



HAL
open science

Approche dynamique pour l'étude de l'emprise spatiale du bruit de trafic routier aux heures de pointe

Arnaud Can, Pierre Aumond, Cécile Bécarie, Ludovic Leclercq

► To cite this version:

Arnaud Can, Pierre Aumond, Cécile Bécarie, Ludovic Leclercq. Approche dynamique pour l'étude de l'emprise spatiale du bruit de trafic routier aux heures de pointe. RTS. Recherche, transports, sécurité, 2020, Comment développer une mobilité plus durable : vers une approche systémique, 2020, 11p. 10.25578/RTS_ISSN1951-6614_2020-05 . hal-02482315

HAL Id: hal-02482315

<https://hal.science/hal-02482315>

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

DOSSIER / ISSUE

Comment développer une mobilité plus durable : vers une approche systémique
How to develop a more sustainable mobility: towards a systemic approach

Approche dynamique pour l'étude de l'emprise spatiale du bruit de trafic routier aux heures de pointe

Dynamic approach for the study of the spatial distribution of road traffic noise during peak hours

Arnaud Can, Pierre Aumond, Cécile Bécarie, Ludovic Leclercq

© Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR 2020

Résumé Une chaîne de modélisation dynamique, couplant le modèle de trafic dynamique Symuvia (LICIT, Ifsttar / ENTPE) et l'outil de prédiction des niveaux sonores Noisemodelling (UMRAE, Ifsttar / Cerema), est constituée dans cet article pour évaluer l'impact du trafic routier sur les environnements sonores à l'échelle d'un réseau de trafic urbain d'environ 10 km² situé à Lyon/Villeurbanne. La simulation, qui reproduit 3h d'un scénario d'heure de pointe matinale, souligne l'augmentation des niveaux de bruit liée à la hausse de demandes en déplacements. Elle met également en évidence que la hausse des niveaux de bruit n'est pas uniformément répartie sur le réseau et impacte davantage les rues où s'opèrent les reports de trafic. De plus, la dynamique du bruit se trouve modifiée : le bruit de fond étant particulièrement sensible à l'augmentation de la densité de véhicules sur le réseau, les périodes de calme sur

le réseau sont raréfiées. Une analyse plus détaillée de cette dynamique est possible localement à travers l'analyse de l'évolution du $L_{Aeq,1s}$ et l'étude d'indicateurs acoustiques spécifiques. Les améliorations souhaitables du modèle sont discutées, avec en vue l'évaluation de l'impact acoustique, actuellement inconnu, de stratégies de gestion du trafic routier à l'échelle d'un réseau urbain.

Mots-clés bruit de trafic routier ; microsimulation ; logiciel Symuvia ; logiciel Noisemodelling ; étude de cas ; réseau urbain ; dynamique du bruit ; affectation du trafic routier ; indicateurs acoustiques

Abstract A dynamic modelling chain, coupling the Symuvia dynamic traffic model (LICIT, Ifsttar / ENTPE) and the Noisemodelling noise level prediction tool (UMRAE, Ifsttar / Cerema), is developed in this paper to assess the impact of road traffic on noise environments at the scale of an urban traffic network of about 10 km² located in Lyon/Villeurbanne. The simulation, which reproduces 3 hours of a morning rush hour scenario, highlights the increase in noise levels associated with the increase in travel demands. It also highlights that the increase in noise levels is not uniformly distributed over the network and has a greater impact on the streets where traffic is reported. In addition, the noise dynamics is modified: since background noise is particularly sensitive to the increase in vehicle density on the network, periods of calm on the network are rarer. A more detailed analysis of this dynamic is possible locally through the analysis of the evolution of the $L_{Aeq,1s}$ and the study of specific acoustic indicators. Desirable improvements to the model are discussed, with a view to assessing the currently unknown acoustic impact of road traffic management strategies at the scale of an urban network.

Arnaud CAN (✉)
UMRAE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, CEREMA,
44344 Bouguenais, France
courriel : arnaud.can@ifsttar.fr

Pierre AUMOND (✉)
UMRAE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, CEREMA,
44344 Bouguenais, France
courriel : pierre.aumond@ifsttar.fr

Cécile BÉCARIE (✉)
Univ Lyon, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, ENTPE,
69518 Vaulx-en-Velin, France
courriel : cecile.becarie@ifsttar.fr

Ludovic LECLERCQ (✉)
Univ Lyon, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, ENTPE,
69518 Vaulx-en-Velin, France
courriel : ludovic.leclercq@ifsttar.fr

Keywords road traffic noise; microsimulation; Symuvia software ; Noisemodelling software; case study; urban network; noise dynamics; road traffic assignment; noise indicators

1. Introduction

L'urbanisation croissante et la forte de demande de mobilité qu'elle engendre sont les vecteurs potentiels d'une dégradation des environnements sonores urbains. La conséquence directe est que deux-tiers des citoyens se déclarent gênés par le bruit à leur domicile, le trafic routier étant régulièrement cité comme la source de bruit la plus gênante. Les enjeux sanitaires sont forts, le nombre d'années en bonne santé perdues à l'échelle de l'Europe étant estimé à 1M en Europe [1]. Les métropoles urbaines, puisqu'elles sont le siège à la fois des niveaux de bruit les plus importants et des densités de population les plus fortes, concentrent les expositions les plus élevées et donc l'essentiel des efforts consentis actuellement pour lutter contre le bruit. Le développement de modèles capables d'évaluer l'impact sur le bruit de politiques urbaines concernant l'aménagement (par exemple l'étude des liens entre la densité urbaine et l'exposition au bruit), ou la gestion de la mobilité (par exemple l'évaluation des stratégies de régulation du trafic routier et des politiques de transport multi-modal), représente donc un enjeu sociétal et environnemental fort.

La congestion urbaine est ciblée comme un point de blocage du développement des villes. Son coût en terme de temps passé, en particulier aux heures de pointe du matin et du soir, a fait l'objet d'études [2], donnant naissance par exemple à des politiques d'étalement de la demande de déplacements. Cependant, l'estimation des externalités environnementales que la congestion engendre, en particulier les nuisances sonores, se heurte à des verrous scientifiques encore non résolus. Les approches classiques de modélisation du bruit de trafic ne satisfont pas les critères de l'évaluation des stratégies de mobilité, car elles se limitent à une description du trafic trop agrégée, qui repose sur les débits et les vitesses moyennes pour estimer la puissance acoustique des flux de véhicules [3]. Ces modélisations classiques font de surcroît des hypothèses simplificatrices sur l'évolution de ces flux en fonction des conditions de circulation, ne tenant aucun compte par exemple de l'affectation du trafic routier (répartition des véhicules sur le réseau en fonction des conditions de circulation). L'estimation fine des impacts acoustiques liés au trafic routier suppose en principe le recours à : i) une modélisation du trafic sensible aux conditions de circulation, c'est-à-dire reproduisant la cinématique des véhicules (vitesses et accélérations) et l'affectation dynamique des véhicules sur le réseau en fonction des conditions de circulation (stratégies individuelles de choix d'itinéraires), ii) une modélisation des émissions acoustiques elle-même sensible aux variables influentes (vitesses et accélérations des véhicules, composition du parc routier, etc.) [4].

Des approches de modélisation du bruit de trafic s'appuyant sur une modélisation dynamique du trafic routier ont vu le jour depuis une quinzaine d'années [5][6][7][8][9][10]. Le principe d'estimation des niveaux de bruit repose sur les trajectoires fournies par le modèle de trafic des véhicules présents sur le réseau, c'est-à-dire leur position, vitesse et accélération à chaque pas de temps (typiquement 1 seconde). Ces données servent à estimer la puissance acoustique de chaque véhicule à chaque pas de temps ; s'en suit une estimation de l'évolution temporelle des niveaux de bruit en une carte de récepteurs après un calcul de propagation acoustique. Ainsi, à l'inverse des approches classiques dites statiques, cette chaîne de modélisation dynamique permet de tester l'impact de stratégies de régulation du trafic modifiant la cinématique des véhicules. Elle permet en outre le calcul d'indicateurs acoustiques décrivant les variations des niveaux de bruit, là où les méthodes statiques se limitent à l'estimation d'indicateurs de bruit agrégés (niveaux de bruit moyens annuels par exemple) [11]. Cet apport est significatif car les variations des niveaux de bruit, et en particulier les émergences, ont un impact démontré sur la perception des environnements sonores [12] ainsi que sur leurs impacts sanitaires [13].

