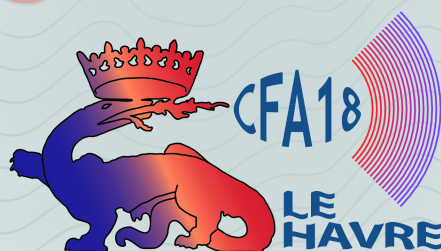


CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018 14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Outil d'aide à la décision pour la réalisation de mobiliers urbains acoustiques (Projet RÉMUS)

J. Defrance^a, J. Maillard^a, J.-D. Laforgue^b, S. Bouakil^c et B. Brunet^c

^aCSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-D'Heres, France

^bJDL (Jean-Didier Laforgue Architecte-Urbanisme), 25 rue d'Haute, 75010 Paris, France

^cDépartement du Nord, 43 rue Gustave Delory, 59 047 Lille, France

jerome.defrance@cstb.fr

L'objectif du projet RÉMUS est de créer et de mettre à disposition, notamment des maîtres d'ouvrage, un outil d'aide à la décision pour la réalisation de mobiliers urbains innovants de type écran antibruit de faible hauteur (1 mètre) et visant la réduction de l'impact acoustique des transports terrestres dans les lieux de vie urbains. Pour ce faire, il a été proposé d'élaborer un guide interactif permettant de juger, en amont d'un projet d'aménagement urbain, de la pertinence d'intégrer une protection sonore de ce type dans un contexte donné. Cet outil d'aide à la décision vise à prendre en compte conjointement les aspects de performances et d'intégration. Dans une première phase, nous avons défini les paramètres architecturaux, environnementaux et acoustiques à faire varier (morphologie urbaine, type de trafic,...), afin de créer un ensemble complet de scénarios urbains réalistes, ceci en zoomant sur le cœur de ville. Parallèlement, nous avons choisi des indicateurs permettant d'évaluer a priori les performances du mobilier antibruit. Ces indicateurs sont de trois types : acoustiques, urbains et routiers. Dans une deuxième phase, des simulations ont été réalisées pour chaque scénario de manière à obtenir, d'une part, une évaluation quantitative de l'intégration basée sur les indicateurs proposées et, d'autre part, une évaluation perceptive de l'apport du dispositif de protection à partir de séquences sonores pour différents points d'écoute. Dans une dernière phase, l'ensemble de ces résultats ont été réunis dans un guide d'aide à la décision sous la forme de contenu interactif disponible en ligne sur internet. Le but est que le rendu des simulations soit clair et réutilisable.

1 Présentation du projet RÉMUS

Une des solutions pour diminuer efficacement l'impact acoustique des infrastructures de transport est la mise en place de protections antibruit de plusieurs mètres de hauteur, ce qui n'est pas envisageable pour l'urbain dense et le cœur de ville. D'autre part, la réglementation se base sur des niveaux sonores moyens de long terme en façade des bâtiments, ce qui est peu adapté aux problématiques de milieu urbain où les piétons et les cyclistes occupent une place croissante ; il apparaît donc opportun de développer de nouveaux dispositifs de faible hauteur (typiquement 1 mètre), intégrables à l'urbain, et visant prioritairement la qualité sonore des espaces publics. Le *mobilier acoustique urbain* est une de ces solutions innovantes qui a prouvé son efficacité, théoriquement et expérimentalement [1-4].

L'objectif principal du projet RÉMUS a été de créer et de mettre à disposition, notamment des aménageurs de la ville mais aussi des riverains, un outil d'aide à la décision pour la réalisation de mobiliers urbains innovants de type écran acoustique de faible hauteur, et visant la réduction de l'impact acoustique des transports terrestres dans les lieux de vie urbains. Il a ainsi été proposé d'élaborer un guide interactif permettant de juger, en amont d'un projet d'aménagement urbain, de la pertinence d'intégrer une protection sonore de ce type en facilitant la compréhension des phénomènes acoustiques en jeu, notamment par l'écoute. Cet outil d'aide à la décision vise à prendre en compte conjointement les aspects de performances et d'intégration, les deux piliers de l'intervention acoustique en milieu urbain [5].

2 Définition des scénarios retenus

La pertinence du dispositif acoustique concerne avant tout les espaces de flux de la ville moderne, c'est-à-dire de la ville développée au cours du XIX^e siècle jusqu'à nos jours (à quelques exceptions près, de type *place royale* au XVII^e).

