

CFA/VISHNO 2016

Evaluation de la Qualité Acoustique des Parcours Piétonniers Urbains par Auralisation

J. Maillard et A. Kacem

CSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-D'Hères, France
julien.maillard@cstb.fr



LE MANS

L'auralisation des environnements sonores urbains constitue une approche intéressante venant compléter les outils de prévision quantitatifs. Les progrès réalisés ces dernières années permettent d'auraliser de manière réaliste le bruit des transports et les autres sources présentes en ville. Les environnements projetés, pour lesquels on ne dispose pas de captations sonores in-situ, peuvent ainsi être évalués perceptivement, à partir de l'écoute. L'auralisation autorise également le calcul d'indices de bruit dynamique basés sur le niveau de pression instantané issu du signal restitué. La caractérisation perceptive de l'environnement sonore est ainsi complétée par une analyse quantitative de l'exposition et de son évolution temporelle. Cet article présente des développements récents visant à étendre l'utilisation des outils d'auralisation pour la caractérisation de l'exposition le long d'un parcours piétonniers ou cycliste. Plutôt que de considérer l'environnement sonore en des points d'exposition fixes, l'écoute et l'analyse des indices de bruit dynamique sont réalisés pour un récepteur se déplaçant le long d'une trajectoire. L'objectif est la comparaison de plusieurs parcours et la valorisation des "parcours calmes", cette notion venant compléter les "zones calmes" introduites dans une récente directive européenne. Les principes de la technique mise en œuvre sont présentés, suivis des résultats de tests d'écoute pour différents parcours piétonniers d'un quartier urbain. L'analyse montre une bonne corrélation entre le désagrément sonore perçu et les indices de bruit calculés. Les résultats d'un test de jugement du réalisme des séquences auralisées sont également présentés.

1 Introduction

La modélisation des phénomènes d'émission et de propagation du bruit permet de prévoir notamment des niveaux de pression acoustique. Traditionnellement, ces niveaux sont présentés sous forme de valeurs numériques ou bien sous forme graphique (courbes, cartes de couleurs, etc.). Pour le non-spécialiste, des niveaux sonores ou des atténuations exprimées par exemple en décibels par bandes de fréquences restent souvent abstraits. Par ailleurs, les seuls niveaux de bruit ne suffisent pas toujours à évaluer le désagrément sonore pour des environnements particuliers dans lesquels par exemple plusieurs types de bruit se superposent. Ces raisons ont motivé le travail de recherche mené au CSTB dans le domaine de la simulation auditive (auralisation) d'environnements sonores, les outils développés permettant une évaluation perceptive des phénomènes de gêne, de la performance acoustique d'un matériau ou encore de la qualité acoustique d'un local.

Dans le domaine des environnements sonores urbains, le développement de systèmes d'auralisation répond à une demande croissante d'un grand nombre de sociétés et d'organismes s'occupant aussi bien de l'implantation d'infrastructures de transport, que d'aménagement urbain. Les travaux du CSTB effectués à ce jour sur le sujet permettent l'auralisation des bruits urbains et plus particulièrement du bruit de trafic routier grâce au couplage du moteur de rendu sonore à la simulation dynamique du trafic au sein du logiciel MithraSON (logiciel de prévision et d'auralisation des environnements sonores urbains) [1]. Au-delà de la restitution sonore, l'outil autorise également le calcul d'indices de bruit dynamique basés sur le niveau de pression instantané issu du signal auralisé [2]. La caractérisation perceptive de l'environnement sonore est ainsi complétée par une analyse quantitative de l'exposition et de son évolution temporelle. Notons également que l'approche par auralisation constitue un outil potentiellement intéressant pour le développement et l'amélioration des modèles perceptifs du désagrément sonore [3, 4]. Dans le cadre de ces travaux, les tests d'écoute peuvent être réalisés sur des séquences auralisées dont les paramètres physiques sont plus facilement contrôlables que dans le cas d'enregistrements in-situ.

Cet article présente une nouvelle fonctionnalité de l'outil d'auralisation en milieu urbain pour l'étude des parcours piétonniers ou cyclistes. Plutôt que de considérer

l'environnement sonore en des points d'exposition fixes, l'écoute et l'analyse des indices de bruit dynamique sont réalisés pour un récepteur se déplaçant le long d'une trajectoire. Parallèlement au développement de "zones calmes" pour améliorer l'environnement sonore urbain [5], ainsi que le recommande la Directive Européenne 2002/49/EC, la mise en valeur de "parcours calmes" constitue également un moyen d'action efficace contre la pollution sonore pour l'usager de la ville. Plusieurs travaux antérieurs ont montré l'intérêt de caractériser les propriétés spatiales et temporelles de l'exposition au bruit pour un auditeur en déplacement [6, 7, 8]. Dans ces travaux, l'exposition est caractérisée physiquement à partir de la prévision du niveau de bruit moyen au cours d'un déplacement de l'auditeur. Le travail présenté ici propose d'étendre ce type d'analyse à partir des séquences auralisées obtenues pour un auditeur mobile le long d'une trajectoire. Le calcul d'indices dynamiques est dans ce cas couplé à la perception par l'écoute. L'approche proposée rejoint ainsi d'autres travaux sur l'exposition au bruit en milieu urbain par la méthode "soundwalk" [9].