La chaîne de modélisation dynamique a été utilisée dans le passé pour comparer l'impact acoustique de différentes intersections [14][15], ou de différents réglages de feux de signalisation sur des corridors urbains [16][17]. Ces premières études soulignent que les stratégies de régulation du trafic limitant les variations de vitesses sont bénéfiques du point de vue acoustique, confortant des résultats obtenus par des observations [18]. Seulement, l'impact des phénomènes de réaffectation, qui sont très présents dans le cas de conditions de trafic congestionnées, n'a pas encore été analysé, car les études réalisées jusqu'à présent se limitaient à des réseaux couvrant seulement quelques intersections.

Les avancées récentes en terme de modélisation du trafic et de calculs acoustiques permettent désormais l'étude de réseaux plus grands. Dans cet article, un couplage entre un modèle dynamique de trafic, Symuvia¹, et un modèle de cartographie du bruit, Noisemodelling², est réalisé et appliqué à un réseau urbain situé dans l'agglomération Lyonnaise et couvrant une superficie d'environ 10 km². Il est possible à cette échelle d'étudier la dimension spatiale de la congestion urbaine en terme d'impact sur l'environnement sonore.

1. <http://www.licit-lyon.eu/themes/realisations/plateformes/symuvia/>.

2. <http://noise-planet.org/noisemodelling.html>

2. Méthode

2.1. Principe de modélisation

La chaîne de modélisation *dynamique* implémentée pour l'estimation du bruit de trafic routier consiste en un couplage entre le modèle dynamique de trafic Symuvia et le modèle de prédiction du bruit de trafic routier Noisemodelling. L'architecture du couplage entre les deux modèles est une adaptation des modèles *statiques* classiquement utilisés : là où les modèles statiques estiment les niveaux de bruit émis par le trafic routier à partir des débits et vitesses moyennes des flux de véhicules par tronçon routier, l'approche dynamique repose sur les trajectoires des véhicules estimées par le modèle de trafic pour déterminer à chaque pas de temps la puissance acoustique de chaque véhicule présent sur le réseau. La modélisation suit les 5 étapes suivantes (voir figure 1) :

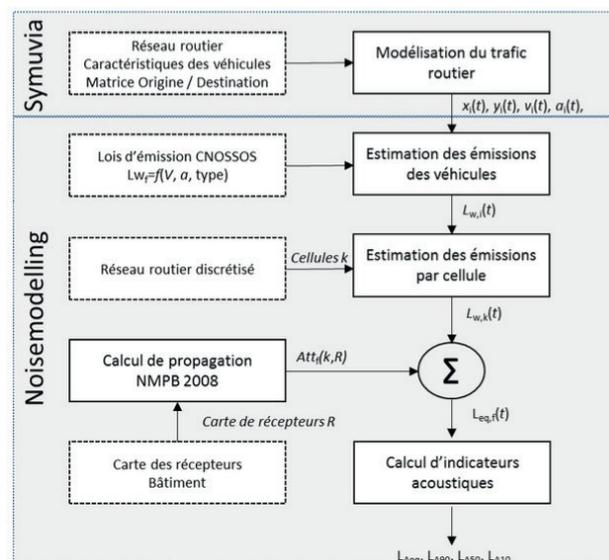


Figure 1. Principe de la modélisation dynamique du bruit implémentée

- Le modèle de trafic Symuvia estime, pour chaque véhicule i présent sur le réseau durant la simulation, sa position $(x_i(t), y_i(t))$, sa vitesse $v_i(t)$ et son accélération $a_i(t)$, avec un pas de temps $\Delta t = 1s$, à partir de données sur le réseau routier (nombre de voies par tronçon par sens de circulation, capacité maximale des tronçons, caractéristiques des intersections (durée et coordination des feux de signalisation, géométrie des carrefours giratoires, voies spécifiques réservées aux bus) et sur les caractéristiques des véhicules (itinéraires prévus, caractéristiques cinématiques pour chaque catégorie de véhicule). Les puissances acoustiques instantanées $L_{w,f,i}(t)$ sont calculées pour chaque véhicule à chaque pas de temps et pour chaque bande d'octave f entre 63 Hz et 8 kHz.
- Les puissances acoustiques instantanées des véhicules sont agrégées sur une grille fixe de points sources k , définie au préalable et suivant le réseau de voirie, donnant accès aux puissances acoustiques par cellule $L_{w,f,k}(t)$ par bande d'octave.

– L'atténuation $Att_r(k, R)$ entre le centre de chaque cellule k et chaque récepteur R est déterminée. Notons que ce calcul n'est fait qu'une seule fois, l'hypothèse étant faite que les conditions de propagation ne varient ni au cours du temps durant la simulation, ni sur l'ensemble de la cellule.

– Le niveau équivalent instantané $L_{eq,f}(t)$ est calculé par bande d'octave pour chaque récepteur, à chaque instant t . Les variations de niveaux de sonores au sein de chaque pas de temps $\Delta t = 1s$ ne sont donc pas modélisées. Un calcul d'indicateurs acoustiques est ensuite réalisé à partir de l'évolution temporelle du niveau équivalent $L_{eq,f}(t)$, agrégés par période sur la durée de la simulation.

Le couplage entre Symuvia et des modèles acoustiques a fait l'objet de validations expérimentales. Dans [6], le couplage entre Symuvia et le logiciel calcul de propagation Mithra a été validé pour l'estimation des niveaux sonores L_{Aeq} et des distributions de bruit. Dans [11], la validation a été étendue à l'estimation d'indicateurs spectraux et des motifs de bruit moyen se répétant à chaque cycle de feu. À chaque fois, la campagne expérimentale consistait en des mesures en 10 points le long du cours Lafayette, à Lyon. Si le modèle de propagation n'était pas le même que celui utilisé dans cette étude, les phénomènes physiques représentés dans Mithra et Noisemodelling étant les mêmes, et les modules de calcul de Noisemodelling ayant fait l'objet de validations séparées, la validité de la chaîne de modélisation nouvellement construite est supposée en premier lieu (voir détails dans [19][20]).

2.2. Modélisation du trafic

La plateforme numérique sur laquelle repose la simulation du trafic, Symuvia, est dédiée à l'analyse des simulations dynamiques de trafic. Symuvia comprend un outil d'édition des jeux de données de simulation (réseau d'écoulement et scénarios), un noyau de calcul et des outils d'analyse et de restitution des résultats. Ces composants sont dimensionnés afin de réaliser des simulations de trafic sur plusieurs heures, pour une zone urbaine pouvant couvrir plusieurs km².

Le noyau de calcul de Symuvia intègre un module d'affectation (calcul des itinéraires des véhicules) et un module d'écoulement (calcul des trajectoires) :

- Le module d'affectation détermine, en fonction de l'origine et la destination de chaque véhicule, son itinéraire en fonction des conditions de trafic sur le réseau routier [23][24]. Le module d'affectation opère des itérations jusqu'à converger vers l'état d'équilibre du réseau pour chaque plage horaire.
- Le module d'écoulement s'appuie sur un modèle microscopique à loi macroscopique étendue qui permet de prendre en compte les spécificités de l'écoulement du trafic en milieu urbain : accélération bornée des véhicules [25], modélisation de l'écoulement au sein des intersections [26], modélisation spécifique de changements de voies [27], transports en commun [28], etc.

