

Étude expérimentale de l'influence de la présence au sol d'objets diffractants sur la propagation du son en milieu urbain

X. Vuylsteke^a et J. Picaut^b

^aCSTB, 24, rue Joseph Fourier, 38400 St Martin D'Hères, France

^bIfsttar Nantes LAE, Route de Bouaye CS4, 44344 Bouguenais, France

xavier.vuylsteke@cstb.fr

De nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont déjà été menés en acoustique urbaine, en particulier concernant différents facteurs pouvant affecter la propagation du son (diffusion aux parois, effets des balcons, ratio hauteur des bâtiments et largeur de rue...). D'autres facteurs, comme l'effet de la micro-météorologie urbaine, l'influence de la végétalisation de surface ou l'effet de l'encombrement dans une rue, ont peu été étudiés, voire pas du tout pour le dernier. Dans la présente étude, nous nous proposons d'étudier expérimentalement l'influence d'un encombrement localisé sur le sol d'une rue (à l'image du mobilier urbain ou de voitures en stationnement), sur la propagation du son dans la rue. L'étude a été menée à l'aide d'une maquette de rue, constituée d'obstacles de différentes tailles et répartis suivant différentes configurations. Les résultats expérimentaux montrent globalement que l'encombrement produit effectivement un effet d'atténuation global du niveau sonore dans la rue, en fonction de la densité d'occupation du sol. Toutefois, cet effet est principalement visible à proximité de l'encombrement, lorsque le champ direct est absent. Enfin, le temps de réverbération n'est affecté que proche de la source, où celui-ci présente une croissance élevée (en comparaison à la rue vide), mais se stabilise autour des valeurs mesurées pour une rue vide.

1 Introduction

L'étude de la propagation du son en milieu urbain a donné lieu à de nombreux travaux de recherche ces dernières années [1, 2]. D'un point de vue physique, l'objectif est de mieux appréhender les phénomènes physiques mis en jeu dans le processus de propagation, de la caractériser puis de les modéliser, afin notamment de développer des modèles propagatifs plus complets, simulant au mieux la réalité et la complexité de la propagation acoustique en espace urbain. En complément, l'objectif est aussi d'étudier l'effet de certains dispositifs pouvant participer à la réduction des nuisances sonores et améliorer la qualité sonore des espaces. Ainsi, on peut par exemple citer les travaux récents sur l'effet de la diffusion acoustique par les façades urbaines [3], l'influence de la végétation et de la végétalisation de surface en milieu urbain [4], l'effet des conditions météorologiques sur la propagation acoustique dans les rues [5, 6], la présence de cours intérieures dans des bâtiments [7, 8], l'effet de l'ouverture supérieure d'une rue [9], l'effet et l'optimisation des balcons sur les bâtiments [10, 11], le développement de dispositifs de réduction du bruit localisés sur les façades urbaines [12], la mise en œuvre de façades calmes [13, 14]...

Dans ce document, nous nous intéressons à une problématique qui a donné lieu à très peu d'étude, portant sur l'effet de la présence de l'encombrement dans une rue (mobilier, voiture) sur la propagation acoustique. On notera toutefois un article récent sur un sujet similaire [15]. L'étude a été réalisée à l'aide de mesures sur des maquettes de rues à différentes échelles.

2 Dispositif expérimental

2.1 Système de mesure

Les mesures ont été effectuées dans la salle semi-anéchoïque de l'Ifsttar à Nantes. Le système est constitué d'une source omnidirectionnelle ayant une fréquence de coupure de 80 kHz (mini-source dodécahédrique), d'un microphone 1/4 de pouce (fréquence de coupure 100 kHz) monté sur un robot et d'une centrale d'acquisition haut-débit, l'ensemble étant piloté par ordinateur.

