

DÉTERMINATION DE NORMES DE BRUIT POUR LES AVERTISSEURS SONORES SPÉCIAUX DES VÉHICULES PRIORITAIRES EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE

Etude relative aux valeurs d'émission et à la
propagation en milieu urbain



OCTOBRE 2020

Bruxelles Environnement



DÉTERMINATION DE NORMES DE BRUIT POUR LES AVERTISSEURS SONORES SPÉCIAUX DES VÉHICULES PRIORITAIRES EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE

Table des matières

Contexte	6
La problématique en détails	6
Bases de calcul et références techniques	8
1. Le modèle de propagation.....	8
2. Mesures d'isolement acoustique de véhicules	8
3. Références techniques.....	10
Résultats	11
1. Hypothèses de calcul et critères d'exigence	11
4. Résultats de calcul	12
5. Application aux Sirènes des véhicules Prioritaires.....	16
Synthèse	18
Perspectives	18
Annexe	20
Annexe A	20
annexe B : Liste des fichiers utilisés	21
annexe C : Références.....	21



Bruxelles Environnement



OBJECTIF

Le but de cette étude technique est de définir, pour les avertisseurs sonores spéciaux (sirènes) des véhicules prioritaires, des plages de fréquences et de niveaux sonores maximales réduisant l'exposition sonore des personnes tout en permettant la sécurité du déplacement de ces véhicules en Région de Bruxelles-Capitale. Il s'agit donc de déterminer des valeurs à l'émission de façon à ce que les véhicules prioritaires, lorsqu'ils effectuent une mission d'urgence, restent audibles par les autres usagers de la route compte tenu des conditions particulières de trafic et du niveau sonore ambiant, relativement élevé en ville.

CONTENU

Dans un premier temps, le document contextualise le cadre de cette étude et détaille les différents éléments à prendre à compte pour la définition de niveaux à l'émission réalistes et pertinents.

Sont ensuite présentés le modèle de propagation acoustique utilisé pour les calculs, la campagne de mesures de l'isolement acoustique de différents véhicules réalisée par Bruxelles Environnement ainsi que diverses références techniques.

Pour des hypothèses de calculs fixées, les résultats de calculs sont exposés pour différents critères d'exigence.

Enfin, une synthèse regroupe les principaux résultats et les annexes reprennent notamment la liste des fichiers utilisés pour écrire ce rapport et les références bibliographiques.

PUBLIC-CIBLE

Ce document est destiné en première ligne aux agents de Bruxelles Environnement en charge de rédiger un projet d'arrêté visant à limiter le niveau sonore des avertisseurs sonores spéciaux des véhicules prioritaires (Département Bruit de la Division Autorisations et partenariats) et aux conseillers du Cabinet du Ministre du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale chargé de la Transition climatique, de l'Environnement, de l'Energie et de la Démocratie participative. Il pourra également servir de support dans le cadre de la procédure d'adoption de cet arrêté et des contacts avec les secteurs impliqués.



CONTEXTE

Lors de l'élaboration en 2017 du troisième Plan Bruit de la Région de Bruxelles-Capitale, Bruxelles Environnement a commandité une enquête de perception de l'environnement sonore de la population bruxelloise. Troisième source de bruit la plus gênante, les sirènes des véhicules prioritaires représentent un enjeu majeur quant à l'amélioration de l'environnement des citoyens de la Région. C'est pourquoi le troisième Plan Bruit, le plan *quiet.brussels*, adopté par le Gouvernement le 28 février 2019, a prévu une mesure spécifique, la mesure 40 « Réduire le bruit lié à l'utilisation des sirènes des véhicules avec mission d'urgence¹ ». La mesure précise que « Tout en reconnaissant le caractère urgent et les questions de sécurité liés à ces transports, la Région définira avec chaque partenaire des mesures adaptées tant en termes d'usage qu'en termes de spécificités techniques, visant la réduction des nuisances sonores liées à l'utilisation des sirènes des véhicules d'urgence et autres véhicules ». Dans cette étude, nous ne nous intéresserons qu'aux spécificités techniques des sirènes des véhicules prioritaires utilisées lors de missions d'urgence.

Actuellement en Belgique, les caractéristiques techniques des véhicules prioritaires sont soumises à différents arrêtés fédéraux, régionaux voire directives ou circulaires. Il en va de même en ce qui concerne les sirènes de ces véhicules pour lesquels il existe certaines impositions en termes de fréquences, de tonalités utilisées et/ou de niveaux émis, minimaux (jour) ou maximaux (nuit). Les détails des textes de lois ayant une incidence sur les sirènes font l'objet d'une étude juridique à part. Il faut noter que les véhicules prioritaires, c'est-à-dire ceux qui peuvent ou doivent utiliser une sirène, sont nombreux et comprennent notamment : les véhicules des services de police, les véhicules non banalisés du service du contrôle routier, les véhicules non banalisés des douanes, les véhicules non banalisés de la police militaire et des services d'enlèvement et de destruction des engins explosifs, les véhicules utilisés pour le transport de détenus, le véhicule de service des gouverneurs de province, les véhicules non banalisés des services d'inspection des régions et des sociétés de transport en commun, les ambulances, les véhicules d'intervention médicale urgente, les véhicules de lutte contre l'incendie, les véhicules de la protection civile, les véhicules du service de sécurité des chemins de fer, les véhicules de secours d'Infrabel, les véhicules de secours en cas d'incident grave occasionné par l'eau, le gaz, l'électricité ou des matières radioactives, etc.²

D'un point de vue technologique, la grande majorité des sirènes actuelles sont des sirènes électroniques. Différents constructeurs ou vendeurs (Rauwers, Ideatech,...) précisent que ces sirènes sont facilement ajustables, tant au niveau de la puissance acoustique émise que des fréquences utilisées. Seules les sirènes pneumatiques encore présentes sur certains véhicules de pompiers ne permettent pas une telle adaptation.

Cette étude est réalisée indépendamment du type de véhicules prioritaires circulant dans la Région bruxelloise (pompiers, ambulances, polices, gestionnaires de réseaux, etc.)

LA PROBLÉMATIQUE EN DÉTAILS

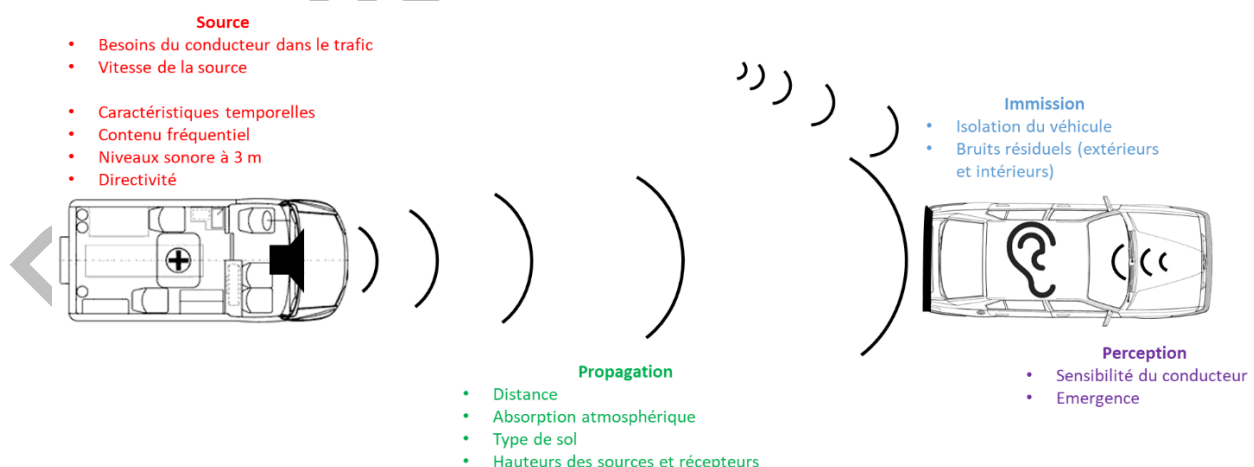


Figure 1 : Schématisation de la problématique de la perception des sirènes de véhicules prioritaires

¹ QUIET.BRUSSELS, Plan de Prévention et de Lutte contre le Bruit et les Vibrations en Milieu urbain, adopté le 28 février 2019, Bruxelles Environnement, http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/PROG_20190228_QuietBrussels_FR.pdf

² Article 43 de l'arrêté royal du 15 mars 1968 portant règlement général sur les conditions techniques auxquelles doivent répondre les véhicules automobiles et leurs remorques, leurs éléments ainsi que les accessoires de sécurité.

Afin de déterminer à quel niveau sonore doivent émettre les sirènes des véhicules prioritaires pour rester audible des véhicules circulant en milieu urbain tout en n'étant pas inutilement élevé pour limiter l'exposition aux personnes alentour, il est nécessaire de connaître un certain nombre de paramètres (acoustiques ou autres). Ceux-ci peuvent être déterminés par hypothèses, au moyen de bases de données ou expérimentalement. La Figure 1 résume ces paramètres en considérant le schéma communément admis en acoustique environnementale : le son est émis par une source, il se propage jusqu'aux endroits d'immission où une personne percevra ce son.