Les différents modules de Symuvia ont été calibrés pour la production d'indicateurs décrivant l'opérabilité du réseau routier, tels que les temps de parcours ou les débits mesurés en différents points du réseau. Symuvia a de plus déjà été couplé avec des modèles acoustiques et de qualité de l'air pour des évaluations environnementales [3][6][11][29].

2.3. Modélisation acoustique

NoiseModelling consiste en un module gratuit et open-source du Système d'Information Géographique OrbisGis³, dont l'objectif initial est la production de cartes statiques de bruit routier [20]. Les algorithmes du module NoiseModelling tirent parti des méthodes d'analyse spatiale offertes par l'environnement SIG. Le calcul d'indicateurs acoustiques à partir de la simulation de trafic s'opère en trois étapes :

- Les données géographiques, provenant de la base de données libre Open Street Map (OSM)⁴, sont importées au sein d'OrbisGis.
- Les trajectoires fournies par Symuvia en format xml sont importées sous forme de table au sein d'OrbisGis, *via* une fonction spécifique créée pour les besoins de cette étude.
- Un ensemble de requêtes SQL permet les calculs acoustiques.

Le noyau de calcul de Noisemodelling, appelé par ces requêtes SQL, dissocie l'estimation des émissions sonores et l'évaluation de la propagation du bruit des sources aux récepteurs.

Les calculs d'émissions utilisés suivent la méthode européenne CNOSSOS, qui dissocie les composantes liées au bruit de roulement et au bruit moteur [30], pour estimer la puissance acoustique en fonction du type de véhicule et de sa vitesse. Un correctif est appliqué pour prendre en compte l'accélération instantanée des véhicules, qui suit la loi d'émission Imagine [31] (correctif ΔLw égal à l'accélération instantanée du véhicule multipliée par une constante). La prise en compte des accélérations à chaque instant est un élément essentiel du calcul pour rendre compte de l'impact de la cinématique des véhicules sur les niveaux de bruit [4]. Notons que la méthode Imagine est préférée à CNOSSOS pour le calcul du correctif en fonction des accélérations car CNOSSOS, prévue pour estimer les émissions de flux de véhicules, s'appuie sur un correctif en fonction de la distance aux intersections, moins approprié au cadre de modélisation dynamique.

La méthode de propagation utilisée est la méthode CNOSSOS, qui reproduit l'essentiel des phénomènes physiques affectant la propagation des ondes sonores : réflexions sur les parois, absorption atmosphérique, effets de sols, diffraction [20].

Les contributions de chaque cellule sont ensuite sommées

à chaque pas de temps pour estimer l'évolution du $L_{eq,f}(t)$, puis les niveaux par bande d'octave sont sommés pour constituer le niveau équivalent pondéré $A L_{Aeq}(t)$. Enfin, ces données ls servent au calcul des indicateurs acoustiques sur la période de calcul.

2.4. Étude de cas et paramètres de l'étude

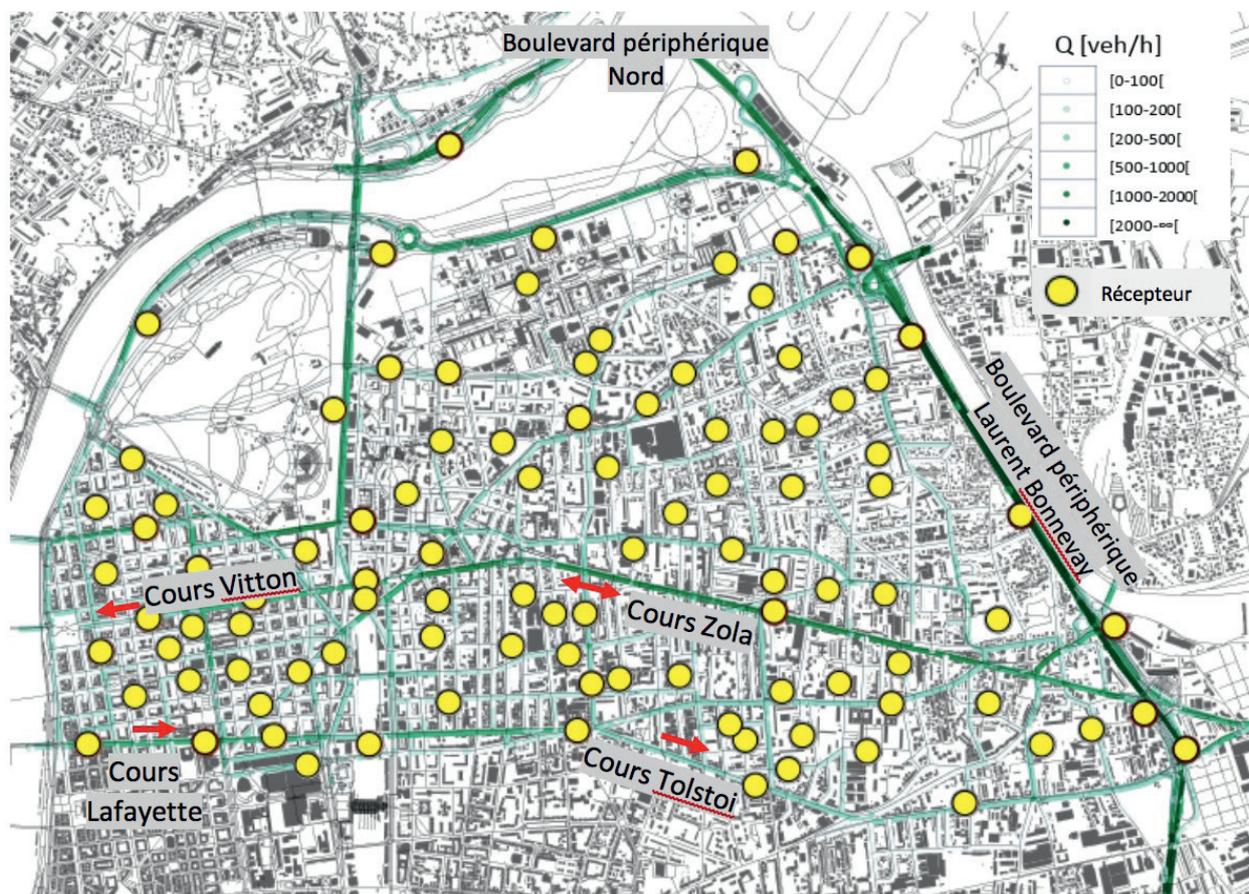
L'étude de cas consiste en l'évaluation de l'impact acoustique du trafic routier sur un réseau urbain d'environ 10 km² situé dans l'agglomération Lyonnaise, couvrant les 3^e et 6^e arrondissements de Lyon et une partie de Villeurbanne (voir figure 2). Le site est encadré au nord et à l'Est par le Boulevard périphérique Laurent Bonnevey et par le Boulevard Périphérique Nord. Des axes structurants et très circulés desservent le site : les cours Lafayette, Tolstoi et Zola d'Ouest en Est, les cours Zola et Vitton d'Est en Ouest. Enfin, un réseau de rues assez denses, notamment dans les 3^e et 6^e arrondissements Lyonnais, vient compléter le réseau. Le réseau de bâtiments est lui-même assez dense dans les 3^e et 6^e arrondissements Lyonnais (voir figure 2), faisant obstacle à la propagation du bruit à longue distance mais favorisant les réflexions dans les rues. La densité du bâti et du réseau routier, ainsi que les volumes de trafic, sont moindres dans l'agglomération de Villeurbanne, à l'Est de la zone (voir débits horaires pour la simulation de référence sur la figure 2). Le scénario implémenté simule 3h de trafic routier pendant l'heure de pointe matinale. Le scénario de trafic est spécifié en décomposant le réseau en sous-zones (75 sous-zones dans le cadre de cette étude) puis en spécifiant sur chaque sous-zone la demande en véhicule par seconde (c'est-à-dire le nombre de véhicule à générer à l'intérieur de la sous-zone à chaque seconde) et la répartition de cette demande vers les sous-zones destination. C'est ce que l'on appelle la matrice origine-destination. La figure 3 est une illustration des niveaux de demande d'une sous-zone particulière du réseau (en véhicule par seconde) agrégés par pallier de 15 mn entre 6h30 et 9h30. Trois niveaux de demande de déplacements sont considérés, allant d'une période P_1 durant laquelle le niveau de demande de déplacement est faible, à une période P_3 où la demande de déplacement est presque doublée (heure de pointe matinale). Le modèle d'affectation a été validé de manière à reproduire les débits mesurés sur site durant la période d'intérêt dans le cadre du projet Magnum⁵.

