



MODÉLISATION ET OPTIMISATION MULTICRITÈRE DU CONFORT THERMO-ACOUSTIQUE FACE AU BRUIT ROUTIER : CAS DE L'HÔPITAL BEFELATANANA À ANTANANARIVO

^{1,1}RAKOTOARISON Tantely Heritiana Désirée, ^{1,2}RAJAONARISON Lalaina Dina, ^{1,3}RAJAONARISON Eddie Franck, ^{1,4}RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa, ^{1,5}TOVONIRINA Mamiharizo Jackie

1- Ecole Doctorale en INGENIERIE ET GEOSCIENCES- UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

RESUME : Dans les hôpitaux urbains, l'exposition au bruit routier et les exigences de performance thermique imposent des choix constructifs capables de concilier confort des usagers et durabilité. Cette étude vise à modéliser l'exposition acoustique et à identifier, par optimisation multicritère, les matériaux d'enveloppe les plus adaptés au cas de l'Hôpital Befelatanana à Antananarivo. Le modèle de décroissance acoustique présente un coefficient de détermination de 0,972, une RMSE de 0,93 dB et une MAE de 0,65 dB. Le coefficient effectif de décroissance atteint 20,71, correspondant à une atténuation d'environ 6,23 dB par doublement de distance. L'analyse trafic-distance confirme l'augmentation de l'exposition avec le débit et sa diminution avec l'éloignement, tandis que la sommation énergétique souligne l'influence des voies secondaires. Parmi les isolants étudiés, la laine de roche/verre offre le meilleur compromis, avec une conductivité d'environ 0,035 W/m·K et un score acoustique de 4/5. La ouate de cellulose atteint 5/5 en acoustique, tandis que le polyuréthane domine thermiquement. Les analyses bootstrap et leave-one-out confirment enfin la robustesse globale du modèle.

Mots-clés : confort thermo-acoustique ; bruit routier ; Hôpital Befelatanana ; matériaux d'enveloppe ; optimisation multicritère.

ABSTRACT: Urban hospitals are simultaneously exposed to road traffic noise and thermal performance requirements, creating the need for building solutions that combine user comfort and environmental sustainability. This study aims to model acoustic exposure and identify, through multicriteria optimization, the most suitable envelope materials for Befelatanana Hospital in Antananarivo. The calibrated acoustic decay model shows strong agreement with measurements, with a coefficient of determination of 0.972, an RMSE of 0.93 dB, and an MAE of 0.65 dB. The effective decay coefficient is 20.71, corresponding to an attenuation of approximately 6.23 dB for each doubling of distance. The traffic-distance analysis confirms that acoustic exposure increases with traffic flow and decreases with setback distance, while energetic summation highlights the contribution of secondary roads. Among the insulation materials assessed, rock/glass wool provides the best thermo-acoustic compromise, with a thermal conductivity of about 0.035 W/m·K and an acoustic score of 4/5. Cellulose wadding reaches 5/5 acoustically, whereas polyurethane performs best thermally. Bootstrap and leave-one-out analyses finally confirm the overall robustness and stability of the calibrated model.

Keywords: thermo-acoustic comfort; road traffic noise; Befelatanana Hospital; building envelope materials; multicriteria optimization.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.22821079>

1 Introduction

La qualité de l'environnement intérieur constitue un enjeu essentiel dans les établissements hospitaliers, où le confort des patients et du personnel dépend notamment des conditions acoustiques et thermiques. Dans les hôpitaux urbains, ces exigences sont difficiles à satisfaire en raison de l'exposition au bruit routier et des contraintes liées aux performances de l'enveloppe. Le bruit environnemental est reconnu comme un problème de santé publique affectant le bien-être et la qualité de vie [1]. La recherche de solutions constructives assurant simultanément isolation acoustique, performance thermique et durabilité constitue ainsi une préoccupation importante dans la conception hospitalière. Le trafic routier représente une source majeure de bruit environnemental en milieu urbain [1]. Son impact dépend notamment du débit de circulation, de la distance entre la chaussée et le bâtiment, de la configuration du site et de la présence de plusieurs voies. Dans les espaces hospitaliers, l'exposition au bruit peut perturber le repos et le sommeil des patients ; des observations en soins intensifs ont montré une association négative entre bruit de fond et qualité subjective du sommeil [2]. L'analyse de la propagation sonore et de sa décroissance avec la distance apparaît donc nécessaire pour caractériser l'exposition des bâtiments hospitaliers. Parallèlement, le confort thermique dépend des conditions intérieures et des caractéristiques de l'enveloppe. Les patients hospitalisés peuvent présenter des besoins thermiques spécifiques [3], conformément aux principes d'évaluation du confort définis par l'ISO 7730 [4]. Toutefois, les matériaux les plus performants thermiquement ne présentent pas nécessairement les meilleures propriétés acoustiques. Les performances des isolants varient selon leur nature et leur comportement, comme l'illustrent les différences observées entre laine minérale et fibres de bois [5]. L'évaluation acoustique des éléments de bâtiment constitue également une dimension de la performance de l'enveloppe [6]. Cette diversité justifie une approche multicritère recherchant un compromis entre performances thermique et acoustique. Cette problématique concerne particulièrement l'Hôpital Befelatanana à Antananarivo, implanté dans un tissu urbain où la proximité des infrastructures routières rend pertinente une évaluation intégrée du trafic, de la distance aux voies et des caractéristiques thermo-acoustiques des matériaux d'enveloppe. L'amélioration du confort intérieur nécessite donc de considérer conjointement la propagation du bruit routier et les choix constructifs permettant d'en limiter les effets tout en maintenant une performance thermique satisfaisante. Les approches multicritères appliquées aux enveloppes permettent de comparer plusieurs solutions selon plusieurs critères simultanés [7]. La présente étude vise ainsi à modéliser et optimiser le confort thermo-acoustique de l'Hôpital Befelatanana face au bruit routier. Elle cherche, d'une part, à calibrer et valider un modèle de décroissance acoustique afin d'évaluer l'influence du débit de circulation, de la distance et de la combinaison de plusieurs sources routières. D'autre part, elle compare différents matériaux isolants selon leurs performances thermiques et acoustiques, puis applique une analyse multicritère pour identifier les solutions offrant le meilleur compromis. Enfin, des analyses de sensibilité et de robustesse sont mobilisées afin de vérifier la stabilité des paramètres obtenus et de fournir une base d'aide à la décision pour des dispositions constructives hospitalières durables et adaptées au contexte urbain d'Antananarivo.

