Qualité de l'air pour les usagers des transports en commun en site propre : un paramètre pour l'évaluation dans les plans de déplacements urbains ? Enseignements d?une étude de cas à Nantes Qualité de l'air pour les usagers des transports en commun en site propre : un paramètre pour l'évaluation dans les plans de déplacements urbains ? Enseignements d?une étude de cas à Nantes

Odile Heddebaut, Bogdan Muresan, Denis Francois

▶ **To cite this version:**

Odile Heddebaut, Bogdan Muresan, Denis Francois. Qualité de l'air pour les usagers des transports en commun en site propre : un paramètre pour l'évaluation dans les plans de déplacements urbains ? Enseignements d?une étude de cas à Nantes Qualité de l'air pour les usagers des transports en commun en site propre : un paramètre pour l'évaluation dans les plans de déplacements urbains ? Enseignements d?une étude de cas à Nantes. RTS. Recherche, transports, sécurité, 2020, Comment développer une mobilité plus durable: vers une approche systémique, 2020, 20p. 10.25578/RTS_ISSN1951-6614_2020-04 . hal-02482306

HAL Id: hal-02482306

https://hal.science/hal-02482306

Submitted on 27 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Recherche Transports Sécurité

ARTICLE ORIGINAL / *ORIGINAL ARTICLE*

OPEN ACCESS

DOSSIER / *ISSUE*

Comment développer une mobilité plus durable: vers une approche systémique

How to develop a more sustainable mobility: towards a systemic approach

Qualité de l'air pour les usagers des transports en commun en site propre : un paramètre pour l'évaluation dans les plans de déplacements urbains ? Enseignements d'une étude de cas à Nantes

Air quality for right of way public transport users: A parameter for evaluation in urban travel plans? Insights from a case study in Nantes

Odile Heddebaut, Bogdan Muresan, Denis François

© Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR 2020

Résumé La qualité de l'air respiré par les usagers est de plus en plus affirmée dans les politiques publiques de transport dont les transports en commun en site propre (TCSP) constituent souvent des projets phares. Cet article s'attache à mesurer deux composantes importantes de la qualité de l'air urbain : les particules et les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Le terrain d'étude (l'Île-de-Nantes) a été choisi en raison de la présence de divers types de TCSP (chronobus, busway, tramway). Les résultats montrent une qualité d'air différente en fonction des différents types de TCSP, influencée par l'environnement proche des lignes et notamment la circulation automobile. Ces informations pourraient être prises en compte dans la constitution d'un diagnostic état zéro pour réaliser l'évaluation des projets de transport en commun en site propre.

Mots-clés évaluation, qualité de l'air, plan de déplacements urbains, transport en commun en site propre, particules, HAP, état zéro

Abstract The quality of air breathed by users is increasingly affirmed in public transport policies, whose Right-of-Way Public Transports (RWPT) often constitute flagship projects. This article focuses on measuring two main components of urban air quality: particles and polycyclic aromatic hydrocarbons. The study area (Île-de-Nantes) was selected due to the presence of various RWPTs (chronobus, busway, tramway). Results show a different air quality depending on the different types of RWPTs, influenced by the close environment of lines and notably the automobile traffic. This information could be considered for the constitution of a zero state diagnosis to carry out the evaluation of right-of-way public transit projects.

Keywords assessment, air quality, urban mobility plan, right-of-way public transport, particles, PAH, zero state

Odile Heddebaut (✉)
AME-DEST, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,
59650 Villeneuve d'Acsq, France
Courriel : odile.heddebaut@ifsttar.fr

Bogdan Muresan (✉)
AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,
44344 Bouguenais, France
Courriel : bogdan.muresan-paslaru@ifsttar.fr

Denis François (✉)
AME-EASE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR,
44344 Bouguenais, France
Courriel : denis.francois@ifsttar.fr

1. Introduction

L'évolution législative en France depuis les années 1980 structure l'évaluation des politiques publiques tant dans le domaine des transports que de l'urbanisme et introduit l'obligation de réaliser un plan de déplacements urbains (PDU) dans les plus grandes agglomérations et d'en évaluer les effets. Concernant la mise en œuvre des politiques et projets de transport, la nécessité d'améliorer la qualité de l'air respiré par les citoyens y est affirmée. Les transports en commun en site propre (TCSP) évoluent totalement ou partiellement hors du trafic automobile, source importante de pollution de l'air urbain. Ils constituent souvent des projets phares des PDU dans lesquels ils sont envisagés comme des facteurs d'amélioration de la qualité de l'air urbain, en premier pour les riverains et d'une façon générale pour l'ensemble des citadins [Métayer, 2012]. La qualité de l'air respiré par les personnes qui contribuent au succès de cette offre de transport, à savoir leurs utilisateurs, n'est quant à elle pas prise en compte. L'offre de TCSP étant variée du point de vue des solutions techniques et séparée plus ou moins nettement du trafic urbain général, il a

Reçu le 23/03/2018 accepté le 20/09/2018 en ligne 17/03/2020
https://doi.org/10.25578/RTS_ISSN1951-6614_2020-04
Cet article est distribué suivant les termes et les conditions de la licence CC-BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr

donc semblé opportun de mener une étude exploratoire afin de connaître la qualité de l'air respiré par les usagers de différents types de TCSP.

Dans la première partie, consacrée à l'évaluation des projets de transport en commun urbains, nous rappelons comment l'évolution du contexte législatif en matière d'évaluation des politiques publiques a conduit à affiner les méthodes d'évaluation des PDU et de la réalisation des TCSP. Les projets de TCSP sont porteurs d'enjeux multiples et répondent aux référentiels exprimés tant dans les appels à projets de TCSP de l'État que dans les candidatures des autorités organisatrices des transports comme Nantes Métropole.

Dans la seconde partie, nous rapportons dans un premier temps les objectifs et le contenu de la politique de transport de Nantes Métropole, particulièrement concrétisée dans son PDU et le dossier de candidature en réponse à l'appel à projets de l'État, et décrivons les différents TCSP composant l'armature centrale de son réseau de transport. Puis sont exposées les caractéristiques du terrain d'étude situé dans et autour de l'Île-de-Nantes et la méthode de mesure des paramètres caractéristiques de la pollution de l'air (particules et hydrocarbures aromatiques polycycliques) au sein des différents types de TCSP y circulant. Les résultats de cette étude sont présentés et identifiés par modes de transport en commun puis discutés notamment en fonction de leur possible contribution à l'évaluation des TCSP et à la détermination de diagnostic d'état zéro.

2. L'évaluation des politiques publiques et projets de transport urbain

2.1. Les transports en commun en site propre comme réponse aux politiques publiques de transport urbain

Les politiques publiques de transport urbain ont été influencées par un contexte législatif en constante évolution qui depuis 1982 impose la rédaction de Plans de Déplacements Urbains (PDU) et intègre le besoin de développer des transports en commun plus propres, avec une grande qualité de service et dégagés de la circulation automobile c'est-à-dire des transports en commun circulant en sites propres ou TCSP.

La loi d'Orientation des Transports Intérieurs du 30 décembre 1982 (LOTI) définit le « *droit aux transports* » et les « *principes généraux applicables aux transports intérieurs* », ainsi que la notion d' « *efficacité économique et sociale* ». D'après l'article 1er, « *le système des transports intérieurs doit satisfaire les besoins des usagers dans les conditions économiques, sociales et environnementales les plus avantageuses pour la collectivité.[…]* [LOTI, 1982]. *Ces besoins sont satisfaits dans le respect des objectifs de limitation ou de réduction des risques, accidents, nuisances, notamment sonores, émissions de polluants et de gaz à effet de serre*; [LOTI, version consolidée de 1986]. » Se basant sur la LOTI et sur la première génération des PDU, les aides de l'État ont permis de conforter l'émergence des TCSP, notamment celle des tramways desservant les centres des agglomérations françaises. Entre 1994 et 2001, l'État a apporté aux collectivités territoriales 1,256 milliard d'euros pour réaliser 220 kilomètres de TCSP.

La loi sur l'Air et Utilisation Rationnelle de l'Énergie (LAURE) adoptée le 30 décembre 1996, vise à rationaliser l'utilisation de l'énergie et à définir une politique publique intégrant l'air en matière de développement urbain. Elle rend obligatoire la surveillance de la qualité de l'air, la définition de normes en ce qui concerne cette qualité de l'air et l'information au public sur ce sujet. En matière d'aménagement urbain, elle a rendu l'élaboration d'un PDU obligatoire pour tous les périmètres de transport urbain (PTU) inclus dans une agglomération de plus de 100 000 habitants ou recoupant celle-ci. Son premier objectif est ainsi de lutter contre la pollution de l'air. Elle vise à développer l'ensemble des modes alternatifs à la voiture particulière et a pour objectifs, comme précisé dans son 14 qui modifie l'article 28-1 de la LOTI, la diminution du trafic automobile, le partage de la voirie, le développement du covoiturage et des modes doux. Le PDU couvre l'ensemble du territoire compris à l'intérieur du PTU. Il vise alors à assurer un équilibre durable entre les besoins en matière de mobilité et de facilité d'accès, d'une part, et la protection de l'environnement et de la santé, et en particulier de la qualité de l'air respiré, d'autre part. Il a comme objectif un usage coordonné de tous les modes de déplacements, notamment par une affectation appropriée de la voirie, ainsi que la promotion des modes les moins polluants et les moins consommateurs d'énergie. Il précise les mesures d'aménagement et d'exploitation à mettre en œuvre afin de renforcer la cohésion sociale et urbaine ainsi que le calendrier des décisions et réalisations. Il est accompagné d'une étude des modalités de son financement et de la couverture des coûts d'exploitation des mesures qu'il contient [LAURE, 1996, modifie l'article 28 de la LOTI]. La circulaire du 17 février 1998, relative à l'application de l'article 19 de la LAURE, complète le contenu des études d'impact des projets d'aménagement. Elle impose que les études d'impact des infrastructures de transports, évaluation a priori, comprennent *« une analyse des coûts collectifs des pollutions et nuisances et des avantages induits pour la collectivité ainsi qu'une évaluation des consommations énergétiques résultant de l'exploitation du projet, notamment du fait des déplacements qu'elle entraîne ou permet d'éviter »*. La prise en compte environnementale apparaît ainsi dans les évaluations a priori [CERTU, CETE de Lyon, 2011]. Les projets de TCSP sont inscrits et décrits dans ces PDU le plus souvent sous le chapitre de l'amélioration des transports collectifs [LAURE, 1996]. Il est à noter que la loi LAURE est aujourd'hui une partie du Code de l'Environnement Titre II concernant l'air et l'atmosphère et spécialement aux chapitres 1 et 2 [RF, 2019].

La loi Solidarité et Renouvellement Urbain (SRU) adoptée le 13 décembre 2000 a renforcé le rôle des PDU. La SRU modifie et complète les objectifs du PDU et réaffirme le besoin de renforcer la cohérence des politiques urbaines et territoriales et de mettre en œuvre une politique de déplacements au service du développement durable (titre III) [SRU, 2000].

Le désengagement de l'État pour le financement des réseaux de transport en 2004, renvoie les collectivités territoriales devant l'obligation de trouver des moyens diversifiés pour financer leurs projets de transport et a pu contribuer à une plus grande coopération entre les différents niveaux institutionnels. Suite au « Grenelle de l'environnement » en 2007, qui est considéré comme le point de départ d'une prise de conscience positive en matière de développement durable et a induit un grand nombre d'orientations concernant l'habitat, l'aménagement du territoire, et les transports en particulier, la loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1) dite « loi Grenelle 1 » du 3 août 2009, relance les projets de TCSP afin de lutter principalement contre l'augmentation du trafic automobile. En effet, le projet de loi Grenelle 1, fixe une enveloppe de 2,5 milliards d'euros d'ici à 2020 pour le développement des TCSP hors Île de France. L'article 12 mentionne que *«les projets portés par les autorités organisatrices des transports devront également s'insérer dans une stratégie urbaine et intégrer les enjeux environnementaux tant globaux que locaux touchant à l'air, la biodiversité, le cadre de vie et le paysage, et la limitation de l'étalement urbain. Ils comprendront des objectifs de cohésion sociale, de gestion coordonnée de l'espace urbain et de développement économique* [Loi Grenelle 1, 2009]. *»*

En matière de déplacements, les efforts doivent désormais être concentrés majoritairement sur les modes de transports les moins polluants à savoir notamment le rail et les transports en commun urbains. Ces deux types d'orientations sont d'ailleurs liés car le Grenelle de l'environnement précise que le développement urbain devra désormais se faire en cohérence avec la desserte en transports collectifs.

La loi du 12 juillet 2010 portant Engagement National pour l'Environnement (ENE) dite « loi Grenelle 2 », vient renforcer la nécessité de développer les transports alternatifs à la voiture particulière et programme des investissements dans le domaine notamment des transports collectifs urbains [Grenelle 2, 2010]. Elle conforte la décision de subventionner les projets de transport tels des TCSP décrits dans le troisième appel à projets de transport de l'État en 2013. L'ensemble de ces préconisations se retrouve dans le code des transports, créé par l'ordonnance du 28 octobre 2010 [RF, 2010a], et qui remplace la LOTI.