Trois types de véhicules sont représentés dans la simulation trafic : les véhicules légers (97% des véhicules générés sur le réseau), les poids lourds (2.5% des véhicules générés sur le réseau) et les bus (0.5% des véhicules générés sur le réseau, suivant le réseau de bus et donc non concernés par les processus d'affectation).

3. <http://orbisgis.org/>

4. <http://openstreetmap.fr/>

5. <https://magnum-erc.weebly.com/>

Figure 2. Réseau et position des récepteurs acoustiques

Du point de vue acoustique, les poids lourds et les bus sont considérés comme appartenant à la catégorie 3 de CNOSSOS. Les deux-roues motorisés ne sont pas pris en compte dans la simulation. De manière plus générale, la variabilité des émissions n'est pas considérée et chaque véhicule a donc la même puissance acoustique à conditions cinématiques équivalentes. Ce choix est motivé par le fait que : (i) l'introduction des deux-roues dans Symuvia nécessiterait un travail spécifique, (ii) le modèle construit est dédié à l'estimation d'indicateurs caractérisant les environnements sonores moyens et non les aspects événementiels. L'estimation d'indicateurs de pics de bruit nécessiterait un travail complémentaire discuté dans la section 4. Ainsi, les bruits de klaxons sont eux aussi exclus de la modélisation.

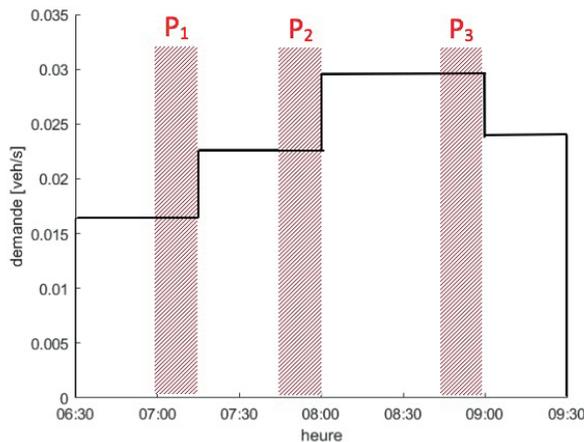
Figure 3. Chronique des niveaux de demande, pour une sous-zone particulière, durant la simulation et périodes retenues pour les calculs acoustiques

Trois périodes de 15 mn sont retenues pour effectuer les calculs acoustiques : P_1 [07:00 - 07:15], P_2 [07:45 - 08:00] et P_3 [08:45 - 09:00]. Par la suite, les variables se rapportant à la période P_i seront accompagnées de l'indice i : par exemple, Q_1 se réfère aux débits durant P_1 , V_2 aux vitesses moyennes durant P_2 . Les périodes sont choisies à la fin des périodes trafic, de manière à ce que les conditions d'écoulement du trafic soient stabilisées. Des études ont démontré que 15 mn est une période en général suffisante pour caractériser les environnements sonores urbains [21]. Le tableau 1 donne un résumé des paramètres qui ont été utilisés pour le calcul acoustique pour cette étude. L'hypothèse est

faite d'un environnement sans pluie ni vent, paramètres pouvant impacter les niveaux de bruit ; cette hypothèse se justifie par le fait que la modélisation se concentre sur l'impact du trafic routier sur le bruit, les scénarios étant analysés relativement les uns par rapport aux autres.

100 récepteurs sont disposés aléatoirement sur le réseau, mais de manière à obtenir une répartition spatiale homogène et à couvrir tous les types de rues (voir figure 2). Les indicateurs retenus pour la caractérisation des environnements sonores sont le niveau équivalent pondéré $A L_{Aeq}$ (moyenne énergétique des 900 valeurs de $L_{Aeq,1s}$ calculées durant la simulation), ainsi que les indicateurs statistiques L_{A10} , L_{A50} et L_{A90} , représentant les niveaux dépassés respectivement durant 10%, 50% et 90% du temps sur la durée de la simulation. Ces trois indicateurs statistiques renseignent sur l'amplitude et la distribution temporelle des niveaux de bruit ; le L_{A90} est par exemple souvent utilisé pour décrire le bruit de fond, alors que le L_{A10} désigne des niveaux de bruit élevés à l'échelle de la période considérée. En terme de niveaux de bruit de trafic routier, est considéré comme très bruyant un environnement pour lequel le L_{Aeq} en période diurne dépasse 70 dB(A) (points noirs du bruit routier). En milieu urbain, les zones calmes sont définies par un L_{Aeq} inférieur à 55 dB(A).

Tableau 1. Valeurs données aux paramètres définis par l'utilisateur dans cette étude pour la propagation du son



Paramètres	Configuration pour cette étude
Ordre de réflexion maximal	2
Ordre de diffraction maximal	1
Distance source-récepteur maximale	500 m
Hauteur des bâtiments	10 m
Hauteur des récepteurs	1.5 m
Coefficient d'absorption du sol	G=0
Coefficient d'absorption des parois	G=0.23
Résolution spatiale de la grille de points sources	D=20m

3. Résultats

3.1. Période P₁

La figure 4 synthétise les indicateurs trafic (débits sur la figure 4a et vitesses moyennes sur la figure 4b), et acoustiques ($L_{Aeq,P1}$ sur la figure 4a et $L_{A90,P1}$ sur la figure 4b) issus de la simulation. La période P₁ correspond à la plage horaire [07:00 - 07:15], durant laquelle les débits sont déjà assez élevés, notamment sur les axes structurants évoqués ci-dessus (voir figure 4a). Le trafic s'écoule malgré tout de manière relativement fluide, avec des vitesses moyennes supérieures à 30 km/h sur une bonne partie du réseau (voir figure 4b). L'environnement sonore est très corrélé à la structure du réseau routier, les niveaux de bruit étant très élevés le long du périphérique, où le $L_{Aeq,P1}$ dépasse les 70 dB(A). Le bruit de fond, matérialisé par le $L_{A90,P1}$, y est aussi extrêmement élevé, le $L_{A90,P1}$ dépassant lui aussi 70 dB(A). Cette constance dans les niveaux de bruit élevés, due à l'effet combiné du flux continu de véhicules et de leur vitesse élevée (vitesses moyennes supérieures à 70 km/h), est caractéristique des environnements sonores au bord des périphériques [34]. Les niveaux de bruit, bien qu'élevés, sont plus faibles sur les axes structurants Ouest-Est et Est-Ouest, le $L_{Aeq,P1}$ y étant compris en général entre 60 et 70 dB(A). Le bruit de fond y est également plus faible, de l'ordre de 50 dB(A), la régulation du trafic par les feux de signalisation, accentuée par le fait que ces axes sont en sens unique, ménageant des périodes de calme à l'échelle du cycle de feu. Des représentations sont proposées dans la Section 3d pour rendre compte localement de cette dynamique

du bruit. Enfin, le réseau secondaire de petites rues est marqué par des débits très faibles, souvent inférieurs à 200 veh/h, entraînant des niveaux de bruit assez faibles, avec des $L_{Aeq,P1}$ de l'ordre de 50dB(A) et des $L_{Aeq,P1}$ compris entre 40 et 45 dB(A).