Sur ces sites, il s'agit d'atténuer les nuisances dues aux flux routiers en milieu urbain qu'ils supportent. Ces axes de déplacement sont également mobilisés pour recevoir des transports type tramway, générateur également de nuisances, ou bus (qui sont souvent hybrides et seront à court terme électriques, et donc non identifiés comme une catégorie spécifique).

Ces flux véhicules sont ponctuellement croisés par les flux piétons qui traversent ces axes de déplacements au niveau des feux.

A l'opposé, les rues de la ville ancienne, souvent étroites, historiquement sans trottoirs, ne sont pas adaptées au dispositif de mobilier acoustique urbain. En effet, le piéton est généralement trop près de la source du bruit d'une part et d'autre part l'implantation de la protection urbaine acoustique serait contraignante dans un espace où les usages de traversées nombreuses dominent. Enfin, les vitesses y étant largement réduites, le bruit du véhicule n'est plus un enjeu majeur en termes d'acoustique urbaine.

Les typologies prises en compte (et les cas associés les déclinant, 21 au total) sont les cinq suivantes :

- Les grandes places, avec espace central (généralement de type *square*) entourées de voies dont fréquemment l'une au moins est structurante donc support de flux importants (4 cas),
- Les places plus modestes mais longées par un flux important (4 cas),
- Les larges avenues (environ 40 mètres) (8 cas),
- Les voies importantes supérieures à 20 mètres de large jusqu'à 30 mètres (4 cas),
- Un cas particuliers type berges sous pont routier.

A partir de ces typologies, deux familles de paramètres permettant de décrire la nature des flux urbains traités ont été retenues :

- 2 Vitesses des voitures, avec ou sans tramway,
- Type de débit : fort (jour) ou faible (nuit).

Des plans des différents exemples typologiques [5] ont été établis avec un code commun de représentation (Figure 1).

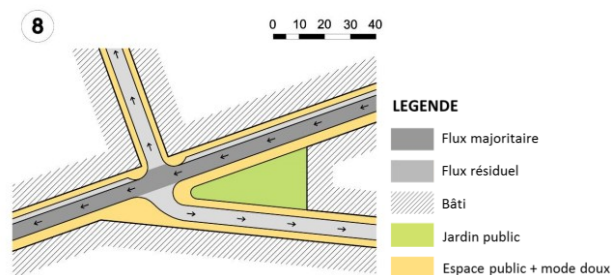


Figure 1: Plan pour le cas N°8 : Square avec flux élevé

3 Choix d'indicateurs

Dans le but d'obtenir une approche intégrée, trois types d'indicateurs ont été retenus : acoustiques, urbains et routiers.

3.1 Indicateurs acoustiques

On propose d'évaluer deux types d'indicateurs acoustiques, avec et sans les dispositifs de protection antibruit. D'une part, des indicateurs basés sur le niveau de *bruit moyen* reçu sur une zone horizontale d'exposition. D'autre part, des indicateurs basés sur l'*évolution dynamique* du niveau de bruit au cours du temps en différents points récepteurs (proches - 3 m - ou éloignés du mobilier urbain).

En effet, les indices énergétiques obtenus à partir de niveaux moyennés sur de longues périodes constituent certes une information importante mais ne sont pas suffisants pour caractériser de manière précise le champ sonore produit par le trafic routier en milieu urbain. Les accélérations et décélérations fréquentes des véhicules dues aux ralentisseurs, ronds-points et feux de circulations induisent des émissions sonores fortement instationnaires qui peuvent être source de gêne sans pourtant être prises en compte par les indices de niveaux moyennés. On complète par conséquent les indices de bruit moyen exposés plus haut par des indices dynamiques permettant de caractériser plus précisément la nature instationnaire du bruit de trafic urbain. Ces indicateurs sont calculés à partir de l'évolution temporelle du niveau de niveau acoustique équivalent pondéré A intégré sur une période de 1 seconde ($L_{Aeq,1s}$). La durée nécessaire à l'estimation de ces indices est généralement supérieure à 15 minutes afin que la période soit représentative d'une situation de trafic en milieu urbain.