2.2. L'évaluation des projets de transport en commun urbains

2.2.1. Évolution du contexte législatif

Afin de tenter d'évaluer un projet tel qu'un TCSP contenu dans une politique plus vaste comme celle des transports, il est nécessaire de rappeler comment depuis les années 1980 l'évaluation des politiques publiques s'impose aux politiques de transport urbains. L'analyse de leurs contenus, de l'évolution de leur mise en forme et de leur possibilité d'évaluation conduit à déterminer des indicateurs comme celui de la qualité de l'air. En France, la décennie 1980 voit le plein essor du volet de l'évaluation des politiques publiques de la science politique [Nioche, Poinsard, 1984, Thoenig, 1985 ; Vollet, Hadjab, 2008], qui remet en question les méthodes d'aide à la prise de décision qui sont toujours fondées sur des approches coûts-bénéfices, particulièrement dans le domaine des transports [Bloy et *al.*1977]. L'évaluation introduit la notion de valeur « *évaluer une politique, c'est former un jugement sur sa valeur* » [Viveret (1989)]. Les décrets de 1990 [RF, 1990] et de 1998 [RF, 1998] introduisent la notion de transversalité des politiques mises en œuvre qui influencent la réalisation des projets de transport. L'importance est ainsi avérée d'analyser les référentiels de l'action publique ou d'appels à projets de transport.

En matière d'évaluation des projets de transport, l'article 14 de la LOTI impose une évaluation a priori des grandes infrastructures de transports ainsi qu'un bilan a posteriori 3 à 5 ans après la mise en service : « *les grands projets d'infrastructures et les grands choix technologiques sont évalués sur la base de critères homogènes intégrant les impacts des effets externes des transports relatifs notamment à l'environnement, à la sécurité et à la santé et permettant de procéder à des comparaisons à l'intérieur d'un même mode de transport et entre différents modes ou combinaisons de modes (…)* »

La LOTI introduit donc l'obligation d'effectuer une évaluation avant et après la réalisation du projet d'infrastructure de transport. La nécessité d'effectuer des comparaisons pour un même mode de transport ou pour une combinaison de modes renvoie à la nature complémentaire de ces politiques de transport qui sont mises en œuvre à différents échelons institutionnels. Cela pose le problème de l'association et de la coopération de ces différents niveaux de gouvernement à cette évaluation [Heddebaut et al, 2002].

La LAURE oblige à une évaluation du PDU dans un délai de 5 ans après son adoption. Elle introduit donc la notion d'évaluation a posteriori du plan de déplacements urbains qui reprend l'ensemble de la politique des transports et de mobilité pour une agglomération donnée. Les projets de TCSP devraient être également évalués durant cette même période. Cependant, les délais de réalisation de ces TCSP peuvent prendre plus de temps que les cinq années

suivant l'approbation des PDU et ainsi ne pas être pris en compte dans l'évaluation à cinq ans du PDU.

La loi SRU introduit la nécessité de prise en compte de la place de l'automobile dans les agglomérations et notamment l'organisation du stationnement avec la création de parcs relais à proximité des transports en commun. C'est dans ce nouveau contexte que devraient être analysés et évalués les projets de TCSP.

La circulaire du 25 août 2000 [RF, 2000] vise à mettre en cohérence les différentes politiques pouvant interagir entre elles. La circulaire du 9 décembre 2008, définit le référentiel et les principes de l'évaluation de la façon suivante : *« Le rôle de l'évaluation est d'éclairer les décisions publiques en fournissant des éléments d'analyse permettant d'apprécier le bon usage des deniers publics et la soutenabilité des politiques ou projets vis-à-vis de l'environnement, du développement économique et du progrès social. C'est un élément clé dans le processus de choix public et déterminant pour l'intégration du développement durable dans les politiques publiques* [MEEDDM, 2008] *»*.

La notion de développement durable est alors introduite dans le processus d'évaluation des politiques ou projets de transport. Afin de mesurer les effets d'un projet de transport il convient de l'intégrer dans cette logique de développement durable en recensant et associant les effets économiques, environnementaux et sociaux. La qualité de l'air respiré compte parmi les effets environnementaux.

La loi « Grenelle 1 », précise que « *l'État veillera à réduire les pollutions et les nuisances des différents modes de transport.* » La « *politique de réduction des pollutions et nuisances fera, tous les cinq ans, l'objet d'une évaluation et d'un programme d'actions sur la base d'objectifs chiffrés »* (article 10). Cette loi introduit ainsi la nécessité de chiffrer les objectifs décrits dans les politiques de transport afin de pouvoir en faciliter l'évaluation. De plus elle insiste sur l'obligation de mise en cohérence des politiques urbaines et des politiques de transport. L'évaluation est à nouveau décrite dans la loi « Grenelle 2 » de 2010 pour les plans de déplacements urbains cinq ans après leur adoption et entrainant une éventuelle révision, or les projets de TCSP compris dans ces plans ne font pas l'objet de nouvelle méthode d'évaluation particulière.

2.2.2. Évolution des méthodes d'évaluation des TCSP

Plusieurs méthodes sont possibles pour évaluer les TCSP. Si l'évaluation socio-économique des projets routiers en sections interurbaines est précisée [SETRA, 2007], celle de projets de TCSP en milieu urbain est moins bien définie par les textes réglementaires, conduisant à une hétérogénéité de pratiques.

En 1997, 1998 et 2002, le CERTU a élaboré 3 ouvrages, qui constituent des guides méthodologiques pour l'évaluation socio-économique des TCSP. En 1997, il est fait état d'un certain nombre d'indicateurs et de domaines à prendre en compte dont l'air. Il s'agit bien d'indicateurs dépendant directement du projet de transport à mettre en œuvre en considérant les changements qui pourraient être induits par la mise en service d'un projet. La liste des indicateurs « *se situe à la fois dans l'a priori et dans l'a posteriori, c'est-à dire dans le cadre d'un processus itératif et continu d'évaluation.* » [CERTU 1997]. Les indicateurs liés à l'environnement et à l'utilisation rationnelle de l'énergie devraient mesurer les niveaux de bruit et la qualité de l'air, liés à la circulation avant et après la mise en service du TCSP.

Le guide méthodologique 1998 du CERTU pour *« l'évaluation des transports en commun en site propre et les méthodes d'observation des effets sur l'urbanisme et le cadre de vie* » évoque des effets directs immédiats ou différés des TCSP et des effets indirects sur l'urbanisme et l'environnement, sur les changements de comportement vis à vis des habitudes de transport [CERTU, 1998].

En 2002, le CERTU recommande, de rassembler des éléments généraux comme le périmètre d'étude concerné, les référentiels de la politique d'urbanisme de l'agglomération, les pratiques de déplacement pour les habitants des différents secteurs à l'aide des dernières enquêtes ménage déplacements (EMD). Il y est également conseillé de décrire l'état de l'offre du réseau de transports collectifs avant réalisation du TCSP et sa fréquentation. De même, il est demandé de réaliser un descriptif de la circulation, des niveaux de bruit et d'émission de polluants [CERTU, 2002].

En 2003, une note méthodologique pour l'élaboration des bilans LOTI de TCSP [CERTU, DTT, CETE de Lyon, 2003] en évoque la difficulté de mise en œuvre et insiste sur la nécessité et l'importance d'établir un diagnostic préalable à la future évaluation requise dans les cinq ans par cette loi, pour les projets de TCSP dont le seuil est supérieur ou égal à 83 millions d'euros. L'existence de ce seuil est utile afin de concentrer les observations sur les projets majeurs dans l'aménagement de la mobilité urbaine telles les réalisations de tramways ou de métro légers (type VAL). Cependant certains territoires réorganisent les fondements de leur mobilité en souhaitant réaliser des projets de TCSP de type Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) qui n'atteignent pas les montants déclenchant l'évaluation *ex post* obligatoire. Ils échappent ainsi à la démarche d'évaluation obligatoire. Néanmoins ces projets sont programmés soit avec une vision linéaire (une seule ligne de BHNS) soit avec une insertion du projet dans un système plus global de réorganisation de la mobilité urbaine [CERTU, 2009] dont l'ensemble des aménagements cumulés pourraient atteindre des sommes investies importantes voire approcher le seuil légal du bilan LOTI.

Cette note méthodologique recommande qu'« *en pratique la collecte des informations qui vont alimenter le bilan LOTI doit débuter avant même les travaux.* »

[CERTU, Cete Lyon, LET, 2003]. Afin d'aboutir dans cette tâche de compréhension préalable du fonctionnement du territoire où les nouvelles infrastructures de transport en site propre vont s'insérer il est également recommandé « *d'engager un dialogue avec les différents producteurs de données, favorisant ainsi une meilleure prise en compte du TCSP dans les actions des différents partenaires dans le respect des compétences de chacun* [CERTU, DTT, Cete Lyon, 2003] ».

Tous les aspects de la vie urbaine sont concernés par la mise en œuvre des transports publics. C'est donc l'ensemble de la politique des transports qui doit être évalué. Selon l'Union Internationale des Transports Publics (UITP) en 2009, « *tous les domaines économique, social et environnemental sont concernés pour l'évaluation des projets de transport* » [UITP, 2009]. Ceci renvoie à la nécessité d'analyser et de tenir compte des référentiels des politiques publiques de transport portées à différents échelons de planification et à leur interactions avec les autres politiques comme l'urbanisme et le développement économique, l'environnement, etc. Ces référentiels ainsi que les enjeux attribués aux TCSP pourraient ainsi servir de fondement pour leur évaluation.

2.2.3. Les enjeux portés par les projets de TCSP

Il existe plusieurs enjeux essentiels sous-jacents à la volonté d'implanter des TCSP dans les villes. Trois se rapportent à la fonction de transport du TCSP [Gagnière, 2012]. Il existe tout d'abord, un enjeu d'augmentation de la fréquentation des transports publics, comme celle de 4 à 40 % entre 1985 et 2006 qui a été constatée sur 14 agglomérations selon qu'elles aient ou non un TCSP [Beaucire, 2006]. En 2016 une évaluation économétrique montre que la fréquentation a davantage augmenté pour les réseaux avec TCSP que pour les réseaux restés sans [Rouchaud, 2016]. Ensuite, le TCSP représente un outil d'articulation multimodale. Les travaux sur les tramways de l'Est lyonnais montrent le rôle important du Rhône Express effectuant une liaison du centre-ville avec l'aéroport de Lyon-Saint-Exupéry [Varlet, 2012]. La ville de Lyon est donc reliée par cette infrastructure en 20 minutes permettant des relations intermodales entre l'avion et le tramway. Enfin, le TCSP peut avoir un rôle de maillage urbain et articuler l'ensemble des zones urbanisées afin d'éviter qu'un grand nombre d'espaces denses de la ville ne soient pas accessibles par les transports en commun. Le TCSP peut en effet désenclaver les quartiers prioritaires de la ville. Le CERTU, en 2009, indique que « *plusieurs réseaux français intègrent désormais la notion de maillage dans la construction de leur réseau de TCSP, tant pour mieux répondre aux besoins de déplacements que pour anticiper les problèmes de capacité* [CERTU, 2009]. »

La réalisation des TCSP présente aussi des enjeux plus larges de mise en valeur de la ville. Tout d'abord, la fonction d'outil urbain replace « *le tramway au cœur des enjeux de gouvernance entre mobilité et territoires* » [Wolff, 2012]. Sans vouloir léguer au tramway la mission systématique de requalification urbaine, un « *rôle d'ordonnateur urbanistique lui a permis de revenir dans les politiques de transports collectifs de plusieurs villes qui auraient continué à l'ignorer* » [Wolff, 2012]. Le TCSP est évoqué comme un outil privilégié de la requalification d'un site ou d'une « *urbanité à reconstruire ou à construire* [Redondo, 2012 ; Zembri, 2012]. Par ailleurs, le TCSP devient parallèlement un outil de marketing urbain en améliorant de fait l'espace urbanisé. La question de l'usage des TCSP comme vecteurs de restructuration urbaine est parfois exacerbée et l'aspect urbanistique et esthétique l'emporte parfois sur l'aspect transport [Bidou-Zachariasen, 2003]. Enfin, le projet de TCSP peut également devenir un outil de développement des activités commerciales. Des études immobilières empiriques ont montré une corrélation positive entre l'accessibilité au centre-ville améliorée par les TCSP et la valeur des terrains à bâtir [Granelle, 1998]. Certaines activités économiques peuvent se polariser dans le corridor du tramway comme les professions libérales de santé ou juridiques ou encore engendrer une différenciation des commerces le long de la ligne de TCSP [Stambouli, 2005].

Mais un enjeu majeur de la réalisation d'un TCSP est la possibilité de réduire les consommations énergétiques et d'améliorer la qualité de l'environnement urbain par la réduction des nuisances que sont le bruit, les accidents et la pollution de l'air due au trafic automobile.

Suite au Grenelle de l'Environnement, l'État a relancé les projets de réalisation de TCSP par des appels à projets dont les référentiels et objectifs ont évolué de 2008 à 2013 [MEEDDM, 2008, 2010, 2013]. En effet, le référentiel du premier appel à projet expose la nécessité de lutter en priorité contre la congestion des centres urbains en y limitant l'usage des voitures, celui de mai 2010 reprend cette exigence en y ajoutant l'ambition d'améliorer la qualité des dessertes de transports collectifs. Le référentiel du dernier appel à projet se situe dans le contexte de la lutte contre le réchauffement climatique et les besoins d'un nouveau modèle de croissance qui repose sur l'environnement, l'accessibilité et le cadre de vie. Il veut favoriser une meilleure cohérence entre le système de transport et le développement urbain.