3.2. Période P₂ : [07:45 - 08:00]

La période P₂, qui correspond à la plage horaire [07:45 - 08:00], est marquée par une hausse de la demande de déplacements, voir figure 3, qui se répercute logiquement par une augmentation des débits sur le réseau. La figure 5a, qui montre la cartographie de l'évolution des débits (ratio $r_{Q_{2-1}} = Q_2 / Q_1$), indique cependant que cette augmentation n'est pas uniformément répartie sur le réseau : certains axes secondaires voient leur nombre de véhicules doublé voire triplé, alors que les débits restent stables voire diminuent sur certains axes plus circulés, comme sur le cours Zola ou le boulevard périphérique. Ceci s'explique par une baisse des vitesses moyennes, et les reports d'itinéraires qu'elle induit. En conséquence, la hausse des niveaux de bruit sur le réseau est elle-même non uniformément répartie sur le réseau : les points à proximité des rues où les débits ont fortement augmenté voient leur niveau de bruit augmenter significativement, avec des $\delta L_{Aeq,2-1} = L_{Aeq,P2} - L_{Aeq,P1}$ de l'ordre de +2 à +3 dB(A), alors que la hausse du L_{Aeq} est comprise entre +0.5 et +1.5 dB(A) sur une bonne partie du réseau. Un gradient spatial est également observé, notamment en ce qui concerne le bruit de fond, avec des $\delta L_{A90,2-1} = L_{A90,P2} - L_{A90,P1}$ inférieurs à 0.5 dB(A) sur toute la partie Est du réseau, à l'exception du périphérique, alors que le $\delta L_{A90,2-1}$ dépasse régulièrement 3 dB(A) à l'Ouest du réseau (voir figure 5b).

3.3. Période P₃ : [08:45 - 09:00]

La période P₃ correspond à la plage horaire [08:45 - 09:00], marquée par le pic de demande de déplacements, voir figure 3. La hausse des débits qui était visible durant P₂ est accentuée durant P₃, et étendue sur une plus grande partie du réseau. Les niveaux de bruit par rapport à P₁ augmentent conjointement, une hausse du L_{Aeq} de plus de 3 dB(A), voire 5 dB(A), étant observée par endroits, notamment à l'Ouest du réseau où la hausse des débits est très prononcée (voir figure 6a). La hausse des niveaux de bruit sur le périphérique est contenue en deçà 1.5 dB(A), de même que durant P₂.

La baisse de vitesse qui découle de l'augmentation significative du nombre de véhicules sur le réseau par rapport à P₁ est finalement assez peu marquée, signe vraisemblable que le réseau n'atteint pas sa capacité maximale. Les vitesses moyennes baissent malgré tout de manière significative le long du cours Emile Zola et de la rue Juliette Récamier (voir figure 6b) qui sont le siège d'une congestion. La conséquence de cette congestion est localement une augmentation très importante du bruit de fond, liée à présence continue de véhicules à proximité des récepteurs acoustiques, les $\delta L_{A90,3-1}$ dépassant 5 dB(A) par endroits (notamment le long de la rue Juliette Récamier).

La répartition spatiale de l'augmentation des niveaux reste inégale, la partie Ouest du réseau étant nettement plus impactée que la partie Est. La carte laisse également entrevoir une distinction dans la hausse des niveaux de bruit entre quartiers calmes et bruyants. Ce point est regardé plus en détails dans la section suivante.

Figure 4. Période P_1 : cartographie des indicateurs trafic et acoustique a) débits et L_{Aeq} ; b) vitesses moyennes et L_{A90}

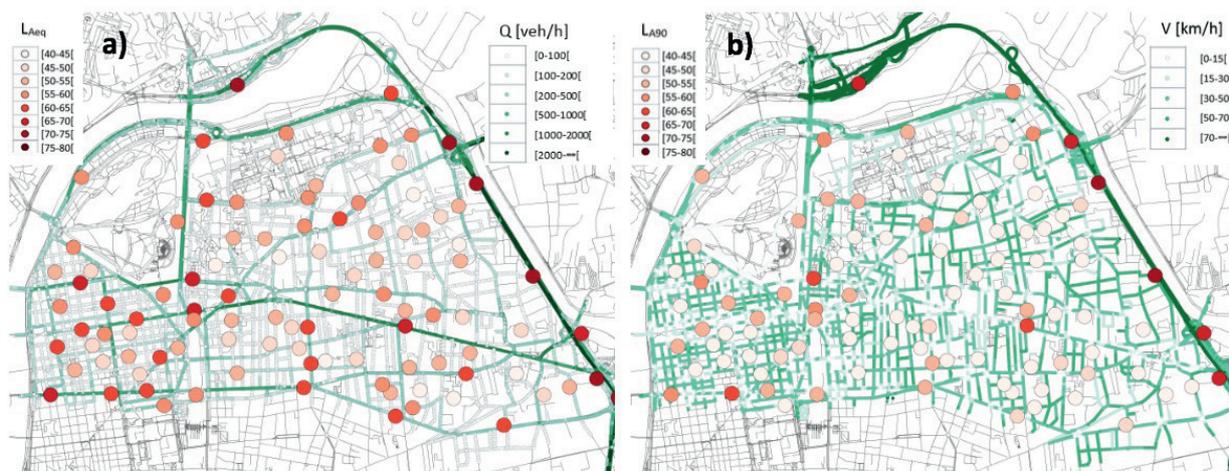


Figure 5. Période P_2 : cartographie, relativement à la période P_1 , des indicateurs trafic et acoustique a) rapports des débits rQ_{2-1} et différences de L_{Aeq} $\delta L_{Aeq,2-1}$; b) différences de vitesses moyennes δV_{2-1} et de L_{A90} $\delta L_{A90,2-1}$