Concernant le *bruit moyen*, les deux indicateurs retenus sont le niveau sonore équivalent L_{Aeq} et le **gain moyen** en dB(A) apporté par la mise en place de mobiliers acoustiques urbains.

Concernant le *bruit dynamique*, les trois indicateurs considérés sont le **L10** (caractérisation du bruit crête) ainsi que les pourcentages de temps où le niveau sonore est **inférieur à 60 dB(A)** (cumul des périodes plutôt calmes) et **supérieur à 70 dB(A)** (cumul des périodes bruyantes).

De plus, il est possible d'écouter, aux points différents points récepteurs, les **séquences auralisées** dans les situations sans et avec mise en place du mobilier acoustique urbain, et de passer de l'une à l'autre pour comparaison subjective, ceci tout en visualisant les **évolutions du $L_{Aeq,1s}$** correspondant à ces deux séquences sonores.

3.2 Indicateurs urbains

Afin d'analyser holistiquement la pertinence de recourir à un tel dispositif acoustique d'écran urbain de faible hauteur, une méthodologie permettant de croiser les paramètres urbains majeurs à anticiper a été développée.

Sur une échelle de 3 (+ pour *favorable*, - pour *difficile à adapter* et 0 pour *à accompagner*), on peut ainsi évaluer la pertinence :

- des apports acoustiques au regard des usages existants ou attendus,
- des déplacements actuels et futurs,

- de l'insertion dans un contexte urbain ou paysager (et donc la nature de sa mise en œuvre),
- de la pérennité dans le temps du dispositif en anticipant sa protection et gestion.

Cette évaluation se fonde sur quatre indicateurs :

- **UbEnv, l'insertion urbaine, la configuration et la qualification de l'espace.** la configuration et la qualification de l'espace sont-elles propices à accueillir les écrans urbains ? Y-a-t-il des préconisations spécifiques d'insertion dans le site ?
- **UbMob, la mobilité : déplacements urbains des usagers piétons et cycles :** les impacts de l'implantation des écrans urbains sur les déplacements des usagers piétons et cycles sont-ils pénalisants ?
- **UbUsag, les usages :** l'implantation des écrans urbains favorise-t-elle un développement de l'usage, de l'animation et de l'appropriation de l'espace public traité ?
- **UbGest, les risques de dégradations :** selon le fonctionnement social-urbain du site (dégradations identifiées à proximité, tags) d'une part et la nature de l'implantation dans l'espace des écrans (pouvant contraindre certains passages) d'autre part, ces écrans urbains risquent-ils d'être dégradés et demandent-ils une mise en œuvre spécifique pour en assurer la pérennité dans le temps ?

Pour chacun des scénarios répertoriés précédemment, on évalue la valeur des quatre indicateurs urbains (Figure 2).

UbEnv	UbMob	UbUsa	UbGest
+	-	+	0

Figure 2 : Valeurs des indicateurs urbains pour une place traversée par un axe important

3.3 Indicateurs routiers

On évalue trois indicateurs permettant de qualifier l'implantation du mobilier urbain du point de vue de l'utilisateur de la route :

- **La sécurité des usagers.** Cet indicateur permet d'évaluer : 1/ Si la conception de la route est conforme aux réglementations et règles de l'art en matière de sécurité ; 2/ Si la conception de la route intègre une approche visant à en faciliter ou améliorer sa compréhension par l'usage ; 3/ Si la voie est compatible avec les usages (accès, stationnement, traversées) qui en sont faits au niveau local. Le but est de traiter les points de conflits dans le respect du « cadre de vie », de manière hiérarchisée et en mettant en œuvre une concertation adaptée aux enjeux ;
- **La prise en compte de la diversité et des spécificités des différents usages.** Cet indicateur vise à évaluer si le projet prend en compte les usages et les pratiques spécifiques de la voirie et de ses abords (poussettes, PMR, déplacements saisonniers,

traditionnels, agricoles) et si la modularité de la voie et des espaces publics attenants permet cette prise en compte ;

- **L'optimisation des emprises nécessaires au projet.** Cet indicateur permet de s'assurer que les emprises nécessaires au projet ont été identifiées puis optimisées en fonction du contexte local, en concertation avec les parties intéressées.