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Pour la réalisation de cette étude, le dispositif de mesure acoustique s'est appuyé sur un sonomètre intégrateur destiné à l'enregistrement du niveau sonore équivalent pondéré A (L_{Aeq}) aux différentes distances retenues par rapport à l'axe routier. Afin d'assurer la fiabilité métrologique des mesures, l'instrumentation acoustique est considérée conformément aux spécifications applicables aux sonomètres de classe 1 ou 2 définies par la norme IEC 61672-1 [8]. Un calibrateur acoustique a été associé au dispositif afin de contrôler la sensibilité du système de mesure avant et après les campagnes de terrain, conformément aux prescriptions relatives aux calibrateurs utilisés avec les sonomètres [9]. Les distances entre les points de mesure et les axes routiers ont été déterminées à l'aide d'un télémètre laser ou d'un dispositif de mesure métrique, tandis que le débit de circulation a été obtenu par comptage des véhicules durant les périodes d'observation, à l'aide de relevés manuels ou d'enregistrements permettant de distinguer les axes principal et secondaire. Les relevés acoustiques ont été organisés selon des positions représentatives de l'exposition au trafic, en cohérence avec les principes de détermination des niveaux de pression acoustique du bruit environnemental définis par l'ISO 1996-2 [10]. Pour l'analyse thermo-acoustique de l'enveloppe, six isolants ont été considérés : polyuréthane, polystyrène expansé, laine de roche/verre, fibre de

bois, liège et ouate de cellulose. Les données de conductivité thermique ont été renseignées à partir de valeurs techniques et de références normalisées relatives aux propriétés hygrothermiques des matériaux de construction [11]. Les performances acoustiques correspondantes ont ensuite été intégrées au classement multicritère afin d'étudier le compromis entre isolation thermique et protection contre le bruit. Enfin, un ordinateur équipé d'outils de traitement numérique et statistique a permis d'effectuer la calibration du modèle logarithmique, le calcul des indicateurs d'erreur, les simulations trafic-distance, la sommation énergétique, l'analyse multicritère ainsi que les tests de robustesse par bootstrap et leave-one-out.

2.2 Méthodes

Les données acoustiques et de trafic ont été analysées selon une approche quantitative combinant modélisation empirique, analyse statistique, simulation numérique et optimisation multicritère. Les niveaux sonores équivalents mesurés ont été associés aux distances par rapport à l'axe routier et aux débits de circulation observés. Ces variables ont été retenues en raison de leur rôle déterminant dans l'exposition au bruit routier [12]. Les traitements numériques ont été réalisés sous Python. La bibliothèque NumPy a été utilisée pour l'organisation et le traitement des données, tandis que SciPy a été mobilisée pour les procédures d'ajustement, d'optimisation et d'analyse statistique [14,15]. La propagation du bruit routier a été représentée par un modèle logarithmique de décroissance acoustique avec la distance. Ce modèle suppose que le niveau sonore diminue progressivement lorsque le récepteur s'éloigne de la source routière. Il a été calibré à partir des mesures de terrain par ajustement aux moindres carrés. Le niveau sonore de référence et le coefficient effectif de décroissance ont ainsi été estimés à partir des données observées. La qualité du modèle acoustique a été évaluée à l'aide du coefficient de détermination, de l'erreur quadratique moyenne, de l'erreur absolue moyenne et de l'erreur moyenne. La comparaison entre les valeurs observées et les valeurs estimées, ainsi que l'analyse graphique des résidus, ont également été utilisées pour vérifier la présence éventuelle de biais systématiques. Un modèle trafic-distance a ensuite été utilisé pour étudier l'influence simultanée du débit de circulation et de la distance au réseau routier. Plusieurs scénarios de trafic ont été simulés afin d'évaluer l'évolution du niveau sonore lorsque le nombre de véhicules augmente ou lorsque le récepteur s'éloigne de la chaussée. Des surfaces de réponse et des courbes d'isoniveaux ont été produites pour représenter ces interactions. Deux catégories de voies ont été considérées : un axe principal et une voie secondaire. Lorsque plusieurs voies contribuaient simultanément au niveau sonore reçu, leurs contributions ont été combinées selon le principe de sommation énergétique des niveaux acoustiques. Cette approche a permis d'estimer l'exposition sonore globale du récepteur plutôt que d'analyser séparément chaque source routière. L'intégration du trafic, du type de voie et de la distance est cohérente avec les principes de modélisation du bruit routier décrits par la FHWA [12]. Le modèle acoustique repose principalement sur la distance entre la source et le récepteur ainsi que sur le débit de circulation. Les autres facteurs pouvant modifier localement la propagation du bruit, notamment les réflexions sur les bâtiments, les obstacles urbains, les variations météorologiques ou les caractéristiques détaillées de chaque véhicule, n'ont pas été modélisés séparément. Leur influence éventuelle est donc considérée comme intégrée dans les paramètres calibrés à partir des mesures de terrain. Les simulations ont ainsi été utilisées principalement pour analyser les tendances relatives de l'exposition acoustique. L'évaluation des matériaux d'enveloppe a été réalisée par une méthode d'analyse multicritère fondée sur la somme pondérée. Deux critères ont été retenus : la performance thermique et la performance acoustique. La performance thermique a été appréciée à partir de la conductivité thermique des matériaux, une faible conductivité correspondant à une meilleure capacité d'isolation thermique. La performance acoustique a été appréciée à partir de l'indicateur acoustique retenu pour caractériser la capacité du matériau à réduire la transmission du bruit. Les deux critères ont été normalisés sur une échelle commune afin de permettre leur comparaison malgré leurs unités différentes. La normalisation a été réalisée de manière à ce qu'un score élevé corresponde systématiquement à une meilleure performance. Cette étape a notamment permis de tenir compte du fait que la conductivité thermique constitue un critère à minimiser, alors que la performance acoustique constitue un critère à maximiser. Un score global a ensuite été calculé pour chaque matériau en combinant les scores thermique et acoustique selon des pondérations complémentaires. La somme des poids attribués aux deux critères a été maintenue égale à 100 %. L'importance relative du critère thermique a été progressivement modifiée, tandis que le poids du critère acoustique variait de manière complémentaire. Cette variation des pondérations a permis de réaliser une analyse de sensibilité du classement des matériaux. Elle a servi à déterminer les conditions dans lesquelles le polyuréthane, la laine de roche/verre ou la ouate de cellulose constituait la solution la plus performante. Cette démarche permet d'éviter de retenir une pondération unique et