- A la source : en urgence, le véhicule doit se déplacer dans la circulation à grande vitesse et être freiné le moins possible pour être au plus tôt à l'endroit où l'urgence est déclarée. En principe, sans circulation, les véhicules avec mission d'urgence n'activent pas leur sirène, celle-ci n'étant utilisée qu'en cas de trafic dense ou au passage de carrefours. En Région de Bruxelles-Capitale, la majorité des grands axes sont limités à 50 km/h voire 70 km/h³. La distance de détection de la sirène doit être suffisante pour que le conducteur du véhicule puisse avancer de manière sécurisée. La sirène utilisée est caractérisée par un niveau de puissance acoustique L_W , basculant avec un certain rythme d'une fréquence à l'autre. L'évolution temporelle plus ou moins rapide permet une perception plus rapide des autres usagers de la route. Elle ne sera pas remise en question dans le cadre de la présente étude⁴. Par contre, le choix des fréquences a son importance pour la propagation sur la distance⁵, la transmission au travers des habitacles des autres véhicules et de la sensibilité de l'oreille, tout comme le niveau de puissance sonore qui peut être évalué à partir d'un niveau de pression acoustique à une distance de référence. Nous prenons comme référence le niveau à 3,5 m $L_{p,3.5m}$. Enfin, la source peut présenter une certaine directivité qu'il est nécessaire de détailler.
- Propagation acoustique : le bruit émis par une sirène est considérée comme une source ponctuelle⁶ pour laquelle un doublement de distance à cette source se traduit par une diminution du niveau de pression acoustique de 6 dB par phénomène de divergence géométrique (l'énergie sonore émise à un instant se propage dans un espace toujours plus grand avec le temps). Avec la distance et suivant les fréquences émises et les conditions météorologiques, une partie de l'énergie acoustique est absorbée par l'air ambiant. Ensuite, le son qui arrive au véhicule devant l'ambulance se réfléchit sur la route, considérée comme un sol dur, et éventuellement sur les obstacles longeant cette route. La contribution totale de l'onde directe et réfléchi sur le sol dépend de la distance entre les deux véhicules mais aussi de la hauteur de la sirène et de la personne qui doit percevoir le son. A noter que l'effet Doppler dû à la vitesse relative de la source par rapport au récepteur et provoquant un décalage en fréquence et une légère variation de l'amplitude de l'onde sonore, sera considérée comme négligeable.
- Immission à l'intérieur du véhicule : les véhicules sont caractérisés par une certaine isolation acoustique, réduisant la transmission du bruit de la sirène en fonction de la fréquence. A l'intérieur de ce véhicule, un bruit résiduel est présent venant de contributions extérieures (bruit de trafic dû aux autres véhicules) et de ses propres contributions (bruit de roulement et du moteur, radio, discussions des passagers). Ce bruit résiduel doit être pris en compte. Toutefois, la présence d'une radio ou d'autres passagers faisant du bruit ou parlant entre eux ne pourra être pris en compte que grossièrement.
- Perception des usagers : la problématique est centrée sur les usagers de la route présents dans des véhicules fermés (situation la plus pénalisante), les piétons, cyclistes, etc. n'ayant pas d'habitacle faisant obstacle à la propagation du bruit des sirènes⁷. Pour être perçu par l'auditeur, le son doit être suffisamment élevé par rapport au bruit résiduel aux fréquences émises afin qu'il émerge. Pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille, les niveaux acoustiques seront pondérés A^8 . La diminution de la sensibilité acoustique avec l'âge sera également prise en compte.

Les valeurs (ou gammes de valeurs) à déterminer sont donc le ou les $L_{Ap,3.5m}$ en fonction des fréquences d'émission et pour certaines exigences de distances entre véhicules et d'émergence (voir infra). Les autres paramètres évoqués doivent donc être fixés pour permettre cette détermination. C'est l'objet de la section suivante.

³ A partir du 01/01/2021, sauf indications contraires, la limitation passe à 30 km/h.

⁴ Une uniformisation de l'évolution temporelle pourra être envisagée ultérieurement, dans un souci d'harmonisation.

⁵ Les basses fréquences se propagent dans l'air plus loin que les hautes fréquences.

⁶ Pour un unique véhicule, il n'y a pas lieu de considérer une source linéaire.

⁷ Ce seront néanmoins ces derniers qui seront pris en compte dans la détermination de normes d'exposition.

⁸ Pondération couramment utilisée en acoustique pour tenir compte de la réaction de l'audition humaine aux différentes fréquences. Cette pondération peut être calculée sur base de la norme International Standard IEC 61672-1 : 2013 (2^{ème} édition), Electroacoustics – Sound level meters – Part 1 : Specifications.



A noter que nous ne nous sommes pas intéressés aux niveaux sonores auxquels sont soumis les conducteurs des véhicules prioritaires en mission d'urgence qui, eux, doivent être encadrés par la législation assurant la protection des travailleurs. Toutefois, la recherche d'un niveau maximal à ne pas dépasser peut s'inscrire dans la lutte pour la protection auditive du travailleur.

BASES DE CALCUL ET RÉFÉRENCES TECHNIQUES

1. LE MODÈLE DE PROPAGATION

Le modèle de propagation utilisé est celui donné par la norme ISO 9613-2⁹ utilisé habituellement pour la propagation du bruit émis par des sources ponctuelles dans l'environnement extérieur. Les avantages de ce modèle sont sa simplicité et la grande variété de phénomènes de propagation qui y sont pris en compte : divergence géométrique, absorption atmosphérique, réflexions secondaires et sur le sol, etc. La méthode détermine le niveau de pression acoustique à partir du niveau de puissance acoustique corrigé d'un facteur de directivité et d'un terme d'atténuation reprenant les effets de propagation précités. Le niveau total calculé doit tenir compte de tous les chemins de propagation secondaire (réflexions) et est une valeur pondérée A. Les calculs sont effectués par bandes d'octave mais peuvent être adaptés aisément à une décomposition fréquentielle en bandes de tiers d'octave.

Cette méthode a été retranscrite dans une feuille de calcul (*CALC_Bruit_sirène_modèle_ISO.xlsx*) en ne gardant que les phénomènes pertinents à cette situation. A partir des niveaux à l'émission par bandes de fréquences, les niveaux sont déterminés à plusieurs distances pour chaque fréquence. Ces niveaux sont calculés en extérieur, c'est-à-dire qu'ils ne tiennent pas compte de la diminution des niveaux due à l'isolation acoustique des habitacles des autres véhicules. Pour cet aspect, des mesures d'isolement acoustique de différents véhicules ont été réalisées par Bruxelles Environnement et sont décrites au paragraphe ci-après.

2. MESURES D'ISOLEMENT ACOUSTIQUE DE VÉHICULES

En septembre 2018, une campagne de mesures a été menée afin de déterminer la réduction des niveaux de bruit par bandes de tiers d'octave engendrée par l'habitacle de véhicules appartenant à la flotte de Bruxelles Environnement et à certain.es de ses collaborateur.rices.

Le principe de mesures est illustré par le schéma de la Figure 2. Le matériel utilisé est un sonomètre (mesure du $L_{Aeq,1s}$ global et en bandes de tiers d'octave) et une source de bruit rose hémisphérique. La source a été placée à 1 m au-dessus du sol et à 6 m d'un repère pour le placement des véhicules tests et dirigée vers cet endroit. Les mesures ont lieu en deux temps pour déterminer quatre niveaux :

- (1) sans véhicule, une mesure du niveau de bruit résiduel extérieur $L_{res,ext}$ et une du niveau source en fonctionnement $L_{s,ext}$;
- (2) dans le véhicule moteur allumé, une mesure du niveau de bruit résiduel intérieur $L_{res,int}$ et une mesure du niveau de bruit avec la source en fonctionnement $L_{s,int}$.

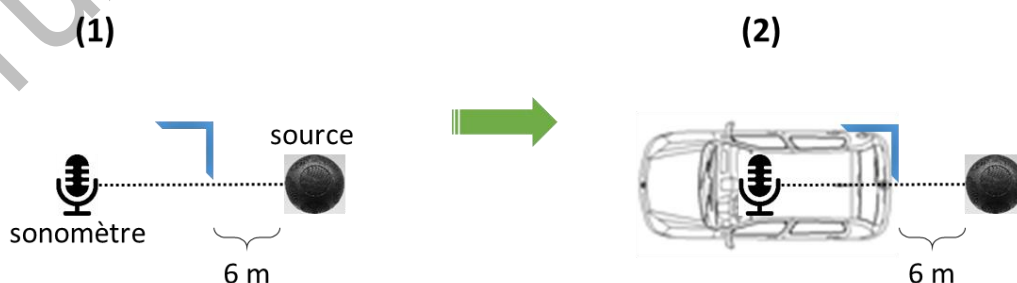


Figure 2 : Principe de mesures pour la détermination de l'isolement acoustique de véhicules

Les mesures dans le véhicule ont été réalisées portes et fenêtres fermées, sans radio ni discussion mais moteur allumé, au niveau du conducteur. Toutes les mesures ont été réalisées sur le parking latéral du bâtiment de

⁹ International Standard ISO 9613-2 : 1996 (1ère édition), Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoor – Part 2 : General method of calculation.

Bruxelles Environnement sur le site de Tour & Taxis. Le sol y est plat et dur (c'est-à-dire réfléchissant d'un point de vue acoustique comme un revêtement routier classique). Lors des trois journées de mesures, il ne pleuvait pas et le vent était quasi absent. Les sources de bruits résiduels étaient peu nombreuses et éloignées (principalement des passages de véhicules sur le site et le trafic routier continu au loin).

Les résultats de mesures du sonomètre sont pertinents et ne portent pas à confusion dans la gamme de fréquence comprise entre les bandes à 125 Hz et 16 kHz. En-dessous, le niveau de puissance de la source était trop peu élevé pour obtenir un rapport signal sur bruit suffisant. La Figure 3 tirée d'une des mesures illustre les différentes grandeurs mesurées globalement (tout le spectre).