Après avoir brièvement rappelé les principes du système d'auralisation utilisé et l'approche spécifique de l'auditeur mobile le long d'une trajectoire, on présente une expérimentation conduite pour plusieurs parcours piétonniers définis sur un site réel. L'expérimentation se base sur des tests d'écoute à partir de séquences auralisées du bruit de trafic pour différents scénarios de trafics et de déplacements de l'auditeur. Elle vise d'une part à évaluer le réalisme des séquences auralisées et d'autre part à corréler le désagrément sonore perçu à différents indices acoustiques calculés à partir du signal auralisé.

2 Méthodologie

L'auralisation regroupe l'ensemble des techniques permettant la restitution auditive du champ sonore associé à un environnement simulé. Basée sur un modèle physique de l'émission et de la propagation acoustique, une séquence sonore auralisée est destinée à reproduire fidèlement le champ sonore réel, à la fois en termes de contenu fréquentiel et de niveaux sonores mais également en termes de propriétés spatiales grâce à des systèmes de restitution 3D adaptés. L'approche utilisée au CSTB pour l'auralisation des ambiances sonores en milieu urbain se caractérise par

la mise en oeuvre de traitements du signal temps réel de manière à disposer d'un système interactif facilitant la comparaison de scénarios. L'ambiance sonore auralisée intègre d'une part le bruit de trafic routier grâce au couplage à un moteur de trafic et d'autre part, les autres sources de bruit rencontrées en milieu urbain représentées soit à l'aide de sources ponctuelles fixes ou bien en mouvement le long de trajectoires prédéterminées. Un bruit résiduel constant sur l'ensemble de la zone étudiée peut également être ajouté afin de simplifier la modélisation de sources de bruit lointaines dont la contribution varie peut.

Le système d'auralisation du bruit urbain est représenté schématiquement sur la Figure 1. Il est composé de trois

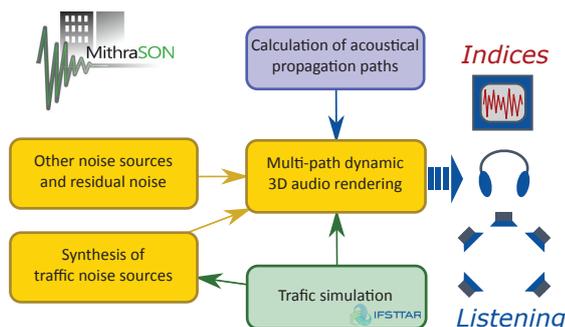


FIGURE 1 – Schéma général du système d'auralisation.

modules temps réel principaux : le moteur de trafic, le moteur de synthèse des signaux d'émission des véhicules et le moteur de rendu sonore 3D intégrant l'ensemble des effets de propagation. Un module supplémentaire prend en charge l'émission acoustique des autres sources de bruit présentes dans l'environnement (sources fixes, sources mobiles et sources de bruit résiduel).

Le moteur de trafic, développé par l'Ifsttar, utilise un modèle de trafic macroscopique paramétré par les valeurs de débits et les matrices origine-destination définies sur le réseau modélisé. A pas de temps réguliers, le moteur fournit l'état du trafic en spécifiant pour chaque véhicule sa position, vitesse et accélération. Ces données alimentent le moteur de synthèse des signaux d'émission du bruit moteur et du bruit de contact pneu-chaussée pour chaque véhicule auralisé ainsi que le module de propagation qui applique les effets de propagation en fonction de la position du véhicule et de l'auditeur.

Le moteur de synthèse des signaux source utilise une approche de synthèse granulaire temps réel [10]. Cette approche permet la synthèse du bruit source émis par un véhicule à moteur dont la vitesse et le régime moteur varient en fonction du temps, permettant ainsi le rendu sonore dynamique de trafics non-stationnaires comportant des accélérations et des décélérations. Dans le cas du bruit moteur, la méthode d'analyse-synthèse est synchrone afin de respecter l'harmonicité du signal. Dans le cas du bruit de contact pneu-chaussée, la méthode est asynchrone. Ces deux types de synthèse ont l'avantage d'être peu coûteux en temps de calcul et très fidèles aux signaux source, comparé à d'autres approches à base de synthèse additive ou bien d'un modèle physique du bruit émis.

