



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Méthode d'évaluation de l'audibilité d'un système d'alerte SAIP

J. Siliézar ^a, P. Aumond ^a, P. Chapron ^b, M. Péroche ^c, A. Can ^a

^a Univ Gustave Eiffel, CEREMA, UMRAE, F-44344 Bouguenais, France

^b LASTIG, IGN/ENSG, Univ.Gustave Eiffel, 73 Avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé, France,

^c Université Paul Valéry, Rte de Mende, 34090 Montpellier, France,



En France, les sirènes de sécurité civile du Système d'Alerte et d'Information des Population (SAIP) sont utilisées par les autorités pour signaler une menace imminente ou en cours. Même si l'on connaît leur niveau sonore, il est néanmoins difficile d'évaluer leur audibilité, notamment en milieu urbain à cause du masquage par des sources sonores secondaires. Un protocole expérimental a été déployé autour d'une sirène standard installée sur la commune de Saint-Martin-de-Londres (Hérault) en collaboration avec un groupe d'étudiants de géographie et le Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier (LAGAM - Université Paul Valéry Montpellier 3). Des mesures de niveau sonore pendant l'activation de la source ont été prises grâce à l'application NoiseCapture à différentes distances et sur plusieurs axes par les étudiants. Il ont aussi été invités à remplir un questionnaire sur des informations perceptives de la sirène comme son audibilité, le niveau sonore perçu ou le masquage de la sirène par le passage de véhicules. Une étape de simulation de l'environnement sonore à l'aide du logiciel NoiseModelling a également été réalisée pour comparer les résultats mesurés avec les résultats simulés. Les résultats de l'étude valident l'utilisation de l'outil NoiseModelling pour simuler l'audibilité du signal sonore dans un rayon de 2,8 kilomètres autour de la sirène

1 Introduction

Les sirènes sont des vecteurs d'alerte indispensables pour alerter la population de l'arrivée d'un risque imminent [1] : tremblements de terre, tsunامي, incendies ou attentats. Déclenchées à temps, les sirènes de sécurité civile restent un vecteur centralisé, redondant et efficace pour avertir la population d'une menace imminente et de la nécessité de s'informer, elles produisent des réactions tant collectives qu'individuelles, elles sont efficaces pour alerter toute une population, de jour comme de nuit et elles ne laissent pas de temps pour l'hésitation et exigent des réactions immédiates [2]. En France, les sirènes ont été installées à la fin de la Seconde Guerre mondiale et faisaient partie du Réseau National d'Alerte (RNA) de 1954 à 2010 [3]. Actuellement, elles font partie du programme Système d'Alerte et d'Information des Population (SAIP), basé sur la multidiffusion de messages d'alerte, permettant aux maires et aux préfets d'assurer la protection de la population [4].

Bien que leur efficacité dépende fortement du fait qu'elles soient correctement entendues par le plus grand nombre d'habitants possible [5, 6], la densification du réseau des sirènes est encore parfois réalisée sur la base de contraintes techniques davantage que par un effort d'optimisation spatiale de leur couverture. Les autorités en mesure de déclencher les sirènes du SAIP, depuis le niveau départemental jusqu'au niveau national ne disposent pas d'une connaissance précise de la couverture spatiale théorique du signal sonore [7]. Ce zonage est cartographié par des cercles concentriques autour des sirènes dont les distances représenteraient des valeurs seuils théoriques généralement autour 800 m, 1 600 m et 2 400 m pour les distances maximales. Cette cartographie ne restitue pas la complexité de la propagation du son, influencée par de nombreux facteurs environnementaux comme le relief, la présence de bâtiments, et les conditions météorologiques. Il est alors incontournable d'évaluer à quel point une alerte diffusée par une ou plusieurs sirènes est susceptible d'être entendue par la population, en tenant compte du contexte acoustique et environnemental spécifique de l'émission de l'alerte sonore.