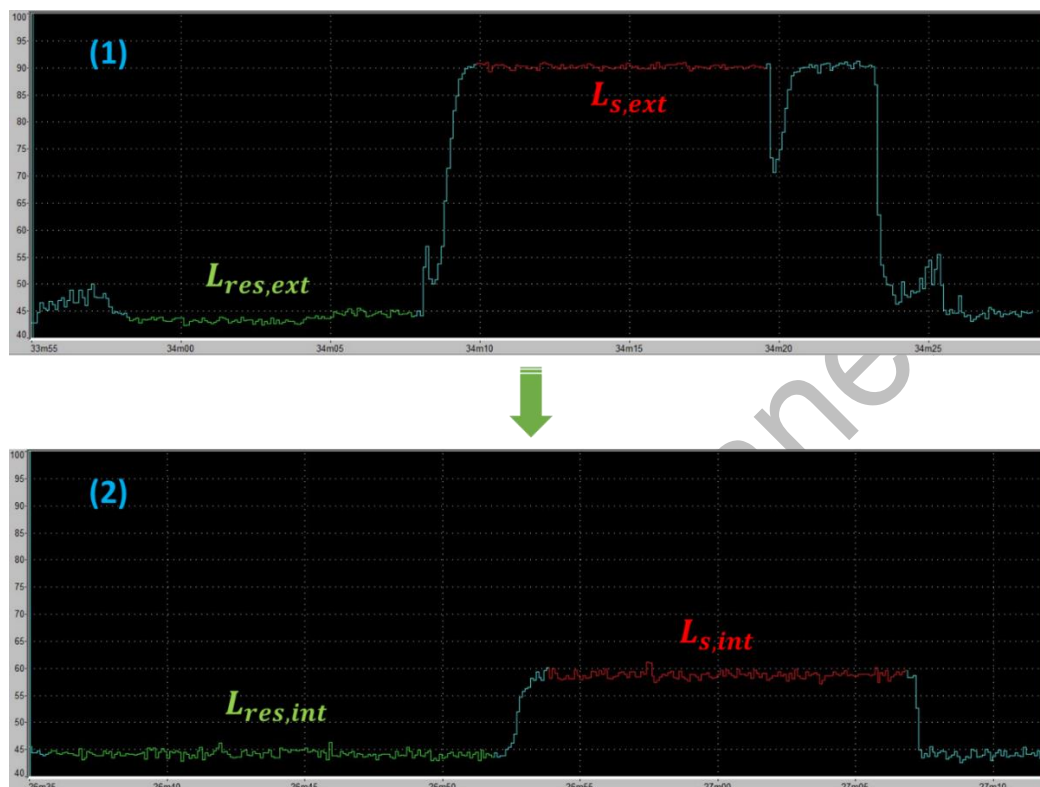


Figure 3 : Exemple de détermination des grandeurs acoustiques nécessaires au calcul de l'isolement acoustique

L'isolement acoustique brut D_b des véhicules est calculé de la manière suivante à partir des niveaux globaux et en bandes de tiers d'octave :

$$D_b = 10 \log \left(10^{L_{s,ext}/10} - 10^{L_{res,ext}/10} \right) - 10 \log \left(10^{L_{s,int}/10} - 10^{L_{res,int}/10} \right) \quad [\text{équation 1}]$$

Il représente la différence entre le niveau particulier de la source à l'extérieur et celui à l'intérieur. Les niveaux particuliers sont obtenus à partir des niveaux mesurés source en fonctionnement, corrigés des niveaux de bruit résiduel.

Les résultats sont donnés aux graphiques de la Figure 4. Le premier donne l'isolement D_b global pour les différents véhicules ainsi que la médiane de l'ensemble. Le second représente le spectre en fréquence de l'isolement médian, les marques en-dessous et au-dessus représentant respectivement les valeurs dépassées sur 95 % des véhicules et 5 % des véhicules. Ainsi, 90 % des véhicules ont des valeurs comprises dans ces intervalles.

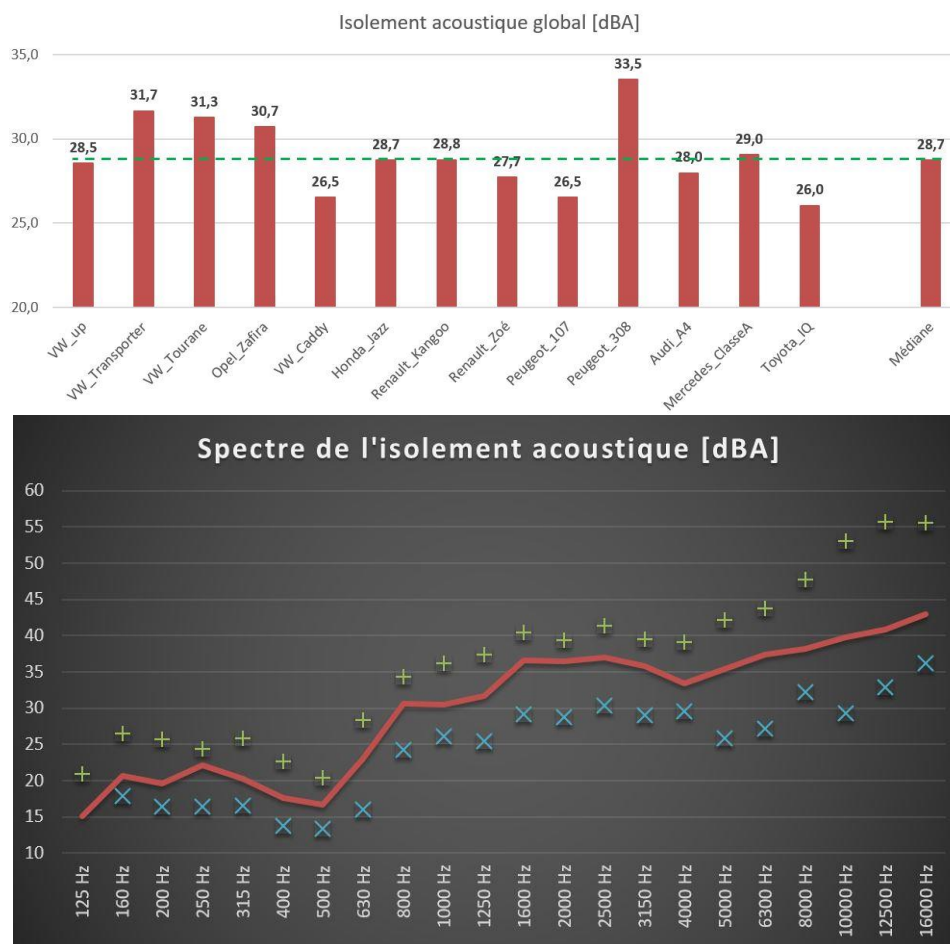


Figure 4 : Isolements acoustiques globaux des véhicules testés par Bruxelles Environnement et leur médiane (graphe du dessus) et spectre en bande de tiers d'octave de l'isolement acoustique médian (---), dépassé sur 95 % des véhicules (x) et dépassé sur 5 % des véhicules (+) (graphe du dessous)

3. RÉFÉRENCES TECHNIQUES

Afin de fixer l'ensemble des paramètres pour déterminer le niveau de puissance acoustique des sirènes de véhicules prioritaires, un ensemble de données ou d'hypothèses sont encore manquantes. Les trois références techniques suivantes ont été utilisées pour apporter les éléments utiles à cette étude.

1. *New siren tones optimised for increased detectability distances of emergency vehicles*

L'article de Balastegui¹⁰ paru en 2013 s'inscrit dans la même démarche d'optimisation de sirènes de véhicules prioritaires. Plusieurs informations utiles pour la suite y apparaissent.

- Plusieurs critères de détection sont testés sur base de précédentes études. Ces critères sont établis à partir de l'émergence d'une ou plusieurs tonalités par rapport au bruit résiduel. Les émergences préconisées évoluent entre 10 et 15 dB. La détection du signal par un auditeur est fonction de la fréquence du signal et de l'âge de l'auditeur. Dans notre cas, nous avons choisi l'approche simple d'utiliser la pondération A. Il est rappelé que les courbes de seuil d'audibilité ont été établies sur base de médianes expérimentales de personnes jeunes et sans problème d'audition. Si nous voulons élargir aux personnes plus âgées (60 ans) qui, naturellement, ont une sensibilité diminuée, il faut considérer des niveaux et des émergences de l'ordre de 5 dB plus hauts d'après l'ISO 7029¹¹ pour des fréquences inférieures à 1 kHz.
- La distance de détection optimale d_{detec} est discutée et une proposition est faite dans l'article. Cette distance est considérée comme étant égale à la distance de freinage d_{frein} plus la distance parcourue par le véhicule avec mission d'urgence pendant le temps de réaction de son conducteur t_{reac} et celui

¹⁰ A. Balastegui, J. Romeu, A. Clot and S.R. Martin, *New siren tones optimised for increased detectability distances of emergency vehicles*, *Applied Acoustics*, **74** (2013), 803-811.

¹¹ International Standard ISO 7029 : 2000, *Acoustics – Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age*.

nécessaire au conducteur du véhicule sur le passage pour se mettre sur le côté t_{cote} . La distance ainsi définie permet de prendre en compte la situation défavorable du véhicule qui se met sur le côté mais cachant un autre obstacle (une seconde voiture bloquée, un croisement où il est nécessaire de s'arrêter), obligeant le véhicule avec mission d'urgence à s'arrêter sans possibilité de dévier de sa trajectoire initiale. Ainsi, cette distance est donnée par

$$d_{detec} = d_{frein} + v(t_{reac} + t_{cote}) = \frac{v_{urges}^2}{2\mu g} + v_{urges} \left(t_{reac} + \sqrt{\frac{2d_{cote}}{a_{cote}}} \right) \quad \text{[équation 2]}$$

avec μ le coefficient de friction statique entre les pneus et la route, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ l'accélération gravitationnelle, d_{cote} la distance de déplacement sur le côté et a_{cote} l'accélération lors de ce déplacement. Des valeurs typiques sont données : $t_{reac} = 1,5 \text{ s}$, $d_{cote} = 5 \text{ m}$ (largeur d'une route avec déplacement vers l'avant), $a_{cote} = 3,7 \text{ m/s}^2$ (voiture passant de 0 à 20 km/h en 1,5 s) et μ compris entre 0,7 et 1. Pour prendre en compte des pneus usés et une route peu adhérente (conditions de pluie), l'auteur fixe ce paramètre à 0,6. Ainsi, pour un véhicule avec mission d'urgence se déplaçant à 50 km/h, la distance de détection $d_{detec} = 60,1 \text{ m}$. A 70 ou à 90 km/h, cette distance passe à 93,3 et 131,7 m respectivement.

- Pour une dizaine de voitures différentes, des mesures de réduction du bruit par les voitures (indice noise reduction NR , équivalent à notre D_b) ont été réalisées. Les résultats sont similaires à ceux réalisés par Bruxelles Environnement, ce qui permet de confirmer la pertinence des résultats.
- Le bruit de fond à l'intérieur des véhicules utilisés pour cette étude a été mesuré lors de trajets dans un trafic chargé, comprenant des accélérations et décélérations, et une vitesse limitée à 50 km/h.