La maquette proprement dite est constituée de deux façades de 4 m de longueur sur 70 cm de hauteur, modélisées par des panneaux en bois verni, dont la surface peut être considérée comme acoustiquement réfléchissante. Le sol de la rue est modélisé par le sol de la salle d'essai et est donc

également considéré comme parfaitement réfléchissant. Deux campagnes de mesure ont été réalisées, l'une à l'échelle 1/10 en utilisant des cubes en bois de 9 cm d'arête pour modéliser les obstacles dans une configuration « académique », l'autre à l'échelle 1/24 en utilisant des modèles réduits de voiture pour simuler un encombrement « plus réaliste ». Dans les deux cas, plusieurs répartitions au sol de l'encombrement ont été testées. Il est important de préciser que les obstacles (cubes ou voitures miniatures) sont considérés comme des objets « statiques », et ne génèrent pas de signal sonore. Il est simplement question d'étudier ici la diffusion multiple du champ sonore sur les obstacles, en utilisant une source sonore extérieure, placée dans la rue.

Dans ce document, seuls les résultats pour la seconde configuration (*i.e.* étude « réaliste » à l'échelle 1/24) sont présentés.

2.2 Indices acoustiques mesurés

Le système de mesure permet de calculer les réponses impulsionnelles (RI) à chaque point de mesure, en utilisant un bruit blanc comme signal source [16]. En utilisant la méthode d'intégration itérative sur les RI obtenues, il est ainsi possible de calculer plusieurs indicateurs acoustiques, notamment le niveau sonore en régime permanent (en dB SPL), le temps de réverbération précoce (EDT en s), et le temps de réverbération TR sur plusieurs niveaux de décroissance et en particulier le TR20 (en s). Les valeurs des indices données par la suite sont présentées en global (*i.e.* l'analyse en bande de fréquence n'est pas détaillée ici).

2.3 Configurations d'étude

Afin de mettre en évidence l'influence de l'encombrement au sol pour un cas réaliste de rue, différentes dispositions de voitures ont été étudiées, à l'image de voitures en stationnement ou en circulation. L'échelle de la maquette a été fixée à 1/24 afin de correspondre au facteur d'échelle des voitures miniatures utilisées, de taille 190 × 95 × 50 mm. Dans cette partie de l'étude, la largeur de la rue a été fixée à 81 cm. Plusieurs répartitions ont été étudiées :

- configuration de référence « 0% » : rue vide (occupation du sol : 0%) ;
- configuration « 12% (a) » : 16 voitures disposées de manière régulière suivant deux lignes au centre de la rue (occupation du sol : 12%) (*cf.* figure 2(a)) ;

- configuration « 12% (b) » : 16 voitures disposées de manière régulière suivant deux lignes, le long des façades (occupation du sol : 12%) (cf. figure 2(b));
- configuration « 12% (c) » : 16 voitures disposées de manière régulière dans toute la rue (occupation du sol 12%) (cf. figure 2(c));
- configuration « 18% (a) » : 24 voitures disposées de manière régulière dans toute la rue avec une plus forte concentration au centre de la rue (occupation du sol 18%) (cf. figure 2(d));
- configuration « 18% (b) » : 24 voitures disposées de manière régulière dans toute la rue avec une plus forte concentration le long des façades (occupation du sol 18%) (cf. figure 2(e));
- configuration « 23% » : 31 voitures disposées de manière régulière (occupation du sol : 23%) (cf. figure 2(f)).

Les configurations 12% (a), (b) et (c) possèdent le même taux d'encombrement au sol (*i.e.* 12%); de même pour les configurations 18% (a) et (b).

Les voitures sont disposées suivant un maillage au sol de 9×8 éléments rectangulaires (cf. figure 1). La taille des mailles est de 180×90 mm de côté, soit la surface au sol d'une voiture. Un total de 3 lignes de mesure (numérotées de 1 à 3) a été retenu (cf. figure 1), avec un pas spatial de 45 mm :

- ligne 1 : ligne de mesures à 50 mm du sol et 45 mm d'une des façades ;
- ligne 2 : ligne de mesures à 500 mm du sol et 45 mm d'une des façades ;
- ligne 3 : ligne de mesures à 50 mm du sol à 405 mm des façades (*i.e.* au centre des rues à 50 mm du sol).

