

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Auralisation des deux-roues motorisés

J. Maillard et S. Bianchetti
CSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-D'Herès, France
julien.maillard@cstb.fr

Le bruit des transports est perçu majoritairement comme une nuisance importante en milieu urbain. En particulier, le trafic routier représente une source prépondérante de la gêne perçue et les deux-roues motorisés contribuent fortement à cette gêne, notamment dans certaines grandes villes où leur proportion peut atteindre un tiers des véhicules. Le bruit des deux-roues a déjà été caractérisé lors de travaux antérieurs et les modèles d'émission associés sont désormais intégrés dans les méthodes de calcul normalisées. Ces outils, utilisés pour la cartographie prévisionnelle du bruit en ville, fournissent des niveaux de bruit moyen : la contribution des deux-roues est ici estimée à partir d'une puissance acoustique moyenne fonction de la densité de véhicules et de leur vitesse moyenne. Les récents progrès en auralisation apportent un outil d'analyse complémentaire qui se révèle intéressant pour étudier en détails des phénomènes complexes liés à la diversité des sources de bruit ou bien pour communiquer des résultats aux non-spécialistes. Cette approche nouvelle permet de simuler auditivement l'exposition au bruit. Elle donne accès à une évaluation directe de la gêne par l'écoute ainsi qu'à l'évolution temporelle des niveaux de bruit. Cet article présente l'extension d'une technique d'auralisation, développée pour les voitures, aux deux-roues motorisés. L'émission acoustique du véhicule utilise une synthèse granulaire dont les données proviennent de mesures embarquées du bruit moteur. Après avoir décrit les mesures réalisées sur plusieurs deux-roues, la qualité de la synthèse est évaluée par comparaison aux enregistrements du bruit à l'émission. Le modèle de l'évolution du régime moteur en fonction de la vitesse du véhicule est également présenté. Finalement, une première validation de l'approche est proposée par comparaison des séquences sonores auralisées et des séquences enregistrées, pour différentes configurations de bruits au passage.

1 Introduction

Les deux-roues motorisés représentent une part importante du trafic routier en milieu urbain. D'après une étude récente, la proportion des deux-roues atteint 30% sur certains axes aux heures de pointes en région parisienne [1]. Les niveaux de bruits émis par les deux-roues sont globalement supérieurs à ceux des véhicules légers, jusqu'à 6 dB(A) pour certains types de véhicules et modes de conduite, mais demeurent inférieurs à ceux des poids-lourds [2]. Cependant cette augmentation ne vient pas modifier de manière significative les niveaux de bruit moyens long-terme constatés aux abords des axes routiers, la part des deux-roues restant inférieure à celle des autres types de véhicules (légers, utilitaires et poids-lourds). En revanche, les deux-roues motorisés sont à l'origine de phénomènes d'émergences pendant lesquelles l'augmentation du niveau de bruit peut dépasser 20 dB(A) sur un court laps de temps, notamment lors des accélérations. Pour cette raison, les deux-roues constituent une source de gêne potentiellement importante. Lors d'une enquête nationale menée en 2005, les deux-roues sont effectivement cités en deuxième position par 43% des Français se déclarant gênés par le bruit des transports [3].

Contrairement aux autres types de véhicules, les études sur l'émission sonore et la perception des deux-roues en milieu urbain sont peu nombreuses. La mesure et la caractérisation des deux roues ont été étudiées conjointement aux autres types de véhicules durant les projets Européens Imagine et Harmonoise. Plus récemment, le projet Français Ascoot [2, 4] a caractérisé la puissance émise et la directivité d'un panel de deux-roues de type scooters à partir de mesures aux passages contrôlés. D'autres caractérisations expérimentales ont été menées sur 5 scooters électriques pour caractériser leur émission acoustique [5]. Des recherches sur la perception des deux-roues ont été menées dans le cadre du même projet Ascoot à partir de tests d'écoute en laboratoire. Plus récemment, une étude sur le bruit de trafic urbain a analysé le désagrément sonore ressenti pour différents scénarios d'exposition comportant des deux-roues motorisés [6]. Dans cette étude, les séquences sonores évaluées en laboratoires sont construites en combinant différents enregistrements de bruits au passage réalisés

sur site et pour lesquels la composition et les paramètres cinématiques du trafic sont connus.