Les signaux des composantes moteur et pneu-chaussée, ainsi que les signaux source des autres sources simples modélisées, alimentent le moteur de rendu sonore 3D [11].

Ce moteur implémente les étapes de traitement du signal liées aux effets de propagation le long de chemins acoustiques dynamiques. Les chemins acoustiques sont obtenus à partir de fonctions de transfert pré-calculées, suivant une des méthodes d'ingénierie standardisée (ISO-9613, NMPB2008 ou CNOSSOS), entre des segments de sources linéiques (ou ponctuelles) aux hauteurs de source appropriées et les points récepteurs définis sur la zone d'écoute. Chaque fonction de transfert est caractérisée par de multiples chemins acoustiques (sources images). Les N chemins perceptivement les plus importants ainsi qu'un chemin "diffus" sommant les contributions supplémentaires sont conservées en mémoire et utilisées lors de la restitution. Pour chaque chemin auralisé, l'atténuation fréquentielle et le retard de propagation, tout deux variables, sont appliqués au signal source. Puis chaque contribution est spatialisée suivant sa direction d'arrivée au point d'écoute et l'orientation de l'auditeur en fonction du système de restitution sonore 3D sélectionné (rendu binaural sur casque ou bien Ambisonic sur système multi-haut-parleurs).

Les différents traitements liés à la propagation sont dynamiques et résultent de l'interpolation entre des chemins acoustiques calculés pour des couples source-récepteur fixes. Les algorithmes d'interpolations mis en oeuvre permettent de traiter d'une part le cas des sources mobiles couplées à un auditeur fixe en un point récepteur et d'autre part le cas, plus complexe, de sources mobiles couplées à un auditeur lui aussi mobile sur une zone d'écoute. Dans ce deuxième cas, la zone d'écoute est maillée à partir d'un ensemble de points récepteurs et l'interpolation intègre les chemins associés aux trois récepteurs entourant le point d'écoute courant.

L'étude des parcours piétonniers proposée ici nécessite une fonctionnalité supplémentaire du système d'auralisation décrit plus haut. Il s'agit dans ce cas d'autoriser le déplacement de l'auditeur non pas sur une zone d'écoute bidimensionnelle mais le long d'une trajectoire. La principale modification concerne donc l'interpolation des chemins acoustiques entre les deux récepteurs entourant la position courante de l'auditeur. Ce type d'interpolation existant déjà pour un maillage 2D, l'extension à une trajectoire unidimensionnelle ne pose pas de difficultés particulière et repose sur les mêmes principes. Notons que le déplacement de l'auditeur est dans ce cas automatique et non plus interactif. L'utilisateur définit au préalable la géométrie de la trajectoire de l'auditeur ainsi que les paramètres cinématiques du déplacement définis par une liste de couples (temps, abscisse curviligne).

3 Expérimentation

On se propose d'étudier l'exposition au bruit d'un piéton se déplaçant le long de voiries urbaines pour différents parcours et différents scénarios de trafics. L'exposition est évaluée à partir des séquences auralisées du champ sonore tel que perçu par le piéton. Ces séquences sont caractérisées à l'aide d'indices de niveaux de bruit dans un premier temps, puis évaluées par un panel de sujets dans un second temps.

L'étude présentée considère un ensemble de parcours dans un site réel, le quartier du Tonkin à Lyon, ayant fait l'objet d'une première modélisation lors de projets antérieurs. La Figure 2 présente la zone étudiée suivant la vue "Édition" du logiciel MithraSON. Le réseau de

circulation est représenté par les axes mauves sur la figure. Sont également représentés les chaussées en gris foncé, les bâtiments en gris clair, ainsi que les surfaces de sol spécifique en vert. Le réseau de circulation intègre l'ensemble des voies routières et des carrefours, soit 583 tronçons, 167 carrefours et 8 giratoires. Une fois la topologie du réseau définie, le trafic est paramétré finement à partir des informations de débit, des matrices origine-destination ainsi que des paramètres des feux de circulation, et ce pour chaque catégorie de véhicules.



FIGURE 2 – Représentations du Quartier du Tonkin modélisé sous MithraSON.

Les parcours piétonniers sont sélectionnés de manière à représenter différents scénarios d'exposition, proches de situations réelles, et recouvrant une plage d'indices acoustiques suffisamment étendue. Pour cela, les parcours choisis sont placés le long de boulevards de forts trafics, de réseaux secondaires à flux réduit, et de zones d'intersection d'axes routiers. Ils sont tous positionnés à une distance d'environ trois mètres du bord de la chaussée.