2.4 Analyse des résultats sur les lignes de mesures

L'ensemble des résultats, en fonction de la position d'observation, sont présentés aux figures 3 et 4 en termes de niveau sonore et aux figures 5 et 6 en termes de TR20.

2.4.1 Analyse des mesures sur le niveau global

En termes de niveau sonore, il est plus simple de baser l'analyse sur la pente des décroissances sonores observées pour chacune des configurations de répartition, et suivant chaque ligne de mesure. Ces pentes sont calculées à partir d'une évolution linéaire pour une abscisse allant de 500 mm à 2000 mm. Les résultats sont regroupés dans le tableau 1.

Suivant la ligne 1, on observe que la décroissance sonore augmente lorsque la densité d'occupation du sol croît. Une différence de 25 dB/100 m est observée pour un taux d'encombrement passant de 0 à 23%. Par ailleurs, la décroissance sonore évolue asymptotiquement avec l'augmentation du taux d'encombrement au sol. En complément, pour un même taux d'encombrement au sol, la configuration « 12% »(a) présente une décroissance

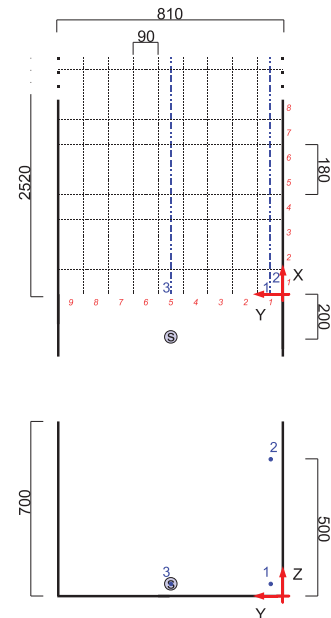


FIGURE 1 – Configurations de mesure (vues de dessus et sections transverses). Les traits pointillés correspondent au maillage au sol. Les traits mixtes (en bleu) correspondent aux lignes de mesures numérotées de 1 à 3. La source est positionnée au point $(-200,405,50)$ mm.

TABLEAU 1 – Décroissances du niveau sonore global (en dB par 100 m, à l'échelle réelle) calculées pour les 7 configurations de rue suivant chaque ligne de mesure.

Config.	Ligne 1	Ligne 2	Ligne 3
0%	13.2	17.6	10.8
12% (a)	28.1	20.3	21.5
12% (b)	35.6	21.5	22.3
12% (c)	36.3	23.9	23.9
18% (a)	37.3	24.2	23.0
18% (b)	37.6	24.7	27.4
23%	38.2	24.5	24.0

bien différente des configurations « 12% »(b) et (c) (écart de 8 dB/100 m environ). Pour ces deux dernières configurations, les points de mesures se trouvent dans la zone d'ombre créée par les obstacles. Ils se situent donc dans la zone sous influence de l'encombrement (influence prédominante par rapport au champ direct et aux premières réflexions), là où la décroissance sonore est plus élevée.

Suivant la ligne 2, les résultats montrent que la décroissance sonore augmente lorsque la densité d'occupation du sol croît. Une différence de 7 dB/100 m est observée pour un taux d'encombrement passant de 0 à 23%. En complément, et comme pour la ligne 1, la décroissance sonore augmente asymptotiquement avec l'augmentation du taux d'encombrement au sol.

Suivant la ligne 3, de la même façon, la décroissance sonore augmente lorsque la densité d'occupation du sol croît. Une différence de 13 dB/100 m est observée pour un taux d'encombrement passant de 0 à 23%. On note toutefois une valeur de décroissance plus élevée pour la configuration « 18% »(b) que pour la configuration « 23% ».