Ces derniers travaux confirment l'impact négatif des deux-roues motorisés sur la perception du trafic routier en milieu urbain. Cependant la réglementation actuelle sur les cartes d'exposition au bruit ne permet pas de caractériser efficacement le désagrément lié aux deux-roues, seuls les niveaux moyennés sur des périodes longues étant considérés. Une connaissance plus fine de l'évolution temporelle des niveaux est par conséquent nécessaire et nécessite soit des mesures in-situ de trafics réels soit une simulation fine de l'émission et la propagation acoustique des véhicules, considérés individuellement. La simulation auditive va au-delà du calcul des niveaux sonores instantanés en offrant la possibilité d'écouter la scène sonore simulée. Cette technique, également appelée auralisation ("auralization" en anglais), constitue un outil d'analyse intéressant puisqu'il permet d'évaluer la perception de scènes sonores virtuelles représentant des situations d'exposition, réelles ou non, dont les paramètres sont contrôlables.

Bien qu'utilisée depuis de nombreuses années dans le domaine de l'acoustique des salles, la simulation auditive n'est apparue que plus récemment en acoustique environnementale. L'une des raisons principales est certainement liée à la complexité des sources sonores présentes. En particulier, les véhicules à moteur présentent une signature acoustique variable dans le temps en fonction des évolutions de la vitesse et donc du régime moteur. La simulation de véhicules en déplacement nécessite par conséquent des techniques de synthèse sonore adaptées permettant de restituer l'émission du véhicule à vitesse constante mais également durant les phases d'accélération et de décélération. Les avancées récentes dans ce domaine permettent aujourd'hui de simuler de manière extrêmement réaliste le bruit en milieu urbain en présence de trafics de véhicules à moteur [7-9]. L'approche proposée utilise une méthode de synthèse granulaire basée sur des enregistrements de bruit moteur lors de montées en régime [10]. Une technique similaire a été récemment appliquée pour la caractérisation perceptive du bruit de contact pneu-chaussée [11]. En ce qui concerne les deux-roues motorisés, une approche différente basée sur la mesure des chemins de transfert vibro-acoustiques ("Transfer Path

Analysis”) a été proposée pour la simulation auditive du bruit au passage d’un scooter [12]. Bien que prometteuse, cette technique nécessite une étape complexe de caractérisation expérimentale.

Cet article présente l’extension de la méthode de synthèse granulaire citée plus haut au bruit des deux-roues motorisés. Le protocole de mesure des montées en régime et les résultats de synthèse sonore sont tout d’abord introduits. L’intégration des deux-roues dans la simulation auditive du bruit de trafic routier est ensuite décrite. Enfin, l’approche proposée est appliquée à l’étude de deux scénarios de trafic urbain, de débit et vitesse identiques mais avec et sans deux-roues motorisés.

2 Synthèse granulaire du bruit émis

La technique de synthèse granulaire développée précédemment repose sur l’enregistrement audio du bruit moteur lors d’une montée en régime [10]. L’analyse du signal enregistré permet dans une première phase d’estimer la fréquence fondamentale moteur. Dans une seconde phase, le signal est découpé en échantillons élémentaires (“grains sonores”) dont la longueur représente exactement une période de la fondamentale moteur. Chaque grain est donc associé à une valeur de la vitesse de rotation du moteur (régime moteur). Une base de grains est ainsi constituée. La phase de synthèse consiste à concaténer les grains associés à une valeur cible du régime moteur. L’évolution temporelle du régime moteur est pilotée à partir de la vitesse et des caractéristiques de la boîte de transmission du véhicule. Le découpage des grains sonores utilise un algorithme spécifique permettant de conserver la phase des harmoniques du signal sans introduire d’artefacts audibles (synthèse granulaire synchrone). Cette technique présente deux avantages importants par rapport à d’autres approches de synthèse sonore basées sur des modèles physiques. Premièrement, l’étape de synthèse est peu coûteuse en temps calcul et par conséquent bien adaptée à une mise en œuvre temps réel. Deuxièmement, le signal synthétisé est extrêmement réaliste étant issu d’un enregistrement de la source réelle et non d’un modèle physique.

L’étape d’enregistrement est essentielle pour l’obtention d’une synthèse réaliste. Premièrement, le signal de pression mesuré doit représenter au mieux la sonorité du moteur en champ lointain. Le microphone doit être positionné à une distance suffisante des sources moteur. Deuxièmement, la montée en régime doit être assez lente de manière à obtenir une densité de grains sonores suffisante sur l’ensemble de la plage de fonctionnement du moteur. En effet, pour un régime constant donné, il n’est pas possible de concaténer un même et unique grain, ce qui induit un effet de répétition synthétique et peu réaliste. La synthèse utilise donc plusieurs grains proches du régime cible. Lorsque la densité de grains est insuffisante, la disparité entre deux grains consécutifs qui en résulte génère des artefacts audibles qui nuisent au réalisme.