3. La qualité de l'air respiré par les usagers des TCSP sur l'Île-de-Nantes

Dès la seconde moitié des années 1970, l'État accorde des aides dans un premier temps aux grandes agglomérations millionnaires pour la réalisation de projets de TCSP concernant essentiellement la réalisation de métros. Dans les années 1980, cette aide est étendue aux villes moyennes et les projets concernent des tramways. Des villes comme Nantes, Grenoble,

Strasbourg s'équipent de tramways modernes. Ces projets jouent également un rôle dans la requalification des quartiers traversés.

Depuis l'origine et jusqu'en 2003, 1,836 milliard d'euros d'aides de l'État ont permis de financer en partie ces investissements, ce qui correspond à un taux moyen d'intervention de l'État d'environ 20% avant son désengagement en 2004. Les propositions contenues dans les candidatures de Nantes en réponse à la relance des appels à projet de TCSP, particulièrement celle de 2010, tiennent compte des enjeux portés dans les documents de planification tels que le PDU [Nantes Métropole, rapport environnemental 2010, PDU 2011] et le plan régional de la qualité de l'air (PRQA) [Région Pays de la Loire PRQA, 2002].

3.1. Le PDU et les projets de transport nantais

En 2010, Nantes est la sixième commune la plus peuplée de France avec ses 284 970 habitants. La communauté urbaine de Nantes, appelée « Nantes Métropole » regroupe 24 communes qui comptent près de 600 000 habitants. C'est une ville dont le bâti forme une étoile que le réseau de transport en commun suit précisément et l'Île-de-Nantes, correspondant au terrain étudié, représente son centre géographique. Le « schéma des TCSP » de Nantes Métropole est organisé autour d'une étoile ferroviaire à six branches déjà bien développée qui représente l'ossature des TCSP pour les déplacements de la périphérie vers l'agglomération. L'enjeu pour les acteurs de la planification des transports est d'une part, de faire une place importante aux communes dans le contexte de la communauté urbaine par une desserte urbaine de transports en communs et d'autre part de relier les périphéries au cœur de la communauté urbaine et entre elles. Les élus de la métropole nantaise ont opté pour un meilleur maillage du territoire, première priorité des documents de planification comme le PRQA ou le PDU où les préoccupations liées aux nuisances induites par la circulation automobile sont affirmées (tableau 1). En effet, dès 2002, le PRQA des Pays de la Loire, qui est un document de planification pour l'ensemble du territoire régional, cherchait à améliorer la qualité de l'air. Y est décrit le rôle important que les transports tiennent dans les émissions polluantes : « *au niveau régional, le secteur des transports, premier consommateur d'énergie fossile, est à l'origine de 55 % des émissions de monoxyde de carbone, de 46 % de celles d'oxyde d'azote, de 11 % des particules en suspension (PM10) et de 30 % des émissions de dioxyde de carbone (chiffres 1999).* »

Ce constat conduit les élus nantais à développer le réseau de transports en commun en site propre afin de diminuer ces émissions polluantes qui nuisent à la qualité de l'air et à la santé, par une politique de transport traduite dans les PDU. Le réseau de transport en commun nantais comporte plusieurs types de TCSP.

Tableau 1. Référentiels contenus dans deux documents de planification en Région Pays de la Loire

	PDU de Nantes Métropole	PRQA
Objectifs	- Réseau de transport urbain durable. - Développer un transport interurbain entre les grands pôles. - Améliorer les conditions de déplacements.	- Diminuer l'exposition à la pollution. - Réduire les émissions dues au trafic routier.
Orientations	- Développer des pôles de vie et des courtes distances. - Développer des déplacements de proximité. - Traiter l'espace public pour favoriser les déplacements à pied et à vélo. - Mailler le territoire.	- Articulation du développement urbain et des réseaux de transports collectifs. - Agir sur les déplacements urbains et péri-urbains. - Agir sur les déplacements interurbains.

Le tramway, qui a été mis en place à Nantes de 1985 à 2002 a plusieurs enjeux : d'abord la desserte des endroits stratégiques de la ville (cf. partie 2.2.3). Ensuite, les enjeux de reconquête de l'espace public prennent une importance particulière singulièrement sur l'Île-de-Nantes. Enfin, l'enjeu d'outil urbain, décrit plus haut, est affirmé avec la volonté de réaliser de nouvelles urbanisations dans et autour des pôles urbains déjà existants et de préférence à proximité (dans un rayon de 700 mètres) des stations de transport en commun sur les axes structurants, comme dans d'autres grandes agglomérations [LMCU, 2009a, 2009b, AUAT, 2007].

Le busway (correspondant à la ligne 4) est un bus à haut niveau de service (BHNS) [CERTU 2009, Finn et *al*., 2011] offrant les mêmes qualités de service qu'un tramway (fréquence, régularité, ponctualité, visibilité) car circulant sur un site propre dégagé de la circulation automobile mais dont le coût infrastructurel est moins élevé puisqu'il ne nécessite pas de dévier les réseaux souterrains (cas du tramway). Il relie le centre nantais depuis la cathédrale au périphérique. Sa réalisation a été effectuée en lui dédiant les deux voies centrales sur l'ancienne route à deux fois deux voies pénétrant au cœur de Nantes.

Les chronobus représentent un nouveau concept de bus « plus performant », entre le bus et le BHNS en site propre, ou système de bus en site propre lorsque cela est possible dans l'insertion urbaine [Rabuel, 2012, 2015]. Les lignes de chronobus sont préférées car moins coûteuses et moins lourdes à implanter que les sites

propres de tramways. De plus, en raison de largeurs de voiries insuffisantes, il est impossible d'implanter un site propre intégral comme pour le busway. Le chronobus de Nantes utilise parfois la voie de l'automobile. Un site propre partiel est réalisé quand cela est possible pour ces lignes de chronobus dont les sept premières lignes ont été réalisées suite à la candidature de Nantes Métropole [Nantes Métropole, 2010] à l'appel à projets de l'État de 2010. La partie centrale de Nantes propose ainsi un maillage des transports urbains avec le croisement des 3 lignes de tramway de celles du Busway et des sept premières lignes de chronobus.

Le PDU nommé « Horizon 2010-2015 perspectives 2030 » stipule que « *l'enjeu principal pour Nantes Métropole est d'une part, de concentrer l'essentiel de la croissance urbaine dans les zones desservies par les transports collectifs structurants (tramway, busway, chronobus, gares) et, d'autre part, d'organiser les nouveaux développements urbains autour des pôles de vie existants (centres villes, centres bourgs, grands quartiers, secteurs des gares et pôles d'échanges de transports collectifs). Cet enjeu est étroitement lié aux autres politiques de Nantes Métropole* [Nantes Métropole, 2011]. » Le PDU vise ainsi à privilégier les courtes distances grâce à un renforcement des pôles urbains existants tout en veillant à un équilibre entre habitat, services, emplois, commerces et équipements. Ces déplacements de proximité sont facilités par un aménagement de l'espace public à l'échelle du piéton et du vélo. Enfin les changements de comportements de mobilité seront encouragés ainsi que les nouvelles pratiques de mobilité. Un objectif chiffré du PDU est de faire passer la part de la voiture de 49% en 2008 à 33% à l'horizon 2030. Le PDU a fait l'objet d'une concertation entre les citoyens, la société civile et les institutions.

3.2. Objectif de l'étude de terrain

3.2.1. La pollution urbaine liée aux transports

Les particules et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont deux paramètres clés de caractérisation de la pollution atmosphérique urbaine [Gros et *al.*, 2007; Silva & Mendes, 2012]. En milieu urbain une part importante des particules a pour origine le transport routier et notamment les émissions hors échappement et celles des moteurs diesel [Barbusse & Plassat, 2005 ; Grigoratos & Martini, 2014]. Ces particules sont constituées de grosses molécules carbonées sur lesquelles divers composés métalliques, minéraux et organiques peuvent s'adsorber, dont les HAP. Les particules sont susceptibles de s'agglomérer entre elles pour constituer des assemblages de plusieurs dizaines de microns de diamètre. Même à relativement faible concentration (de l'ordre de 50 µg/m^3) les effets respiratoires des particules peuvent être observés à court terme. À long terme, l'exposition aux particules présente des risques mutagènes et carcinogènes. De plus, les HAP qui les composent, issus de la combustion des composés fossiles, sont connus pour leurs effets carcinogènes, mutagènes et tératogènes [Azevedo et *al.*, 2013].

Par rapport aux autres transports en commun, les TCSP présentent une plus grande fluidité, améliorant la qualité de service aux usagers (vitesse moyenne, ponctualité) et permettant de réduire la consommation des véhicules (régularité des régimes moteurs). De plus les TCSP peuvent être dotés de moteurs moins émissifs (ex. alimentés à l'électricité ou au gaz naturel), permettant de réduire les concentrations locales en NOx et particules [Gonçalves et *al.*, 2009], polluants inhérents aux combustibles fossiles.

L'objectif de l'étude de terrain était donc de caractériser la qualité de l'air respiré par les usagers de différents types de TSCP, dans différentes situations de leur déplacement [Masiol et *al.*, 2014 ; Moreno et *al.*, 2015]. L'étude inclue aussi la comparaison avec un moyen de transport en commun dit classique (i.e. bus circulant au sein du trafic automobile).

3.2.2. Caractéristiques du site d'étude et protocole de collecte de données

L'Île-de-Nantes s'étend sur 4,9 km d'est en ouest et 1 km au maximum de sa largeur. Elle constitue un lieu de passage important entre le centre-ville et le sud de l'agglomération. En son centre, le tramway (ligne n°2-3) la traverse du nord au sud. Parallèlement, à 600 m à l'est passe le busway (ligne n°4). La ligne de chronobus (n°5) s'étend de l'extrémité ouest de l'île jusqu'à sa partie est. Elle croise donc les deux lignes précédentes, avant de rejoindre la gare de Nantes. Les stations situées aux croisements des lignes ont permis d'évaluer la qualité de l'air à deux moments distincts de chaque campagne ; mais aussi en partie les changements dus aux variations spatiales qui s'expriment à l'échelle métrique (i.e. décalage de quelques mètres entre les arrêts des lignes qui se croisent). La ligne de bus classique (n°26) emprunte sur l'île un tracé est-ouest en rive sud. Elle croise les lignes de busway et tramway, avant de remonter vers le centre-ville (intersection avec le chronobus). L'Île-de-Nantes fait l'objet depuis le début des années 1990 d'un programme de rénovation urbaine [Chasseriau, 2004] et connaît une importante refonte urbaine avec la réalisation d'une desserte spécifique avec la ligne de Chronobus devant relier à terme de nouveaux développements urbains comme le futur centre hospitalier universitaire, le lycée, de nouveaux logements et bureaux.

L'aire d'étude, commune à l'ensemble des moyens de transport, est centrée sur l'Île-de-Nantes. Cette proximité de différentes modalités de transports assure l'homogénéité des conditions environnementales lors des mesures [Choi et *al.*, 2013 ; Font et *al.*, 2014]. De plus, à proximité de la station 2 et des lignes de chronobus et de bus classique (cf. Figure 1), donc au centre de l'aire d'étude, se trouve une installation fixe de suivi de qualité de l'air de l'association Air Pays de la Loire en service

depuis 1990. Ses données servent de référence pour l'évaluation de la pollution ambiante et ont été utilisées pour vérifier la cohérence des mesures dans les stations et les rues de l'île.

La ligne de tramway bénéficie d'un espace inaccessible aux autres véhicules tandis que le busway emprunte une voie réservée sur la chaussée. Le chronobus utilise quant à lui pour partie des tronçons dédiés et pour partie des sections partagées avec le trafic automobile. Chronobus, busway et bus classiques fonctionnent aux gaz naturel et le tramway à l'électricité.

Quatre campagnes de mesure d'une durée d'environ 5 heures chacune ont été réalisées (5 et 13 juin ; et 10 et 11 juillet 2014), en première moitié de journée (c'est à dire couvrant la période 6 heures – 14 heures), correspondant à la phase journalière d'augmentation du trafic automobile. Les conditions météorologiques étaient généralement nuageuses à couvertes avec quelques éclaircies passagères.

La méthode de collecte des données a consisté à se mettre dans la situation d'un usager empruntant les différentes lignes de la zone d'étude, avec un dispositif portable de mesure de la qualité de l'air. Les mesures ont été opérées en continu, dans les véhicules en mouvement, de même qu'en extérieur dans des stations d'arrêt où les usagers attendent leur correspondance. Au total, plus de 20 heures d'enregistrement continu ont été réalisées concernant plus 50 segments.

La figure 1 présente la zone d'étude, les tracés des lignes étudiées et les stations d'arrêt. Les stations 2 et 3 sont à l'intersection de deux lignes de TCSP. Les autres jonctions entre lignes (au nombre de trois) ont été effectuées à pied (4 à 5 ; 8 à 9 et 0 à 1), permettant de caractériser la qualité de l'air ambiant à distance des lignes de transport en commun.

Les stations sont constituées d'un à plusieurs (ex. station 3) abribus selon l'importance des arrêts. Ces abris donnent directement sur les voies, sont largement ouverts à l'avant et équipés sur au moins un côté et à l'arrière de vitres de séparation avec la circulation piétonne et éventuellement le trafic. Les mesures sont généralement effectuées sous l'abribus et, lorsque la configuration et la situation le permettent, à proximité immédiate. La séquence et la codification des phases de mesure sont indiquées dans le tableau 2. Les stations et segments au trafic le plus élevé [Auran, 2014], notamment entre les points 5 à 10 et 2 à 9, correspondent aux axes où la pollution par NO_2, indicatrice des émissions des véhicules, est aussi relativement élevée dans le centre de l'agglomération [Air Pays de la Loire, 2011, 2018].