arbitraire et met en évidence le compromis entre performance thermique et performance acoustique [13]. Les résultats de l'analyse multicritère ont été représentés à l'aide de courbes de sensibilité, de cartes du matériau optimal et de surfaces tridimensionnelles du meilleur score obtenu. Ces représentations ont permis d'identifier les changements de solution optimale en fonction des priorités accordées aux critères thermique et acoustique. La robustesse du modèle acoustique a enfin été évaluée par deux méthodes de rééchantillonnage. Une procédure bootstrap a été appliquée aux données de calibration afin d'estimer la variabilité du coefficient de décroissance et du niveau sonore de référence. Des intervalles de confiance à 95 % ont été obtenus à partir des distributions générées par les rééchantillonnages. Cette procédure permet d'apprécier l'incertitude associée aux paramètres estimés [16]. Une validation croisée de type leave-one-out a également été réalisée. Chaque point de mesure a été retiré successivement, puis le modèle a été recalibré sur les observations restantes. La variation des paramètres obtenus a permis d'identifier les observations les plus influentes et d'évaluer la stabilité générale du modèle [17]. L'ensemble des traitements a été automatisé sous Python afin d'assurer la reproductibilité des analyses. Le processus a couvert la préparation des données, la calibration du modèle acoustique, les simulations trafic-distance, l'analyse multicritère, l'analyse de sensibilité et les tests de robustesse.

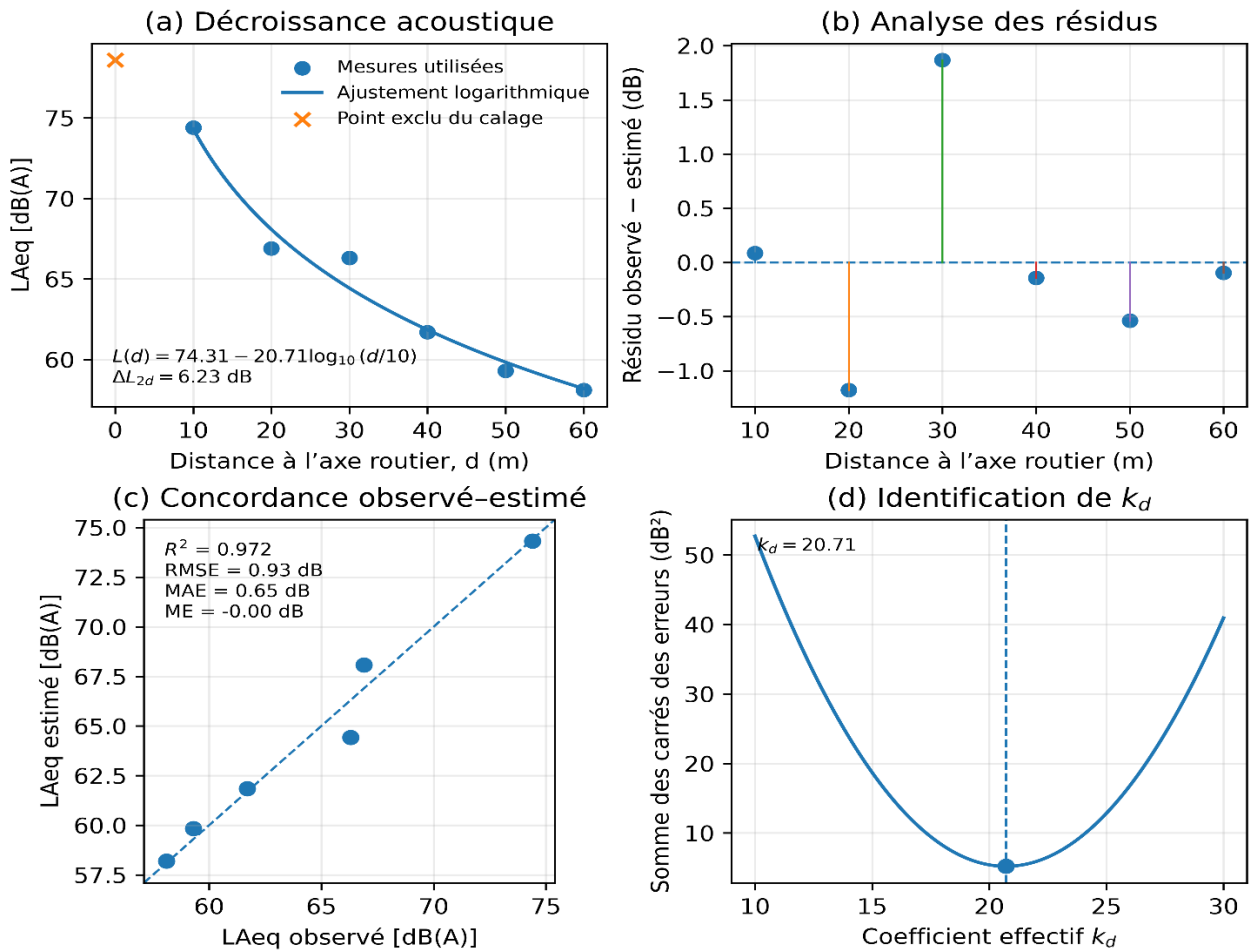
3 Résultats et discussions

3.1 Résultats

3.1.1 Calage et validation du modèle logarithmique de décroissance du niveau sonore routier en fonction de la distance à l'axe de la route

La Figure 1 ci-dessous présente l'analyse de la décroissance du niveau sonore LA_q en fonction de la distance à l'axe routier. Elle regroupe l'ajustement du modèle logarithmique aux mesures de terrain, l'analyse des résidus, la concordance entre les valeurs observées et estimées, ainsi que l'identification du coefficient effectif d'atténuation k_d . Cette analyse permet d'évaluer à la fois la dynamique de propagation du bruit routier et la qualité prédictive du modèle retenu.