Pour les deux-roues étudiés ici, la mesure du bruit émis est effectuée en condition de roulement sur route à l’aide d’un microphone embarqué. Ce choix introduit des contraintes supplémentaires sur le positionnement du microphone et sa protection par rapport à l’écoulement d’air. Un dispositif plus performant mais plus coûteux consiste

à réaliser les mesures sur un banc à rouleau silencieux en chambre anéchoïque.

Parallèlement à l’enregistrement audio, le dispositif embarqué inclut une mesure de la vitesse du véhicule à l’aide d’un récepteur GPS. L’information de vitesse permet notamment de valider les paramètres de la transmission caractérisant la relation régime/vitesse du véhicule.

Pour cette étude, trois scooters (Gilera Stalker 50, Piaggio Medley 125, Suzuki Burgman 400) et une motocyclette (Harley Davidson 1200) sont mesurés sur route. Les mesures sont réalisées durant des plages horaires garantissant des conditions de trafic réduites de manière à limiter le risque de pollution du signal enregistré par d’autres véhicules. Une mesure complémentaire de bruit au passage est également effectuée à une distance de 7.5 m par rapport à l’axe de déplacement du véhicule. La Figure 1 montre le scooter Suzuki Burgman 400 équipé du dispositif de mesure embarqué. Le microphone, DPA SC061B00H, est monté sur



FIGURE 1 – Dispositif de mesure embarqué sur le Suzuki Burgman 400.

une perche et protégé par une fourrure Rycote. L’acquisition du signal de pression est réalisée à l’aide d’un enregistreur Zoom H6 installé derrière le pilote. Le microphone est positionné à l’arrière du véhicule et donc relativement protégé de l’écoulement d’air, permettant d’atteindre des vitesses de 90 km/h environ. L’atténuation introduite par la bonnette anti-vent a été caractérisée en laboratoire et compensée sur l’enregistrement à l’aide d’un filtrage à phase nulle lors d’une étape de post-traitement.

La construction de la base de grains est réalisée sur une section d’enregistrement comportant une montée en régime lente et régulière. La fondamentale du bruit moteur est identifiée à partir du suivi d’une des harmoniques dominantes [10]. Dans le cas de véhicules à moteur thermique, l’harmonique dominante correspond généralement à la fréquence d’explosion du moteur ou à une de ses harmoniques. Connaissant le nombre de cylindres, N_{cyl} , et la catégorie du moteur, deux temps ($N_T = 2$), ou quatre temps ($N_T = 4$), la fréquence fondamentale du bruit moteur, f_0 s’exprime en fonction de la fréquence de rotation du moteur, $f_r = r/60$ (r , régime moteur en nombre de tours par minute) suivant la relation

$$f_0 = f_r \frac{2}{N_T} \quad (1)$$

La fréquence d’explosion f_e est elle-même liée à la vitesse de rotation par

$$f_e = f_r \frac{2N_{cyl}}{N_T} \quad (2)$$

La fondamentale moteur s'obtient donc à partir de la fréquence d'explosion suivant

$$f_0 = \frac{f_e}{N_{cyl}} \quad (3)$$

L'extraction de la fondamentale moteur est illustrée sur la Figure 2 représentant le spectrogramme temps-fréquence de la section du signal enregistré sur une montée en régime du Suzuki Burgman 400. Ce scooter est un mono-cylindre

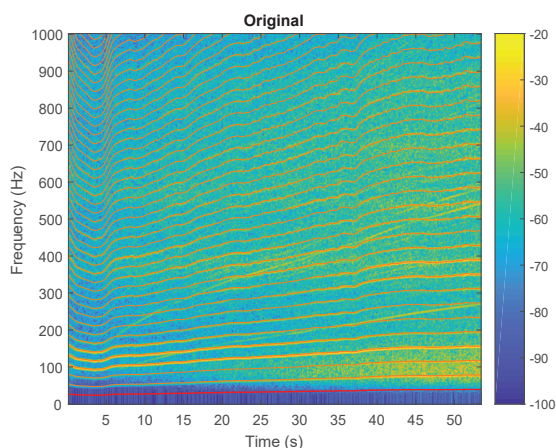


FIGURE 2 – Suzuki Burgman 400 : spectrogramme du signal enregistré. La fréquence fondamentale des harmoniques moteur est tracée en rouge, les harmoniques, en orange.