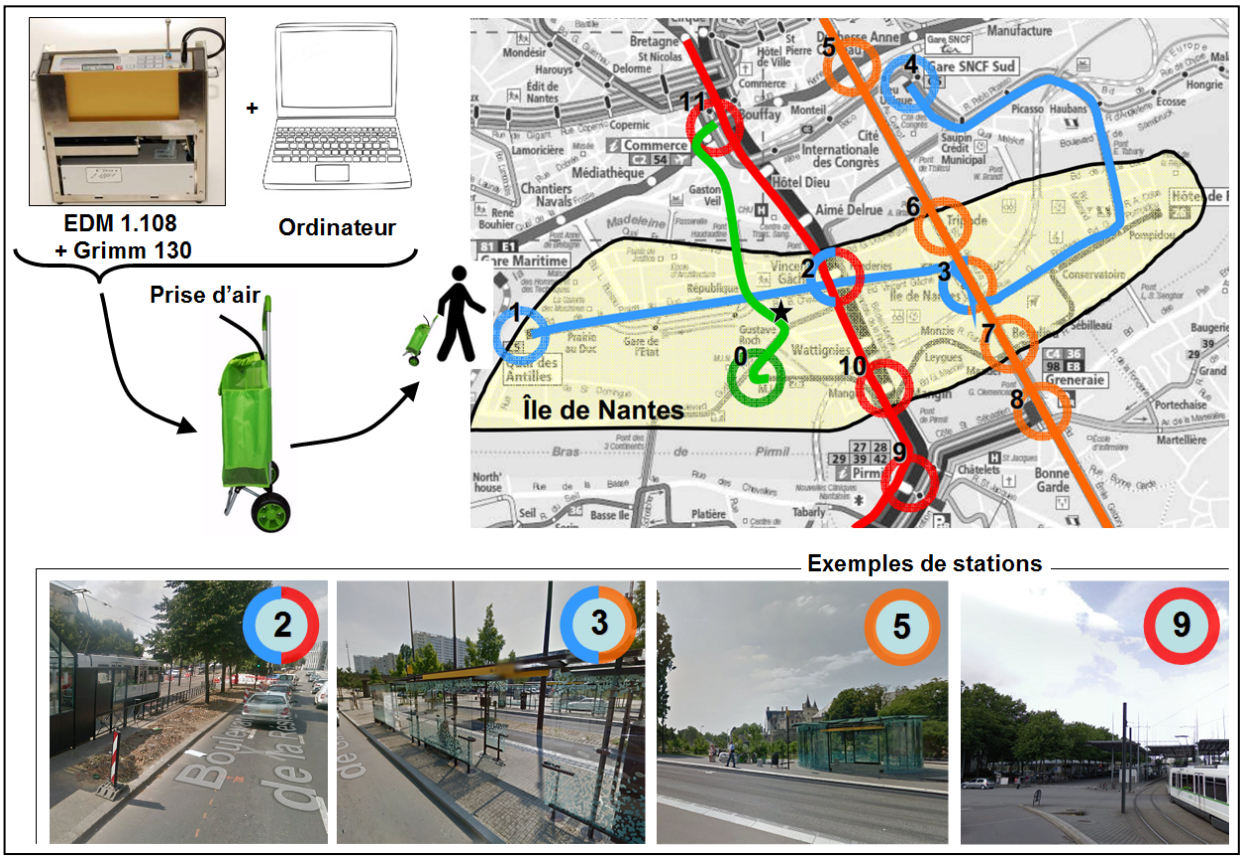
3.2.3. Mesure de la qualité de l'air

Les mesures ont été réalisées avec un compteur de particules Grimm EDM 1.108 (une mesure toutes les 6 secondes), monté en série avec un détecteur de HAP (Grimm 130, une mesure toutes les minutes) (Figure 1). Les données sont enregistrées sur un ordinateur portable. L'analyseur de particules peut compter jusqu'à 2.10^6 particules/L d'air, ce qui correspond (correspondance établie après pesée d'un filtre téflon intégré) à une gamme de concentration massique allant de 0,1 ng/L (1 particule) à 100 µg/L.

L'analyseur fournit une distribution granulométrique en nombre des particules aspirées sur 15 classes de tailles. La taille des particules détectables va de 0,35 à 23 microns. L'exactitude moyenne des mesures granulométriques est de 85%, avec une variabilité inférieure à 5%. Les mesures granulométriques en nombre servent de base pour le calcul des concentrations massiques. Ce calcul implique l'utilisation d'un facteur gravimétrique spécifique qui rend compte de la densité, de la forme et de l'indice de réfraction des particules. Ce facteur est déterminé pour chaque campagne par pesée, en comparant la masse de particules collectées sur le filtre intégré, au poids calculé par comptage optique. Une fois le facteur déterminé, les concentrations massiques obtenues à l'extérieur des véhicules par le compteur EDM 1.108 sont comparées aux valeurs fournies par l'installation fixe de suivi de la qualité de l'air se trouvant à proximité. Les mesures mobiles de particules ayant un diamètre médian de 2,5 µm ($PM_{2,5}$) et 10 µm (PM_{10}) représentent 70% ± 20% et 110% ± 40% des concentrations massiques mesurées par l'installation fixe de suivi de la qualité de l'air.

Aux calculs des $PM_{2,5}$ et PM_{10}, suivant la norme EN481 (CEN, 1993) viennent s'ajouter ceux des fractions particulaires PM_{Alv}, PM_{Tho} et PM_{Inh} respectivement pour les fractions alvéolaire (diamètre médian, i.e. D_{50} = 4 µm), thoracique (D_{50} = 12 µm) et inhalable (D_{50} = 100 µm). La norme préconise d'attribuer pour toutes particule, en fonction de sa taille, une contribution à chaque fraction particulaire. En ce qui concerne l'estimation des PM_{Inh}, l'analyseur associe les concentrations accessibles (i.e. jusqu'à 23 µm) à une loi de contribution de type exponentielle inverse. Cette estimation est possible grâce au très faible nombre de particules supérieures à 20 µm dans l'air capté (typiquement moins de 15 particules/L pour un intervalle proche de 10 minutes entre deux détections). Dans ces conditions, la part volumique des particules supérieures à 20 µm représenterait moins de 10% (vraisemblablement ~5%) de la contribution de l'ensemble des particules accessibles.

Figure 1. Instrumentation utilisée (panneau de gauche) et localisation des lignes / stations (panneau de droite : chronobus en bleu ; busway en orange ; tramway en rouge; bus classique en vert). L'installation fixe de suivi de la qualité de l'air est figurée par l'étoile noire. Réalisé d'après le plan du réseau TAN. Le panneau du bas présente les vues des stations 2, 3, 5 et 9



Dans le cadre de cette étude de cas, les écarts de niveau de pollution entre modes de transport sont évalués au moyen des polluants accessibles par notre analyseur : via les niveaux de particules fines et micrométriques pondérés en nombre, mais aussi via ceux pondérés en masse ou les concentrations de HAP particulaire (notées HAPp). Après étalonnage au moyen des teneurs en HAP mesurées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) sur filtres GF/F, la gamme du détecteur de HAPp s'étend de 0,001 ng à 5 ng de HAP/litre. L'incertitude sur les mesures de HAPp est inférieure à 10%. Il s'ensuit que les niveaux de particules pondérés en nombre ne sont qu'une pièce de l'ensemble des éléments explicatifs disponibles. De fait, l'indentification d'une contamination locale de l'air par les polluants d'origine routière a d'abord été faite de manière qualitative (i.e. via l'observation de l'état du trafic à proximité ainsi que des odeurs d'échappement). Elle a ensuite été confirmée ou infirmée par les mesures de HAPp et de particules. Dans ce dernier cas de figure, nous avons préalablement évalué la capacité de l'analyseur EDM 1.108 à détecter les particules issues de l'échappement en champ proche de ce dernier (i.e. à 1,5 m de distance et au-delà). Ces évaluations montrent que l'analyseur est capable de quantifier la fraction la plus grossière des particules émises par les échappements ainsi que les particules provenant du contact entre le pneu et la chaussée (entre 0,1 et 1 µm de diamètre).

Par ailleurs, si la fraction accessible à l'analyseur Grimm EDM 1.108 ne représente qu'un pourcentage minime (<5%) du nombre de particules présentes en sortie d'échappement, elle rend compte de particules potentiellement plus évoluées (i.e. après refroidissement/condensation des gaz et agrégation entre classes particulaires ultrafines) et que les populations respirent à proximité du trafic. Ces particules sont susceptibles de transporter individuellement une plus grande quantité de polluants tels que les suies condensées, les HAP ou des métaux. Ceci s'accorde avec le fait que l'air des stations situées à proximité des rues les plus circulées, comme celui des bus ou des tramways qui s'y arrêtent durablement, présentent classiquement de plus forts niveaux de particules pondérées en nombre, des ratios particules fines / grossières plus prononcés ou des plus fortes concentrations de HAPp (cf. Section 3.3). De ce point de vue, les concentrations de particules et les tailles particulaires mesurées en sortie d'échappement (généralement dans la plage de 0,08 à 0,12 µm) ne sont pas systématiquement les plus pertinentes pour juger des niveaux de pollution ambiante ou pour estimer l'exposition des personnes.

La chaîne de mesure (Grimm EDM 1.108 + Grimm 130 + ordinateur) d'un poids total de 15 kg est installée dans un chariot de courses permettant de se déplacer aisément dans les véhicules et dans l'espace public (Figure 1). La prise d'air (flexible antistatique) est située à environ 1 mètre au-dessus du sol. Cette hauteur correspond à un compromis intégrant les particules issues des sources proches des systèmes de transport (émissions des véhicules, remise en suspension par les turbulences créées par le trafic, abrasion des revêtements et des pneumatiques, etc.) et les particules de l'air urbain ambiant. Cette hauteur correspond en outre à celle du nez d'enfants d'environ 6 ans et des personnes assises dans les transports en commun ou en station.

Tableau 2. Codage des lignes (chronobus CRB ; busway BSW ; tramway TMW ; bus classique BCL), stations et segments de la zone d'étude et caractérisation de l'occupation du sol, du tissu urbain et du trafic automobile (valeurs 2012 pour ce dernier d'après [Auran, 2014])

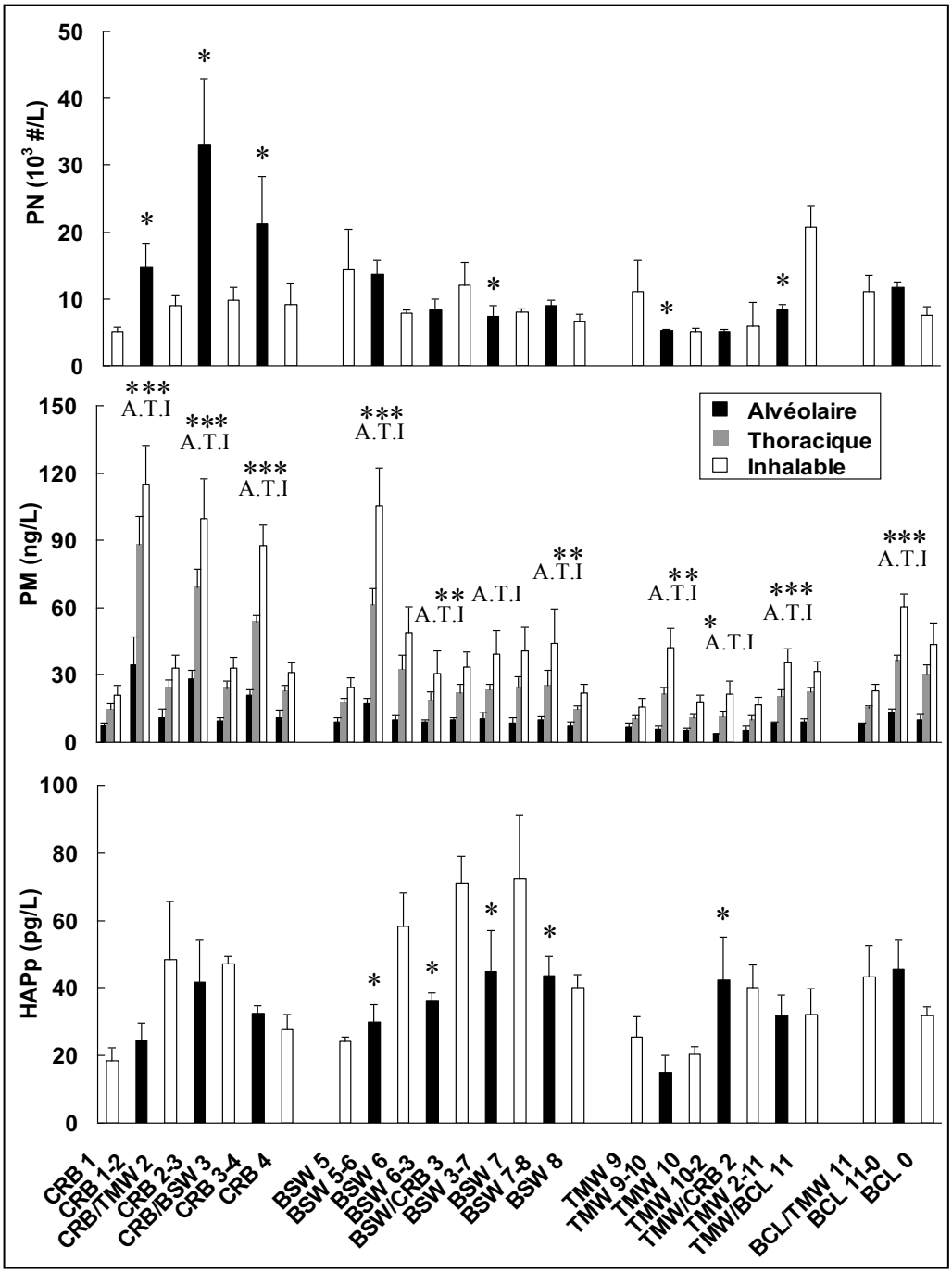
Moyen de transport	Stations et segments	Occupation du sol	Densité du tissu urbain	Trafic de la voirie la plus proche (véh./j)
CRB	Station 1	Récréative	Faible	11 900
CRB	Segment 1-2	Récréative/Résidentielle	Faible	6 200-13 100
CRB/TMW	Station 2	Résidentielle	Moyenne	16 400
CRB	Segment 2-3	Résidentielle	Faible	10 200
CRB/BSW	Station 3	Résidentielle	Moyenne	23 100
CRB	Segment 3-4	Résidentielle	Moyenne	6 900-20 600
CRB	Station 4	Résidentielle/Commerciale	Moyenne	10 800
BSW	Station 5	Résidentielle/Commerciale	Moyenne	21 100
BSW	Segment 5-6	Résidentielle/Commerciale	Dense	20 400
BSW	Station 6	Résidentielle	Moyenne	19 700
BSW	Segment 6-3	Résidentielle	Moyenne	21 400
BSW/CRB	Station 3	Résidentielle	Moyenne	23 100
BSW	Segment 3-7	Résidentielle/Commerciale	Moyenne	23 400
BSW	Station 7	Résidentielle/Commerciale	Moyenne	23 700
BSW	Segment 7-8	Transport	Ouvert	25 100
BSW	Station 8	Résidentielle	Ouvert	22 400
TMW	Station 9	Résidentielle/Commerciale	Ouvert	21 600
TMW	Segment 9-10	Transport	Ouvert	34 600
TMW	Station 10	Résidentielle/Commerciale	Moyenne	14 600
TMW	Segment 10-2	Résidentielle	Moyenne	14 300
TMW/CRB	Station 2	Résidentielle	Moyenne	16 400
TMW	Segment 2-11	Résidentielle/Commerciale	Dense	16 700
TMW/BCL	Station 11	Résidentielle/Commerciale	Dense	23 300
BCL	Segment 11-0	Résidentielle/Commerciale	Dense	12 800-21 500
BCL	Station 0	Industrielle	Faible	21 300