2. Auto-decibel-db

Auto-decibel-db est un site internet¹² contenant une base de données de véhicules de différentes marques et années pour lesquels le bruit résiduel a été mesuré à l'arrêt, à 50, 80, 100, 120 et 140 km/h. Le site ne donne aucune explication quant à la manière dont ont été effectuées les mesures, ni avec quel appareil et par qui. Toutefois, les mesures à l'arrêt et à 50 km/h correspondent respectivement à nos résultats et ceux trouvés par Balastegui. L'intérêt des résultats de ce site est d'ajouter un très grand nombre de résultats (1 747 véhicules testés) permettant par régression linéaire de définir un niveau de bruit résiduel à l'intérieur des véhicules en fonction de la vitesse de circulation. Ce niveau est donné par l'équation suivante :

$$L_{res,int} = 0,194 v_{circu} + 45,537 \quad \text{[équation 3]}$$

où $L_{res,int}$ est le niveau de bruit résiduel¹³ estimé à l'intérieur du véhicule en dBA et v_{circu} la vitesse de déplacement en km/h. Toutefois, au vu des incertitudes liées à la provenance des mesures, nous nous sommes limités à une vitesse de 70 km/h. Les résultats sont repris dans le fichier *LIST_2019_Auto-decibel-db.xlsx*.

3. Acoustic characteristics for effective ambulance sirens

Cet article de Howards¹⁴ aborde les caractéristiques acoustiques des sirènes du point de vue de la source, leurs niveaux d'émission, fréquences et variations temporelles, mais aussi les différentes positions possibles sur le véhicule. Ils mettent en évidence la possible directivité de certaines sirènes (diminution des niveaux sonores sur les côtés et l'arrière par rapport à ceux mesurés devant) ce qui peut nuire à la circulation des véhicules avec mission d'urgence aux carrefours et embranchements, obligeant les conducteurs à parfois arrêter leur véhicule. Dès lors, il n'est pas conseillé de trop réduire les émissions vers les côtés des véhicules par l'installation de sirènes avec une directivité quasi exclusive vers l'avant.

RÉSULTATS

1. HYPOTHÈSES DE CALCUL ET CRITÈRES D'EXIGENCE

Sur base du modèle de propagation, des mesures réalisées par Bruxelles Environnement et de la documentation précédemment décrite, il est possible de rendre compte de l'émergence d'un signal d'urgence à l'intérieur d'un

¹² Auto-decibel-db, http://www.auto-decibel-db.com/desktop_kmh.html, consulté jusqu'en avril 2020.

¹³ Il s'agit autant du bruit de la circulation environnante que du bruit produit par le véhicule lui-même. Sur base des données utilisées, ces deux contributions ne sont pas séparables.

¹⁴ Carl Q. Howard, Aaron J. Maddern and Eleferios P. Privopoulos, *Acoustic characteristics for effective ambulance sirens*, *Acoustics Australia*, **39** (08/2011), n°2, 43-53.



habitacle d'un autre véhicule et à l'intérieur duquel le conducteur doit pouvoir réagir à la perception de ce signal. Un critère d'émergence doit être établi et complété d'un critère lié à la distance de détection.

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- La source est placée à 2 m de hauteur au niveau du véhicule prioritaire (sur le toit par exemple) et est caractérisée par un niveau $L_{Ap,3.5m}$ (niveau de pression acoustique pondéré A mesuré à 3,5 m de la sirène) pour chaque bande de tiers d'octave.
- La propagation acoustique est calculée pour différentes distances suivant l'ISO 9613 avec les valeurs suivantes :
 - Hauteur du véhicule de réception : 1 m
 - Température : 15 °C
 - Humidité relative : 70 %
 - Pression atmosphérique : 101325 Pa
 - Facteur de sol G : 0 (sol dur)
 - Correction supplémentaires (autres réflexions, directivité, météo particulière) : 0 dBConditions classiques¹⁵
- Les isolements acoustiques bruts D_b par bandes de tiers d'octave sont ceux dépassés sur 5 % des véhicules testés par Bruxelles Environnement (marques + sur le graphe du dessous de la Figure 4).
- Le bruit résiduel à l'intérieur du véhicule de réception est calculé en fonction de la vitesse de circulation v_{circu} selon l'équation [3]. Dans le cas présent la vitesse est fixée à 50 km/h.

Le critère d'émergence à l'intérieur du véhicule est de minimum 10 dB. Pour tenir compte d'éventuels bruits supplémentaires dans le véhicule de réception ou de l'augmentation du seuil d'audition avec l'âge, un second critère d'émergence à 15 dB est considéré.

La distance de détection d_{detec} à laquelle une émergence suffisante est nécessaire est donnée par l'équation [2] avec les valeurs des paramètres fixés comme dans l'article de référence. C'est-à-dire que cette distance est égale 60,1 m pour un véhicule avec mission d'urgence se déplaçant à $v_{urges} = 50$ km/h et 93,3 m à 70 km/h.

2. RÉSULTATS DE CALCUL

Les premiers résultats présentés ci-après sont des graphiques qui montrent l'évolution de l'émergence de la sirène dans le véhicule de réception en fonction de la distance de ce dernier au véhicule prioritaire. Chaque courbe du graphique représente l'émergence pour une bande de tiers d'octave donnée. Pour un niveau défini à la source, issu d'une sirène en utilisation actuellement ou pour tester un nouveau signal, il est directement possible de vérifier la conformité ou non du critère d'émergence à une distance donnée.

Les seconds résultats s'intéressent au niveau nécessaire de la source en fonction de la fréquence pour différents critères exprimés en termes d'émergence et de distance. Sans contrainte sur le niveau et la fréquence émise, il est ainsi possible de mettre en évidence les fréquences pour lesquelles le niveau nécessaire est le plus bas.

Emergence en fonction de la distance pour différentes fréquences

Les graphiques de la Figure 5 et Figure 6 montrent les résultats d'émergence en fonction de la distance entre les deux véhicules pour un bruit large bande de type bruit rose caractérisé par un niveau de pression identique de 100 dBA pour chaque bande de tiers d'octave (Figure 5) et pour une sirène bitonale fictive à 300 et 810 Hz avec des niveaux de 115 et 105 dBA respectivement (Figure 6). Un critère d'émergence minimale à une certaine distance (liée à la vitesse) est respecté si la courbe calculée passe au-dessus de la ligne horizontale voulue à la distance choisie. Par exemple, dans les deux graphiques suivants, le critère de 10 dB sera respecté à 93,3 m (70 km/h) si la courbe est au-dessus de la ligne horizontale verte à l'endroit où elle est coupée par la ligne verticale mauve.

¹⁵ Conditions généralement utilisées pour les simulations de propagation acoustique en extérieur. Ces dernières sont plutôt défavorables à une bonne propagation. En changeant avec des valeurs plus proches des moyennes bruxelloises, les variations sont négligeables aux distances considérées.



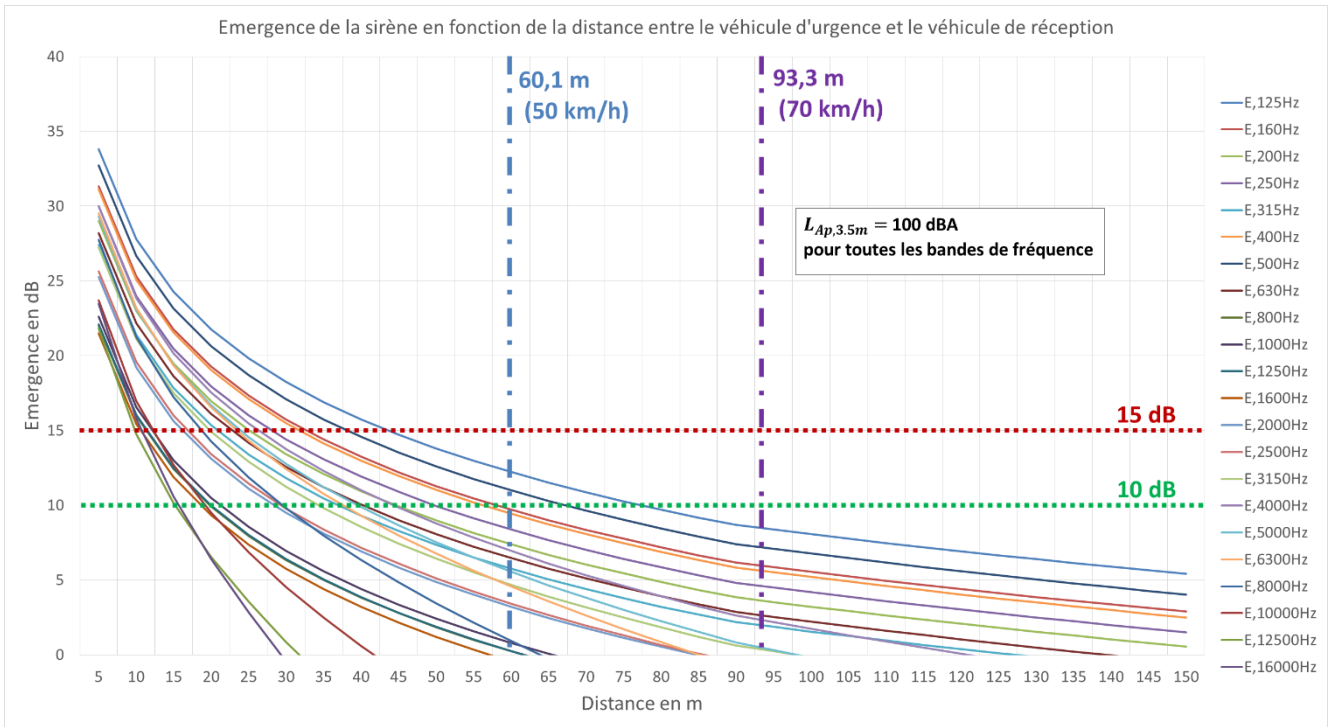


Figure 5 : Emergences de tonalités dans l'habitacle d'un véhicule en fonction de la distance entre ce véhicule et l'endroit d'émission pour les fréquences comprises entre 125 et 16 000 Hz