Le modèle CNOSSOS-EU est le modèle le plus utilisé dans l'Union Européenne pour évaluer le niveau sonore d'une source dans l'espace [8]. Il est notamment imposé

pour établir les cartes de bruit stratégiques (bruit routier, ferroviaire, aérien et principales industries) que doivent produire chaque ville de plus de 100 000 habitants [9]. Cet article propose d'évaluer la pertinence d'utiliser le logiciel libre NoiseModelling, qui intègre le modèle CNOSSOS-EU, pour réaliser la cartographie sonore d'un système d'alerte par sirènes. Afin d'atteindre cet objectif, des données acoustiques et perceptives ont été recueillies dans le cadre d'une expérimentation sur la commune de Saint-Martin-de-Londres. Ces données sont comparées aux calculs issus de NoiseModelling, puis les conséquences en termes d'estimation par la modélisation de l'audibilité des sirènes sont discutées.

2 Méthode

2.1 Cas d'étude

La figure 1 présente la zone d'étude. Elle se situe à Saint-Martin-de-Londres, commune d'environ 3000 habitants du département de l'Hérault (34), au nord de Montpellier. La commune dispose d'une sirène d'alerte installée sur un mât à proximité d'un bâtiment municipal. La collecte s'est réalisée le 6 octobre de 2021 à 12h15 pendant l'activation de la sirène d'environ 1 minute et 41 secondes.

2.1.1 Collecte de données

21 étudiants du master Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels (GCRN) de l'université Paul-Valéry Montpellier 3 ont été déployés à des distances variables et sur 360° aux points indiqués sur la Figure 1. Ils étaient équipés de l'application NoiseCapture, décrite dans la section suivante, et d'un formulaire destiné à mesurer leur perception de la sirène. Les étudiants les plus éloignés se trouvaient à environ 2,8 km du positionnement de la sirène.

2.1.2 Source sonore d'intérêt

La sirène considérée est une sirène à air comprimé située à 10 mètres du sol sur un mât, en activation pendant 1 minute et 41 secondes. Elle émet un signal de 135 dB à une fréquence fondamentale de 380 Hz. La Figure 1

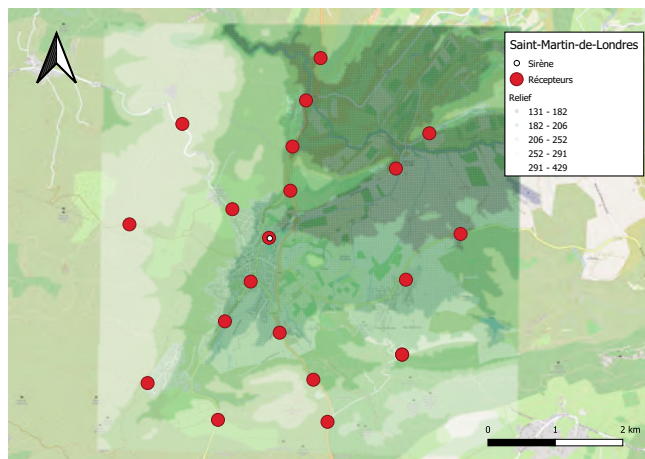


FIGURE 1 – Cartographie de la commune de Saint-Martin-de-Londres. La sirène est représentée avec un point blanc. Les étudiants étaient positionnés aux points rouges.

présente la localisation de la sirène sur la commune de Saint-Martin-de-Londres.

2.2 Outils

2.2.1 Questionnaire

Un questionnaire a été distribué à chaque étudiant. Sur ce questionnaire, l'unique question retenue pour la présente étude concerne l'audibilité de la sirène que les étudiants devaient évaluer sur une échelle sémantique bipolaire allant de "très faiblement audible", à "très fortement audible". Les réponses ont été encodées par une valeur pouvant aller de 1 à 6. D'autres questions portaient notamment sur le masquage de la sirène par le passage de véhicules routiers et sur l'environnement sonore résiduel.