4 temps ($N_{cyl} = 1$, $N_T = 4$) : la fréquence fondamentale estimée à partir du signal (courbe rouge) est ici égale à la fréquence d'explosion. C'est l'harmonique de rang 4 de la fréquence d'explosion qui domine ici le bruit émis. Le spectrogramme révèle également la présence d'une deuxième source harmonique indépendante de la rotation du moteur.

Une fois la fondamentale moteur estimée pour chaque échantillon du signal original, les grains sont extraits comme expliqués précédemment. La Figure 3 présente le spectrogramme du signal synthétisé pour la même évolution du régime moteur que sur le signal d'origine. Les caractéristiques principales du signal d'origine sont

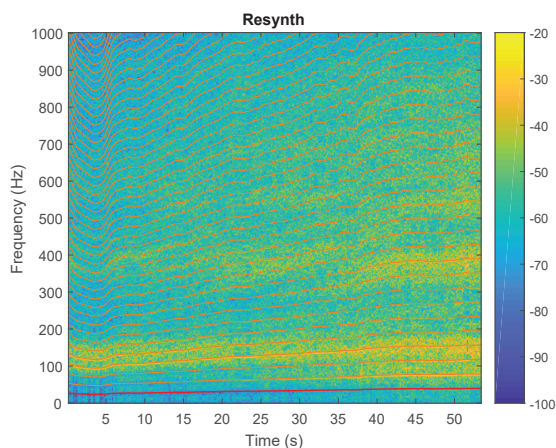


FIGURE 3 – Suzuki Burgman 400 : spectrogramme du signal synthétisé. La fréquence fondamentale des harmoniques moteur est tracée en rouge, les harmoniques, en orange.

correctement reproduites et en particulier les harmoniques

du moteur. Des différences apparaissent entre certaines harmoniques avec une légère augmentation du niveau des composantes large bande du signal. Comme expliqué dans les précédents travaux sur la synthèse granulaire, ces différences résultent de l'assemblage de grains de sonorité légèrement différentes du fait d'une densité sous-optimale. Cependant, les premières écoutes informelles montrent que la qualité de la synthèse telle qu'illustrée sur la Figure 3 reste très satisfaisante en termes de réalisme sonore. Des résultats similaires sont obtenus pour les autres deux-roues inclus dans cette étude.

3 Auralisation du bruit de trafic

Le moteur de synthèse sonore est intégré à un système d'auralisation du bruit de trafic routier et urbain. Ce système, déjà décrit dans des travaux antérieurs [7], fait partie du logiciel de simulation auditive MithraSON®.

La particularité des deux-roues motorisés concerne d'une part, les sources de bruit considérées et d'autre part, la relation qui relie vitesse et régime moteur. A la différence des autres véhicules à moteur, le bruit de contact pneu-chaussée des deux-roues est dominé par le bruit moteur en termes de puissance acoustique à l'émission [2]. Par conséquent, cette composante n'est pas incluse en tant que source de bruit de manière à optimiser le coût des calculs temps réel du système. La relation vitesse-régime moteur est liée au type de transmission du véhicule. La plupart des motocyclettes possèdent une transmission à engrenages, similaire à celles des voitures, caractérisée par un nombre fixe de rapports. C'est le cas de la Harley Davidson 1200 considérée ici. La relation vitesse-régime est alors linéaire pour chaque rapport et fonction du rapport de boîte, du rapport de pont et du diamètre des roues. En revanche, la plupart des scooters possèdent une boîte à transmission variable continue (CVT). C'est le cas des trois scooters inclus dans cette étude. Le rapport de boîte varie de manière continue en fonction du régime moteur et de la vitesse du véhicule. Plus précisément, le régime augmente rapidement aux faibles vitesses puis faiblement aux vitesses supérieures. Ce type de boîte équipe les trois scooters étudiés ici. Connaissant le régime moteur, r , obtenu à partir de l'analyse du signal enregistré à l'émission, et la vitesse du véhicule, V , obtenue par mesure GPS, la relation vitesse-régime est approximée par une fonction de la forme

$$r = r_{min} + (r_{max} - r_{min})(1 - e^{-\alpha V/V_{max}}) \quad (4)$$

Les valeurs de régime minimum, r_{min} , maximum, r_{max} , vitesse maximum V_{max} et le paramètre α peuvent être ajustés autour de leur valeur nominale, obtenue à partir de la mesure, de manière à obtenir différents "modes" de transmission et ainsi simuler plusieurs exemplaires d'un même véhicule. Cette variabilité permet d'améliorer le réalisme d'un flux dense de véhicules lorsque seuls quelques véhicules sont disponibles. La Figure 4 illustre la relation vitesse-régime obtenue pour le Suzuki Burgman 400.