Pour ces indicateurs routiers, il existe trois niveaux de performance pouvant leur être associés :

- **Base (B) :** Niveau correspondant à la réglementation si elle existe, ou à la pratique courante (état de l'art),
- **Performant (P) :** Niveau correspondant à de bonnes pratiques actuelles,
- **Très Performant (TP) :** Niveau calibré par rapport aux meilleures pratiques actuelles, c'est-à-dire les performances maximales constatées dans des opérations à haute qualité environnementale, tout en veillant à ce qu'il reste atteignable.

4 Simulations acoustiques

4.1 Modélisation des scénarios

L'ensemble des simulations est réalisée à l'aide des logiciels MithraSON et Micado du CSTB. MithraSON est un logiciel de prévision des niveaux et de simulation auditive (auralisation) adapté aux bruits des transports et activités humaines en environnements urbains extérieurs [6-11]. Micado est un logiciel de calcul par éléments de frontière (BEM) bien adapté à l'évaluation des performances des écrans acoustiques complexes [12].

La modélisation des scénarios suit les étapes suivantes :

- Calcul de la perte par insertion d'un écran bas typique en site ouvert à l'aide de Micado,
- Détermination des caractéristiques d'un écran droit simple équivalent en termes de performance,
- Pour chaque typologie, saisie de la géométrie du bâti, des voiries et écrans pour les variantes géométriques associées à la configuration améliorée,
- Pour chaque typologie, détermination et saisie des paramètres de trafic communs aux deux variantes non-protégées et protégées (débits et vitesses moyennes sur les voies de circulation),
- Pour chaque typologie, saisie des points récepteur et des cartes de bruit.

Le mobilier acoustique urbain est un **écran droit absorbant de 1 m de hauteur et 0,4 m d'épaisseur**. L'impédance acoustique de sa surface est évaluée selon le modèle de Delany et Bazley avec une résistivité au passage de l'air de 30 kPa.s.m^{-2} (pas de transmission sonore).

Il est à noter que le projet RÉMUS n'avait pas pour but d'optimiser ou de comparer différentes géométries et/ou impédances d'écrans antibruit urbains. C'est la raison pour laquelle un seul type de mobilier acoustique urbain a été considéré, ce dernier étant similaire à celui testé dans le cadre du projet HOSANNA [13-14], mais avec âme pleine.

4.2 Calcul de la performance acoustique du mobilier urbain

La perte par insertion est calculée à l'aide du logiciel Micado pour différentes positions de sources et récepteurs en faisant l'hypothèse d'une ligne source incohérente, hypothèse classiquement utilisée pour la prévision des performances d'écrans antibruit.

Une première série de calculs concerne les sources associées aux véhicules routiers légers. Pour ces véhicules, on prend en compte deux hauteurs de source, l'une à 5 cm du sol pour le bruit de contact pneu/chaussée et l'autre à 30 cm pour le bruit de propulsion moteur. La Figure 3 présente la géométrie de l'écran et le positionnement des sources et récepteurs utilisés pour caractériser les performances acoustiques du mobilier en présence de véhicules légers.

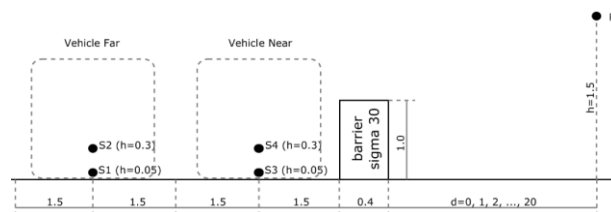


Figure 3 : Géométrie de l'écran et position des sources et récepteurs – Véhicules légers

Une deuxième série de calculs concerne le cas des tramways. Une seule hauteur de source à 5 cm est considérée dans ce cas. Cette configuration, incluant un écran central absorbant de 10 cm, est illustrée en Figure 4.

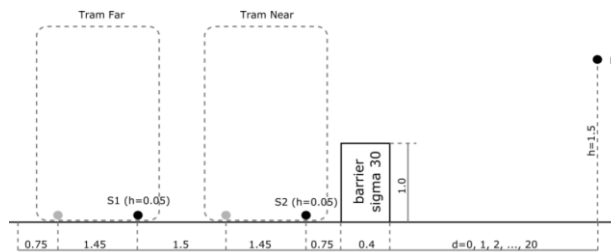


Figure 4 : Géométrie de l'écran et position des sources et récepteurs – Tramways avec écran central