2.2.2 Mesures acoustiques

NoiseCapture¹ est une application Android développée au sein de l'UMRAE, qui permet aux utilisateurs de réaliser des mesures acoustiques et partager leur environnement sonore en utilisant le microphone de leur téléphone portable. Les données obtenues par l'application NoiseCapture contiennent le niveau sonore mesuré par bande de fréquence (1s, tiers d'octave), le niveau sonore équivalent sur la durée d'une mesure en dB(A) ainsi qu'un identifiant de l'appareil de mesure et sa localisation géographique au moment de la mesure (trace avec une résolution temporelle de 1s).

Les 21 étudiants étaient équipés d'un microphone de mesure calibré (micW i436). De plus, une mesure de référence a été faite avec un sonomètre classe 1 près de la source lors de l'activation de la sirène. Sur l'ensemble des mesures, le niveau sonore sur le tiers d'octave 400Hz est le plus saillant au moment de l'émission du signal sonore, ce qui est en accord avec les caractéristiques de la sirène. Ce tiers d'octave sera donc retenu par la suite pour l'étude comme valeur équivalente au niveau sonore émis de la

1. <https://noise-planet.org/noisecapture.html>

Direction	Nord-Est				Sud-Est				Sud-Ouest				Nord-Ouest			
Morceau	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Valeur	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0

TABLEAU 1 – Conditions de propagation du vent

sirène.

La méthode de mesure étant relativement sensible aux différentes conditions d'acquisition (vent assez important au moment de la prise de mesure, manipulation du téléphone, etc.), le niveau sonore retenu a été déterminé manuellement à partir de l'évolution temporelle du tiers d'octave 400Hz pour chacun des appareils.

2.2.3 Modélisation numérique

Le calcul de propagation acoustique dans la zone d'étude est réalisé à l'aide de NoiseModelling, un logiciel libre conçu pour produire des cartes de bruit sur de très grandes zones urbaines. Le logiciel intègre le modèle de bruit de trafic routier CNOSSOS-EU pour l'émission et la propagation du bruit. Il utilise une connexion à une base de données spatiale de type H2GIS pour permettre la manipulation d'un grand nombre des données spatiales.

Grâce à la localisation géographique fournie par les données NoiseCapture récoltées lors de l'expérience, nous avons généré une couche des points récepteurs distribués dans la zone d'étude conformément à l'emplacement des participants lors de l'expérience. La sirène a été modélisée sur NoiseModelling par un point source placé à sa localisation exacte, avec un niveau sonore de 135 dB(A). Le signal modélisé est considéré comme tonal à la fréquence fondamentale de la sirène et constant.

Le facteur d'absorption G pour le sol a été collecté à partir de l'outil Geoclimate². La géométrie des bâtiments et le modèle de terrain proviennent des bases de données BD TOPO©départementale 2018³ et BD ALTI ©25m 2021⁴ de l'IGN.

Les diffractions sur les arêtes verticales et horizontales des bâtiments ont été prises en compte, ainsi que la réflexion sur les façades se trouvant à moins de 500 m du point récepteur.

Les directions des conditions favorables à la propagation ont été estimées sur la base des prévisions météorologiques, ainsi que de l'expérience terrain. Les valeurs retenues pour chacune des directions cardinales sont présentées dans la table 1