Cinq trajectoires sont considérées. Les quatre premières sont associées à trois scénarios de trafic différents. La cinquième trajectoire est introduite afin d'évaluer l'impact d'un réaménagement effectué sur le cours Émile Zola (partie sud du quartier). Ce cours est actuellement caractérisé par un axe 2×2 voies comportant cinq carrefours à feux. Le réaménagement proposé consiste à passer à 2×1 voies et remplacer les carrefours à feux par des giratoires. La cinquième trajectoire est placée au bord du boulevard réaménagé et associée aux deux scénarios de trafic, initial et réaménagé. Notons que le réaménagement réaffecte certains itinéraires tout en conservant le même nombre de véhicules sur le réseau réaménagé que le réseau de référence.

Au total, 14 parcours piétonniers (4 trajectoires * 3 scénarios + 1 trajectoire * 2 scénarios) sont définis. Pour chaque séquence sonore associée, l'évolution du $L_{A,eq,1s}$ (niveau sonore pondéré A intégré sur 1 seconde) est calculée ainsi que différents indices acoustiques. A titre d'exemple, la Figure 3 illustre l'évolution du $L_{A,eq,1s}$ pour les deux séquences associées au réaménagement du Cours Émile Zola. Comme prévu, le remplacement des carrefours à feux par des giratoires a pour conséquence une réduction des pics de bruits liés aux démarrages groupés de véhicules aux carrefours.

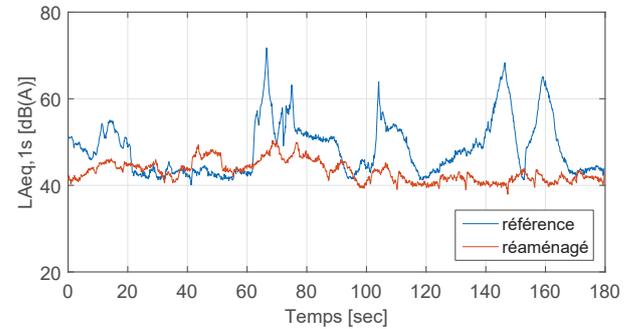


FIGURE 3 – Évolutions du $L_{A,eq,1s}$ le long du Cours Émile Zola pour les scénarios de trafic référence et réaménagé.

Le Tableau 1 présente les principaux indices de bruit calculés pour l'ensemble des 14 séquences auralisées. Pour

TABLEAU 1 – Propriétés des séquences sonores auralisées.

Séq. #	Traj. #	Trafic #	$L_{A,eq}$ dB(A)	$L_{A,1}$ dB(A)	$L_{A,10}$ dB(A)	$L_{A,90}$ dB(A)	TNI dB(A)
1	1	1	57.2	70.6	60.8	44.5	79.7
2	1	2	56.5	69.0	60.7	43.6	82.0
3	1	3	55.9	70.6	58.5	41.6	79.2
4	2	1	45.1	54.9	47.6	40.8	38.0
5	2	2	48.1	64.2	49.0	41.1	42.7
6	2	3	42.5	50.2	44.0	40.2	25.4
7	3	1	44.5	54.1	46.4	41.3	31.7
8	3	2	50.3	66.4	51.2	41.4	50.6
9	3	3	47.4	64.3	47.2	41.1	35.5
10	4	1	56.2	72.0	58.6	41.3	80.5
10	4	2	58.4	73.2	59.9	42.6	81.8
12	4	3	55.1	72.8	57.0	42.4	70.8
13	5	1	54.6	69.5	57.5	42.1	73.7
14	5	4	44.0	49.8	46.7	40.4	35.6

chaque séquence sont indiqués les identifiants de trajectoire et de scénario trafic suivis du niveau de bruit moyen, $L_{A,eq}$, des indices statistiques $L_{A,N}$ représentant le niveau atteint ou dépassé N % du temps et de l'indice TNI ("Traffic Noise Index"). Cet indice s'obtient à partir des indices statistiques $L_{A,10}$ et $L_{A,90}$ suivant l'expression

$$TNI = 4(L_{A,10} - L_{A,90}) + L_{A,90} - 30 \quad (1)$$

D'autres indices de bruit dynamiques tels que ceux présentés dans une étude antérieure [2] ont également été calculés mais sont volontairement omis par souci de concision.

Les séquences auralisées durent chacune 3 minutes, correspondant à une distance parcourue de 200 m à la vitesse constante de 4 km/h représentative d'un piéton en déplacement. Chaque séquence inclut également un bruit résiduel stationnaire de niveau moyen 35 dB(A). Cette composante de bruit résiduel correspond à un extrait d'enregistrement sur site lors de périodes calmes sans passages de véhicules.

Les tests d'écoute se déroulent dans une pièce calme dont le niveau de bruit de fond est de 30 dB(A) environ. Les séquences sont restituées au format binaural sur casque à l'aide d'une interface audio RME Babyface et d'un casque Sennheiser HD 600. Le système de restitution est calibré de manière à restituer les niveaux réels.