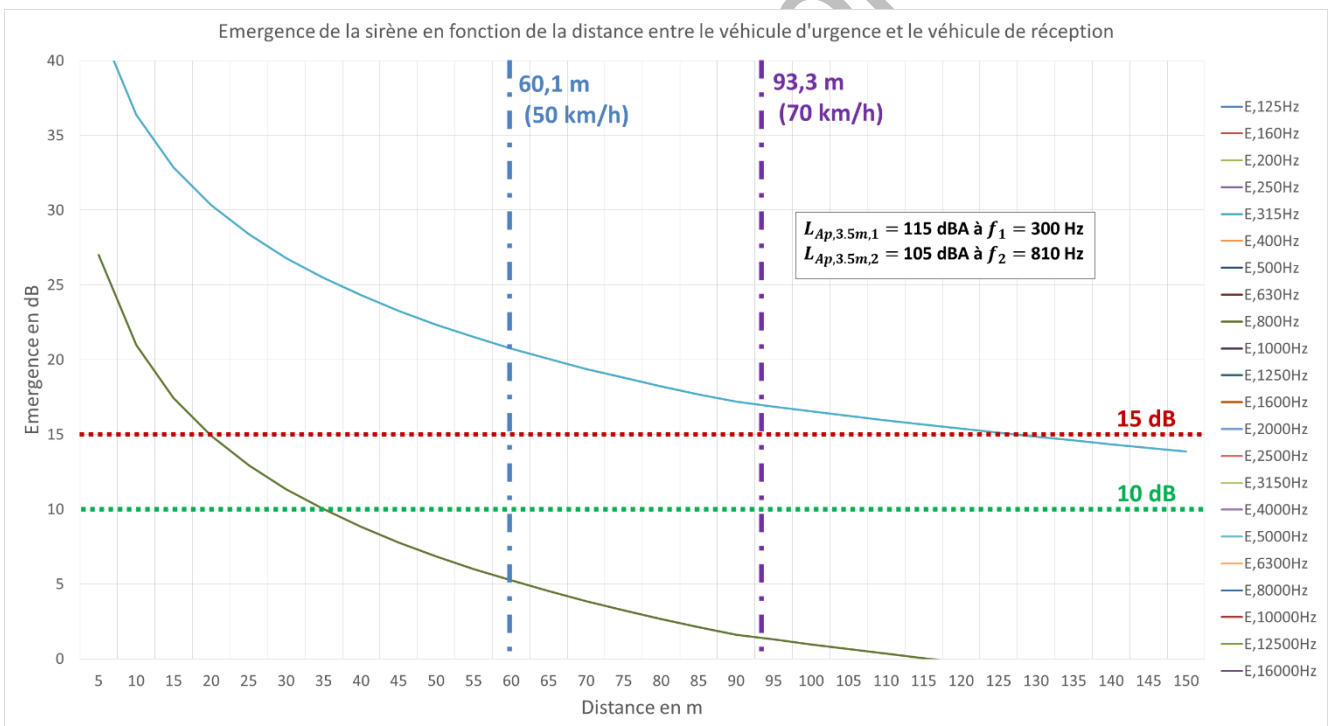


Figure 6 : Emergences de deux tonalités particulières composant un signal d'urgence dans l'habitacle d'un véhicule en fonction de la distance entre ce véhicule et l'endroit d'émission

Le premier graphique permet de se rendre compte que certaines fréquences sont à privilégier pour une sirène et d'autres à proscrire à cause d'une trop grande atténuation, ce qui devrait être compensé en augmentant exagérément leur niveau sonore. Le second graphe représente une situation typique d'une sirène bitonale (émissions de deux fréquences particulières). En termes de critère d'émergence (10 ou 15 dB) ou de critères de distance de détection (60 ou 93 m), la tonalité à 810 Hz n'a pas un niveau suffisant pour être véritablement utile.

Afin de mieux rendre compte des fréquences optimales et leur niveau minimal nécessaire pour répondre aux critères d'exigence, les seconds résultats ci-dessous permettent une approche complémentaire pertinente.

Niveau de pression acoustique $L_{Ap,3.5m}$ en fonction de la fréquence pour différents critères d'émergence et de distance

A partir des critères de distance de détection optimale et d'émergence minimale, il est possible de déterminer les niveaux $L_{Ap,3.5m}$ par bandes de tiers d'octave permettant de respecter ces critères. Les graphiques des Figure 7 et Figure 8 mettent en avant ces niveaux (frontière entre la zone rouge et verte) pour les distances de 60,1 et 93,3 m respectivement. L'émergence minimale considérée est de 10 dB. Pour un critère d'émergence de 15 dB, il suffit d'ajouter 5 dB aux niveaux trouvés. Les valeurs minimales de niveaux de pression acoustique sont reprises dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs minimales des niveaux de pression acoustique $L_{Ap,3.5m}$ en fonction de la fréquence émise pour répondre à différents critères d'émergence dans l'habitacle d'un véhicule de réception

Fréquence [Hz]	Niveaux $L_{Ap,3.5m}$ minimaux répondant au critère de 60,1 m (50 km/h) avec une émergence de 10 dB	Niveaux $L_{Ap,3.5m}$ minimaux répondant au critère de 93,3 m (70 km/h) avec une émergence de 10 dB
125	98	102
160	100	104
200	102	106
250	101	105
315	104	108
400	101	104
500	99	103
630	104	107
800	110	114
1000	109	113
1250	110	114
1600	110	114
2000	107	111
2500	107	111
3150	105	110
4000	103	108
5000	105	109
6300	105	111
8000	109	116
10000	116	124
12500	121	132
16000	126	141

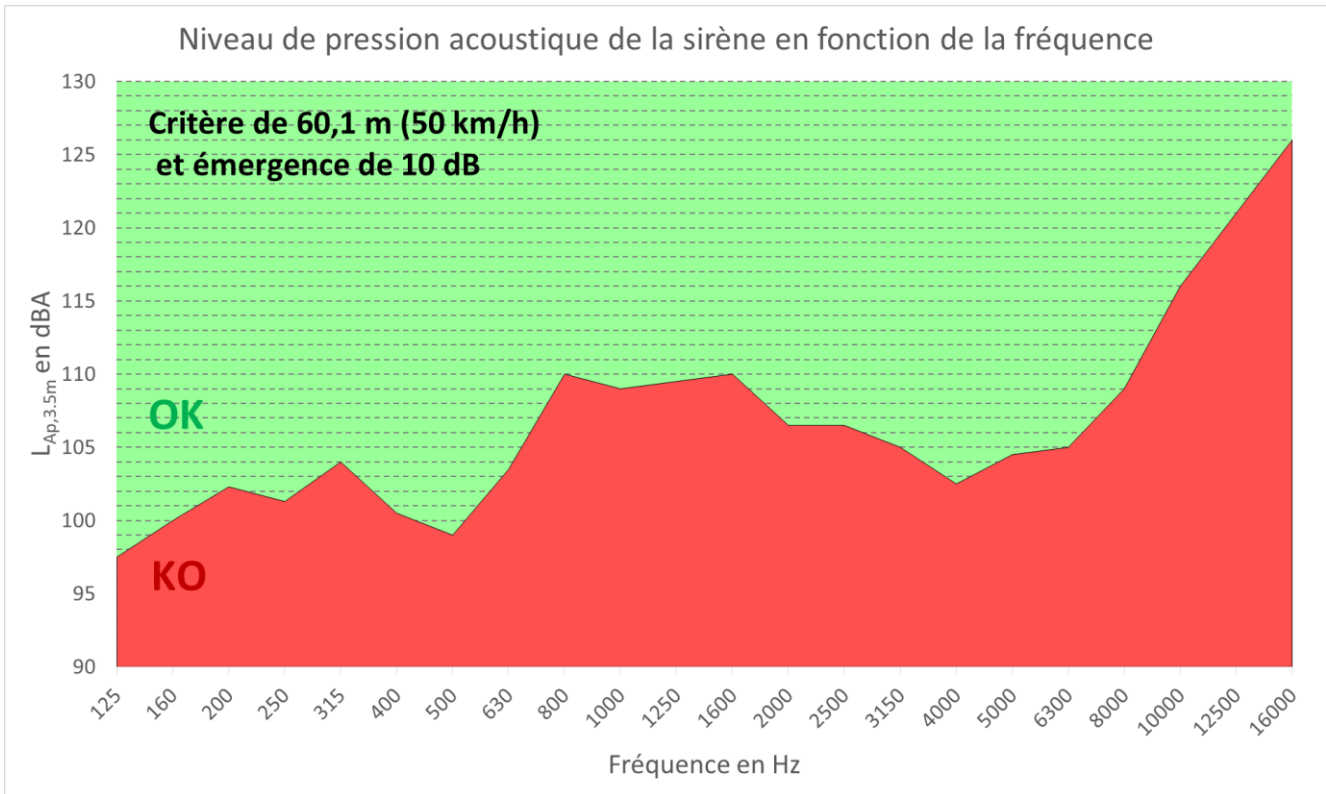


Figure 7 : Valeurs de niveau de pression acoustique $L_{Ap,3.5m}$ répondant à un critère d'émergence (10 dB) dans l'habitable d'un véhicule de réception pour une distance de détection fixée (60,1 m)