3 Résultats

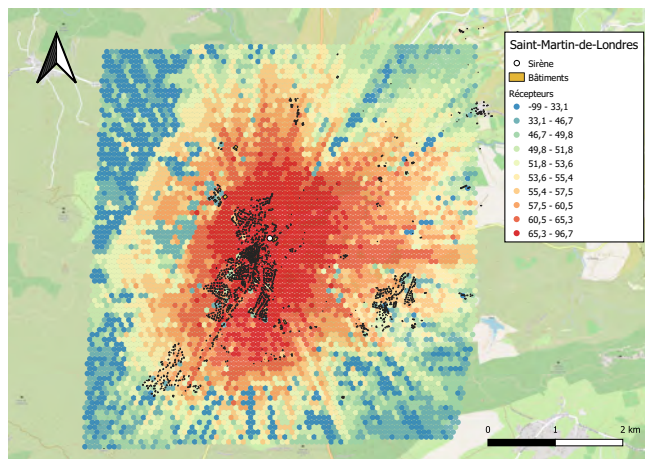
3.1 Représentations cartographiques

Une représentation des niveaux sonores sur une grille de 6778 points espacés de 10 mètres dans la zone d'étude

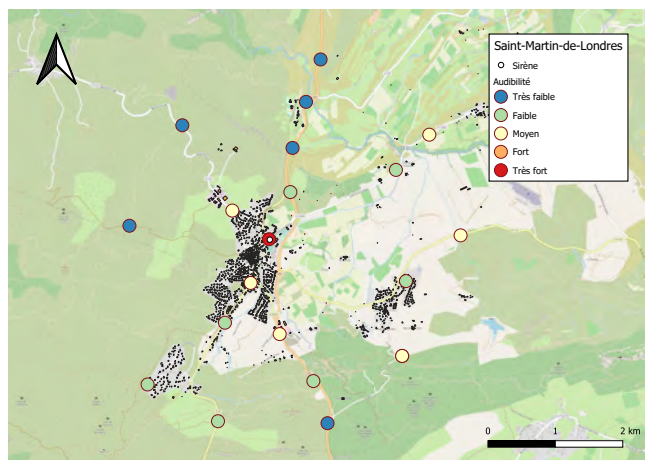
2. <https://github.com/orbisgis/geoclimate>

3. <https://geoservices.ign.fr/bdtopo>

4. <https://geoservices.ign.fr/bdalti>



(a) Cartographie du niveau sonore de la sirène en dB(A)



(b) Cartographie de l'audibilité de la sirène renseignée par les participants.

FIGURE 2 – Représentations cartographiques

issue du calcul effectué par NoiseModelling est présenté sur la figure 2a. Si la figure souligne la diminution des niveaux sonores lorsque la distance à la source augmente, il est toutefois notable que les isophones ne sont pas concentriques, ce qui peut remettre en cause l'approche par seuils théoriques généralement utilisée pour caractériser le bruit des sirènes. En effet, les niveaux sonores semblent également impactés par la topographie du site, les bâtiments et les gradients de vent. La figure 2b représente les valeurs d'audibilité issues du jeu de données perceptives constitué d'après le formulaire rempli par les étudiants. Ici aussi, la distance ne semble pas être le seul paramètre impactant l'audibilité de la sirène. La section suivante analyse plus en détail les liens entre mesures acoustiques, perception et modélisation.

3.2 Analyse croisée : Mesures acoustiques, perception, modélisation

Dans un premier temps, l'audibilité perçue est croisée aux niveaux sonores mesurés à l'aide de l'application

NoiseCapture. Le coefficient de corrélation de Pearson montre une corrélation élevée et significative ($r_{\text{Pearson}} = 0,57$ et $p\text{-value} < 0.001$). Ce résultat permet de confirmer : (i) d'une part la capacité de NoiseCapture à capturer des niveaux sonores malgré des conditions d'acquisitions non optimales, (ii) d'autre part la bonne interprétation de la question sur l'audibilité par les étudiants, ainsi que le lien logique entre audibilité et niveau sonore. Il n'est toutefois pas possible à ce stade de déterminer si la part de la corrélation non expliquée est liée à des erreurs de mesures, ou à une relation non linéaire entre audibilité et niveaux sonores.

Les résultats issus des simulations sont fortement et significativement corrélés aux mesures ($r_{\text{Pearson}} = 0.77$, et $p\text{-value} < 0.01$). Ce lien permet de valider à la fois l'utilisation de NoiseModelling et de NoiseCapture pour estimer le niveau sonore de la sirène dans la zone d'étude.