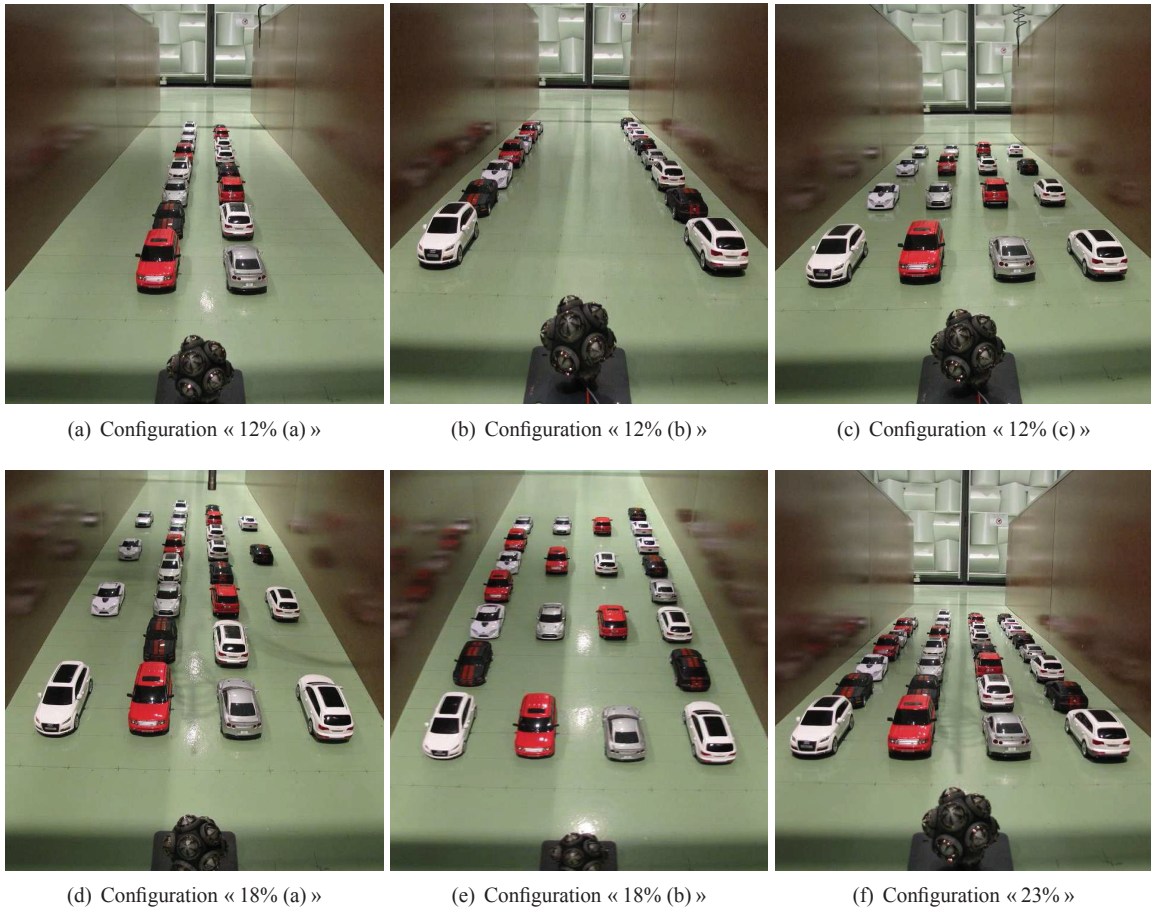


FIGURE 2 – Photos des configurations de mesure.

Comme attendu, la décroissance sonore dans une rue encombrée tient bien compte du taux d'encombrement du sol. Un écart maximal de 25 dB/100 m est constaté suivant la ligne 1 pour un taux d'encombrement du sol passant de 0% à 23%. La décroissance sonore évolue de manière asymptotique avec l'augmentation du taux d'encombrement au sol. Un facteur important est la présence de zone d'ombre des voitures. Au sein de ces zones, sous influence majoritaire de l'encombrement, la décroissance sonore est accentuée : on constate ainsi, suivant la ligne 1, pour les configurations « 12% »(a) et « 12% »(c), une différence de 8 dB/100 m. Enfin, l'influence de l'encombrement diminue avec la hauteur dans la rue. Cette influence passe de 25 dB/100 m (différence 0% - 23%, ligne 1) à 7 dB/100 m (différence 0% - 23%, ligne 2).