4.3 Création des modèles 3D

L'ensemble des 21 configurations est modélisé sous le logiciel MithraSON. Les écrans acoustiques urbains sont placés à 1,5 m de l'axe central des voies de circulation dont la largeur est fixée à 3 m. On suppose que les voiries de largeur supérieure à 3 m, nécessaires notamment pour les engins de secours, sont matérialisées par une bande utile du côté opposé à l'écran. Ce positionnement concerne le bord intérieur de l'écran (côté voirie). Les écrans sont interrompus au droit des passages piétons de manière à maintenir une largeur de passage de 3 m. Les récepteurs sont placés à une hauteur de 1,5 m (correspondant à l'oreille). Le récepteur situé en bordure de zone à protéger est placé à 3 m minimum de la bordure de voirie (qui correspond également au bord intérieur de l'écran). Les cartes de LAeq englobent les zones à protéger en se limitant à une bordure distante de 3 m minimum des bords de voirie.

A titre d'illustration, on présente en Figure 5 une vue 3D du cas N°5 modélisé avec MithraSON

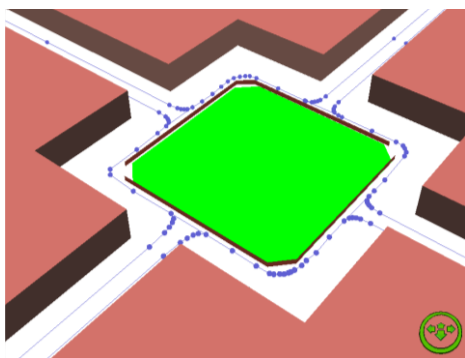


Figure 5 : Capture d'écran de la vue 3D analyse du logiciel MithraSON pour le cas N°5. Les axes de voirie sont en violet (les points représentent les nœuds de la géométrie)

4.4 Génération des séquences sonores

Les atténuations sonores entre segments de voie et points récepteurs sont calculées par MithraSON à partir d'un tir de rayons et en appliquant la méthode de calcul Harmonoise (d'où le choix des hauteurs de sources évoqué précédemment). Les sources linéaires sur l'axe des voies de circulation sont décomposées en sources linéiques élémentaires de longueur inférieure ou égale à 10 m. Les calculs sont effectués pour les deux variantes sans et avec écrans acoustiques urbains. La variante « avec écrans » correspond à un scénario où l'ensemble des mobiliers acoustiques urbains sont mis en œuvre sur le site.

5 Présentation de l'outil final

5.1 Fonctionnement

L'outil est disponible en ligne à l'adresse suivante (ne pas utiliser Internet Explorer ; utiliser Firefox ou Chrome) : <http://ecran-urbain.cstb.fr>.

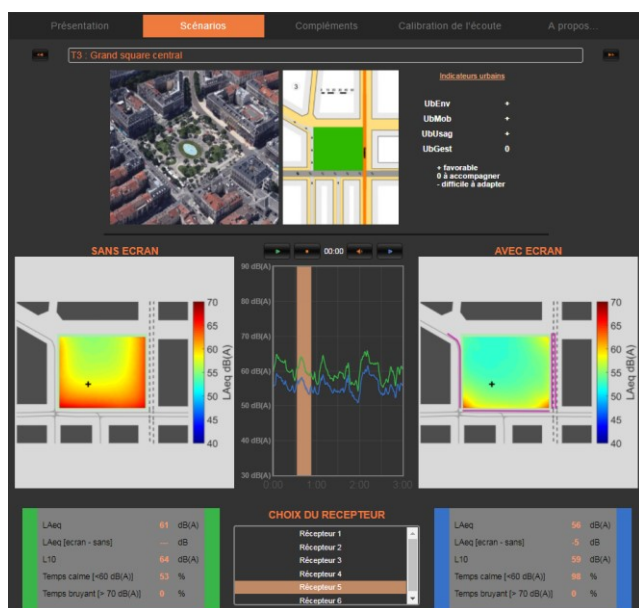


Figure 6 : Vue de l'interface de l'outil (partie résultats). Exemple du Grand square central

Une vue de la partie *résultats* de l'interface est donnée en Figure 6.

Les résultats détaillés des indicateurs urbains peuvent être affichés, pour chacun des 21 cas étudiés, dans une fenêtre pop-up dédiée (Figure 7).