La calibration du signal synthétisé est basée sur la mesure du bruit au passage à 7.5 m à vitesses stabilisées. Le facteur de calibration du véhicule est ajusté de manière à minimiser l'erreur entre le niveau de bruit mesuré et auralisé pour plusieurs vitesses au passage. Le niveau considéré est le niveau équivalent pondéré A sur une période autour

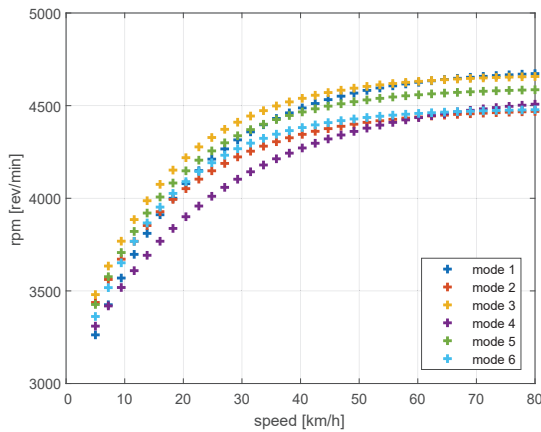


FIGURE 4 – Suzuki Burgman 400 : régime moteur en fonction de la vitesse pour différents “modes” de transmission.

de l’instant de passage. A titre d’illustration, le niveau de bruit maximum, LA_{max} , obtenu pour un récepteur à 7.5 m à partir du signal auralisé, est donné en fonction de la vitesse au passage stabilisée pour le Suzuki Burgman 400 sur la Figure 5. Les valeurs obtenues sont cohérentes par

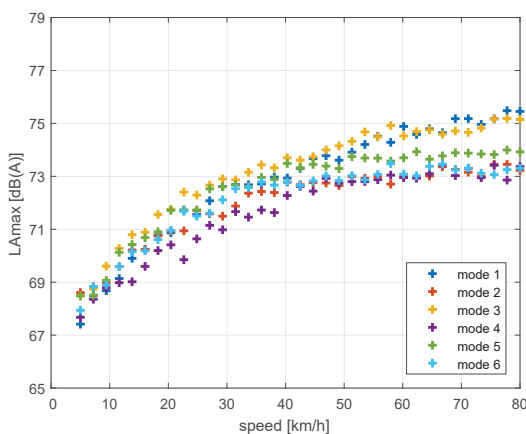


FIGURE 5 – Suzuki Burgman 400 : niveau LA_{max} du bruit au passage pour un récepteur à 7.5 m en fonction de la vitesse et des “modes” de transmission.

rapport aux mesures disponibles dans la littérature pour des véhicules de type similaire [2].

La directivité du bruit moteur des deux-roues a été mesurée pour un panel de deux-roues dans le cadre du projet Ascot [2]. Le même type de mesure n’a pas été réalisé sur les 3 scooters et la motocyclette étudiés ici par manque de moyens. Le moteur d’auralisation utilisé dans cette étude permet d’introduire une directivité par type de véhicule en fonction de l’angle d’émission dans le plan horizontal et de chaque bande d’octave entre 63 et 8000 Hz. Pour les quatre deux-roues, la directivité introduite approxime la directivité moyenne mesurée précédemment par une relation en cosinus qui reproduit la différence d’émission entre l’avant et l’arrière liée au pot d’échappement du deux-roue. Le gain de directivité en dB, D_{ω} , suit une loi de la forme $D_{\omega}(\theta) = -\Delta_{D,\omega}/2 \cos(\theta)$ où θ représente l’angle d’émission et $\Delta_{D,\omega}$ la différence d’émission dans la bande ω entre l’avant et l’arrière du véhicule. Les valeurs $\Delta_{D,\omega}$ sont fixées à partir des données publiées dans le cadre du projet Ascot [2].

L’effet de la charge moteur sur le bruit émis n’a pas pu

être caractérisé précisément lors des mesures. Les montées en régime lentes utilisées pour la synthèse granulaire ont été effectuées sur une route plate avec une accélération faible. La charge moteur associée est par conséquent également faible. Pour cette première mise en oeuvre du bruit des deux-roues, l’effet de charge est approximé par un gain global variable en fonction de l’accélération du véhicule entre une valeur nulle et une valeur maximum de 4 dB, constante pour les 4 véhicules considérés. Cette valeur est choisie d’après les résultats de mesures pour différents régimes d’accélération publiés dans [2]. Une caractérisation plus avancée permettrait d’affiner ce modèle en fonction du véhicule et de la fréquence du signal émis comme déjà effectué pour les véhicules légers [8].