2.4.2 Analyse des mesures sur le TR20

Dans cette section, on s'intéresse au comportement du TR20 en fonction de la position du point d'observation, et notamment son augmentation en fonction de la distance à la source. Au sein de l'encombrement (*i.e.* proche du sol), le TR20 augmente jusqu'à la position longitudinale de 1000 mm. Dans cette situation (pour les lignes proches du sol, *i.e.* ligne 1 et 3) les pentes de la croissance du TR20 sont calculées à partir d'une approximation linéaire pour une abscisse allant de 100 mm à 1000 mm. En dehors de l'encombrement, l'analyse de la première campagne de mesure (non présentées ici) a permis de montrer que le TR20 présentait une évolution linéaire tout au long de la rue. Aussi, pour la ligne 2, se trouvant à 500 mm du sol, les pentes de la croissance du TR20 sont calculées pour une abscisse allant de 500 mm à 2000 mm.

Suivant la ligne 1, on observe que le temps de réverbération proche de la source, et en présence d'encombrement, présente une croissance plus élevée qu'en l'absence d'encombrement. L'écart maximal observé est de 2 s/100 m. Par ailleurs, le temps de réverbération en présence d'encombrement est plus faible proche de la source que pour une rue vide. Cependant, celui-ci croît beaucoup plus rapidement en présence d'encombrement. Après une certaine distance (ici position longitudinale de 1000 mm), le temps de réverbération est le même quelle que soit la configuration.

Suivant la ligne 2, on observe que l'écart maximal observé est de 0.3 s/100 m. En dehors de l'encombrement, à 500 mm au dessus, celui-ci n'a aucun effet sur le temps de réverbération.

Suivant la ligne 3, on observe qu'au centre de la rue (*i.e.* en présence de champ direct), l'écart maximal observé est de 3.7 s/100 m. Cette croissance est observée jusqu'à une abscisse de 1000 mm. À de plus grandes distances, comme pour la ligne 1, il est difficile d'observer un écart entre les configurations et la rue vide.

En conclusion, le temps de réverbération proche de la source et en présence d'encombrement présente une croissance plus élevée qu'en l'absence d'encombrement. L'écart maximal observé est de 2 s/100 m.

TABLEAU 2 – Croissance du TR20 (en s par 100 m, à l'échelle réelle) calculées pour les 7 configurations de rue suivant chaque ligne de mesure.

Config.	Ligne 1	Ligne 2	Ligne 3
0%	3.5	1.2	3.7
12% (a)	5.4	0.9	5.6
12% (b)	5.3	1.1	6.7
12% (c)	4.5	1.1	6.4
18% (a)	5.5	1.1	7.1
18% (b)	5.7	1.2	7.4
23%	5.4	1.1	7.0

3 Conclusion

L'objectif de cette étude expérimentale était d'étudier l'impact d'un encombrement (présence d'objets au sol) sur la propagation sonore en zone urbaine. Deux campagnes expérimentales ont été menées sur la base de mesures sur maquettes acoustiques, l'une à l'échelle 1/10 (configuration « académique », non détaillée ici), l'autre à l'échelle 1/24 avec des voitures miniatures. L'ensemble des résultats expérimentaux a permis d'établir un certain nombre de résultats.