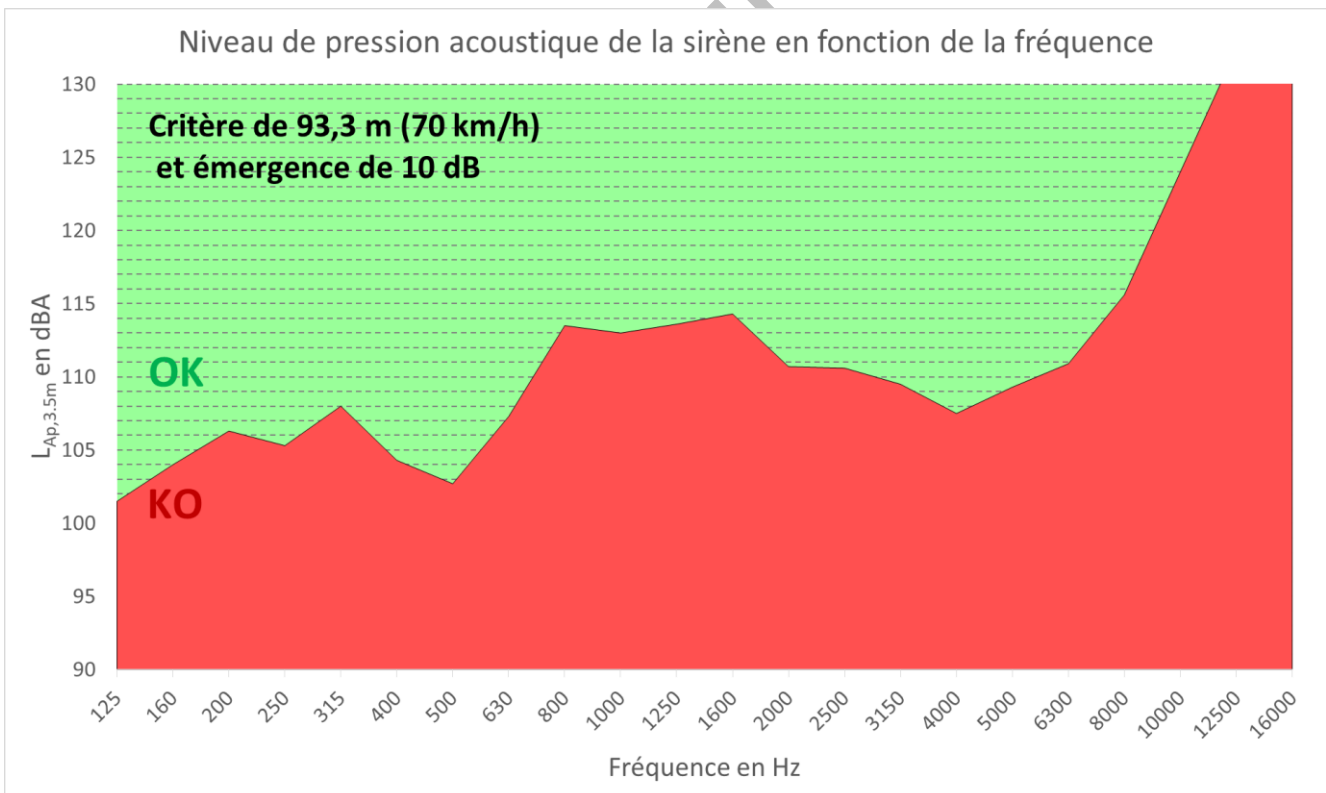


Figure 8 : Valeurs de niveau de pression acoustique $L_{Ap,3.5m}$ répondant à un critère d'émergence (10 dB) dans l'habitable d'un véhicule de réception pour une distance de détection fixée (93,3 m)

3. APPLICATION AUX SIRÈNES DES VÉHICULES PRIORITAIRES

En Belgique, toute une série de véhicules prioritaires n'ont pas d'obligations techniques particulières concernant leur sirène. Seuls les véhicules des services d'incendie publics et de la protection civile ainsi que ceux qui interviennent dans le cadre de l'aide médicale urgente sont soumis à des spécifications techniques imposées, d'une part, par une circulaire ministérielle de 2013¹⁶ et, d'autre part, par un arrêté royal de 2017¹⁷.

Précisément, les véhicules des services d'incendie publics et de la protection civile doivent être équipé d'une sirène (ou avertisseur sonore spécial) jour et nuit :

Avertisseur sonore spécial de jour

- Soit de type pneumatique et conforme à la norme belge NBN 549
- Soit électronique et conforme aux spécifications suivantes :
 - L'avertisseur sonore est à 2 tons alternés dont les notes sont liées
 - La note aigue est de 495 Hz (+/- 5 Hz)
 - La note grave est de 440 Hz (+/- 5 Hz)
 - La fréquence d'un cycle de 2 tons, égaux entre eux en durée, est de 25 à 30 par minute
 - Le niveau sonore est de minimum 110 dB(A) (+/- 5 dB(A)) à 3,5 mètres dans la direction du niveau sonore maximum

Avertisseur sonore spécial de nuit

- L'avertisseur sonore est à 2 tons alternés dont les notes sont liées
- La note aigue est de 495 Hz (+/- 5 Hz)
- La note grave est de 440 Hz (+/- 5 Hz)
- La fréquence d'un cycle de 2 tons, égaux entre eux en durée, est de 25 à 30 par minute
- Le niveau sonore est de 95 dB(A) (+/- 5 dB(A)) à 3,5 mètres dans la direction du niveau sonore maximum

La norme belge NBN 549 (pour les avertisseurs de type pneumatique) précise que le niveau minimum à 3,5 m est de 120 dB(A) pour des fréquences similaires. Ce type de sirène n'est pas modulable facilement contrairement aux sirènes électroniques et, en pratique, de moins en moins utilisées. Vu la valeur exagérément élevée du niveau sonore, il faudrait sans doute envisager de proscrire ce type de sirène à l'avenir.

Quant aux véhicules qui interviennent dans le cadre de l'aide médicale urgente, les spécifications sont très semblables : la sirène de jour doit avoir un niveau sonore de 110 dB(A) à 120 dB(A) avec une tolérance de (+/- 5 dB(A)) à 3,5 mètres dans la direction du niveau sonore maximum et la sirène de nuit doit avoir un niveau sonore de 95 dB(A) (+/- 5 dB(A)) à 3,5 mètres dans la même direction.

Mises ensembles, les sirènes électroniques de jour des véhicules visés doivent respecter 110 dB(A) à 3,5 m aux fréquences de 440 et 495 Hz. En considérant la tolérance de 5 dB(A), le minimum se trouve à 105 dB(A) et le maximum à 115 dB(A). L'émergence de ces deux tonalités, quel que soit le niveau choisi dans cette gamme, sur base du modèle de calcul préalablement établi, rencontre le critère d'émergence de 10 dB aux deux distances de détection minimales (60,1 et 93,3 m). Par contre, le critère de 15 dB n'est pas respecté à 93,3 m pour un niveau de 105 dB(A). Les courbes d'émergence en fonction de la distance sont données à la Figure 9.

Pour les sirènes de nuit pour ces mêmes véhicules, une même tolérance de +/- 5 dB(A) mais autour de la valeur de 95 dB(A) est laissée à l'appréciation du constructeur ou de chaque demandeur. Ainsi, le niveau peut varier entre 90 et 100 dB(A) à 3,5 m et pour les mêmes fréquences. Les courbes d'émergence en fonction de la distance et du niveau sont tracées à la Figure 10. Pour ces courbes, le niveau estimé du bruit résiduel à l'intérieur du véhicule de réception a été diminué de 5 dB(A). Cette valeur correspond à la médiane des différences des niveaux du bruit routier de jour et de nuit calculée sur base des cartes du bruit routier de Bruxelles Environnement et estimé aux abords des axes routiers modélisés. L'Annexe A présente cette carte de bruit différentielle pour l'ensemble de la Région de Bruxelles-Capitale. Il apparaît que

- Un niveau de 90 dB(A) serait insuffisant pour répondre aux critères d'émergence
- Un niveau de 95 dB(A) permettrait de répondre au critère d'émergence de 10 dB(A) pour un véhicule prioritaire à 50 km/h
- Un niveau de 100 dB(A) permettrait de répondre au critère d'émergence de 10 dB(A) à 70 km/h et à celui de 15 dB(A) à 50 km/h.

¹⁶ Circulaire ministérielle du 9 juillet 2013 relative aux spécifications techniques des avertisseurs sonores spéciaux (sirènes) pour les véhicules des services d'incendie publics et de la protection civile.

¹⁷ Arrêté royal du 12 novembre 2017 déterminant les caractéristiques extérieures des véhicules qui interviennent dans le cadre de l'aide médicale urgente.



Ce résultat est corroboré par un retour informel que Bruxelles Environnement a eu avec l'installateur Arisco en décembre 2018 qui précisait que les conducteurs de véhicules prioritaires n'utilisaient pas les sirènes de nuit avec un niveau de 90 dB(A) car trop faibles. Rappelons néanmoins que les résultats de calcul se basent sur des hypothèses plutôt sévères.