Figure 1: Calage et validation du modèle logarithmique de décroissance du niveau sonore routier en fonction de la distance à l'axe de la route



Source : Auteur 2026

Interprétation

(a) Décroissance acoustique.

Les résultats montrent une diminution nette du niveau sonore lorsque la distance à la route augmente. Le modèle obtenu est :

$$L(d) = 74,31 - 20,71 \log_{10} \left(\frac{d}{10} \right)$$

Le coefficient k_d correspond à une réduction d'environ 6,23 dB à chaque doublement de la distance. Ainsi, le niveau sonore passe d'environ 74,4 dB(A) à 10 m à 58,1 dB(A) à 60 m, confirmant l'effet significatif de l'éloignement sur l'exposition au bruit routier.

(b) Analyse des résidus.

Les résidus restent globalement proches de zéro et sont compris approximativement entre -1,18 et +1,87 dB. Leur distribution de part et d'autre de zéro ne met pas en évidence de biais systématique important. L'écart maximal est observé à 30 m (+1,87 dB), tandis que les autres écarts demeurent relativement faibles.

(c) Concordance observé-estimé.

La bonne concordance entre les niveaux mesurés et estimés est confirmée par un coefficient de détermination élevé, avec $R^2=0,972$. Les erreurs restent faibles, avec un RMSE de 0,93 dB et une MAE de 0,65 dB. L'erreur moyenne $ME \approx 0,00$ dB indique en outre l'absence de surestimation ou de sous-estimation systématique du modèle.

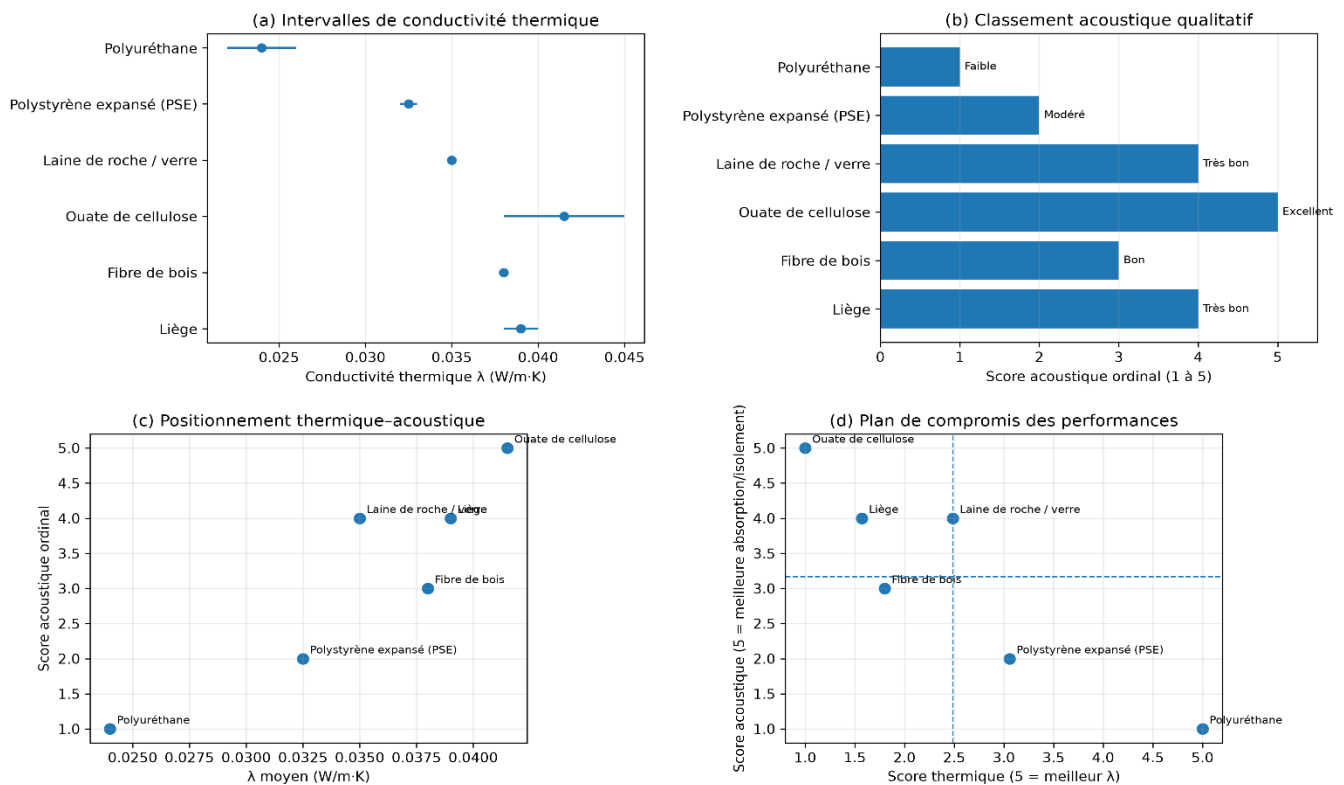
(d) Identification du coefficient k_d .

La minimisation de la somme des carrés des erreurs permet d'identifier une valeur optimale de $k_d = 20,71$. Ce minimum confirme que cette valeur fournit le meilleur ajustement aux mesures considérées et caractérise la décroissance acoustique effective observée sur le site étudié.

3.1.2 Comparaison des performances thermiques et acoustiques de matériaux isolants et analyse de leur compromis thermo-acoustique

La Figure 2 suivante compare six matériaux isolants selon leurs performances thermiques et acoustiques. L'analyse repose sur les plages de conductivité thermique, un classement qualitatif des performances acoustiques, puis un positionnement croisé permettant d'identifier les matériaux offrant le meilleur compromis entre isolation thermique et protection acoustique. Cette comparaison constitue une base d'aide au choix des matériaux susceptibles d'être intégrés aux enveloppes des bâtiments hospitaliers exposés aux nuisances routières.