Concernant la campagne « académique », dont l'analyse n'est pas détaillée dans le présent document, les résultats montrent que :

- l'encombrement accentue la décroissance sonore au sein de la rue. La décroissance est d'autant plus élevée que la densité d'obstacle est élevée. La densité de l'encombrement est un facteur d'autant plus important que la rue est étroite ;
- il y a invariance du niveau global, en présence d'encombrement par rapport à une rue vide, si la zone étudiée est soumise au champ direct. En dehors de cette zone, l'encombrement a un effet de diffusion du son et accentue la décroissance du niveau global. La décroissance liée à l'encombrement est plus forte à proximité de celui-ci ;
- la présence d'encombrement est à l'origine d'une diminution de l'EDT à proximité de la source et pour les récepteurs proches du sol. Par contre, l'EDT subit une hausse dans la zone non soumise au champ direct ;

Concernant la seconde campagne (présentée dans le document), les résultats montrent :

- qu'au niveau du sol, à proximité des parois, une différence de décroissance sonore de 25 dB/100 m est constatée, lorsque le taux d'encombrement passe de 0% à 23%. Au niveau du sol, au milieu de la rue (*i.e.* sous influence du champ direct), cette différence est de 13 dB ;
- qu'en s'éloignant de l'encombrement (mais au dessus), l'effet de celui-ci sur la décroissance sonore diminue. À 500 mm du sol, à proximité des parois, une différence de décroissance sonore de 7 dB/100 m est observée, lorsque le taux d'encombrement passe de 0% à 23% ;

- qu'à 500 mm au dessus du sol, celui-ci n'a pas d'influence sur le temps de réverbération ;
- qu'à 45 mm du sol (au niveau de l'encombrement), le temps de réverbération est plus faible en présence d'encombrement (relativement à la rue vide). Cependant, le temps de réverbération croît plus rapidement en rue encombrée, si bien qu'à 1200 mm de la source (à l'échelle de la maquette), il n'y a plus d'écart de temps de réverbération entre une configuration vide et encombrée.

Pour conclure, la présence d'un encombrement a bien un effet visible sur la propagation acoustique, aussi bien en termes de niveaux sonores (augmentation de la décroissance) que de réverbération (diminution globale du TR), pour des points d'observation localisés dans l'encombrement. En dehors de l'encombrement, en présence du champ direct, l'effet de l'encombrement est beaucoup moins visible. Dans une configuration multi-sources (donc en présence presque systématique d'un champ direct, ce qui est le cas lorsque chaque obstacle est également une source sonore), il est probable que l'effet globale de la présence d'encombrements soit finalement très réduit.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) pour son soutien financier (conventions N°06.04.C.0070 et N°12.17.C.0025).

Références

- [1] Jian KANG : *Acoustics of Long Spaces : Theory and Design Guidance*. Thomas Telford, 2002.
- [2] Jian KANG : *Urban Sound Environment*. CRC Press, septembre 2006.
- [3] Hiroshi ONAGA et Jens Holger RINDEL : Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades. *Applied Acoustics*, 68(3): 310–325, mars 2007.
- [4] Hong Seok YANG, Jian KANG et Min Sung CHOI : Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment*, 50:44–55, avril 2012.
- [5] Takuya OSHIMA, Masashi IMANO, Yasuhiro HIRAGURI et Yoshikazu KAMOSHIDA : Linearized euler simulations of sound propagation with wind effects over a reconstructed urban terrain using digital geographic information. *Applied Acoustics*, 74(12):1354–1366, décembre 2013.
- [6] Timothy VAN RENTERGHEM et Dick BOTTELDOOREN : Meteorological influence on sound propagation between adjacent city canyons : A real-life experiment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(6):3335–3346, juin 2010.
- [7] Miguel MOLERON, Simon FELIX, Vincent PAGNEUX et Olivier RICHOUX : Low frequency acoustic resonances in urban courtyards. *Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1):74–82, janvier 2014.
- [8] Maarten HORNIKX et Jens FORSSÅN : Modelling of sound propagation to three-dimensional urban courtyards using the extended fourier PSTD method. *Applied Acoustics*, 72(9):665–676, septembre 2011.
- [9] O. RICHOUX, C. AYRAULT, A. PELAT, S. FELIX et B. LIHOREAU : Effect of the open roof on low frequency acoustic propagation in street canyons. *Applied Acoustics*, 71(8):731–738, août 2010.
- [10] Takashi ISHIZUKA et Kyoji FUJIWARA : Traffic noise reduction at balconies on a high-rise building facade. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(3): 2110–2117, mars 2012.
- [11] Y. G. TONG, S. K. TANG et M. K. L. YEUNG : Full scale model investigation on the acoustical protection of a balcony-like facade device. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2):673–676, août 2011.
- [12] Judicael PICAUT et Denis SCOUARNEC : Using acoustic diffusors to reduce noise in urban areas. *Acta Acustica United with Acustica*, 95(4):653–668, août 2009.
- [13] Yvonne de KLUIZENAAR, Erik M. SALOMONS, Sabine A. JANSSEN, Frank J. van LENTHE, Henk Vos, Han ZHOU, Henk M. E. MIEDEMA et Johan P. MACKENBACH : Urban road traffic noise and annoyance : The effect of a quiet facade. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(4):1936–1942, octobre 2011.
- [14] Timothy VAN RENTERGHEM et Dick BOTTELDOOREN : Focused study on the quiet side effect in dwellings highly exposed to road traffic noise. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(12):4292–4310, décembre 2012.
- [15] Elzbieta WALERIAN, Ryszard JANCZUR et Mieczyslaw CZECHOWICZ : The role of mutual screening by vehicle bodies in traffic noise propagation throughout a built-up area. *Applied Acoustics*, 76:291–299, février 2014.
- [16] J. PICAUT, T. LE POLLES, P. L'HERMITE et V. GARY : Experimental study of sound propagation in a street. *Applied Acoustics*, 66(2):149–173, février 2005.