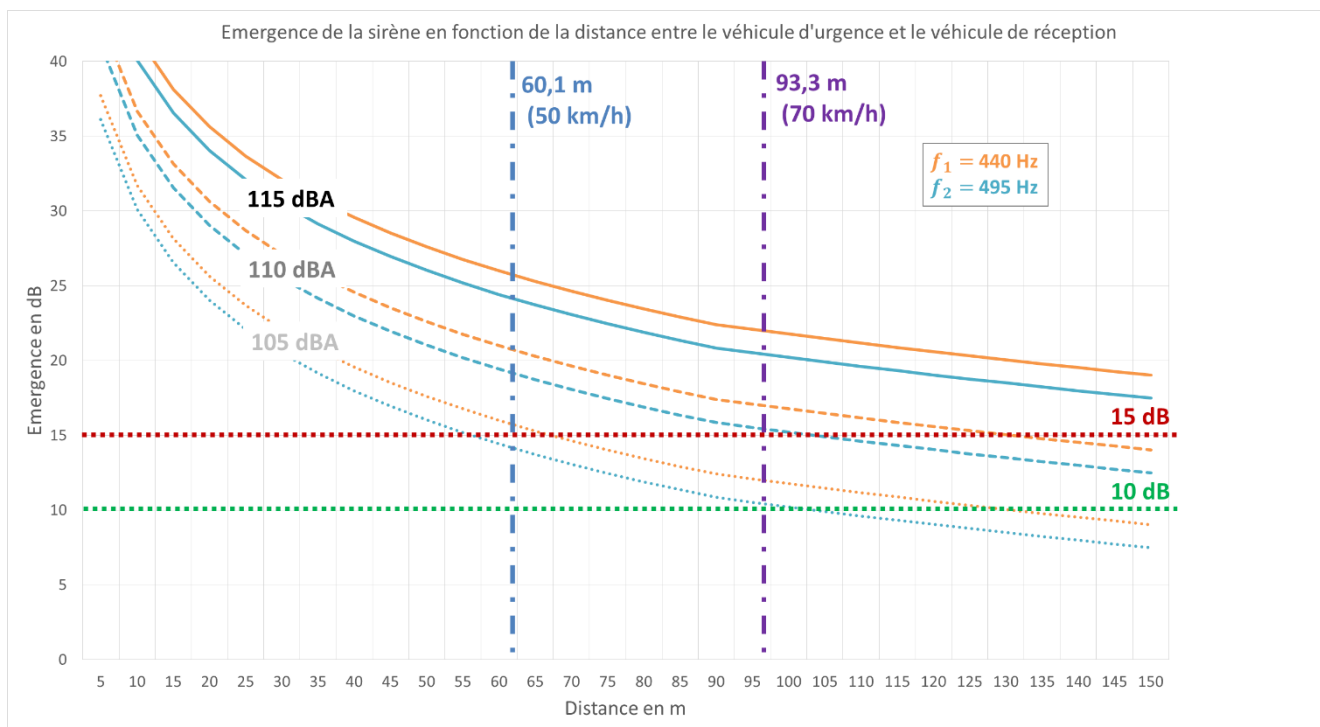


Figure 9 : Emergences des deux tonalités composant les sirènes de jour des véhicules d'incendie publics, de la protection civile et de l'aide médicale urgente dans l'habitable d'un véhicule de réception en fonction de la distance entre ce véhicule et l'endroit d'émission

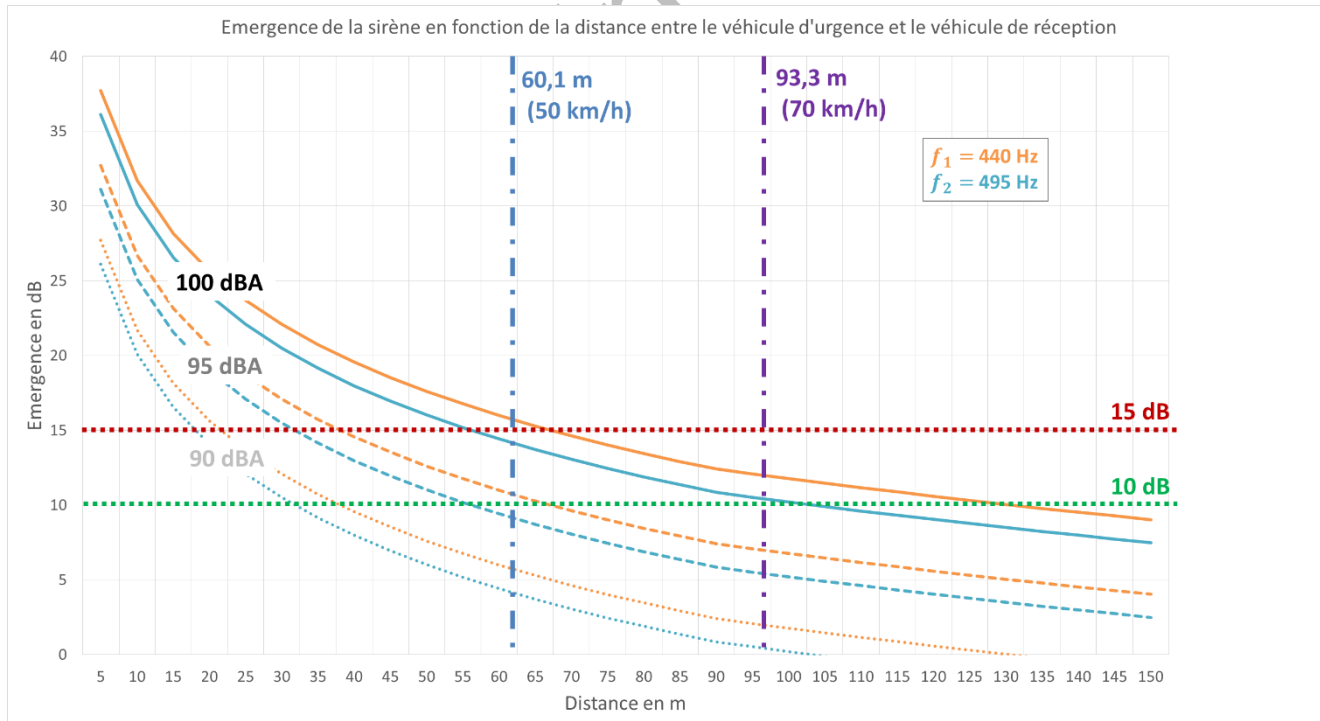


Figure 10 : Emergences des deux tonalités composant les sirènes de nuit des véhicules d'incendie publics, de la protection civile et de l'aide médicale urgente dans l'habitable d'un véhicule de réception en fonction de la distance entre ce véhicule et l'endroit d'émission pour différentes valeurs du niveau $L_{Ap,3.5m}$

SYNTHÈSE

Cette étude a été menée dans le cadre de l'élaboration éventuelle d'un arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale encadrant les niveaux sonores des sirènes des véhicules prioritaires en mission d'urgence se déplaçant sur son territoire. Elle vise à déterminer quels seraient les niveaux seuils maximaux à l'émission garantissant des déplacements sécurisés et rapides des véhicules prioritaires lors de l'utilisation de leur sirène (c'est-à-dire pour être entendus par les conducteurs dans leur voiture), tout en réduisant l'exposition sonore des personnes exposées.

Afin de déterminer ces niveaux, le modèle de propagation acoustique ISO 9613 a été utilisé avec des valeurs de paramètres standards. Les niveaux à la source recherchés ont été caractérisés par le niveau de pression acoustique pondéré A à 3,5 m devant la sirène installée sur le véhicule prioritaire. A la réception, il était nécessaire de connaître les valeurs d'isolement acoustiques des habitacles de véhicules en circulation. Des mesures ont été menées par Bruxelles Environnement afin de fixer ces valeurs d'isolement en fonction de la fréquence. Des valeurs similaires ont été trouvées par d'autres études, validant les résultats de Bruxelles Environnement. De plus, une estimation du bruit résiduel à l'intérieur du véhicule de réception a été calculée en fonction de la vitesse de circulation.

La détermination de deux facteurs ont permis de cadrer le choix des valeurs seuils de niveaux acoustiques. D'une part, la distance de détection entre le véhicule prioritaire et les autres usagers de la route doit être suffisante afin de garantir une sécurité suffisante. Cette distance dépend grandement de la vitesse de circulation du véhicule prioritaire. Deux distances ont été retenues pour deux vitesses différentes : 60,1 et 93,3 m pour des vitesses respectivement de 50 et 70 km/h. D'autre part, l'émergence minimale au niveau des usagers de la route a été fixée à 10 dB, c'est-à-dire que la sensation sonore pour une personne dans son véhicule est d'entendre approximativement la sirène deux fois plus fort que le bruit résiduel dans l'habitacle. L'émergence minimale devrait monter à 15 dB suivant les personnes qui conduisent le véhicule et la présence d'une radio ou de passagers.

Dans ces hypothèses et pour des valeurs de paramètres plutôt conservatives (distance de détection, isolement de l'habitacle, etc.) il est possible de calculer les niveaux pour des sirènes existantes ou théoriques. De plus, en considérant que ces critères sont respectés, nous avons pu déterminer les niveaux minimaux qui doivent être émis en fonction de la fréquence (cf. Tableau 1). L'outil permettant ces calculs a été écrit sous forme de formules reprises dans un fichier Excel. Il est dès lors possible de tester différents types de sirènes, différents paramètres de propagation et d'autres critères d'exigence. En effet, les résultats dépendent fortement de ces derniers et des valeurs des paramètres comme la vitesse des véhicules, leur isolement, etc.

Les véhicules prioritaires qui utilisent une sirène sont nombreux à circuler en Région de Bruxelles-Capitale. Le Gouvernement bruxellois peut, dans le cadre de la lutte contre le bruit, légiférer pour limiter l'émission sonore de ces véhicules tout en respectant ce qui par ailleurs est déjà légiféré au niveau fédéral.

PERSPECTIVES

La préoccupation de la Région de Bruxelles-Capitale est de protéger sa population d'une trop forte exposition au bruit. Le bruit en provenance des avertisseurs sonores des véhicules prioritaires apparaît comme la 3^{ème} source de nuisances sonores qui gêne le plus les Bruxellois, après le bruit routier et le bruit issu du trafic aérien¹⁸. Il touche principalement l'environnement immédiat de centres hospitaliers, de postes incendies, de police, d'établissements pénitenciers, mais également les abords d'itinéraires privilégiés pour ce type de transports urgents.

Les législations en vigueur (énumérées ci-avant) portent sur les spécifications techniques des avertisseurs sonores spéciaux. Le Code de la route en spécifie, de manière générale, les conditions d'utilisation. Aucune réglementation ne concerne les niveaux sonores admissibles dans l'environnement. Or il est possible, par des principes physiques acoustiques, d'établir ceux-ci en tenant compte des spécificités urbaines rencontrées en Région bruxelloise tout en respectant les législations existantes.

En premier, le choix des fréquences pertinentes pour les sirènes, sur base des minimums du Tableau 1, peut se porter soit sur les premières bandes de tiers d'octave, soit sur celles de 400 et 500 Hz. Nous choisissons ces deux dernières, les deux bandes couvrant les deux fréquences utilisées pour les services d'incendie publics, de

¹⁸ Selon l'enquête de perception réalisée dans le cadre de l'élaboration du plan QUIET.BRUSSELS de prévention et de lutte contre le bruit en milieu urbain (Bruxelles Environnement, 2017).



la protection civile et l'aide médicale urgente. Ainsi, en considérant la plage couverte par ces deux bandes de tiers d'octave, le choix de la fréquence peut se faire dans l'**intervalle [350 ; 560] Hz**.