4 Résultats

4.1 Réalisme

Le premier test d'écoute a pour objectif d'évaluer le réalisme sonore des séquences auralisées. Ce test vient compléter d'autres tests de validation quantitatifs et perceptifs du système d'auralisation ayant fait l'objet de travaux antérieurs. Huit séquences auralisées parmi les 14 séquences disponibles ont été sélectionnées de manière à couvrir un éventail représentatifs des situations d'exposition. Il s'agit des séquences numéro 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13 et 14 dont les propriétés sont listées dans le Tableau 1. Ce choix a pour objectif de diminuer la durée totale du test et également éviter que les sujets tombent dans l'évaluation d'autres grandeurs acoustiques (par exemple la force sonore), le réalisme sonore étant une grandeur subjective assez mal définie. La durée moyenne du test est d'environ 25 minutes. La consigne du test est reproduite ci-dessous.

L'objectif de ce test auquel vous avez bien voulu participer est d'évaluer le réalisme sonore de plusieurs extraits audio. Vous allez entendre des extraits synthétisés d'environnement sonore urbain pour un auditeur se déplaçant le long de parcours piétonniers en ville. On vous demande d'en évaluer le réalisme associé. Pour cela, imaginez-vous marcher en ville le long d'un parcours piétonnier. Vous devez noter le réalisme sonore sur une échelle graduée de 0 à 10. La valeur 0 signifie que vous jugez la séquence sonore perçue comme pas du tout réaliste et la valeur 10, comme extrêmement réaliste. Si vous êtes entre ces deux situations, choisissez une valeur intermédiaire entre 0 et 10. Les sons seront présentés automatiquement. Après avoir saisi votre note, cliquez sur " Valider et passer à la séquence suivante ". Vous pouvez aussi rejouer la même séquence si vous le souhaitez. Prenez votre temps pour répondre. L'expérience dure environ 25 minutes, un bouton clignotera en vert vous indiquant la fin de l'expérience.

L'interface du test, développée sous l'environnement Max/MSP, présente les étapes suivantes. Après la saisie des coordonnées du sujet (nom, prénom, âge...), les séquences auralisées sont présentées successivement dans un ordre aléatoire. Pour répondre, l'auditeur est invité à déplacer un curseur entre 0 et 10, le long d'une échelle continue, une fois la séquence terminée (l'auditeur ne peut formuler sa réponse qu'après la fin de l'extrait sonore). Après avoir saisi sa réponse, l'auditeur peut lancer la séquence suivante en cliquant sur "Valider et passer à la séquence suivante". Une fois l'ensemble des séquences évaluées, les réponses saisies s'enregistrent dans un fichier texte associé au sujet.

Une population de 18 sujets a été recrutée pour participer au test de réalisme, 8 hommes et 10 femmes, avec une moyenne d'âge de 26 ans. La Figure 4 présente les résultats du test sous la forme de boîtes à moustache pour les 8 séquences évaluées. La différence en termes de réalisme sonore ne paraît pas remarquable entre les différentes séquences sonores bien que les paramètres acoustiques diffèrent d'un extrait à l'autre (voir Tableau 1). Le réalisme moyen calculé sur les 144 scores attribués (8 séquences * 18 sujets) est de 6.9 sur 10. Cette valeur moyenne tend à montrer que les séquences auralisées sont jugées comme étant globalement réalistes. Notons que les valeurs médianes sont représentées sur la Figure 4. Statistiquement, il n'existe pas de dépendance du réalisme sur les indices acoustiques ce

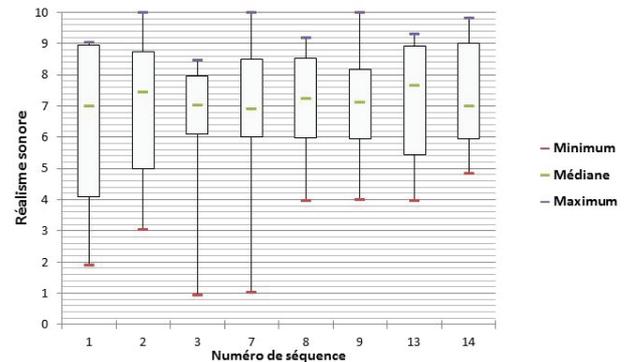


FIGURE 4 – Jugement du réalisme sonore de huit séquences auralisées.

qui indique que les propriétés des séquences auralisées n'ont pas ou peu contribué dans l'évaluation du réalisme sonore.

4.2 Désagrément sonore

Un second test d'écoute a été mis en place. Il consiste à juger le désagrément sonore des 14 séquences auralisées. Le test utilise la même interface que dans le cas du test de réalisme. La consigne adoptée pour ce test est la suivante.