3.3. Résultats et discussion

3.3.1. Qualité de l'air dans les transports en commun et en stations

Les concentrations moyennes en nombre et en masse de particules sont notées respectivement PN et PM ci après. Sont distinguées par ailleurs les fractions PM_{Alv}, PM_{Tho} et PM_{Inh}.

Figure 2. Concentrations moyennes (+ erreur-type) de particules et de HAPp mesurées dans les stations et les véhicules (segments) des lignes de chronobus (CRB), busway (BSW), tramway (TMW) et bus classique (BCL). Un astérisque marque les segments où les concentrations en un polluant donné diffèrent significativement de celles des stations qui le délimitent (avec un seuil de significativité de 5%). Une séparation en fractions particulaires est faite pour la concentration massique : A : alvéolaire, T : thoracique, I : inhalable. Les codes couleur pour PM_{Alv}, PM_{Tho} et PM_{Inh} sont précisés dans le panneau central.



Ligne de chronobus

Sur la ligne du chronobus (Figure 2), PN et PM augmentent rapidement puis se stabilisent à des niveaux moyens : (9,3±0,4) 10^3 particules/L (PN) et 10,6±0,8 (PM_{Alv}), 23,9±0,8 (PM_{Tho}) et 32±1 (PM_{Inh}) ng/L. Les stations 2 et 3 montrent des concentrations en HAPp significativement plus élevées (50±20 et 47±2 pg/L, respectivement). Elles sont toutes deux situées dans des zones de trafic automobile plus dense que les stations 1 et 4 (Tableau 2). La qualité de l'air à l'intérieur du véhicule surpasse d'un facteur 3 (respectivement 2,8 pour PN et 3,4 pour PM) les mesures en stations et traduit une dégradation significative (i.e. $p < 0,05$, Tableau 3) sans lien avec la qualité de l'air extérieur. La plus importante dégradation entre air extérieur et air intérieur

est observée sur le segment 1-2, où les concentrations moyennes PM_{Alv}, PM_{Tho} et PM_{Inh} atteignent 35±10, 90±10 et 120±20 ng/L, respectivement. Au cours du trajet vers la station 4, les concentrations en PM décroissent progressivement. La station 2 montre une augmentation significative de PN. L'ensemble des mesures indique l'existence d'une source de particules grossières interne au véhicule, qui représentent 15 à 20% de PN et qui sont émises avant que le chronobus ne quitte sa première station. Elles indiquent aussi, au voisinage de la station 2 et dans une moindre mesure à la station 3, l'influence dans le véhicule d'une source externe de HAPp associée aux plus fines particules. L'hypothèse (non vérifiable avec notre matériel) peut être émise d'une agglomération de ces HAPp avec les particules grossières générées au début du trajet.

Tableau 3. Segments [x-y], tronçons de lignes [x→y] ou lignes entières étudiées (🚌) présentant des différences significatives de niveaux de pollution par rapport à un segment donné (colonne de gauche). Les couleurs bleue, jaune, rouge et verte se rapportent respectivement au chronobus (CRB), busway (BSW), tramway (TMW) et bus classique (BCL). La significativité des écarts est déterminée par analyse de la variance (ANOVA) suivie du test paramétrique de Holm-Šídák (α = 0,05). Lorsque ce test ne s'applique pas (e.g. comme pour les HAPp dont les valeurs ne suivent pas une distribution normale), l'analyse de la variance est menée au moyen du test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Polluants		PN	PM_{Alv}	PM_{Tho}	PM_{Inh}	HAPp
Moyen de transport [segment]		Segments, tronçons ou lignes entières étudiées présentant des différences significatives avec les segments de la colonne de gauche pour chacun des polluants				
CRB	[1-2]	[2-3] [6→8] 🚌🚌	[3-4] [6→8] 🚌🚌	🚌🚌🚌🚌	[3-4] 🚌🚌🚌	[2→4] [6→8] [10-2] 🚌
	[2-3]	[1-2/3-4] 🚌🚌🚌	[6-8] 🚌🚌	🚌 [6-8] 🚌🚌	[3-4] 🚌🚌🚌	[1-2/3-4] [9-10]
	[3-4]	[2-3] 🚌🚌	[1-2] 🚌🚌🚌	🚌🚌🚌🚌	[1→3] [6→8] 🚌🚌	[1→3] [3→8] [9→2] 🚌
BSW	[5-6]	[2-3] [6→8] 🚌🚌	[3-4] [6→8] 🚌🚌	[1-2/3-4] [6→8] 🚌🚌	[1→3] [6→8] 🚌🚌	[3→8] [9-10] 🚌
	[6-3]	🚌 [5-6] [9→2] 🚌	🚌 [5-6] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6] [9→2] 🚌	[1-2] [9-10]
	[3-7]	[1→3] [5-6/7-8] [9→2] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6] 🚌	[1-2/3-4] [5-6] [9-10]
	[7-8]	🚌 [5-6/3-7] [9→2] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6] [9→2] 🚌	[1-2/3-4] [5-6] [9-10/2-11]
TMW	[9-10]	🚌🚌 [2-11] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌🚌 [2→11] 🚌	[2→4] 🚌 [10→11] 🚌
	[10-2]	🚌🚌 [2-11] 🚌	🚌 [5-6/3→8] [9-10/2-11] 🚌	🚌🚌 [9-10/2-11] 🚌	🚌🚌 [9-10/2-11] 🚌	[1-2/3-4] [9-10]
	[2-11]	🚌 [5-6] [9→2] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6] [10-2] 🚌	🚌 [5-6/3→7] [9→2] 🚌	[7-8] [9-10] 🚌
BCL	[11-0]	🚌🚌🚌	🚌🚌🚌	🚌🚌🚌	🚌 [5→3/7-8] 🚌	[1-2/3-4] [5-6] [9-10/2-11]

Les résultats présentés dans le tableau 3 montrent que les valeurs mesurées sur un segment donné sont souvent significativement différentes (au sens statistique) de celles d'autres segments de la même ligne et d'autres lignes de transport en commun. Par exemple, les concentrations en PM_{Tho} enregistrées sur le segment [5-6] (busway), sont significativement différentes des celles mesurées sur les segments [1-2] et [3-4] du chronobus, sur le tronçon 6 à 8 du busway, et sur l'ensemble de la ligne de tramway (symbole rouge) et de bus classique (symbole vert).

Ligne de busway

Les niveaux de PN et PM moyens dans la plupart des stations du busway sont comparables à ceux des stations du chronobus : les différences moyennes ne sont que de 3 à 19% uniquement. Les plus fortes concentrations en PN sont observées aux stations 5 et 3. La station 3 peut être utilisée pour rendre compte de la variabilité temporelle des concentrations entre l'heure du passage en chronobus et le passage en busway (entre 30 et 50 minutes d'intervalle). Cette variabilité s'avère limitée

pour les concentrations de particules mais davantage prononcée pour celles des HAPp (Figure 2). La station 5 est en partie sous l'influence des émissions de PN liées aux activités au voisinage de la station 4. La station 3 se situe au centre d'un couloir de circulation entouré d'immeubles d'habitation pouvant atteindre 10 étages au maximum. Le trafic automobile y varie de 19 700 à 25 100 véh./jour. L'axe emprunté par le busway dans la zone d'étude (tronçon 5 à 8), constitue une voie d'accès importante au centre-ville, source de pollution ancienne par les gaz d'échappement [Air Pays de la Loire, 2011]. Ce contexte contribue aux niveaux élevés de HAPp observés dans les stations ainsi que dans les véhicules de transport en commun qui y circulent (Figure 2). D'ailleurs, entre les stations 5 et 7 une augmentation extrêmement significative (i.e. un triplement ; i.e. $p < 0,01$) des concentrations en HAPp dans les stations et une augmentation de 50% dans le busway lui-même sont constatés. De même, la concentration en PM (en particulier la fraction grossière : PM_{Inh} et PM_{Tho}) dans le busway sur le segment 5-6 est particulièrement forte (Tableau 3). La station n'est que la deuxième de la ligne de busway après son départ. La proportion de particules grossières (10-15%) dans les PN et la décroissance significative de la charge polluante lorsque le busway atteint la station 6, indiquent une contamination initiale de l'air intérieur du véhicule : une conclusion analogue à celle obtenue pour le chronobus. La dégradation de l'air intérieur en début de course pourrait résulter d'une pratique assez courante, celle d'un bus qui, à son terminus, attend de partir avec les portes ouvertes et le moteur qui tourne au ralenti. Il ne s'agit cependant que d'une hypothèse parmi d'autres : particules émises par le système de chauffage, par la régénération du filtre à particules… Quoi qu'il en soit, certains usagers du busway et des chauffeurs ont été exposés aussi bien aux particules grossières générées au début du trajet, qu'aux HAPp associés aux fines particules produites à l'extérieur.

Ligne de tramway

Par rapport aux deux autres TCSP les mesures sur la ligne de tramway indiquent généralement une meilleure qualité de l'air : PN, PM et HAPp dans les stations et dans les véhicules ne représentent que 40 à 90% et 20 à 90% respectivement des valeurs mesurées pour les lignes de chronobus et busway. Ces écarts significatifs peuvent s'expliquer par la motorisation électrique du tramway (i.e. absence d'émission de particules liées à la combustion) et à l'absence de sources notables de particules dans l'environnement proche de la ligne de tramway. Le segment 9-10 est celui qui supporte le plus important trafic automobile de la zone d'étude (34 600 véh./jour) et s'inscrit sur un axe (tronçon 2 à 9) marqué par une pollution due aux gaz d'échappement (NO_2) relativement importante [Air Pays de la Loire, 2018]. Il correspond en même temps au franchissement d'un bras de la Loire (sur 250 m), espace ouvert qui favorise la dispersion des particules émises par les véhicules et des HAPp associés, et leur piégeage dans le milieu récepteur voisin. Le tissu urbain environnant cette section, constituée de maisons et immeubles de taille modeste, n'est pas de nature à favoriser l'accumulation des particules dans l'air ambiant.