Ensuite, il est nécessaire de fixer le critère d'émergence à une distance de référence qui dépend de la vitesse moyenne du véhicule prioritaire. Comme la vitesse en Région de Bruxelles-Capitale sera à partir du 01/01/2021 généralisée à 30 km/h (sauf exceptions), la distance de référence choisie est celle correspondant à la vitesse du véhicule prioritaire fixée à 50 km/h : 60,1 m. Les deux critères d'émergence déjà utilisés (10 et 15 dB) à l'intérieur des habitacles des autres usagers de la route sont considérés.

Ainsi, de jour, le niveau $L_{Ap,3,5m}$ doit être d'au moins :

- 99 & 101 dB(A) (cf. Tableau 1 en rouge) pour une émergence de 10 dB
- 104 & 106 dB(A) pour une émergence de 15 dB

Le niveau à 7 m, $L_{Ap,7m}$, correspond au niveau sonore à l'immission pour les personnes sur le trottoir exposées au bruit des sirènes¹⁹. Le niveau de pression acoustique pour une source ponctuelle diminue de 6 dB par doublement distance à la source. Dès lors, dans les mêmes conditions, le niveau $L_{Ap,7m}$ est égal à :

- 93 & 95 dB(A) pour une émergence de 10 dB
- 98 & 100 dB(A) pour une émergence de 15 dB

Les niveaux sonores tolérés par l'être humain pour qu'il n'ait pas de problèmes auditifs sont de 110 dB(A) en niveau maximal, toujours respecté ici, et de 85 dB(A) sur une 1 heure²⁰. Par la règle d'égalité d'énergie²¹, le niveau sonore de 100 dB pourrait être toléré durant 1,88 minute alors que le passage d'une sirène ne dure en moyenne que 15 secondes. Même si cette distance de 7 mètres n'est pas atteinte, les effets sur la santé sont négligeables.

Pour la nuit, du fait d'un bruit résiduel inférieur au jour, les niveaux sont diminués de 5 dB. Ainsi, de nuit, le niveau $L_{Ap,3,5m}$ doit être d'au moins :

- 94 & 96 dB(A) pour une émergence de 10 dB
- 99 & 101 dB(A) pour une émergence de 15 dB

Dès lors, dans les mêmes conditions, le niveau $L_{Ap,7m}$ est égal à :

- 88 & 90 dB(A) pour une émergence de 10 dB
- 93 & 95 dB(A) pour une émergence de 15 dB

limiter à **100 dB(A) le jour à 7 m** permet de limiter l'exposition aux personnes tout en respectant les législations en vigueur et tout en assurant une très bonne audibilité des sirènes chez les autres usagers de la route.

limiter à **90 dB(A) la nuit à 7 m** permet de réduire fortement l'exposition aux personnes lors des périodes de repos habituelles tout en respectant les législations en vigueur et tout en assurant une bonne audibilité chez les autres usagers de la route.

Rappelons les hypothèses utilisées sont conservatives et ne tiennent pas compte pour le bruit résiduel de l'impact de la généralisation de la limitation de vitesse des véhicules à Bruxelles à 30 km/h. Une diminution de quelques décibels est attendue, ce qui améliore d'autant l'émergence pour les autres usagers de la route.

¹⁹ Moyenne de la distance entre le flux du trafic sur la voirie et les premières personnes exposées au bruit présentes sur un trottoir.

²⁰ Brigitta Berglund, Thomas Lindvall and Dietrich H. Schwela Howard, *Guidelines for community noise*, World Health Organization, Geneva, April 1999.

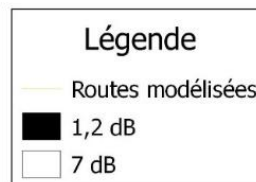
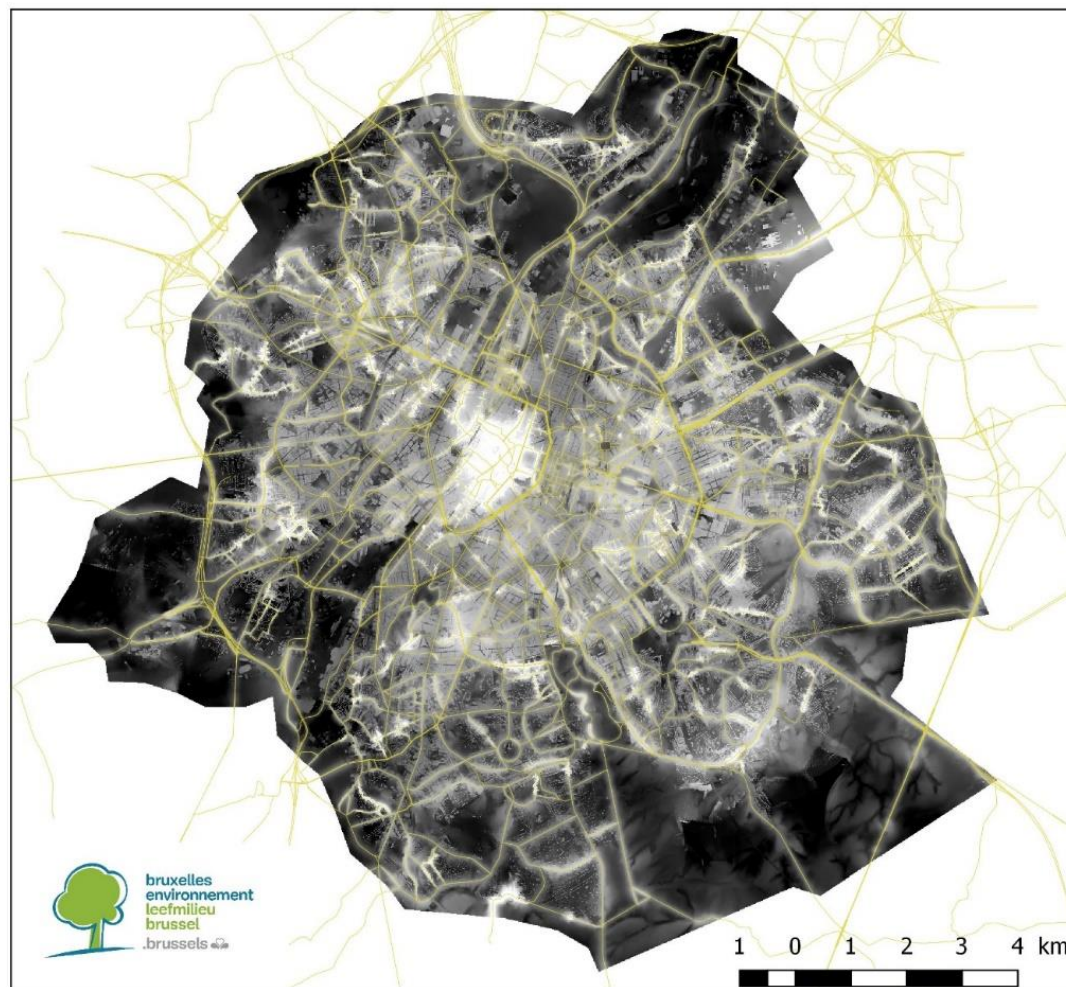
²¹ Une personne soumise à un bruit continu de 90 dB pendant 1 h est énergétiquement équivalente à une personne soumise à un bruit continu de 93 dB pendant ½ h.



ANNEXE

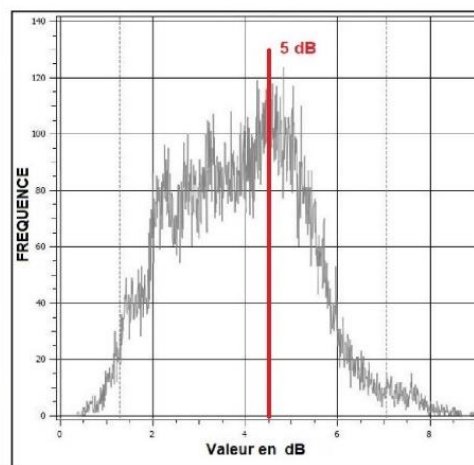
1. ANNEXE A

Cartographie du bruit routier en Région de Bruxelles Capitale Différence entre Lday (07h - 19h) et Lnight (23h - 07h)



Valeurs de la différence Lday - Lnight des points modélisés

Médiane des différences Lday - Lnight des points proches des routes modélisées : 5 dB



2. ANNEXE B : LISTE DES FICHIERS UTILISÉS

Fichiers excel

- CALC_Bruit_sirène_modèle_ISO.xlsx
- LIST_2019_Auto-decibel-db.xlsx

Fichiers images

- Ambulance.jpg
- MesureExt.jpg
- MEsureInt.jpg
- Db_tot.jpg
- Db_spec.jpg
- Différence Ld-Ln.jpg
- Ear.png
- Volumle.png
- ProtocoleMesureDb.png

3. ANNEXE C : RÉFÉRENCES

- QUIET.BRUSSELS, Plan de Prévention et de Lutte contre le Bruit et les Vibrations en Milieu urbain, adopté le 28 février 2019, Bruxelles Environnement, http://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/PROG_20190228_QuietBrussels_FR.pdf
- International Standard IEC 61672-1 : 2013 (2^{ème} édition), Electroacoustics – Sound level meters – Part 1 : Specifications.
- International Standard ISO 9613-2 : 1996 (1^{ère} édition), Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoor – Part 2 : General method of calculation.
- A. Balastegui, J. Romeu, A. Clot and S.R. Martin, New siren tones optimised for increased detectability distances of emergency vehicles, Applied Acoustics, 74 (2013), 803-811.
- International Standard ISO 7029 : 2000, Acoustics – Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age.
- Auto-decibel-db, http://www.auto-decibel-db.com/desktop_kmh.html, consulté jusqu'en avril 2020.
- Carl Q. Howard, Aaron J. Maddern and Eleferios P. Privopoulos, Acoustic characteristics for effective ambulance sirens, Acoustics Australia, 39 (08/2011), n°2, 43-53.



Bruxelles Environnement



Rédaction : B. Fauville
Comité de lecture : Marie Poupé, Fabienne Saelmackers