Figure 2: Comparaison des performances thermiques et acoustiques de matériaux isolants et analyse de leur compromis thermo-acoustique



Source : Auteur 2026

Interprétation

(a) Intervalles de conductivité thermique.

Les résultats montrent des différences sensibles de performance thermique entre les matériaux. Le polyuréthane présente la conductivité thermique la plus faible, autour de 0,024 W/m·K, ce qui traduit la meilleure capacité d'isolation thermique du groupe étudié. Il est suivi du polystyrène expansé, avec environ 0,032–0,033 W/m·K, puis de la laine de roche/verre, proche de 0,035 W/m·K. La fibre de bois, le liège et la ouate de cellulose présentent des valeurs plus élevées, approximativement comprises entre 0,038 et 0,042 W/m·K. Sur le seul critère thermique, les matériaux synthétiques apparaissent donc particulièrement performants.

(b) Classement acoustique qualitatif.

Les performances acoustiques présentent une hiérarchie différente. La ouate de cellulose obtient le score maximal de 5/5, correspondant à une performance acoustique qualifiée d'« excellente ». La laine de roche/verre et le liège atteignent chacun 4/5, indiquant une très bonne performance. La fibre de bois présente un niveau intermédiaire de 3/5, tandis que le polystyrène expansé atteint seulement 2/5 et le polyuréthane 1/5. Les matériaux les plus efficaces thermiquement ne sont donc pas nécessairement les plus performants du point de vue acoustique.

(c) Positionnement thermique-acoustique.

Le croisement des deux critères met clairement en évidence cette opposition. Le polyuréthane, malgré sa très bonne performance thermique, présente la plus faible performance acoustique. À l'inverse, la ouate de cellulose atteint le meilleur score acoustique, mais possède une conductivité thermique plus élevée, proche de 0,041 W/m·K. La laine de roche/verre se distingue par un positionnement relativement équilibré, associant une conductivité d'environ 0,035 W/m·K à un score acoustique de 4/5. Le liège présente également une très bonne performance acoustique, avec 4/5, mais une performance thermique légèrement inférieure.

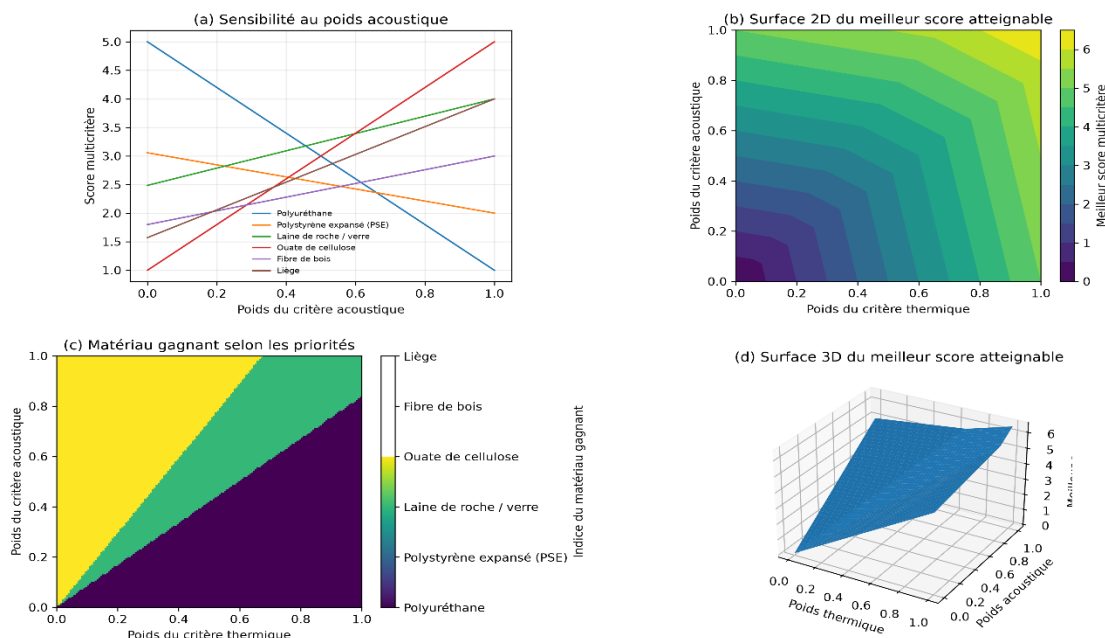
(d) Plan de compromis des performances.

L'analyse du compromis confirme qu'aucun matériau ne domine simultanément l'ensemble des critères. Le polyuréthane atteint le meilleur score thermique (5/5) mais seulement 1/5 en acoustique. La ouate de cellulose présente la situation inverse, avec 5/5 en acoustique mais le score thermique le plus faible. La laine de roche/verre, avec environ 2,5/5 en thermique et 4/5 en acoustique, apparaît comme l'un des matériaux les plus équilibrés. Le liège, avec environ 1,6/5 en thermique et 4/5 en acoustique, privilégie davantage la performance acoustique, tandis que la fibre de bois occupe une position intermédiaire.

3.1.3 Analyse de sensibilité multicritère et identification des matériaux optimaux selon la pondération des performances thermiques et acoustiques

La Figure 3 ci-après présente une analyse de sensibilité du choix des matériaux isolants aux priorités thermiques et acoustiques. Elle examine l'évolution du score multicritère lorsque l'importance accordée au confort acoustique varie, puis cartographie le meilleur niveau de performance atteignable et le matériau optimal selon différentes combinaisons de pondération. Cette approche permet ainsi d'identifier les solutions constructives les plus adaptées lorsque les exigences de confort thermique et de protection contre le bruit routier évoluent.

Figure 3: Analyse de sensibilité multicritère et identification des matériaux optimaux selon la pondération des performances thermiques et acoustiques



Source : Auteur 2026

Interprétation

(a) Sensibilité au poids du critère acoustique.