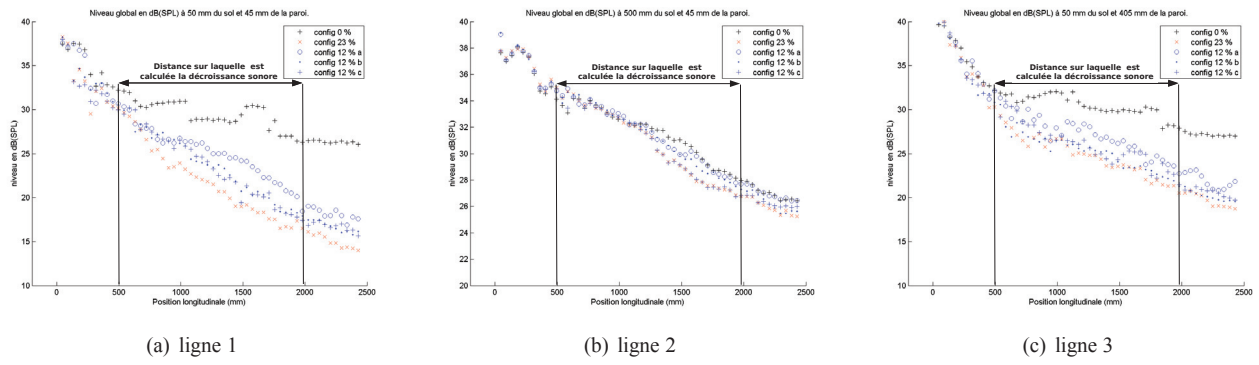


FIGURE 3 – Niveaux sonores obtenus pour les configurations 0%, 12% (a-b-c) et 23%.