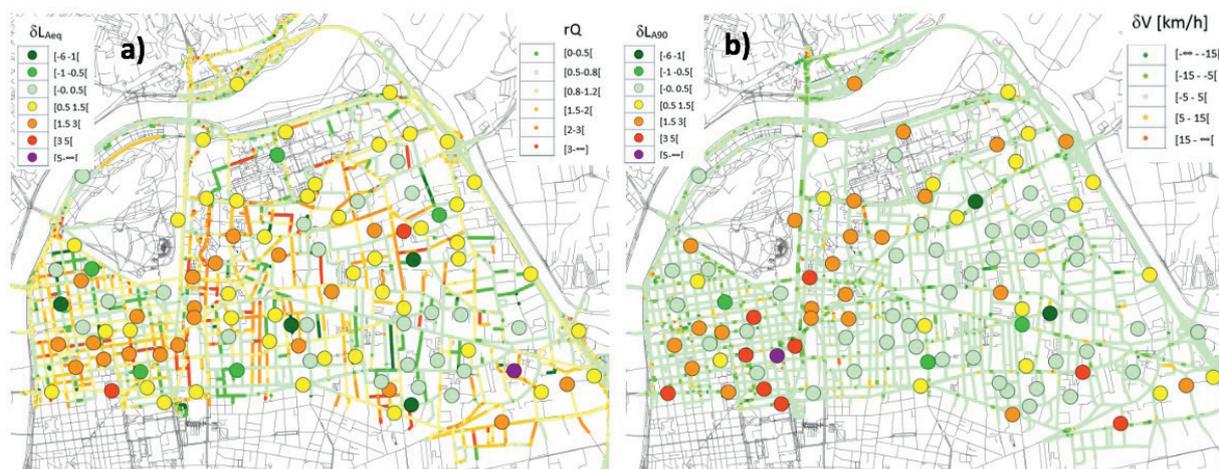
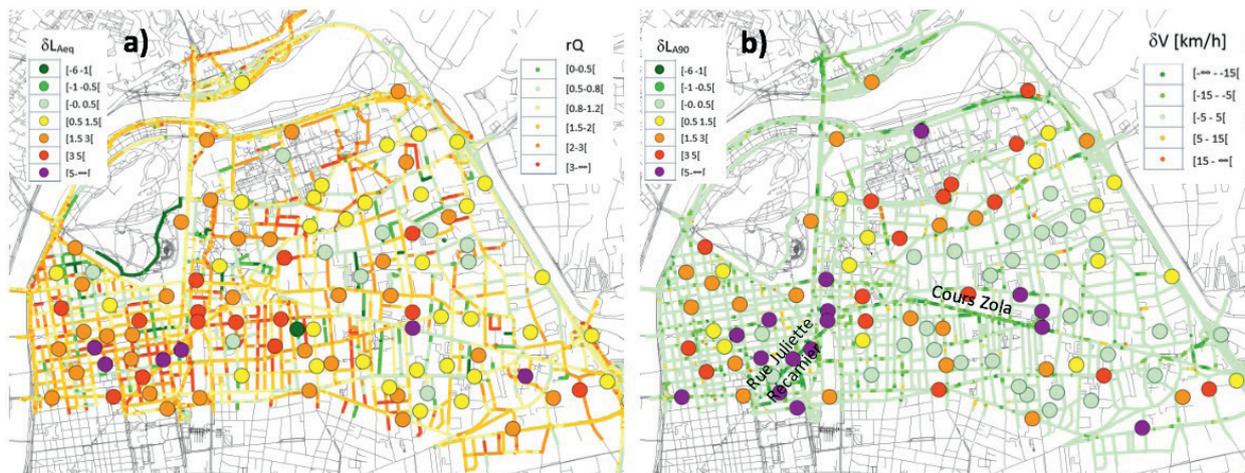
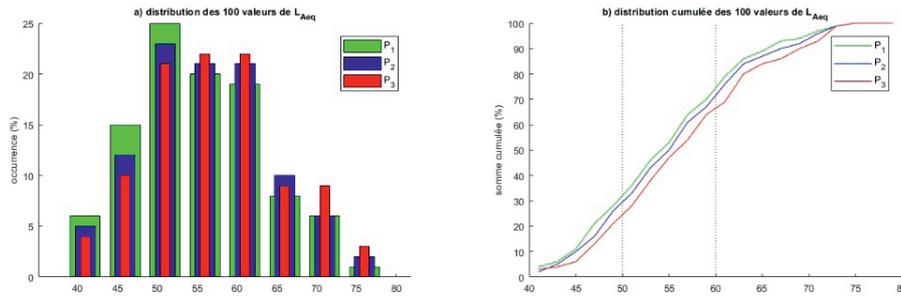


Figure 6. Période P_3 : cartographie, relativement à la période P_1 , des indicateurs trafic et acoustique a) rapports des débits rQ_{3-1} et différences de L_{Aeq} $\delta L_{Aeq,3-1}$; b) différences de vitesses moyennes δV_{3-1} et de L_{A90} $\delta L_{A90,3-1}$



3.4. Analyse détaillée des résultats acoustiques

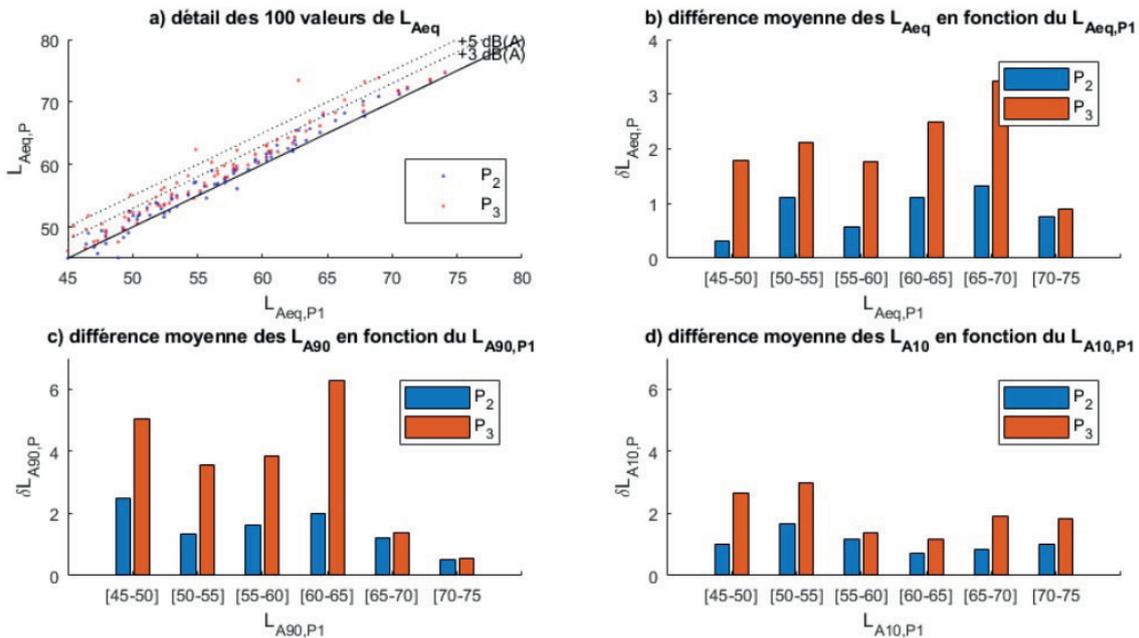
Figure 7. Analyse des valeurs de L_{Aeq} aux 100 récepteurs acoustiques a) distribution des valeurs de L_{Aeq} ; b) distribution cumulée des valeurs de L_{Aeq}



La figure 7 détaille les évolutions de l'environnement sonore sur le réseau durant les périodes P_1 , P_2 et P_3 . La distribution des valeurs de L_{Aeq} estimées aux 100 récepteurs souligne la raréfaction des points pour lesquels le niveau L_{Aeq} est inférieur à 50 dB(A), les distributions se déplaçant vers des niveaux plus élevés pour les périodes P_2 et P_3 . Le pourcentage de points pour

lesquels le niveau est inférieur à 50 dB(A), niveau sonore caractéristique d'environnements sonores calmes, est respectivement 28%, 26% et 21% pour les périodes P_1 , P_2 et P_3 . Les mêmes pourcentages pour un seuil à 60 dB(A), pour lesquels les niveaux de bruit peuvent commencer à s'avérer gênants, sont respectivement 70%, 67% et 64% pour les périodes P_1 , P_2 et P_3 .

Figure 8. Synthèse des résultats acoustiques pour les périodes P_2 et P_3 a) détail des 2*100 couples de valeurs $L_{Aeq,P1}$ vs $L_{Aeq,P2}$ et $L_{Aeq,P3}$; b) différence moyenne des L_{Aeq} en fonction du $L_{Aeq,P1}$; c) différence moyenne des L_{A90} en fonction du $L_{A90,P1}$; d) différence moyenne des L_{A10} en fonction du $L_{A10,P1}$



La section précédente a souligné que l'augmentation des niveaux de bruit n'était pas homogène sur le réseau. La figure 8b souligne que pour les points les plus bruyants (points localisés le long du périphérique, pour lesquels $L_{Aeq,P1} > 70$ dB(A)), la hausse de L_{Aeq} moyenne reste en deçà 1 dB(A), alors que les points dont le $L_{Aeq,P1}$ est compris entre 65 et 70 dB(A) voient leur niveau augmenter de plus de 3 dB(A) pour la période P_3 , soulignant un lien direct entre l'augmentation des niveaux de bruit occasionné par la hausse de demande en déplacements et l'environnement sonore initial.