Les résultats montrent que le classement des matériaux dépend fortement de l'importance accordée à l'acoustique. Lorsque la priorité est essentiellement thermique, le polyuréthane obtient le score le plus élevé, proche de 5, alors que la ouate de cellulose se situe autour de 1. Avec l'augmentation du poids acoustique, cette tendance s'inverse : le score du polyuréthane diminue progressivement jusqu'à 1, tandis que celui de la ouate de cellulose augmente jusqu'à 5. La laine de roche/verre progresse d'environ 2,5 à 4, ce qui traduit une bonne stabilité entre les deux exigences. Le liège évolue également vers un score de 4, tandis que la fibre de bois atteint environ 3.

(b) Surface du meilleur score atteignable.

La surface de performance montre une augmentation générale du meilleur score multicritère lorsque les poids attribués aux critères thermique et acoustique deviennent simultanément importants. Les valeurs les plus faibles sont observées lorsque les deux critères reçoivent une pondération limitée, tandis que les niveaux les plus élevés, supérieurs à 6, apparaissent lorsque les deux exigences sont fortement valorisées. Les changements de pente observés sur la surface traduisent également des changements de matériau optimal en fonction des priorités retenues.

(c) Matériau gagnant selon les priorités.

La cartographie met en évidence trois matériaux principalement dominants. Le polyuréthane constitue la solution privilégiée lorsque le critère thermique domine nettement le critère acoustique. À l'inverse, la ouate de cellulose devient optimale lorsque la performance acoustique constitue la priorité principale. Entre ces deux situations, la laine de roche/verre occupe une zone intermédiaire importante et apparaît comme la solution la plus équilibrée lorsque les exigences thermiques et acoustiques présentent des niveaux de priorité relativement proches. Dans les conditions considérées, le polystyrène expansé, la fibre de bois et le liège ne constituent pas la solution optimale globale, même s'ils peuvent conserver des qualités spécifiques intéressantes.

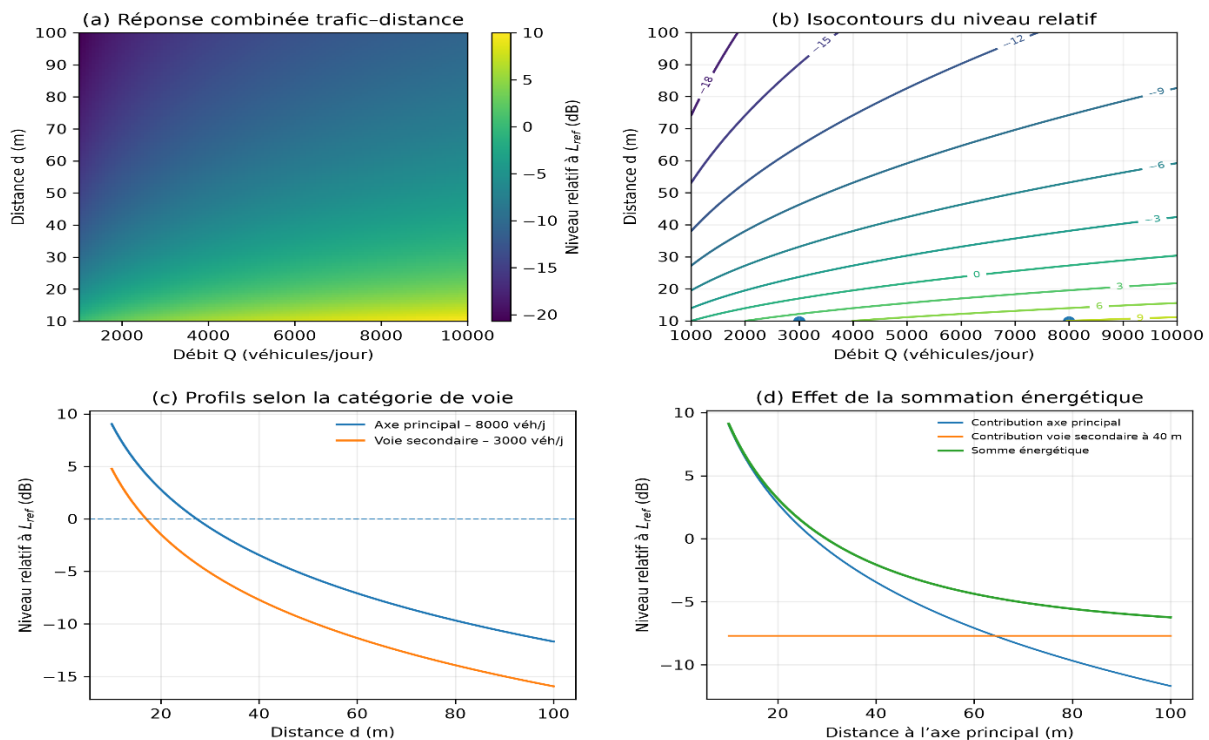
(d) Surface tridimensionnelle du meilleur score.

La représentation tridimensionnelle confirme l'évolution du niveau de performance en fonction des pondérations thermiques et acoustiques. Le meilleur score augmente progressivement avec l'importance combinée des deux critères et atteint environ 6 à 6,5 dans les configurations les plus exigeantes. Les variations de pente traduisent le passage d'un matériau optimal à un autre, confirmant que le choix de l'isolant dépend directement de la hiérarchie donnée aux objectifs de conception.

3.1.4 Influence combinée du débit de circulation et de la distance à la voie sur l'exposition acoustique et effet de la sommation énergétique des sources routières

La Figure 4 suivante analyse l'effet conjoint du débit de circulation et de la distance à l'axe routier sur le niveau sonore relatif. Elle présente successivement la réponse acoustique pour différentes combinaisons trafic-distance, les courbes d'isoniveaux, la comparaison entre un axe routier principal et une voie secondaire, puis l'effet de leur sommation énergétique. Cette représentation permet d'apprécier l'importance respective de l'intensité du trafic, de l'éloignement à la source et du cumul de plusieurs voies dans l'exposition acoustique des bâtiments hospitaliers urbains.

Figure 4: Influence combinée du débit de circulation et de la distance à la voie sur l'exposition acoustique et effet de la sommation énergétique des sources routières



Source : Auteur 2026

Interprétation

La distribution du NDVI montre une concentration importante des valeurs autour de 0,30 à 0,35, ce qui indique

(a) Réponse combinée trafic-distance.