La possible génération de particules dans le tramway n'est pas pour autant exclue (voir § 3.3.2, *Busway*). À la station 2 et dans les rames sur le segment 10-2, des concentrations élevées en HAPp sont constatées (proches de 40 pg/L, voir Figure 2). Les niveaux de PN et PM associés étant faibles, il est envisageable que des HAPp associés à des particules (ultra-)fines (jusqu'à 4±1 ng/g) s'accumulent dans les rames mais que la taille de ces particules soit trop petite pour être mesurée avec notre équipement. De plus, la station 2 du tramway se situe à une cinquantaine de mètres de la station 2 du chronobus, c'est à dire à un carrefour soumis à un trafic automobile relativement important de la zone d'étude. Le décalage temporel des deux mesures (environ 2 heures entre le passage à l'arrêt du chronobus et celui à l'arrêt du tramway) ainsi que la distance entre les deux arrêts peuvent expliquer l'écart souvent significatif entre les valeurs de PM. Les chiffres précédents concernant la ligne de tramway ne prennent pas en compte les concentrations particulièrement fortes mesurées à la station 11 : PN et PM y surpassent significativement (i.e. $p < 0,05$) les valeurs moyennes des autres stations de tramway de facteurs 1,9 et 2,8 respectivement. La station 11, dans le centre-ville, est caractérisée par un fort trafic automobile (23 300 véh./j) constitué de véhicules particuliers et nombreux véhicules de transport en commun. Cependant, grâce à des immeubles de taille modeste, le confinement y est moins marqué que dans d'autres zones. Ainsi par exemple, les concentrations en HAPp sont comparables à celles de la station 2 (32±7 vs. 40±7 pg/L) tout en restant significativement inférieures (50%-60%) à celles des stations du busway.

Ligne de bus classique

Les stations d'arrêt de la ligne de bus classique présentent des valeurs de PN et PM similaires, voire inférieures, à celles des stations du busway (facteur 0,6 à 1,2 entre elles − voir Figure 2). En revanche les valeurs de PN et PM dans le bus sont significativement plus fortes que dans le busway (facteur de 1,4 à 1,6) (Tableau 3). Le busway sur le segment 5-6 est une exception car des particules semblent y être produites au début du trajet (voir § 3.3.1, *Ligne de busway*). Ces constatations laissent à penser qu'en l'absence de source interne de particules et malgré l'entrée de polluants extérieurs lors des ouvertures de portes en station, les busway testés peuvent offrir une qualité d'air améliorée en PN et PM par rapport au bus de ligne classique.

Ce n'est toutefois pas forcément le cas pour tous les modes de TSCP, tous les polluants et toutes les zones traversées. Les concentrations de HAPp dans un véhicule de transport en commun sont influencées par les

concentrations dans les stations desservies et dans les zones traversées. Par exemple, lorsque la ventilation dans les bus classiques est suffisante, les concentrations intérieures en HAPp peuvent y être ponctuellement inférieures à celles dans les TCSP. Tel est le cas pour les HAPp dans le busway sur les segments 3-7 et 7-8 : les concentrations extrêmes peuvent y excéder 200 pg/L. De plus, les véhicules de TCSP avec génération interne de grosses particules présentent des niveaux de PN et PM significativement plus forts que les bus classiques (Figure 2 et Tableau 3). Ces résultats mettent en lumière l'importance des relations entre qualité de l'air intérieur et air extérieur, accumulation et extraction, confinement et ventilation.

3.3.2. Transfert de particules entre véhicules et atmosphère ambiante

Rapport des tailles des particules

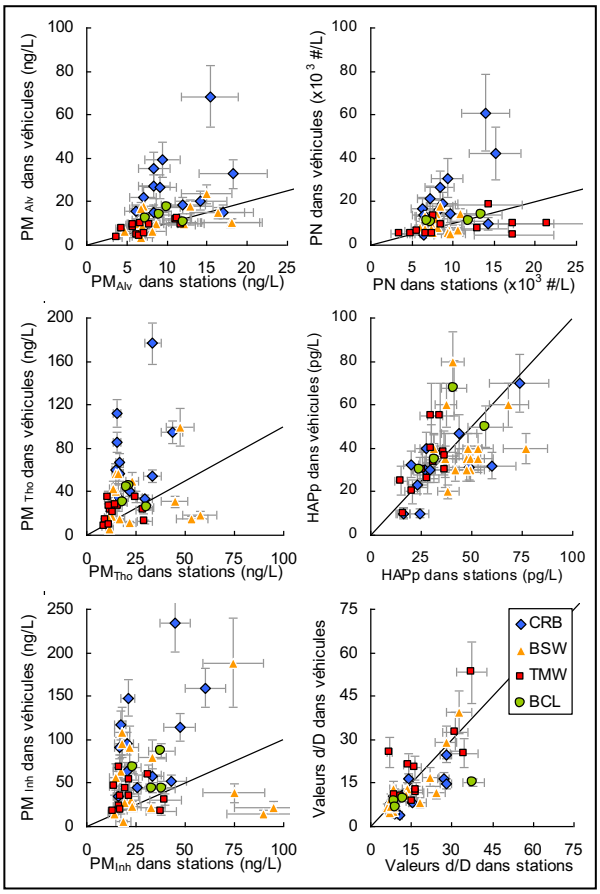
Sur l'ensemble de l'étude, les mesures révèlent un large éventail de concentrations et de tailles de particules. Le ratio d/D du nombre de particules ayant un diamètre inférieur à 1 µm (d) par rapport au nombre de particules ayant un diamètre supérieur à 1 µm (D), est utilisé pour étudier l'évolution des populations de particules, et donc des tailles particulaires. La Figure 3 présente en ordonnée (y) les concentrations de particules et les rapports d/D dans les véhicules, et en abscisse (x) la moyenne des deux stations délimitant le segment concerné, pour les différents modes de transport (chronobus, busway, tramway, bus classique). Les corrélations observées pour les HAPp et les rapports d/D suivent des distributions linéaires proches de la droite d'équation y = x (i.e. intérieur = extérieur). Par contre, pour PM_{Inh} et PM_{Tho}, les concentrations à l'intérieur des véhicules dépassent régulièrement et significativement celles mesurées à l'extérieur (Figure 2). Cette différence suggère : 1) une évacuation limitée des plus grosses particules vers l'extérieur des véhicules et/ou 2) l'importance de la génération interne de grosses particules dans certains TCSP. Les particules plus fines (PM_{Alv}) présentent des concentrations plus équilibrées entre l'intérieur et l'extérieur des véhicules (avec toutefois des niveaux souvent plus élevés à l'intérieur). Les valeurs de PN présentent une évolution similaire à celles de PM_{Alv}, à l'exception du tramway pour lequel les concentrations extérieures sont plus importantes.

Chronobus

La plupart des valeurs obtenues pour le chronobus se situent nettement au-dessus de la droite d'égalité *intérieur = extérieur*. Cette situation reflète la génération de particules dans les véhicules (cas de PN et PM_{Inh}, mais surtout PM_{Tho} et PM_{Alv}), tandis que les quelques valeurs de PN et PM_{Alv} situées en-dessous de la droite peuvent être associées aux zones dans lesquelles les émissions dues au trafic automobile (i.e. à l'échappement ou au hors-échappement) induisent des fortes concentrations dans et entre les stations.

Les seules corrélations linéaires significatives ($p > 0,05$) sont trouvées pour les paramètres PAHp et d/D. Leurs coefficients de corrélation linéaire entre concentrations intérieures et extérieures (r^2 de Pearson) sont respectivement de 0,64 et 0,63. Ceci signifie que lorsque le chronobus traverse une zone chargée en HAPp, la qualité de l'air intérieur est en partie influencée par cette ambiance. Il existe une faible inertie des concentrations de HAPp et des particules les plus fines dans les véhicules du chronobus. En quittant une zone relativement plus polluée, il faut entre 1 et 2 segments moyens pour que les niveaux de HAPp et les valeurs de d/D s'équilibrent avec l'air moins chargé de l'extérieur, et inversement. En raison de fortes concentrations particulaires générées initialement, il faudrait cependant entre 20 et 35 segments moyens pour atteindre l'équilibre des niveaux de PM_{Inh}, PM_{Tho} et PM_{Alv}. Ceci est plus long que la ligne de chronobus elle-même qui ne compte que 13 segments.

Figure 3. Concentrations moyennes de particules ± erreur-type (et valeurs associées du ratio d/D) dans les véhicules et les stations avoisinantes. Un distinguo est fait entre les différents modes de transport en commun. (CRB = Chronobus ; BSW = Busway ; TMW = Tramway ; BCL = Bus classique)



Busway

Deux catégories de particules peuvent être distinguées pour la ligne de busway. Elles portent sur les concentrations en PM_{Tho} et PM_{Inh} dans l'air extérieur (Figure 3). La première catégorie correspond au groupe des concentrations les plus élevées (PM_{Tho} > 40 ng/L et PM_{Inh} > 70 ng/L ; en excluant cependant le premier segment traversé qui est associé à la génération initiale interne de grosses particules) et la seconde aux concentrations les plus faibles (PM_{Tho} < 30 ng/L et PM_{Inh} < 45 ng/L).

En ce qui concerne la première catégorie, des comparaisons avec des zones urbaines semblables mais avec un plus faible trafic que celui des abords du busway au moment des mesures, indiquent des concentrations en PM_{Tho} et PM_{Inh} significativement plus basses (respectivement 17±4 ng/L et 21±8 ng/L ; p< 0,05). Les faibles valeurs de l'indicateur d/D (15±3) – donc la présence de grosses particules – dans les mesures extérieures effectuées sur l'axe du busway, ainsi que les moindres concentrations en HAPp (30±10 pg/L), indiquent la prépondérance de la mise en suspension par le trafic automobile d'une pollution accumulée, et ce malgré les pluies abondantes des jours précédant la campagne de mesure. Les faibles concentrations mesurées à l'intérieur du busway (PM_{Tho} = 20±8 ng/L et PM_{Inh} = 30±20 ng/L) indiquent par ailleurs que les particules provenant de la remise en suspension ne sont pas/peu transférées vers l'intérieur des véhicules.

La seconde catégorie de particules est davantage présente à l'intérieur des véhicules qu'à l'extérieur (i.e. la plupart de ses points sont situés au-dessus de la droite $y=x$). Elle indique l'effet de la contamination initiale de l'air par les sources internes aux véhicules du busway. Les quelques points (n=3) en dessous de la droite correspondent à la section à fort trafic du segment 6-7.

La plupart des points associés aux mesures de HAPp et aux valeurs prises par le rapport d/D sont en-dessous de la droite $y=x$, indiquant que les sources extérieures en HAPp et fines influencent peu la qualité de l'air intérieur des busways (visible aussi sur la figure 2). Ainsi, il faudrait un peu plus de 4 segments pour que la concentration intérieure en HAPp s'équilibre avec celle de l'air extérieur. La concentration en HAPp à l'intérieur du busway présente donc une inertie plus importante que dans le chronobus (moins de 2 segments pour atteindre l'équilibre).

Tramway

Pour le tramway, les valeurs de PN, PM_{Alv}, HAPp et D/d sont distribuées de façon homogène de part et d'autre de la droite $y=x$ (Figure 3). Les coefficients de corrélation linéaire (r^2 de Person) entre concentrations à l'intérieur et à l'extérieur des rames sont compris entre 0,45 et 0,75, et les coefficients directeurs des droites (a) sont compris entre 0,7 et 1,3. Les concentrations en HAPp et particules fines dans les rames de tramway sont donc proches de celles de l'air extérieur. L'équilibre est néanmoins moins marqué pour les particules plus grossières (PM_{Tho} et PM_{Inh}) et dans le cas de l'ambiance extérieure plus chargée de la station 11 (Figure 2). Le détail des résultats montre que le niveau de concentration intérieure est le résultat d'une succession d'évènements de contamination pendant les trajets entre stations (segments) et d'extractions lors des arrêts en station. Pour les PM_{Tho} et PM_{Inh}, les concentrations intérieures moyennes tendent à dépasser les valeurs mesurées à l'extérieur, dans des proportions moyennes respectives *intérieur/extérieur* de 1,7±0,2 et 2,2±0,3. Ces écarts, souvent significatifs, restent toutefois bien inférieurs aux écarts constatés pour le busway (2,0±0,3 et 2,6±0,6 respectivement) et surtout le chronobus (3,5±0,7 et 3,7±0,8). Ceci atteste d'une relativement plus faible accumulation des particules les plus grossières dans le tramway que dans les deux autres modes de TCSP (comme illustré par le segment 9-10, Figure 2).

Les résultats précédents montrent que les concentrations en PM_{Tho} et PM_{Inh} dans les rames de tramway ne dépendent pas des distances parcourues (Figure 2), et faiblement des échanges avec l'extérieur (Figure 3). La nature des particules constitutives de ces fractions est donc probablement différente de celles des deux autres modes de TCSP. Les faibles concentrations en HAPp associées à ces particules sont cohérentes avec la source d'énergie non carbonée du tramway. La question des sources de particules (poussières extérieures, apports par les usagers, équipements/aménagement intérieur des rames, etc.) n'a pas pu être traitée dans le cadre de cette étude.

Bus classique

Pour les bus classiques, les valeurs (Figure 3) se situent majoritairement au-dessus de la droite $y=x$: les concentrations à l'intérieur sont supérieures à celles à l'extérieur. Mais toutes les valeurs d/D sont en-dessous. La qualité de l'air dans les bus est donc d'une façon générale moins bonne qu'à l'extérieur. Le cas du paramètre d/D indique que les bus contiennent de plus grandes proportions de grosses particules (les particules de taille > 1 µm représentent de 6% à 13% des PN) que l'air extérieur. Les concentrations intérieures en PN, PM et HAPp sont les plus importantes à la station 11, et décroissent significativement pendant le trajet. L'ambiance extérieure étant moins chargée, pendant le trajet les particules sont progressivement extraites et/ou déposées. Suivant cette loi de décroissance, pour les paramètres PM_{Inh}, PM_{Tho} et PM_{Alv}, les concentrations intérieures atteindraient les niveaux de référence (mesurés à la « station 0 ») lorsque le trajet dépasse 4 segments moyens. Les fortes concentrations en HAPp dans les véhicules laissent quant à elles supposer l'existence d'entrées à partir de l'air extérieur (émissions du trafic général, voire du bus lui-même) et/ou une source interne aux véhicules.