L'objectif de ce test auquel vous avez bien voulu participer est d'évaluer le désagrément sonore de plusieurs extraits audio. Vous allez entendre des extraits d'environnement sonore urbain pour un auditeur se déplaçant le long de parcours piétonniers en ville. On vous demande d'en évaluer le désagrément ressenti. Pour cela, imaginez-vous marcher en ville le long d'un parcours piétonnier. Vous devez noter le désagrément ressenti sur une échelle graduée de 0 à 10. La valeur 0 signifie que vous jugez la séquence sonore perçue comme pas du tout désagréable et la valeur 10, comme extrêmement désagréable. Si vous êtes entre ces deux situations, choisissez une valeur intermédiaire entre 0 et 10. Les sons seront présentés automatiquement. Après avoir saisi votre note, cliquez sur " Valider et passer à la séquence suivante ". Vous pouvez aussi rejouer la même séquence si vous le souhaitez. Prenez votre temps pour répondre. L'expérience dure environ 45 minutes, un bouton clignotera en vert vous indiquant la fin de l'expérience.

L'objectif de cette expérience est d'évaluer le désagrément des séquences sonores auralisées. Ce test vise à étudier les éventuelles relations qui existent entre les indices acoustiques des séquences présentées et les scores du désagrément ressenti. Dans un deuxième temps, on vise à évaluer plus particulièrement l'influence d'un réaménagement urbain (celui du Cours Émile Zola détaillé précédemment) sur la qualité sonore de l'environnement urbain étudié. Pour cette deuxième expérience, 20 sujets ont été recrutés, 15 hommes et 5 femmes avec une moyenne d'âge de 23 ans.

La Figure 5 présente les scores moyens de désagrément en fonction du niveau sonore équivalent pondéré A, $L_{A,eq}$. L'analyse de corrélation de Pearson entre les scores moyens de désagrément et le $L_{A,eq}$ donne un coefficient de corrélation de 0,99. La tendance constatée confirme un premier résultat très connu : la très forte corrélation entre le désagrément sonore et le $L_{A,eq}$. La variation de désagrément, noté D, apparaît linéaire en fonction du $L_{A,eq}$ suivant la relation

$$D = 0.31 \times L_{A,eq} - 10.5 \quad (r^2 = 0.97) \quad (2)$$

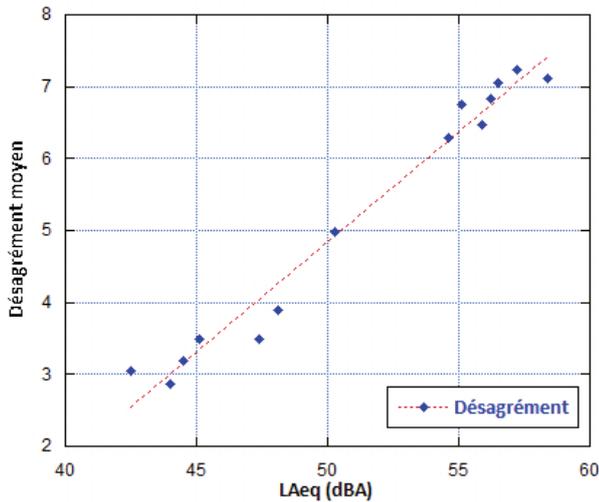


FIGURE 5 – Représentation de la droite de régression linéaire et des scores moyens de désagrément en fonction du $L_{A,eq}$.

Les coefficients de corrélation entre désagrément et indices statistiques $L_{A,10}$, $L_{A,50}$ et $L_{A,90}$ sont, respectivement, 0.99, 0.93 et 0.80. Le désagrément moyen apparaît statistiquement moins corrélé avec les indices moins représentatifs des émergences du bruit. En revanche, le $L_{A,10}$ qui capte les émergences fortes du bruit est logiquement prépondérant sur les scores de désagrément puisque ces émergences sont naturellement liées à la sensation de nuisance.

La Figure 6 est une représentation du désagrément moyen en fonction de l'indice TNI (voir Equation 1). La

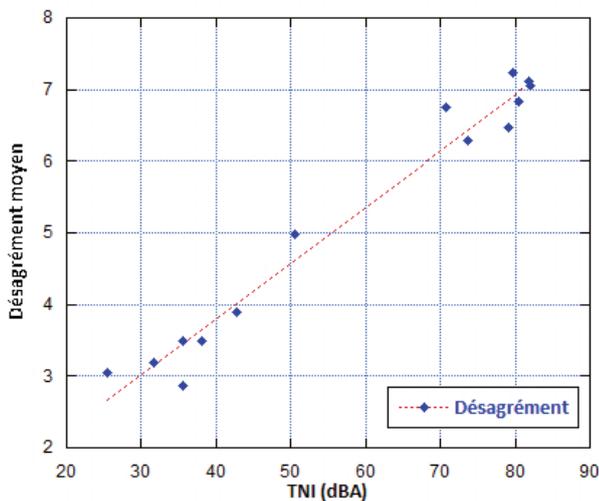


FIGURE 6 – Représentation de la droite de régression linéaire et des scores moyens de désagrément en fonction du TNI.