La représentation met en évidence deux tendances principales : le niveau sonore augmente avec le débit de circulation et diminue fortement avec la distance à la route. À proximité immédiate de la chaussée, autour de 10 m, les niveaux relatifs peuvent atteindre environ +9 à +10 dB pour les débits les plus élevés. À l'inverse, à une

distance proche de 100 m, ils deviennent nettement négatifs et peuvent descendre jusqu'à environ -20 dB pour les faibles trafics. L'effet de la distance apparaît ainsi particulièrement déterminant dans la réduction de l'exposition acoustique.

(b) Isocontours du niveau relatif.

Les courbes d'isoniveaux confirment que des niveaux acoustiques similaires peuvent résulter de différentes combinaisons entre débit et distance. Pour un trafic élevé, de l'ordre de 8 000 à 10 000 véhicules/heure, le niveau relatif reste positif à courte distance, alors qu'il diminue progressivement à mesure que le recul augmente. À environ 40 m, les niveaux se situent généralement autour de -3 à 0 dB, selon le débit considéré, tandis qu'au-delà de 80 à 100 m, des réductions pouvant atteindre environ -9 à -18 dB sont observées. Cette évolution montre qu'un recul suffisant peut compenser partiellement l'effet d'un trafic important.

(c) Profils selon la catégorie de voie.

La comparaison entre les deux catégories de voies montre que l'axe principal de 8 000 véhicules/heure génère systématiquement des niveaux supérieurs à ceux de la voie secondaire de 3 000 véhicules/heure. À 10 m, les niveaux relatifs sont approximativement de $+9$ dB pour l'axe principal contre $+5$ dB pour la voie secondaire. À 100 m, ils atteignent respectivement environ -12 dB et -16 dB. Le niveau de référence est atteint vers 25–30 m pour l'axe principal et vers 15–20 m pour la voie secondaire, illustrant l'incidence directe du volume de trafic sur la distance nécessaire à l'atténuation acoustique.

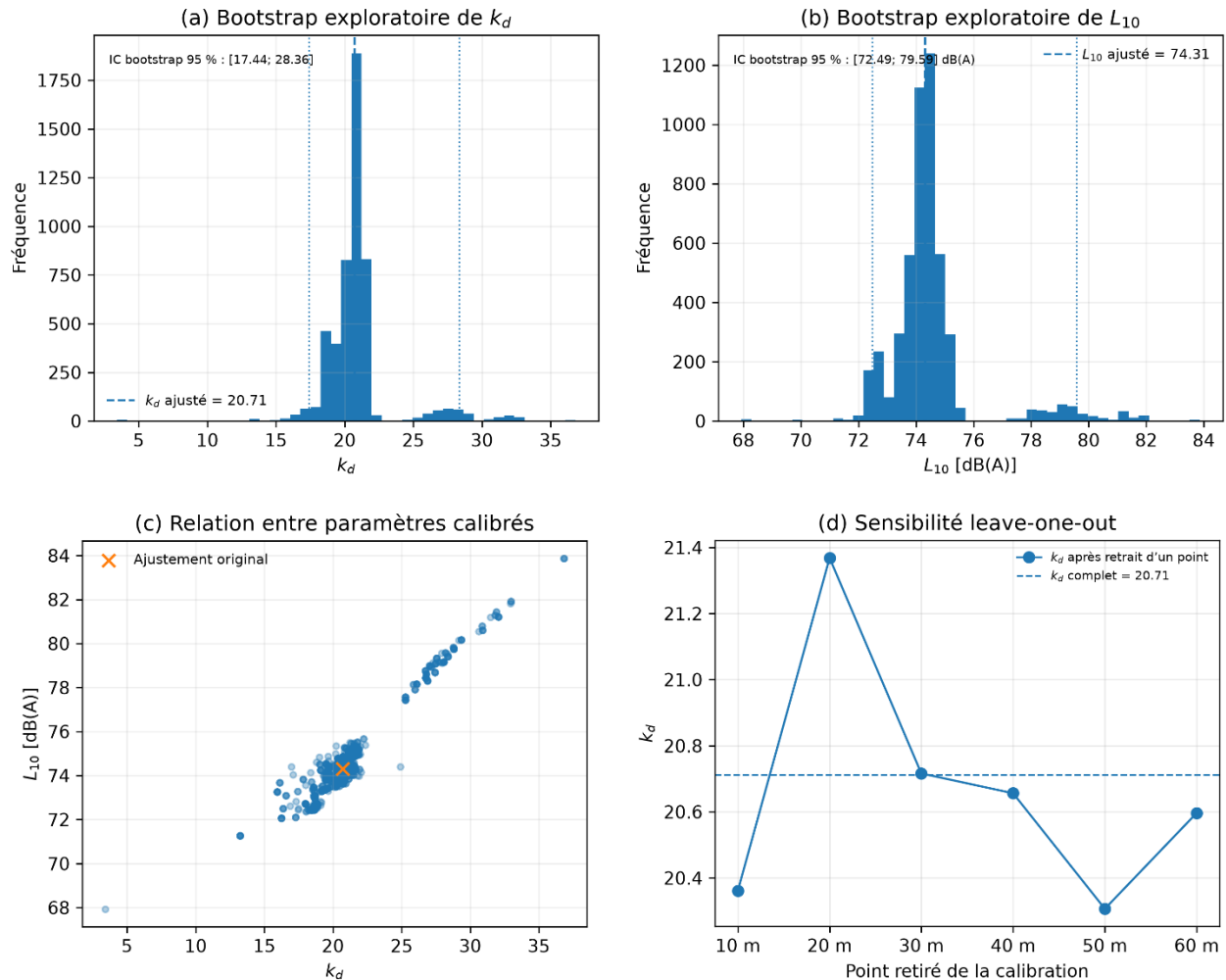
(d) Effet de la sommation énergétique.

La présence simultanée de plusieurs voies modifie sensiblement l'exposition sonore totale. La contribution de l'axe principal décroît avec la distance, tandis que celle de la voie secondaire, considérée ici à 40 m, demeure proche de -8 dB. À courte distance, l'axe principal domine donc largement le niveau global. Au-delà d'environ 60–65 m, sa contribution devient comparable puis inférieure à celle de la voie secondaire. À 100 m, bien que l'axe principal atteigne environ -12 dB, le niveau résultant de l'ensemble des sources reste proche de -6 dB, en raison de l'apport acoustique de la voie secondaire.