3.4. Enseignements pour l'évaluation environnementale des TCSP

3.4.1. Principaux éléments de comparaison entre TCSP

Les bus classiques pris comme référence dans cette étude montrent pendant les trajets (segments) une qualité de l'air intérieur inférieure à la moyenne entre les stations reliées, avec une forte proportion de grosses particules (PM_{Inh}, PM_{Tho}) et de fortes concentrations en HAPp (dont l'origine est interne ou provient d'entrées d'air extérieur). Le busway et le chronobus confirment l'influence que peuvent avoir niveaux de HAPp extérieurs sur la qualité de l'air à l'intérieur des véhicules. Ces deux TCSP indiquent aussi une production significative de grosses particules au départ des lignes. Par contre, les concentrations en particules fines (dont PM_{Alv}) sont généralement analogues entre l'intérieur et l'extérieur de tous les bus (chronobus, busway et bus classique).

La qualité de l'air dans le tramway (PN, PM, HAPp) est généralement meilleure que dans les autres TCSP et a fortiori dans le bus classique. Localement, les concentrations en particules fines y sont même significativement inférieures aux moyennes entre stations. Les concentrations en particules fines et HAPp s'accroissent cependant au cours de certains trajets effectués à proximité d'un trafic automobile dense et diminuent lors des arrêts à des stations situées à l'écart (ventilation par ouverture des portes).

L'accumulation de particules grossières à l'intérieur des véhicules par rapport à la qualité de l'air extérieur est plus marquée pour le chronobus que le busway, et est la plus faible pour le tramway. D'une façon générale (chronobus, busway, tramway et bus classique), l'évacuation des particules grossières pendant les trajets est lente.

Pour les paramètres PN, PM et HAPp, la qualité de l'air offerte aux usagers des quatre modes de transport en commun est donc supérieure dans le tramway, devant le busway, puis le chronobus et enfin le bus classique.

La qualité de l'air dans les transports en communs testés rend compte d'une situation intermédiaire entre air intérieur propre au véhicule et air extérieur. L'influence relative des deux masses d'air dépend du mode de transport (sources intérieures, ventilation) mais aussi des types d'activités (sources) dans les secteurs traversés et du trafic automobile avoisinant. Il s'avère donc complexe et délicat d'appliquer les normes existantes relatives à la qualité de l'air intérieur ou extérieur à ces compartiments mobiles et semi-confinés que sont les véhicules de transport en commun.

Par rapport aux concentrations en PM_{10} préconisées pour la qualité de l'air extérieur [RF, 1998 ; UE, 2008 ; RF, 2010b], le fait est que dans le chronobus les valeurs ont régulièrement dépassé les seuils journaliers d'information (i.e. de 50 $\mu g/m^3$) et, plus ponctuellement, les seuils journaliers d'alerte (i.e. de 80 $\mu g/m^3$). C'est aussi le cas pour le premier segment du busway. Ce TCSP est par ailleurs soumis aux particules fines riches en hydrocarbures aromatiques (émissions non réglementées à l'heure actuelle) du trafic automobile avoisinant la ligne et ses stations.

3.4.2. Possibilité de prise en compte dans le diagnostic d'état zéro pour de futurs projets de TCSP

Dans le cadre du troisième appel à projet de l'État de 2013, Nantes Métropole projette la création de 3 nouvelles lignes de chronobus (C9, C10 et C20) dont l'objectif porte en priorité sur les dessertes des périphéries [Nantes Métropole, 2013]. Préalablement à la conception, réalisation et mise en œuvre d'un TCSP, les textes consacrés à l'évaluation des politiques et projets de transport indiquent la nécessité de diagnostic d'une situation « zéro ».

Or, si le contexte législatif évolue rapidement, il ne s'attache pas toujours à définir la façon de réaliser les états-zéro préalables à l'évaluation d'une politique ou d'un projet de transport. L'étude des divers guides dédiés à l'évaluation des TCSP [CERTU 1997, 1998, 2002 ; CERTU et *al.*, 2003] nous montre que s'ils sont de plus en plus précis à propos des variables à considérer après la mise en service d'un projet de transport, ils ne comportent le plus souvent que très peu d'indications afin de reconstituer l'état zéro des projets.

En 2004, il est préconisé de répertorier un ensemble d'indicateurs et de calculer leur évolution par rapport à une situation correspondant à un état zéro ou au démarrage de l'étude tout en mettant en garde contre les difficultés inhérentes à la détermination de cet état zéro. « L'évaluation suppose que soit défini un état zéro, par rapport auquel seront comparés les impacts et autres bénéfices socio-économiques des actions d'exploitation mises en œuvre. L'établissement de cet état zéro se heurte à une difficulté qu'il convient de prendre en compte. Les mesures à effectuer peuvent nécessiter l'emploi de moyens techniques qui n'existent pas, puisque c'est précisément le projet qui a vocation à les mettre en œuvre » [Nouvier et *al.*, 2004].

La question de l'observation des impacts d'une réalisation de grand projet d'infrastructure ou système de transport est conditionnée par la détermination de la situation de départ qui servira à établir les comparaisons et mesurer les évolutions. Mais il n'existe pas de consensus quant à la date de cette dernière ni quant aux données à collecter ou créer à cette fin. Certains avancent la nécessité de repérer une situation de départ avant le début des travaux, d'autres préconisent la date de réalisation de l'enquête publique ou de la dernière enquête ménage déplacements (EMD).

Les indicateurs de mobilité préconisés sont issus des enquêtes ménage déplacements réalisées sur les territoires considérés. Dans le cas de la réalisation d'un TCSP, nous pouvons donc situer l'état zéro de la mobilité et des pratiques de déplacements à la date de la dernière EMD effectuée avant la mise en service du TCSP. Pour Nantes et son agglomération, l'état zéro décrivant les déplacements est tributaire des deux enquêtes réalisées en 2002 et 2008 [Seguin et *al*, 2009].

Pour les projets de TCSP circulant en surface, la constitution d'une option de référence [Cerema, 2015] s'effectue par rapport à la situation envisagée par la réalisation du TCSP sur les itinéraires qu'il doit emprunter, et de la réorganisation prévisible des circulations des autres modes de transport (voitures et les autres bus qui seront redéployés sur l'ensemble du réseau de transport collectifs). Les indicateurs qui serviront à comparer les situations avant la réalisation du TCSP et celle après sa réalisation seront calés sur ce réseau de référence qui correspond à une évolution probable du réseau sans la réalisation du TCSP.

Ceci renvoie à la nécessité d'analyser et tenir compte des référentiels des politiques publiques de transport portées à différents échelons de planification et à leur interactions avec les autres politiques comme l'urbanisme, le développement économique et l'environnement [Heddebaut et *al.*, 2014 ; Halphen, 2015]. Ces référentiels ainsi que les enjeux attribués aux TCSP pourraient ainsi consister en l'état zéro des projets à évaluer. La qualité de l'air respiré par les usagers des systèmes de transport en commun et les riverains des lignes de transport, avant la réalisation des projets, pourrait être un paramètre pertinent et accessible techniquement, pour évaluer l'état zéro et de la performance environnementale des systèmes mis en place.

4. Conclusion

Jusqu'à aujourd'hui, l'évaluation environnementale des TCSP, souvent projets phare des PDU, porte sur une amélioration générale de la qualité de l'air, d'abord pour les riverains, ensuite pour l'ensemble des citadins, mais la qualité de l'air respiré par les personnes qui contribuent directement au succès de cette offre de transport n'est quant à elle jamais prise en compte.

Les paramètres de qualité de l'air urbain que sont particules et HAP s'avèrent pertinents pour faire apparaître des différences entre l'air respiré par les usagers du tramway, du busway, du chronobus et des bus circulant au sein du trafic automobile urbain.

Ainsi, d'une façon générale, il semble que la mise à l'écart de la ligne de transport en commun par rapport aux voies de circulation automobile soit un facteur d'amélioration de la qualité de l'air intérieur des véhicules de transport en commun, et ce quel que soit le contexte extérieur. De ce fait on observe d'une part une hiérarchie générale tramway > busway > chronobus > bus classique, qui se trouve suivre celle des investissements nécessaires à la mise en place des différents modes de transport en commun étudiés. Nous constatons d'autre part que dans des contextes extérieurs plus chargés en polluants, l'intérieur des véhicules de transport en commun se charge plus abondamment en polluants (particules et HAP). Concernant les HAP particulaires, la qualité de l'air à l'intérieur des véhicules est donc nettement influencée par celle des zones traversées ou des activités avoisinantes (échanges intérieur/extérieur), tel qu'à proximité de voies de circulation automobile parallèles ou d'intersections avec des voies à fort trafic. S'il semble donc envisageable de réduire l'exposition des usagers des TCSP au HAP en plaçant les lignes à l'écart du trafic urbain général, ceci ne réglera vraisemblablement pas les problèmes associés aux sources de particules internes aux véhicules.

Ces éléments de contexte environnemental proche entrent donc en ligne de compte dans l'évaluation de la qualité de l'air fournie aux usagers des transports en commun et en particulier des TCSP dont les régimes de fonctionnement sont supposés être moins émissifs en particules et HAP (minimisation des phases de freinage/accélération). L'influence de ces éléments pourrait donc être analysée dans l'évaluation *ex post* d'une ligne de TCSP. De la même façon, dans le cadre d'un état zéro de projet de ligne de TCSP, ils devraient être pris en compte dans la zone du tracé projeté.

Il ressort de ces résultats que la qualité de l'air mesurée au niveau des personnes en situation de transport apparaît comme un indicateur pertinent de la qualité de service aux usagers des TCSP eux-mêmes, mais aussi de la qualité de l'environnement dans le champ proche des lignes. Elle peut donc aussi être un indicateur de la cohérence de l'aménagement urbain autour des infrastructures de TCSP. En effet, le code de l'environnement prône « la prévention, la réduction ou le contrôle du rejet, du dégagement, de l'écoulement ou de l'émission des polluants et des substances toxiques » [RF, 2019, article L110-1-1]. Les mesures effectuées à bord et aux alentours des TCSP inciteraient à considérer cet indicateur de l'air respiré par les usagers des transports en commun dans les évaluations obligatoires des plans et programmes dont les PDU.

Ces résultats expérimentaux aboutissent à la même conclusion de nécessité de cohérence que celle préconisée ces dernières années par la loi, entre les politiques urbaines, de transport, d'environnement et de développement socio-économique.

Remerciements

Les auteurs remercient M. Sébastien Rabuel, Directeur des Investissements à la Direction Générale des Déplacements de Nantes Métropole pour avoir autorisé la réalisation de cette étude, ainsi que la Semitan et ses chauffeurs pour leur coopération. Ces travaux ont été soutenus par le ministère de l'Environnement (MEDDE) dans le cadre du projet Orevadd (Outils et référentiels pour évaluer dans une approche de développement durable, Axe 2: Diagnostic des États Zéro pour l'Évaluation de la Réalisation de Transports collectifs en site propre).