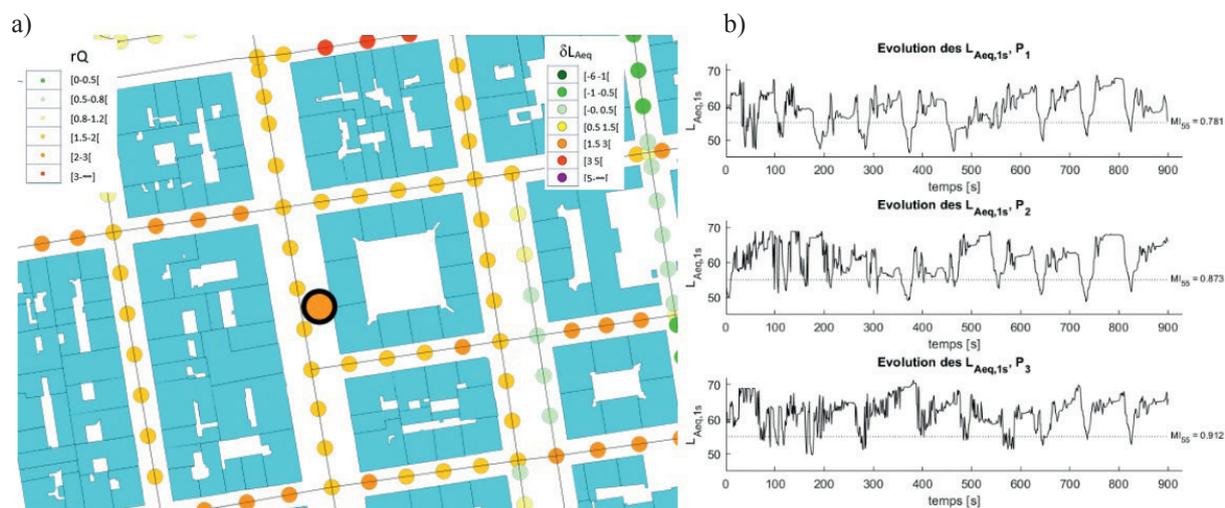
La figure 8a montre même que pour certains points, la différence entre les L_{Aeq} peut dépasser 5 dB(A) lors de la période P_3 . La figure 8a montre également le très faible nombre de points pour lesquels les niveaux de bruit diminuent durant les périodes P_2 et P_3 . Enfin, les figure 8c et figure 8d montrent que l'augmentation des niveaux de bruit est également non uniforme dans le temps et impacte la dynamique du bruit : le bruit de fond augmente davantage que les niveaux élevés, les hausses de L_{A90} étant bien supérieures aux hausses de L_{A10} . Ainsi, l'augmentation du nombre de véhicules sur le réseau a

tendance à comprimer la dynamique du bruit, augmentant davantage le bruit de fond que les niveaux déjà élevés. Ceci s'explique par la raréfaction des instants de la simulation où peu de véhicules se trouvent à proximité du récepteur.

La chaîne de modélisation construite permet l'analyse fine de cette dynamique, puisqu'elle donne accès à l'évolution des niveaux instantanés $L_{Aeq,1s}$. Un exemple d'analyse plus fine est donné pour le récepteur n°22. La figure 9a illustre l'augmentation de L_{Aeq} au récepteur n°22 (+2.8 dB), expliqué par l'augmentation des débits sur les routes voisines. La figure 9b représente l'évolution du $L_{Aeq,1s}$ pour chacune des trois périodes. La courbe pour la période P_1 montre l'évolution caractéristique des niveaux de bruit dans les rues où le trafic routier est cadencé par les feux de signalisation, évolution marquée par une alternance régulière entre niveaux de bruit élevés et niveaux plus faibles. Des indicateurs acoustiques ont

été proposés dans [35] pour souligner cette dynamique. Les « respirations » durant les périodes de calmes peuvent être caractérisées par le MI_{55} , qui représente le ratio du temps pendant lequel les niveaux de bruit dépassent 55dB(A) : il est de $MI_{55} = 0.78$ (soit 22% du temps en dessous 55 dB(A)) pour la période P_1 . La hausse des débits dans la rue Maréchal Foch, ainsi que dans les rues voisines, a pour conséquence une raréfaction des périodes de calme qui étaient renouvelées à l'échelle du cycle de feu durant la période P_1 : le temps pendant lequel le $L_{Aeq,1s}$ est en deçà 55 dB(A) chute à 13% pour P_2 , puis à 9% pour P_3 . L'impact de cette dynamique du bruit sur l'environnement sonore en termes perceptifs, et en particulier l'altération des périodes de calme, n'est pas encore complètement établi ; mais des premières études semblent montrer l'importance des variations de niveaux de bruit sur la qualité des environnements sonores [36] [37].

Figure 9. a) Environnement au récepteur n°22 ; b) Évolution du $L_{Aeq,1s}$ au récepteur n°22 pour les périodes P_1 , P_2 et P_3



4. Conclusion

La gestion du trafic routier aux heures de pointe est un enjeu crucial pour le développement des métropoles, notamment en raison des impacts environnementaux générés. Une chaîne de modélisation dynamique, couplant le modèle de trafic dynamique Symuvia (LICIT, Ifsttar / ENTPE) et l'outil de prédiction des niveaux sonores Noisemodelling (UMRAE, Ifsttar / Cerema), est constituée dans cet article pour évaluer l'impact du trafic routier sur les environnements sonores à l'échelle d'un réseau de trafic urbain d'environ 10 km² situé à Lyon/Villeurbanne. Le modèle de trafic est sensible aux phénomènes d'affectation dynamique dépendants des conditions de circulation (reports d'itinéraires), et reproduit la cinématique des véhicules présents sur le réseau. Le modèle acoustique estime les niveaux de puissance acoustique instantanés en fonction de la cinématique des véhicules, puis les niveaux de bruits en une carte de récepteurs après un calcul de la propagation du bruit en fonction de données sur le réseau de bâtiments.

La simulation, qui reproduit 3h d'un scénario d'heure de pointe matinale, souligne l'augmentation des niveaux de bruit liée à la hausse de demandes en déplacements. Elle met également en évidence que la hausse des niveaux de bruit : i) n'est pas uniformément répartie sur le réseau et impacte davantage les rues où s'opèrent les reports de trafic, les niveaux de bruit augmentant peu par exemple sur le périphérique en raison d'une augmentation plus faible de la quantité de véhicules comparativement aux autres rues ; ii) impacte davantage le bruit de fond (et notamment le L_{A90} , niveau dépassé 90% du temps), raréfiant les périodes de calme sur le réseau, ce qui s'explique par une densité plus grande de véhicules. Une analyse plus détaillée est possible localement à travers l'analyse de l'évolution du $L_{Aeq,1s}$ et l'étude d'indicateurs acoustiques spécifiques (ici la distribution des $L_{Aeq,1s}$ et en particulier le ratio du temps où le $L_{Aeq,1s}$ dépasse le seuil de 55 dB(A)).

Certaines améliorations au modèle sont toutefois souhaitables, et feront l'objet d'une recherche dans un futur proche.

– L'estimation d'indicateurs d'émergence (pics de bruit), qui s'avère importante pour caractériser la gêne due au trafic routier notamment dans les rues peu circulées ou pour les périodes nocturnes, fait l'objet d'études actuelles. Ceci nécessite des analyses acoustiques complémentaires portant sur la distribution des émissions des véhicules, voire une réflexion sur la distribution des comportements de conduite au sein du modèle de trafic. L'ajout d'une classe de véhicules dédiée aux deux-roues est également un élément clé de l'estimation des pics de bruit. Elle implique un travail spécifique en terme de modélisation du trafic, notamment de comprendre leur interaction avec les autres classes de véhicules (paramètres de changements de voies, etc.) et de calibrer leur cinématique (accélération moyenne, etc.).

– Une étude approfondie des puissances des véhicules à basse vitesse et en régime accéléré est également nécessaire pour affiner les estimations en période congestionnée ou aux abords des intersections.

– Les briques trafic et acoustique du modèle ayant été validées séparément, et la validité du couplage dynamique ayant été démontrée mais pour une chaîne de modélisation différente (voir références [6] et [11]), il paraît désormais important de mener une campagne expérimentale à l'échelle du réseau pour valider les résultats avancés.