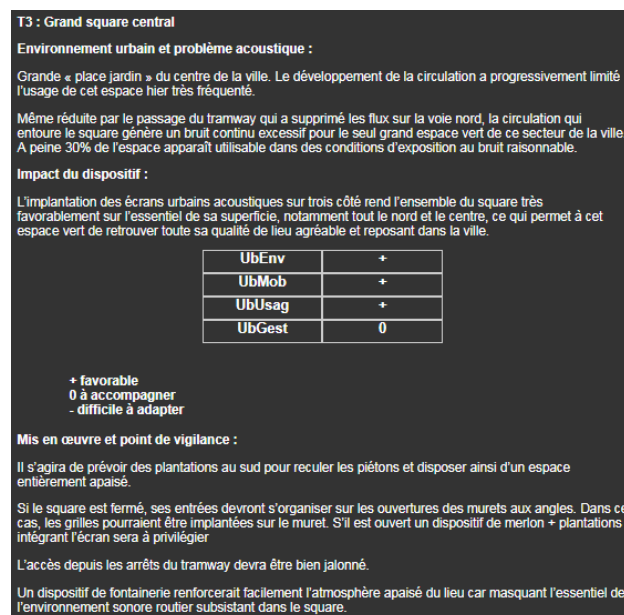


Figure 7: Vue de l'interface de l'outil (partie résultats). Exemple du Grand square central

En outre, avant toute écoute, un système simple de calibration de la restitution sonore peut être activé, soit au sonomètre, soit le cas échéant « à l'oreille ».

5.2 Cas particulier du passage sous pont

Un des cas particuliers étudié dans ce projet (cas N°21) est celui d'une promenade ou piste cyclable passant sous un pont (Figure 8, pont de 5 m de hauteur, route à 2 voies).

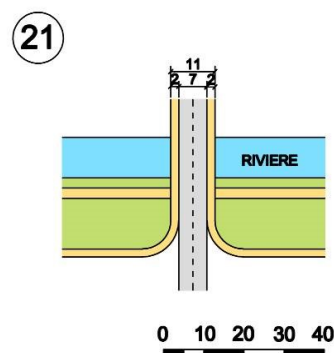


Figure 8: Plan pour le cas N°21 : Passage sous pont (les récepteurs sont à 5 – 1,5 = 3,5 m sous le plan de roulement)

C'est une situation fréquente pour les axes piétons ou cyclistes situés le long d'une rivière en site urbain (voie sur berge, ancien chemin de halage...). Ces chemins, propices aux modes doux, sont généralement d'une grande qualité environnementale (présence de l'eau, de végétation, d'activités nautiques, vue dégagée...) et sont donc à préserver dans une optique de valorisation des modes actifs de déplacement dans la ville. Cependant, ils comportent toujours des zones très bruyantes au niveau des ponts routiers et ponts tramways les enjambant, aucun seuil réglementaire n'étant à respecter.

Or, dans ce cas précis, le récepteur est en « zone d'ombre profonde » de diffraction par l'écran urbain, zone où l'atténuation sonore due à l'ajout du mobilier acoustique est très significative (Figure 9), alors que cette protection antibruit de faible hauteur entrave peu la vue latérale (sur la rivière) pour l'automobiliste ou le passager du tramway. Cette solution est donc très prometteuse.

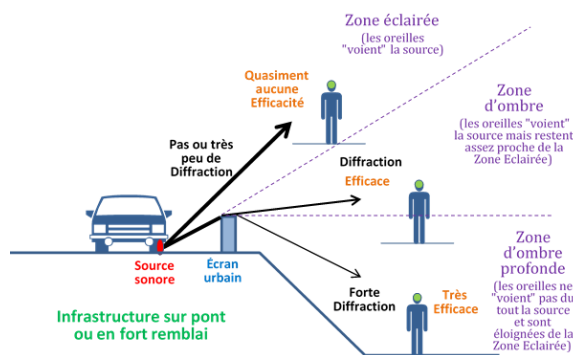


Figure 9 : Potentiel d'efficacité acoustique d'un écran urbain en fonction de la position relative du récepteur

Les simulations montrent des efficacités de l'écran urbain de 6 à 10 dB(A) (Figure 10, de 0 à 40 m du pont).