régression linéaire du désagrément en fonction du TNI aboutit à la relation

$$D = 0.08 \times TNI + 0.67 \quad (r^2 = 0.97) \quad (3)$$

La valeur du coefficient de corrélation calculé à partir de cet indicateur est de 0.98, légèrement inférieur à celui déterminé pour le niveau équivalent $L_{A,eq}$ (0.99). Globalement, le TNI reste fortement corrélé au désagrément sonore.

Les résultats suivants concernent cette fois uniquement les deux séquences auralisées associées au réaménagement

du Cours Émile Zola (séquences 13 et 14 du Tableau 1). Comme cité précédemment, le réaménagement du cours Émile Zola consiste à réduire le nombre de voies et surtout le remplacement des carrefours à feux par des giratoires.

Comme illustré sur la Figure 3 qui présente l'évolution du $L_{A,eq,1s}$ pour le scénario de référence et le scénario réaménagé, on note une alternance de périodes calmes et bruyantes dans le scénario de référence. Les périodes bruyantes sont causées par la présence de démarrages rapides lors du passage des feux au vert. Dans le cas du scénario réaménagé, le trafic est plus fluide, les véhicules s'arrêtant moins souvent à proximité des giratoires, et les variations de niveau diminuent. Ces différences se retrouvent sur les indices acoustiques présentés sur le Tableau 1. En particulier, l'indice TNI qui accentue les variations de niveaux entre les périodes calmes et bruyantes présente une diminution forte dans le cas du scénario réaménagé, suggérant une amélioration de l'ambiance acoustique.

Considérant maintenant le désagrément ressenti tel qu'exprimé lors du test d'écoute, les valeurs de désagrément sont présentées pour les deux séquences pour l'ensemble des sujets sous la forme de boîtes à moustache sur la Figure 7. Les résultats montrent qu'un aménagement de type

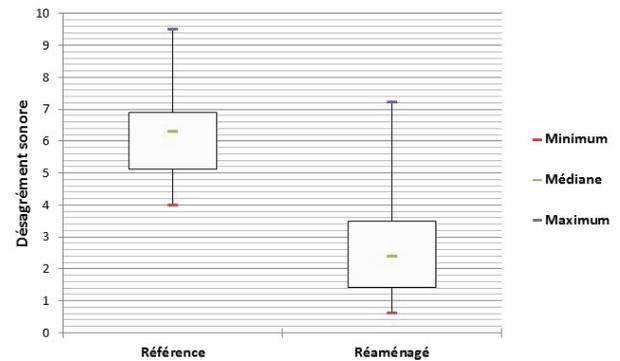


FIGURE 7 – Désagrément sonore du scénario de référence (à gauche) et du scénario réaménagé (à droite).

giratoire est en moyenne plus agréable que l'aménagement de référence comportant des carrefours à feux. Ce résultat perceptif vient valider l'analyse quantitative basée sur les indices acoustiques.

5 Conclusions

La mise en œuvre d'une nouvelle technique d'évaluation de la qualité acoustique des parcours piétonniers urbains par auralisation est présentée dans cet article. Le logiciel MithraSON dans lequel l'approche est testée permet de construire des séquences auralisées d'une ambiance urbaine pour un auditeur en déplacement le long d'un trajet prédéfini. La technique développée est validée sur un cas réel de bruit de trafic routier dans le quartier du Tonkin à Lyon à partir de tests d'écoute.

Le premier test d'écoute vise à juger le réalisme sonore des séquences auralisées. Les résultats du test montrent que les séquences auralisées sont jugées globalement réalistes, avec une note moyenne de 6.9 sur une échelle de 0 à 10. Le réalisme sonore paraît statistiquement indépendant des propriétés acoustiques. Ce résultat vient compléter les tests de validation perceptives déjà effectués sur les signaux

source du bruit des véhicules. Il montre que le système d'auralisation permet une simulation auditive fidèle proche de la réalité.