Une comparaison des spectrogrammes du bruit au passage à 70 km/h entre la mesure et le signal auralisé pour un récepteur omnidirectionnel à 7.5 m est donnée sur les Figures 6 et 7 pour la Harley Davidson 1200. Le

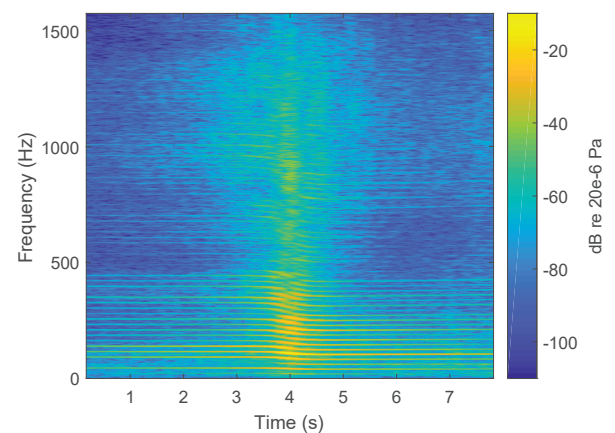


FIGURE 6 – Harley Davidson 1200 : spectrogramme du bruit au passage enregistré à 70 km/h.

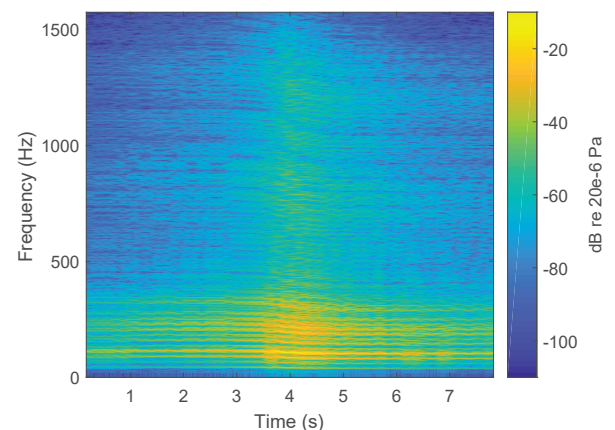


FIGURE 7 – Harley Davidson 1200 : spectrogramme du bruit au passage simulé à 70 km/h.

signal auralisé restitue globalement les caractéristiques fréquentielles du signal mesuré. La variation rapide des harmoniques autour de l’instant de passage, liée à l’effet Doppler, est bien visible également sur les deux spectrogrammes. Une analyse plus détaillée montre que l’énergie des harmoniques du signal auralisé est répartie autour de la valeur cible sur une plage plus large que sur

le signal enregistré. Ce phénomène, qui se traduit par des raies fréquentielles plus épaisses sur le spectrogramme, s'explique par l'assemblage de grains sonores légèrement dissemblables. Une densité de grains supérieure permettrait de limiter ces effets. A l'écoute, les différences audibles restent faibles et ne nuisent pas au réalisme global de la simulation. Des résultats similaires sont obtenus pour les autres deux-roues inclus dans cette étude.

4 Application à un cas d'étude

Le moteur d'auralisation, étendu aux deux-roues motorisés, est intégré au logiciel MithraSON[®]. A titre d'illustration, il est ici utilisé pour analyser l'influence des deux-roues sur le bruit de trafic aux abords d'un boulevard urbain.

L'axe étudié est le Boulevard de Sébastopol à Paris, modélisé entre la rue de Rivoli et la rue Réaumur à partir des données de la base "Open Street Map". Le modèle inclut le terrain, les bâtiments et la chaussée principale du boulevard constituée de trois files de circulation à sens unique. Le point d'écoute est positionné en bordure du Boulevard devant le passage piétons, au croisement de la rue Saint-Merri, à 5.5 m de l'axe centrale de la voie proche.