Figure 10 : Carte horizontale de Gain – Passage sous pont

En plus de ce gain significatif, les évolutions temporelles du $LA_{eq,1s}$ et les séquences sonores permettent de mettre en évidence le « gommage » des pics sonores au passage de chaque voiture, ce qui diminue le caractère agressif de l'ambiance acoustique initiale. En Figure 11, on montre ces évolutions sur 3 minutes pour le point récepteur R3 situé (en contrebas) à une distance de 20 m du pont.

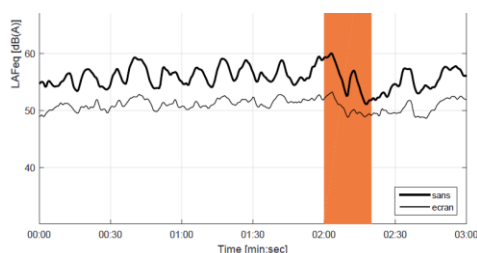


Figure 11 : Evolutions du $LA_{eq,1s}$ – Passage sous pont

6 Conclusion

Dans ce projet RÉMUS, un outil interactif original d'aide à la décision pour la réalisation de mobiliers acoustiques urbains a été développé. Cet outil, librement accessible en ligne (<http://ecran-urbain.cstb.fr>), offre une approche holistique par l'utilisation de trois types d'indicateurs : acoustiques, urbains et routiers, ceci sur 21 configurations classiques d'environnement urbain. Il donne en outre la possibilité d'une approche perceptive et comparative (sans/avec écran) par écoute de séquences sonores simulées issues du logiciel MithraSON.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (Ademe) pour son soutien financier (Convention n°1417C0002). Ce projet a été effectué dans le cadre de l'Appel à Projets de Recherche 2013 de l'Ademe "Urbanisme durable et environnement sonore : outils, guides, solutions techniques ou matériaux".

Références

- [1] Defrance J, Jean P, Acoustical performance of innovative vegetated barriers, InterNoise 2013, Innsbruck
- [2] Koussa F, Defrance J, Jean P, Blanc-Benon P. Acoustic performance of gabions noise barriers: numerical and experimental approaches, Applied Acoustics 74(1), 189–197 (2013)
- [3] Defrance J, et al., Acoustical performance of complex-shaped earth berms, 4075-4081, Acoustics 2012 Nantes
- [4] Baulac M, Defrance J, Jean P, Minard F, Efficiency of low height noise protections in urban areas: Predictions and scale model measurements, Acta Acustica 92(4), 530-539 (2006)
- [5] Maillard J, Defrance J, Laforgue J-D, Bouakil S, Brunet B. Projet RÉMUS : Guide d'aide à la décision pour la réalisation de mobiliers urbains acoustiques. Rapport final (janvier 2017)
- [6] Logiciel MithraSON <http://logiciels.cstb.fr/sante-confort/acoustique-environnementale-et-urbaine/mithra-son/>
- [7] Maillard, J. & Kacem, A. Auralization Applied to the Evaluation of Pedestrian and Bike Paths in Urban Environments Proc. of Internoise 2016, Hamburg (G)
- [8] Maillard J, Jagla J. Real Time Auralization of Non-Stationary Traffic Noise - Quantitative and Perceptual Validation in an Urban Street AIA-DAGA 2013, Merano, Italy
- [9] Maillard J, Jagla J. Auralization of non-stationary traffic noise using sample based synthesis - Comparison with pass-by recordings, Proc. of Internoise 2012, New York City, New York (2012)
- [10] Jagla J, Maillard J, Martin N. Sample-based engine noise synthesis using an enhanced pitch-synchronous overlap-and-add method, JASA 132, 3098-3108 (2012)
- [11] Maillard J. Prediction and auralization of construction site noise, EuroNoise 2009, Edinburgh, Scotland
- [12] Logiciel MICADO <http://www.cstb.fr/dae/fr/nos-produits-et-formations/outils-de-calcul/micado.html>
- [13] Defrance J, Jean P et al. Innovative barriers exploiting natural materials, Projet Collaboratif européen HOSANNA, www.greener-cities.eu (2009-2013)
- [14] Rådsten-Ekman M, Vincent B, Anselme C, Mandon A, Rohr R, Defrance J, Van Maercke D, et al., Case-study evaluation of a low and vegetated noise barrier in an urban public space, InterNoise 2011, Osaka, Japan