Le deuxième test d'écoute consiste à étudier l'impact du trafic routier urbain sur le désagrément sonore. Plusieurs parcours piétonniers définis sur le site sont auralisés et évalués en termes de désagrément sonore. Le calcul des indices de niveaux de bruit standards pour chaque séquence auralisée permet de caractériser la relation entre ces indices et le désagrément ressenti. Il ressort de cette étude que le désagrément sonore est lié en premier lieu au niveau sonore équivalent pondéré A, $L_{A,eq}$, résultat conforme à d'autres travaux réalisés sur le même site à partir d'enregistrements de trafic réels [4]. Le désagrément est aussi lié aux autres indices de bruit dynamiques dont par exemple l'indice TNI. Cependant, les coefficients de corrélation associés à ces indices restent toujours inférieurs à celui obtenu à partir de l'indice $L_{A,eq}$ qui permet donc une meilleure prédiction du désagrément. Un résultat similaire a été montré par Yaniv et al. pour des bruits de trafic routier [12].

D'autre part, l'étude confirme un résultat lui aussi déjà obtenu à partir de séquences enregistrées sur site selon lequel un aménagement de type giratoire est jugé moins désagréable qu'un carrefour à feux. Lors de cette comparaison entre les deux aménagements, la pertinence des indices dynamiques par rapport aux indices de niveau moyen tel que le $L_{A,eq}$ est confirmée comme dans le cas d'autres études récentes [2].

Les travaux futurs sur l'étude des ambiances sonores urbaines à partir de séquences auralisées pourront également considérer des indicateurs psychoacoustiques afin de quantifier leurs influences sur le désagrément sonore. Parmi ces indicateurs, la sonie par exemple apparaît comme un facteur déterminant du désagrément en présence de bruits de trafics routiers d'après des travaux antérieurs basés sur des enregistrements réels [13]. D'autre part, le test de réalisme sonore des séquences auralisées pourrait être reconduit en introduisant cette fois parmi les séquences auralisées des séquences d'enregistrements réels. Cela permettrait d'aboutir à un jugement plus pertinent du réalisme des séquences auralisées par rapport aux extraits réels.

Remerciements

Nous tenons à remercier le LICIT (Ifsttar/ENTPE) pour l'utilisation du simulateur de trafics Symuvia dans le cadre de cette étude.

Références

- [1] Julien Maillard and Jan Jagla. Real time auralization of non-stationary traffic noise - quantitative and perceptual validation in an urban street. In *Proc. of AIA-DAGA 2013, Merano*, 18-21 March 2013.
- [2] Jan Jagla, Julien Maillard, and Jérôme Defrance. Estimation of dynamic indicators based on auralization of urban traffic noise. In *Krakow, Poland, EURONOISE 2014, September 7-12, 2014*.
- [3] Catherine Marquis-Favre and Julien Morel. A simulated environment experiment on annoyance due to combined road traffic and industrial noises. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7) :8413, 2015.
- [4] A. Trollé, J. Terroir, C. Lavandier, C. Marquis-Favre, and M. Lavandier. Impact of urban road traffic on sound unpleasantness : A comparison of traffic scenarios at crossroads. *Applied Acoustics*, 94 :46 – 52, 2015.
- [5] Catherine Lavandier and Pauline Delaitre. Individual and shared representations on “zones calmes” (“quiet areas”) among the french population in urban context. *Applied Acoustics*, 99 :135 – 144, 2015.
- [6] Mauny F, Pujol S, Houot H, Defrance J, Berthillier M, Lardies J, and Viel.JF. A quels niveaux sonores les enfants scolarisés sont-ils exposés lors du trajet domicile-école? Technical report, Rapport final, convention de coopération de recherche AFSSE – CHU de Besançon no 07-CRD-56, Février 2009.
- [7] Jérôme Defrance, Julian Palacino, and Marine Baulac. Acoustical assessment of cycle paths in urban areas. In *Euronoise 2009, Edinburgh, UK EAA, 2009*.
- [8] Sophie Pujol, Hélène Houot, Jean-Philippe Antoni, and Frédéric Mauny. Linking traffic and noise models to explore spatio-temporal distribution of noise pollution : an example in besançon (france). In *19th International Congress on Sound and Vibration, Vilnius, Lithuania, 2012*.
- [9] Catherine Semidor. Listening to a city with the soundwalk method. *Acta Acustica united with Acustica*, 92(6) :959–964, 2006.
- [10] Jan Jagla, Julien Maillard, and Nadine Martin. Sample-based engine noise synthesis using an enhanced pitch-synchronous overlap-and-add method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(5) :3098–3108, November 2012.
- [11] Julien Maillard. Prediction and auralization of construction site noise. In *Edinburgh, Scotland, EURONOISE 2009, October 26-28, 2009*.
- [12] Simone L. Yaniv, William F. Danner, and Jay W. Bauer. Measurement and prediction of annoyance caused by time-varying highway noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(1) :200–207, 1982.
- [13] Sabine Meunier. Simulation acoustique et évaluation psychoacoustique de bruits de circulation routière. In *CFA - Congès Français d'Acoustique, Lausanne, Switzerland, 2000*.