Enfin, il existe un lien significatif et élevé entre les niveaux sonores estimés par NoiseModelling et les valeurs d'audibilité renseignées par les participants ($r_{\text{Pearson}} = 0.70$ et $p\text{-value} < 0.01$). Le modèle CNOSSOS-EU, implémenté sous NoiseModelling, semble donc pertinent pour estimer l'audibilité de la sirène sur notre zone d'étude.

3.3 Vers une cartographie de l'audibilité

La validation du modèle CNOSSOS-EU pour estimer l'audibilité des sirènes laisse entrevoir la possibilité de cartographier cette audibilité sur un territoire. Pour cela, il est nécessaire de proposer une métrique qui représente le pourcentage de personnes entendant la sirène en fonction du niveau sonore estimé ; c'est ce qui est proposé dans cette section.

Pour chacun des 21 participants de l'étude, sont disponibles le niveau sonore estimé par NoiseModelling, ainsi que le niveau d'audibilité, estimé entre 1 et 6. A partir de ces 21 couples de valeur, il est possible d'estimer, pour chaque intervalle de niveau sonore de 10 dB(A) de large, la proportion des participants exposés à ce niveau sonore ayant renseigné un score d'audibilité supérieur à une valeur donnée. Par exemple, si 5 des 10 participants ayant été exposé à un niveau sonore compris entre 40 dB(A) et 50 dB(A) ont entendu la sirène à un seuil d'audibilité de 3 ou plus, alors ce pourcentage est de 50%. C'est ce que représente la Figure 3, pour les niveaux d'audibilité "Très faible", "Faible", et "Moyen", correspondant respectivement à des niveaux d'audibilité de 2, 3 et 4, sur une échelle allant de 1 à 6. Les niveaux d'audibilité de 1, 5 et 6 n'ont pas été assez renseignés par les participants pour pouvoir produire de telles courbes.

La Figure 3 souligne que la sirène est toujours entendue à un niveau au moins "Très faible". Il est nécessaire que le niveau sonore soit au moins dans l'intervalle [40 – 50dB(A)] pour que 50% des participants entendent la sirène au moins à un niveau "Faible", et que le niveau sonore soit au moins dans l'intervalle [60 – 70dB(A)] pour que 50% des participants entendent la sirène au moins à un niveau "Moyen".

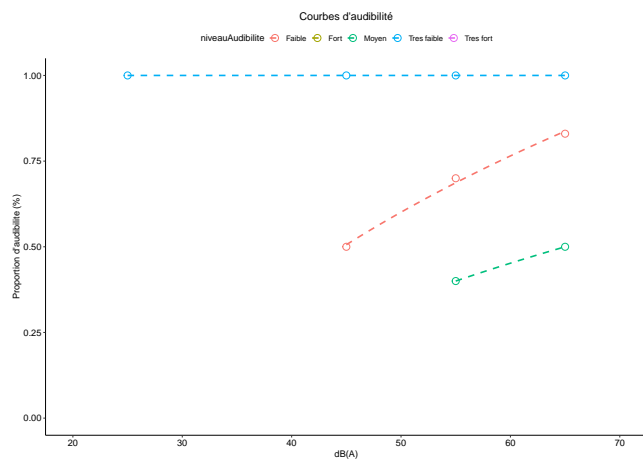


FIGURE 3 – Courbes de proportion d'audibilité (%) de la sirène en fonction du niveau sonore en décibels, pour un niveau d'audibilité "Très faible", "Faible" et "Moyen".