Références

1. Air Pays de la Loire (2011) Cartographies de la qualité de l'air, agglomération de Nantes pour l'année 2010, 21 p
2. Air Pays de la Loire (2018) Qualité de l'air en 2030 sur le territoire de Nantes Métropole, Rapport définitif, 68 p
3. Auran (2014) Trafic routier en Loire-Atlantique, comptages 2012. Département de Loire-Atlantique, Nantes métropole, Agence d'urbanisme de la région nantaise, AURAN-118.14, 1 p
4. André M, Brutti-Mairesse E, (2015) Évaluation de l'impact d'un PDU : Problématique de l'émission de polluants atmosphériques, Recherche Transport Sécurité, (2015) 32 :121-133
5. AUAT (2007) Guide méthodologique pour la mise en œuvre des contrats d'axes, Agence d'urbanisme et d'Aménagement du Territoire de Toulouse Aire Urbaine, 59 p
6. Azevedo J A H, Araùjo R S, Silva G M M (2013) Polycyclic aromatic hydrocarbons atmospheric from automotive sources: a brief review. Holos 29 : 102-114
7. Barbusse S, Plassat G (2005) Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination. Reference data. 2nd Ed. ADEME report, n° 5728, Paris, France, 132 p
8. Beaucire F, (2006) Transports collectifs urbains : quelle contribution au développement urbain durable et par quels moyens ?, Paris, Institut Veolia Environnement, N°6, 49 p
9. Bidou-Zachariasen C (2003) Retours en ville - des processus de « gentrification » urbaine aux politiques de « revitalisation » des centres, Descartes et Cie, collection « Les urbanités », Paris, 267 p
10. Bloy E, Bonnafous A, Cusset M, Gérardin B (1977) Évaluer la politique des transports, Economica, 102 p
11. CEN (Comité européen de normalisation) (1993) Norme EN481 Workplace atmospheres: size fraction definitions for measurement of airborne particles. Sampling conventions for particle size fractions for inhalable, inspirable, thoracic and respirable fractions. European Standard, EH/2, 16p. ISBN: 0580221407
12. Cerema (2015) Évaluation a posteriori des transports collectifs en site propre - Note méthodologique, Direction technique Territoires et ville, Direction territoriale Centre-Est, 110 p
13. CERTU (1997) Évaluation des transports en commun en site propre : indicateurs transport pour l'analyse et le suivi des opérations, CERTU, novembre, 145 p
14. CERTU (1998) Évaluation des transports en commun en site propre : méthodes d'observation des effets sur l'urbanisme et le cadre de vie, CERTU, juin
15. CERTU (2002) Évaluation des transports en commun en site propre, recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP, CERTU, juin
16. CERTU (2009) Tramway et Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) en France : domaines de pertinence en zone urbaine, Transport/Environnement/Circulation (TEC), N° 203, septembre, et numéro spécial « Transports publics et territoires » in Mobilités et transports
17. CERTU, CETE de Lyon (2011) Évaluation environnementale des plans de déplacements urbains : Analyse des premières pratiques et préconisations, juin, 241 p
18. CERTU, CETE de Lyon, LET (2003) Évaluation a posteriori des TCSP. Analyse des bilans LOTI des TCSP de Province, 20 mars, 35 p
19. CERTU, DTT, CETE de Lyon (2003) Note méthodologique pour l'élaboration des bilans LOTI des TCSP, septembre, 29 p
20. Chasseriau A (2004) Au coeur du renouvellement nantais: la Loire en projet, Norois 192, 71-84. doi:10.4000/norois.899
21. Choi W, Hu S, He M, Kozawa K, Mara S, Winer A M, Paulson S E (2013) Neighborhood-scale air quality impacts of emissions from motor vehicles and aircraft. Atmospheric Environment 80 : 310-321
22. Circulaire du Premier Ministre du 25 août 2000 relative à la mise en œuvre de l'évaluation dans les procédures contractuelles (contrat de plan – contrats de ville et d'agglomération – contrats de pays – contrats conclu avec les parcs naturels régionaux pour la période 2000 - 2006. (NOR : PRMX0004319C)
23. Finn B, Heddebaut O, Kerkhof A, Rambaud F, Sbert Lozano O, Soulas C (editors) (2011) Buses with a High Level of Service, Fundamental characteristics and recommendations for decision-making and research. Results from 35 European cities, Final report COST TU 0603, Certu Publication Department, 180 p
24. Font A, Baker T, Mudway I S, Purdie E, Dunster C, Fuller G W (2014) Degradation in urban air quality from construction activity and increased traffic arising from a road widening scheme. Science of the Total Environment 497-498 : 123-132
25. Gagnière V (2012) Les effets du tramway sur la fréquentation du transport public. Un bilan des agglomérations françaises de province, Revue Géographique de l'Est [En ligne], vol. 52 / 1-2 | 2012, mis en ligne le 16 octobre 2012, consulté le 11 octobre 2013. URL : http://rge.revues.org/3508
26. Gonçalves M, Jiménez-Guerrero P, Baldasano JM (2009) High resolution modeling of the effects of alternative fuels use on urban air quality : Introduction of natural gas vehicles in Barcelona and Madrid Greater Areas (Spain). Science of the Total Environment 407 : 776-790
27. Granelle J-J (1998) Économie Immobilière Analyse et Applications, Économica, 534p
28. Grigoratos T, Martini G (2014) Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM. Literature review. JRC Science and Policy Reports. European Commission. 53 pp. ISBN 978-92-79-38302-1. doi:10.2790/21481

29. Grimfeld A, Jouzel J, Gazeau B, Liebard A, Lepelletier P, Le Grand J-F, Notat N, (2010) Rapport d'évaluation du Grenelle de l'Environnement, La Documentation Française, octobre, 127 p. +Annexes
30. Gros V, Sciare J, Yu T (2007) Air-quality measurements in megacities: Focus on gaseous organic and particulate pollutants and comparison between two contrasted cities, Paris and Beijing. Comptes Rendus Géosciences 339 : 764-774
31. Halphen B., (coord), François D, Fontaine A, Tardivel Y, Ferraille A & Heddebaut O (2015) Projet : Outils et référentiels pour évaluer dans une approche développement durable (OREVADD), Rapport final, Convention de subvention MEDDE/CGDD 10-AST-CVS-083, Coordination : Bernard Halphen, CEREMA/ DtecITM, Partenaires du projet : CEREMA/DtecITM, CSTB, École des Ponts ParisTech, UPEMLV, IFSTTAR, 80 p
32. Hamnett C (1991) Les aveugles et l'éléphant : l'explication de la gentrification, Transactions institute of British geographers, N.S., 16, 2, 1991 : 173-189
33. Heddebaut O (2017) The evolution of public transport contracts in France, Discussion Paper n°2017-11, Prepared for the Working Group on Public Transport Market Organisation and Innovation", International Transport Forum, OCDE, Paris, June, 23p
34. Heddebaut O, Courteix J, Roulet R (2014) Évolution des référentiels liés à la réalisation des TCSP : Application aux communautés urbaines de Nantes et de Bordeaux, Projet "Outils et référentiels pour évaluer dans une approche développement durable" (OREVADD) du PST Paris Est Axe 2 : Diagnostic des États Zéro pour l'Évaluation de la Réalisation d'un TCSP (DEZERT), Deuxième rapport, Novembre 2014
35. Heddebaut O, Grezil G, Delaval C, Picot C, Bour-Desprez B, Malé J-M (2002) La définition des « périmètres d'application des politiques publiques » et les problèmes liés à leur juxtaposition et/ou emboîtement dans l'évaluation territorialisée des politiques. pp.55-89, in Baslé M, Dupuis J, Le Guyader S, (éd), Évaluation, Action publique territoriale et collectivités, L'Harmattan, collection Logiques Politiques, 339 p
36. Ley D (1996) The New middle class and the remaking of the central city, Oxford, Oxford University Press, 400 p
37. LMCU (Lille Métropole Communauté Urbaine) (2009a) Faire la Ville Intense, Direction Aménagement et Renouvellement Urbain, Conseil communautaire du 26 juin 2009
38. LMCU (2009b) Les Disques de Valorisation des Axes de Transports DIVAT, Cadre de vie, déplacements urbains, Lille Métropole Communauté Urbaine, novembre 2009
39. Loi N° : 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs LOTI
40. Loi N° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains SRU (SRU) (NOR : EQUX9900145L)
41. Loi N° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) (NOR: ENVX9500163L)
42. Loi N° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (Grenelle 1) (NOR : DEVX0811607L)
43. Loi N° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (Grenelle 2) (NOR: DEVX0822225L)
44. Masiol M, Squizzato S, Rampazzo G, Pavoni B (2014) Source apportionment of PM2.5 at multiple sites in Venice (Italy): Spatial variability and the role of weather. Atmospheric Environment 98 : 78-88
45. MEEDDM (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer) (2008) Circulaire du 9 décembre 2008 relative au référentiel d'évaluation au MEEDDM
46. MEEDDM (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer) (2008) Premier appel à projets « transport urbains » hors Île-de-France, suite du Grenelle de l'environnement, 4 p
47. MEEDDM (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer) (2010) Deuxième appel à projets « transport urbains » hors Île-de-France, suite du Grenelle de l'environnement, 4 p
48. MEEDDM (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer) (2013) Transports collectifs et mobilité durable, Troisième appel à projets « transport urbains » hors Île-de-France
49. Métayer P (2012) Évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques : développements méthodologiques et test sur le PDU de Nantes Métropole, Programme ANR Villes Durables ANR-08-VILL-0005, Rapport scientifique final, août 2012, 43 p
50. Moreno T, Reche C, Rivs I et *al*. (2015) Urban air quality comparison for bus, tram, subsway and pedestrian commutes in Barcelona. Environmental Research 142 : 495-510
51. Nantes Métropole (2010) Dossier de candidature de l'appel à projets transports urbains, les lignes chronobus, 8 Octobre 2010
52. Nantes Métropole (2010) Plan de déplacements urbains 2010-2015 perspectives 2030, rapport environnemental, annexe 1 projet arrêté par le conseil communautaire du 18 octobre 2010, 70 p
53. Nantes Métropole (2011) Plan de déplacements urbains PDU de Nantes Métropole horizon 2010-2015 perspective 2030, 236 p
54. Nantes Métropole (2013) Dossier de candidature du troisième appel à projets transports urbains, Chronobus, lignes C9, C10, C20, programme 2014- 2017
55. Nioche J-P, Ponsard R (éd) (1984) L'évaluation des politiques publiques, Economica, 302 p
56. Nouvier J et J-M Serrier (Coordonnateurs), Dubois C (CETE de Lyon), Künkel Frédérik (ex CERTU), Olivero P (CETEdu Sud-Ouest), Revillon D (SETEC Economie) (2004) Évaluation des projets d'exploitation sur les axes principaux d'agglomération ; Schéma directeur d'exploitation de la route - Réseau de niveau 1, rapport CERTU, août, 94 p
57. Rabuel S (2012) Busway et Chronobus - L'adaptation du concept BHNS aux contextes, Atelier Civinet, 29 avril, Angoulême, présentation diaporama, 45 p. http://docplayer.fr/65837095-Busway-et-chronobus-l-adaptation-du-concept-bhns-aux-contextes.html

58. Rabuel S (2015) Tramway, Busway et Chronobus à Nantes Concepts, bilan et perspectives, Nantes Métropole, présentation diaporama, 37 p http://www.observatoire-transports.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2_-_NANTES_METROPOLE.pdf
59. Redondo B, « Tramway et territoire : quel urbain en perspective? », Revue Géographique de l'Est [En ligne], vol. 52 / 1-2 | 2012, mis en ligne le 13 février 2013, consulté le 11 octobre 2013. URL : http://rge.revues.org/3572
60. Région Pays de la Loire (2002) Plan Régional de la Qualité de l'Air (PRQA) des Pays de la Loire, décembre
61. République française (RF) (1990) Décret N° 90-82 du 22 janvier 1990 relatif à l'évaluation des politiques publiques, Journal officiel de la république française n°20 du 24 janvier 1990 page 952 (NOR : PRMX8900173D)
62. République française (RF) (1998) Décret N°98-1048 du 18 novembre 1998 relatif à l'évaluation des politiques publiques (NOR : FPPX9800123D)
63. République française (RF) (2000) Circulaire du 25 août 2000 relative à la mise en œuvre de l'évaluation dans les procédures contractuelles (contrats de plan - contrats de ville et d'agglomération - contrats de pays - contrats conclus avec les parcs naturels régionaux) pour la période 2000-2006, Journal officiel de la république française, n°201 du 31 août 2000 page 13455 NOR: PRMX0004319C
64. République française (RF) (2010a) Ordonnance n° 2010-1307 du 28 octobre 2010 relative à la partie législative du code des transports, Journal officiel de la république française, n°0255 du 3 novembre 2010 page 19645 texte n° 2NOR: DEVX0915592
65. République française (RF) (2010b) Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air, Journal officiel de la république française, Texte 2 sur 96. 7p
66. République française (RF) (2019) Code de l'environnement - Dernière modification le 01 avril 2019 https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do;jsessionid=FE9C528EEA159D535B4E30FD343D1A90.tplgfr28s_1?cidTexte=LEGITEXT000006074220&dateTexte=20190403
67. Rouchaud D (2016) Transports collectifs en site propre : quel impact des investissements sur la fréquentation ? Analyse THEMA transports, Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, juillet, 36 p
68. Seguin S, Fouin L, Le Gal Y, Tisserand B, Godineau D, Ranty A (2009) Les déplacements à Nantes Métropole : la pole position de la voiture contestée, Insee Pays de la Loire, Études n° 80 –Novembre 2009
69. SETRA (service d'études techniques des routes et autoroutes) (2007) Évaluation des projets d'infrastructures routières, guide méthodologique, octobre, 42 p
70. Silva L T, Mendes J F G (2012) City Noise-Air: An environmental quality index for cities. Sustainable Cities and Society 4: 1-11
71. Stambouli J (2005) Les territoires du tramway moderne : de la ligne à la ville durable, in Développement durable et territoires [En ligne], Dossier 4 | 2005, mis en ligne le 11 juin 2007, consulté le 31 janvier 2014. URL : http://developpementdurable.revues.org/3579 ; DOI : 10.4000/developpementdurable.3579
72. Thoenig J-C (1985) L'analyse des politiques publiques, in Traité de Science Politique, M Grawitz et J Leca, Vol 4, P.U.F
73. UITP (2009) Évaluer les avantages des transports publics, prise de position, janvier, 6 p
74. Union Européenne (UE) (2008) Directive 2008/50/CE du parlement Européen et du conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Journal officiel de l'Union européenne. L 152, 44 pp
75. Varlet J (2012) Entre desserte (péri)urbaine et desserte aéroportuaire, les tramways de l'Est lyonnais, Revue Géographique de l'Est [En ligne], vol. 52 / 1-2 | 2012, mis en ligne le 18 octobre 2012, consulté le 11 octobre 2013. URL : http://rge.revues.org/3598
76. Viveret P (1989) L'évaluation des politiques et des actions publiques, La Documentation Française
77. Vollet D, Hadjab F (2008) Manuel de l'évaluation des politiques publiques, Editions Quae
78. Wolff J-P (2012) Le tramway : au cœur des enjeux de gouvernance entre mobilité et territoires, Revue Géographique de l'Est [En ligne], vol. 52 / 1-2 | 2012, mis en ligne le 16 octobre 2012, consulté le 11 octobre 2013. URL : http://rge.revues.org/3498
79. Zembri P (2012) La conception des transports collectifs en site propre (TCSP) en France: des tracés problématiques ?, Revue de Géographie de l'Est, vol. 52, n° 3