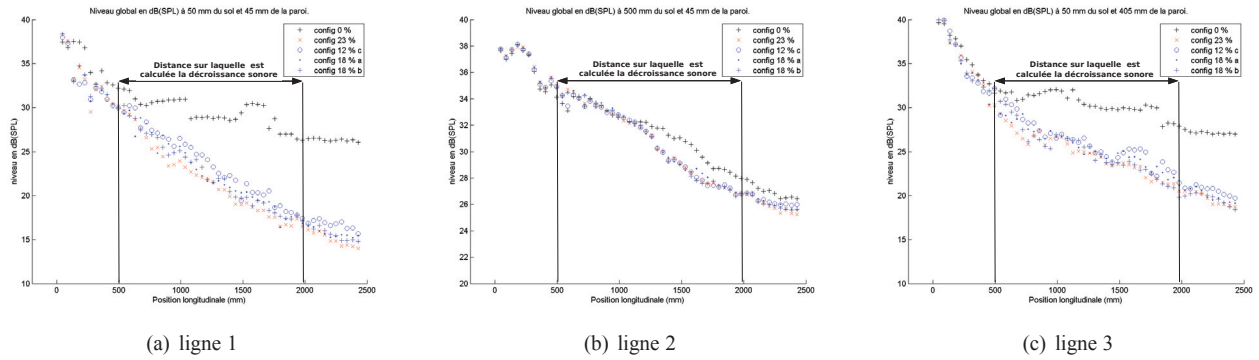


FIGURE 4 – Niveaux sonores obtenus pour les configurations 0%, 12% (c), 18% (a-b) et 23%.

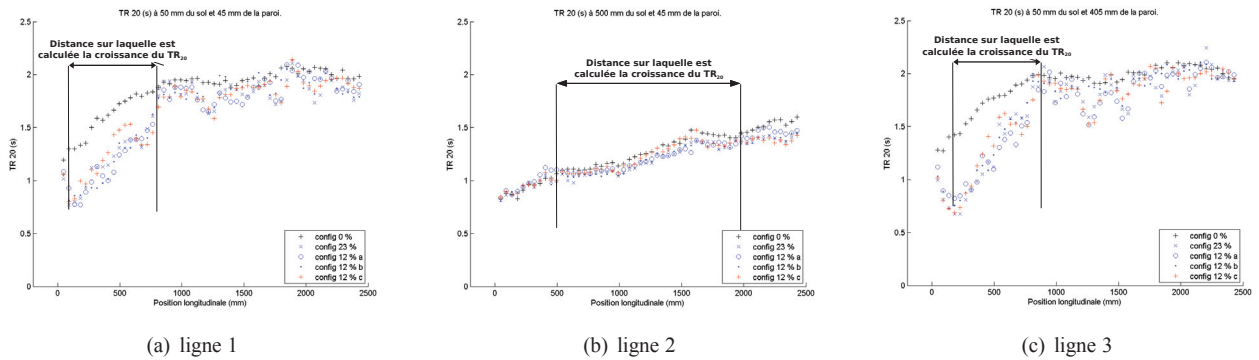


FIGURE 5 – TR20 obtenus pour les configurations 0%, 12% (a-b-c) et 23%.

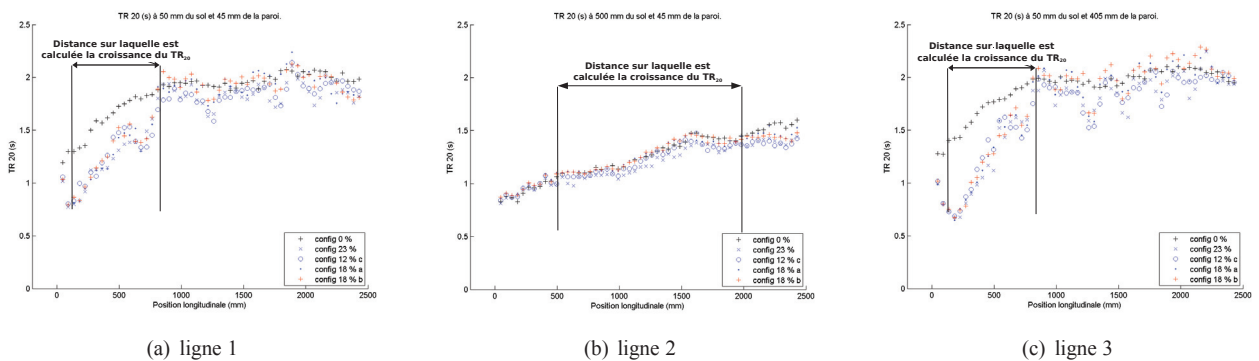


FIGURE 6 – TR20 obtenus pour les configurations 0%, 12% (c), 18% (a-b) et 23%.