4 Conclusions

Les sirènes de sécurité civile constituent un vecteur d'alerte indispensable face à des risques climatiques ou industriels. Pourtant, la densification du réseau des sirènes est encore parfois réalisée sur la base de contraintes techniques davantage que par un effort d'optimisation spatiale de leur couverture, faute de connaissances précises de la couverture spatiale du signal sonore émis par les sirènes. L'outil de modélisation NoiseModelling, et plus généralement le modèle CNOSSOS-EU qui y est implémenté, a été mobilisé dans cette étude pour répondre à ce besoin de calculer et de représenter plus précisément la couverture du signal sonore des sirènes. L'étude montre que cet outil est pertinent pour évaluer l'audibilité d'un signal de sirène à des distances supérieures à 2 km. La validation est issue d'une analyse croisée qui souligne les corrélations entre : (i) l'audibilité et les niveaux mesurés via l'application NoiseCapture, (ii) les niveaux mesurés via l'application NoiseCapture et les niveaux estimés avec NoiseModelling, (iii) l'audibilité et les niveaux estimés avec NoiseModelling. Ce résultat est non trivial, notamment par le fait que le modèle CNOSSOS-EU est utilisé bien en dehors de son domaine de validité, qui correspond normalement à une distance maximale de propagation de 800m. Ce résultat laisse entrevoir une forte plus-value de l'approche, comparée à la simple considération de seuils de distance théoriques, car le modèle tient compte des influences combinées de la morphologie des bâtiments, de la topographie et de la météorologie, sur la propagation du son dans la zone d'étude. Cette étude propose également une métrique originale représentant l'audibilité d'une sirène par une population en fonction du niveau sonore, rendant possible la cartographie de l'audibilité des sirènes. La méthodologie présentée dans cette étude sera prochainement reconduite sur un plus grand terrain d'étude, contenant de nombreuses sirènes et davantage de participants, afin de confronter la modélisation à d'autres configurations

géographiques, et d'autre part tester la robustesse des courbes d'audibilité proposées. Il sera alors possible de s'inspirer de la méthodologie proposée pour optimiser le placement de jeux de sirènes en se basant sur leur audibilité.

Remerciements

La thèse de Jonathan Siliézar est co-financée par l'Université Gustave Eiffel et la région Pays-de-la-Loire. Les auteurs remercient les étudiants du Master Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels (GCRN) de l'université Paul-Valéry Montpellier 3 ayant participé à l'expérimentation.

Références

- [1] Akihiko Nishino, Akira Kodaka, Madoka Nakajima, and Naohiko Kohtake. A model for calculating the spatial coverage of audible disaster warnings using gtf's realtime data. *Sustainability (Switzerland)*, 13(23), 2021.
- [2] Johnny Douvinet, Anna Serra-Llobet, Esteban Bopp, and G. Mathias Kondolf. Are sirens effective tools to alert the population in France? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(10) :2899–2920, 2021.
- [3] Johnny Douvinet. Maintaining siren systems to alert the population in France is a debatable priority! *Annales de Géographie*, 2020(731) :5–32, 2020.
- [4] Esteban Bopp and Johnny Douvinet. Spatial performance of location-based alerts in France. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50(July) :101909, 2020.
- [5] KH Wanniarachchi and AH Lakmal. Optimum Locations Suitability : Analysis for Tsunami Warning Centres. In *13th International Research Conference*, pages 45–54, 2004.
- [6] Graham S. Leonard, David M. Johnston, Douglas Paton, Amy Christianson, Julia Becker, and Harry Keys. Developing effective warning systems : Ongoing research at Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172(3-4) :199–215, 2008.
- [7] Esteban Bopp, Béatrice Gisclard, Johnny Douvinet, Karine Weiss, and Gilles Martin. How to improve alert systems : the technical, human, environmental and structural aspects. *Australian Journal of Emergency Management*, 36(1) :67–75, 2021.
- [8] Erwan Bocher, Gwenaél Guillaume, Judicaël Picaut, Gwendall Petit, and Nicolas Fortin. Noisemodelling : An open source GIS based tool to produce environmental noise maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 2019.
- [9] European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure - Position Paper. 2006(January) :1–129, 2006.