Le réseau de circulation est simplifié en ne considérant que les véhicules présents sur le Boulevard et en négligeant l'influence des axes traversants. Cette hypothèse est justifiée compte-tenu de la faible distance du récepteur à la chaussée. Un seul feu de circulation est simulé à l'intersection sur laquelle est positionnée le récepteur. La durée du cycle est de 60 secondes avec une durée de vert de 30 secondes. Deux scénarios de trafics sont étudiés : un scénario avec véhicules légers uniquement et un scénario avec véhicules légers et deux-roues. La vitesse moyenne sur le boulevard est fixée à 50 km/h. Le débit global est de 2286 véhicule/heure pour les deux scénarios. Le scénario sans deux-roues ne comporte que des véhicules légers tandis que le scénario avec deux-roues inclut 30% de deux-roues soit 1600 véhicules légers et 686 deux roues en moyenne par heure. Une probabilité d'occurrence est affectée aux deux-roues disponibles pour l'étude : les trois scooters ont une probabilité de 30% et la Harley Davidson 1200, une probabilité de 10%.

La Figure 8 montre l'interface de l'outil d'auralisation en mode analyse durant une simulation. Sont notamment

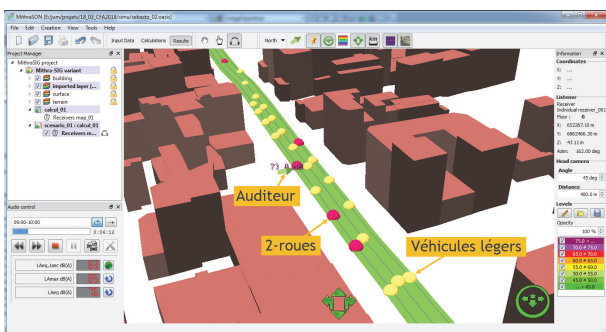


FIGURE 8 – MithraSON[®] : vue du site modélisé lors de l'auralisation du bruit de trafic.

visibles les véhicules en déplacement, deux-roues en rouge et véhicules légers en jaune, et la position et l'orientation du point d'écoute.

Parallèlement à la simulation auditive destinée à l'écoute, MithraSON[®] peut exporter l'évolution du niveau de pression instantané, $LA_{eq,1sec}$, au point d'écoute. La Figure 9 présente cette évolution sur une période de 4 minutes pour les deux scénarios de trafic, avec et sans deux-roues.

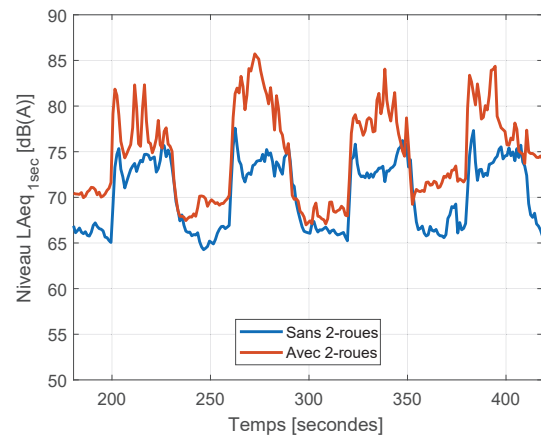


FIGURE 9 – Evolution du niveau $LA_{eq,1sec}$ du bruit au passage avec (courbe rouge) et sans (courbe bleue) deux-roues.

L'évolution globale des niveaux pour les deux scénarios se caractérise par une succession de périodes de niveaux faibles et de périodes de niveaux élevés. Ce phénomène est lié à la présence du feu de circulation dont la durée des cycles (30 secondes) correspond à la durée des périodes visibles sur le graphe. Pour le scénario sans deux-roues (courbe bleue), l'effet de l'accélération simultanée de plusieurs véhicules lorsque le feu passe au vert engendre une augmentation ponctuelle des niveaux, dépendant de la composition des véhicules. Dans le cas des deux-roues (courbe rouge), l'augmentation liée au passage au vert est globalement plus marquée. Comme évoqué précédemment, l'accélération des deux-roues provoque une montée des régimes moteur plus importante surtout dans le cas des scooters. Le niveau global en présence des deux-roues est également plus élevé, ce qui s'explique par des niveaux à l'émission globalement plus élevés et ce, y compris à l'arrêt lorsque le moteur est au ralenti. Enfin, les émergences sont également plus importantes en présence des deux-roues, jusqu'à 8 dB(A) durant les phases de trafic établi contre 4 dB(A) environ pour le scénario sans les deux-roues. Ces différences se retrouvent en termes de niveau moyen. Sur la période considérée, le niveau de bruit équivalent, LA_{eq} , est de 72 dB(A) sans les deux-roues et de 77 dB(A) avec les deux-roues, soit une augmentation de 5 dB.

Il est à noter que le moteur de trafic ne simule pas la remontée de file des deux-roues. Par conséquent, les deux-roues ne sont pas regroupés ensemble lors du démarrage au feu. Les niveaux simulés sont donc probablement sous-estimés par rapport à une situation réelle.