– L'étude de réseaux de grande taille, tel que proposé dans cet article, a été rendue possible par la mise en place d'outils d'édition de réseaux efficaces, par le développement de routines d'import de réseau de voirie à partir de SIG, par la conception de méthodes de scénarisation permettant à partir de données de différentes sources de construire efficacement les matrices origine-destination. L'étude prochaine d'autres réseaux de taille similaire est maintenant nécessaire pour pouvoir généraliser des résultats avancés dans cet article.

– Une étude perceptive doit enfin être menée pour corréler les indicateurs acoustiques que la simulation permet de calculer au caractère agréable ou désagréable des environnements sonores, ou à la gêne subie par les riverains.

À terme, le modèle proposé permettra l'évaluation de l'impact acoustique, actuellement inconnu, de stratégies de gestion du trafic routier à l'échelle d'un réseau urbain : politiques d'étalement de la demande, limitation des vitesses sur une portion du réseau, interdiction de circuler pour certains véhicules (motos, véhicules anciens, etc.) dans un quartier, etc.

5. Références

1. World health Organization. Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. 126p
2. CEBR. The future economic and environmental costs of gridlock in 2030. An assessment of the direct and indirect economic and environmental costs of idling in road traffic congestion to households in the UK, France, Germany and the USA, Report for INRIX, July 2014
3. Can A, Leclercq L, Lelong J. Dynamic estimation of urban traffic noise: influence of traffic and noise source representations. *Applied Acoustics* 69(10) (2008) 858-867
4. Can A, Aumond P. Estimation of road traffic noise emissions: the influence of speed and acceleration. *Transportation Research Part D*, 2018
5. Leclercq L, Lelong J (2001) Dynamic evaluation of urban traffic noise. In: *Proceedings of the 17th ICA, Roma, Italy*
6. Can A, Leclercq L, Lelong J, Defrance J (2009) Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: experimental evidence. *Appl Acoust* 70(6):821-829
7. Heltimo J, Niitymaki J, Björk E (2003) A microlevel method for road traffic noise prediction. *Advances in transport 8, urban transport VIII: urban transport and the environment in the 21st century*
8. De Coensel B, De Muer T, Yperman I, Botteldooren D. The influence of traffic flow dynamics on urban soundscape. *Applied Acoustics* 66 (2005) 175-194
9. Oshino Y, Tsukui K (2006) Investigation into the noise map based on traffic flow prediction in the citywide road network. In: *Proceedings of Euronoise, Tampere, Finland, May 30-June 1 2006*, 6p
10. Hou Q, Cai M, Wang H. Dynamic modeling of traffic noise in both indoor and outdoor environments by using a ray tracing method. *Building and Environment* 121 (2017) 225-237
11. Can A, Leclercq L, Lelong J, Botteldooren D. Traffic noise spectrum analysis: Dynamic modeling vs. Experimental observations. *Applied Acoustics* 71(8) (2010) 764-770
12. Lavandier C., Barbot B., Terroir J., Schütte M., "Impact of aircraft sound quality combined with the repetition of aircraft flyovers on annoyance as perceived activity disturbance in a laboratory context", *Applied Acoustics*, Vol. 72(4), pp.169-176, mars 2011
13. Basner et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *Lancet*. 2014 Apr 12; 383(9925): 1325-1332
14. Chevallier E, Can A, Nadji M, Leclercq L. Improving noise assessment at intersections by modeling traffic dynamics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14(2) (2009) 100-110
15. Estévez-Mauriz L, Forssén J, Kropp W, Zachos G. Traffic dynamics, road design and noise emission: a study case. *Proceedings of the 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise)*, Maastricht, Netherlands, 2015
16. Can A, Chevallier E, Nadji M, Leclercq L. Dynamic traffic modeling for noise impact assessment of traffic strategies. *Acta Acustica united with Acustica* 96(3) (2010) 482-493
17. De Coensel B, Can A, Botteldooren D. Effect of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions. *Environmental Modelling and Softwares* 35 (2012) 74-83
18. Bendtsen H, Haberl J, Sandberg U, Watts G, Pucher E. SILVIA Project Deliverable 12. Traffic Management and Noise Reducing Pavements -Recommendations on Additional Noise Reducing Measures. SILVIA-DTF-DRI-008-11-WP5-020205. 90p. 2000

19. Mithra, Manuel technique. *Mithra 5.0*; 2002: p. 58
20. Fortin N, Bocher E, Petit G, Gouge A, Picaut J, Dutilleul G. Urban noise maps in a GIS. In: *Open Source Geospatial Research and Education Symposium* [Internet]. 2012. p. 227–35. Available from: https://www.researchgate.net/publication/278381211_Urban_noise_maps_in_a_GIS
21. Brocolini L, Lavandier C, Quoy M, Ribeiro C. Measurements of acoustic environments for urban soundscapes: choice of homogeneous periods, optimization of durations, and selection of indicators. *J Acoust Soc Am.* 2013;134(1):813–21
22. Ramis J, Alba J, Garcia D, Hernandez F. Noise effects of reducing traffic flow through a spanish city. *Applied Acoustics* 64 (2003) 343-364
23. Leclercq L, Geroliminis N. Estimating MFDs in simple networks with route choice. *Transportation Research Part B: Methodological* 57, 468-48
24. Laval JA, Leclercq L, Chiabaut N. 2017, Minimal parameter formulations of the dynamic user equilibrium using macroscopic urban models: Freeway vs City Streets revisited, 2017. *Transportation Research part B*, [VOL], [PAGES], doi:10.1016/j.trb.2017.08.027
25. Leclercq, L. 2007. Bounded acceleration close to fixed and moving bottlenecks. *Transportation Research Part B*, 41 (3), 309-319
26. Chevallier E, Leclercq L. A macroscopic theory for unsignalized intersections. *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (10), 1139-1150
27. Laval JA, Leclercq L. Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. *Transportation Research Part B: Methodological* 42 (6), 511-522
28. Chiabaut N, Xie X, Leclercq L. Road capacity and travel times with Bus Lanes and Intermittent Priority Activation: Analytical Investigations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2315, 182-190. <http://dx.doi.org/10.3141/2315-19>
29. Lejri D, Can A, Leclercq L. Accounting for traffic speed dynamics when calculating pollutant emissions at urban scale, Soumis pour publication, *Transportation Research Part D*, 2017
30. Kephelopoulou S, Paviotti M, Anfosso-Lédée F, Van Maercke D, Shilton S, Jones N. Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping. *Sci Total Environ.* 2014 Jun;482–483:400–10
31. Peeters B, van Blokland G. The Noise Emission Model For European Road Traffic, EU-FP6 project, IMAGINE deliverable report no D11 (IMA55TR-060821-MP10), M+P, 2007, 66p
32. Can A, Leclercq L, Lelong J, Defrance J. Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: experimental evidence. *Applied acoustics* 70(6) (2009) 821-829
33. De Coensel B, Brown AL, Tomerini D. A road traffic noise pattern simulation model that includes distributions of vehicle sound power levels. *Applied Acoustics* 111, (2016) 170-178
34. Can A, Gauvreau B. Describing and classifying urban sound environments with a relevant set of physical indicators, *Journal of the Acoustical Society of America*, 137 (1), January 2015, 208-218
35. Can A, Leclercq L, Lelong J, Defrance J. Capturing urban traffic noise dynamics through relevant descriptors. *Applied Acoustics*, 69(12), 2008, p.1270-1280
36. Abiale – Laboratory study of the influence of noise level and vehicle number on annoyance - *Journal of Sound and Vibration* (1983) 90(3), 361-371
37. L-A Gille, Marquis Favre C., Klein A., Noise annoyance due to urban road traffic with powered two wheelers : quiet periods, order and number of vehicles. *Acta Acustica united with Acustica*, Volume 102, Number 3, May/June 2016, pp. 474-487(14)