L'écoute comparative des deux séquences avec et sans deux-roues confirme les différences visibles sur l'évolution des niveaux. Les travaux à venir devront inclure des tests d'écoute de manière à évaluer l'influence des deux-roues considérés ici en termes de désagrément sonore ressenti.

5 Conclusions

Les travaux présentés dans cet article concernent l'extension d'une technique de simulation auditive du bruit de trafic routier aux deux-roues motorisés. L'approche proposée se base sur des mesures embarquées pour l'enregistrement du bruit moteur à l'émission en condition de roulement. Le bruit moteur des deux-roues présente une structure harmonique très marquée dont la fréquence fondamentale est directement liée au régime moteur. L'approche utilise par conséquent la synthèse granulaire synchrone déjà appliquée aux bruits moteur des véhicules légers. L'avantage de ce type de synthèse réside dans son réalisme et son faible coût de calcul. Ce dernier point autorise une mise en œuvre temps réel de la simulation.

Bien que seuls des tests d'écoute informels aient été réalisés à ce stade, les résultats obtenus pour trois scooters et une motocyclette constituent une première validation de l'approche en termes de niveaux et de réalisme. Les travaux à venir doivent permettre d'étendre les mesures à d'autres types de deux-roues de manière à enrichir la variété des véhicules présents et ainsi améliorer le réalisme des trafics simulés. Des tests d'écoute basés sur un jury d'auditeurs seront également menés pour valider formellement l'approche.

Compte tenu de l'importance des deux-roues en milieu urbain, l'intégration de ce type de sources dans un outil d'auralisation du bruit de trafic représente une avancée importante pour l'évaluation perceptive du bruit en ville. Elle permet de considérer l'influence particulière des deux-roues dans les scénarios d'exposition aux bruit de trafic. En particulier, la gêne induite par les fortes émergences liées aux accélérations des deux-roues peut être évaluée à partir de tests d'écoute. Ce type d'évaluation perceptive peut également être combiné à l'analyse d'indicateurs physiques innovants obtenus à partir des signaux auralisés. Au-delà de ces analyses, un tel outil doit aussi permettre aux aménageurs de mieux intégrer la dimension sonore d'un projet urbain et ce, dès la phase de conception.

Références

- [1] Chris MONCHATRE. Étude du trafic des deux-roues motorisés en ile-de-france. Technical report, CETE Ile-de-France, 2012.
- [2] J. Lelong, R. Chatagnon, C. Clerc, D. Jamin, M. Seigner, and M. Thivant. Towards a reduction of noise emission of powered two-wheels - part 1. In *INTERNOISE 2014 - 43rd International Congress on Noise Control Engineering : Improving the World Through Noise Control*, 2014.
- [3] J. Lambert and C. Philipps-Bertin. Les nuisances environnementales des transports : résultats d'une enquête nationale. Technical Report 278, INRETS-LTE, 2009.
- [4] P. Champelovier, R. Chatagnon, J. Lelong, D. Jamin, Q. Gauthier, M. Thivant, and C. Clerc. Ascot : Acoustique des scooters et des motocycles. Technical report, ADEME, 2015.
- [5] P. Poveda-Martínez, R. Peral-Orts, N. Campillo-Davo, H. Campello-Vicente, and J. Ramis-Soriano. Acoustic directivity and detectability of electric powered two-wheelers. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(6) :1014–1024, 2017.
- [6] L.-A. Gille, C. Marquis-Favre, and A. Klein. Noise annoyance due to urban road traffic with powered-two-wheelers : Quiet periods, order and number of vehicles. *Acta Acustica united with Acustica*, 102(3) :474–487, 2016.
- [7] 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.
- [8] Julien MAILLARD and Jan JAGLA. Effect of load on engine noise for the auralization of road traffic. In *Proceedings of EuroNoise 2015, 31 May 31 – 3 June, Maastricht*, pages 763–768, 2015.
- [9] Julien Maillard and Abbes Kacem. Auralization applied to the evaluation of pedestrian and bike paths in urban environments. In *Proc. of Internoise 2016, Hamburg, Germany, August 21-24*, 2016.
- [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] Jens Forssén, Alice Hoffmann, and Wolfgang Kropp. Auralization model for the perceptual evaluation of tyre-road noise. *Applied Acoustics*, 132 :232–240, 03 2018.
- [12] A. Fiebig, P. Marla, and R. Sottek. Noise of electric and combustion-powered scooters and resulting annoyance. In *Proceedings - European Conference on Noise Control*, pages 1069–1074, 2012.