3.1.5 Analyse de robustesse et de sensibilité des paramètres du modèle de décroissance acoustique par bootstrap et validation leave-one-out

La Figure 5 ci-dessous évalue la robustesse statistique des paramètres issus du calage du modèle acoustique. L'analyse combine une procédure bootstrap appliquée au coefficient de décroissance k_d et au niveau de référence à 10 m, l'étude de leur relation, ainsi qu'une analyse de sensibilité par retrait successif des points de mesure. Elle permet ainsi d'apprécier la stabilité des paramètres estimés et leur dépendance vis-à-vis des observations utilisées pour la calibration.

Figure 5: Analyse de robustesse et de sensibilité des paramètres du modèle de décroissance acoustique par bootstrap et validation leave-one-out



Source : Auteur 2026

Interprétation

(a) Bootstrap exploratoire du coefficient de décroissance.

Le coefficient ajusté est de 20,71, tandis que l'intervalle bootstrap à 95 % s'étend de 17,44 à 28,36. La majorité des rééchantillonnages se concentre autour de 20–21, à proximité de la valeur issue du modèle initial. La présence de quelques estimations plus élevées, notamment autour de 27–28, explique toutefois l'élargissement de l'intervalle de confiance. Ces résultats indiquent une estimation centrale relativement stable, accompagnée d'une certaine incertitude liée à la taille et à la composition de l'échantillon.

(b) Bootstrap exploratoire du niveau à 10 m.

Le niveau acoustique ajusté à 10 m est de 74,31 dB(A). L'intervalle bootstrap à 95 % est compris entre 72,49 et 79,59 dB(A). La distribution est principalement concentrée autour de 74 dB(A), ce qui confirme la cohérence de l'estimation initiale. Quelques valeurs situées autour de 78–80 dB(A) entraînent néanmoins une extension de l'intervalle vers les niveaux supérieurs.

(c) Relation entre les paramètres calibrés.

Le nuage de points montre une relation positive marquée entre le coefficient de décroissance et le niveau estimé à 10 m : les valeurs élevées du coefficient sont généralement associées à des niveaux de référence plus importants. L'ajustement original, situé autour de 20,71 et 74,31 dB(A), se trouve au cœur de la principale concentration des simulations bootstrap. Cette position renforce la cohérence du couple de paramètres retenu pour représenter les mesures observées.

(d) Sensibilité leave-one-out.

Le retrait successif d'une mesure produit des valeurs du coefficient comprises approximativement entre 20,31 et 21,37, contre 20,71 pour l'ajustement complet. Le retrait du point situé à 20 m entraîne la variation la plus importante, avec un coefficient proche de 21,37, tandis que le retrait du point à 50 m conduit à la valeur minimale

d'environ 20,31. Les autres estimations restent très proches de la valeur initiale, ce qui traduit une bonne stabilité globale du modèle vis-à-vis des observations individuelles.

3.2 Discussions

Les résultats obtenus montrent que l'exposition acoustique de l'Hôpital Befelatanana est fortement conditionnée par la distance aux infrastructures routières et par l'intensité du trafic. Le modèle calibré présente une bonne capacité de restitution des mesures, avec un coefficient de détermination de 0,972, une RMSE de 0,93 dB et une MAE de 0,65 dB. Le coefficient de décroissance de 20,71, correspondant à une atténuation d'environ 6,23 dB par doublement de distance, confirme que l'éloignement constitue un levier important de réduction du bruit routier. Toutefois, cette atténuation reste dépendante du débit de circulation et de la présence de plusieurs voies autour du site. L'analyse trafic-distance confirme en effet que l'augmentation du débit entraîne une hausse des niveaux sonores, tandis que le recul par rapport à la chaussée réduit progressivement l'exposition. La comparaison entre l'axe principal de 8 000 véhicules/h et la voie secondaire de 3 000 véhicules/h montre que le premier domine à courte distance. Néanmoins, la sommation énergétique révèle que les voies secondaires peuvent maintenir une contribution non négligeable lorsque l'on s'éloigne de l'axe principal. L'évaluation acoustique d'un bâtiment hospitalier doit donc considérer l'ensemble des sources routières environnantes et non uniquement la voie la plus proche. Les résultats relatifs aux matériaux mettent également en évidence l'absence d'une solution optimale sur tous les critères. Le polyuréthane, malgré sa meilleure performance thermique, présente une performance acoustique faible. À l'inverse, la ouate de cellulose atteint un score acoustique de 5/5, mais possède une conductivité thermique relativement plus élevée. La laine de roche/verre, avec environ 0,035 W/m·K et un score acoustique de 4/5, apparaît comme le compromis le plus équilibré. L'analyse multicritère confirme cependant que le matériau optimal varie selon la priorité accordée au confort thermique ou acoustique. Enfin, les analyses bootstrap et leave-one-out montrent une stabilité satisfaisante du modèle, malgré une certaine dispersion des estimations bootstrap. Les faibles variations du coefficient de décroissance lors du retrait successif des mesures renforcent la fiabilité du calage obtenu. Dans l'ensemble, ces résultats soulignent que l'amélioration du confort thermo-acoustique de l'Hôpital Befelatanana doit reposer sur une stratégie combinant gestion du recul aux voies routières, prise en compte du trafic environnant et choix multicritère des matériaux d'enveloppe. Cette approche permet de privilégier des dispositions constructives équilibrées plutôt qu'une optimisation exclusivement thermique ou acoustique.

4 Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer de manière intégrée l'influence du trafic routier, de la distance aux voies et des matériaux d'enveloppe sur le confort thermo-acoustique de l'Hôpital Befelatanana à Antananarivo. Le modèle acoustique calibré présente une bonne qualité d'ajustement, avec un coefficient de détermination de 0,972, une RMSE de 0,93 dB et une atténuation estimée à 6,23 dB par doublement de distance. Ces résultats confirment que l'éloignement des infrastructures routières réduit sensiblement l'exposition sonore, même si la contribution cumulée de plusieurs voies doit être prise en compte. L'analyse des matériaux montre qu'aucune solution ne domine simultanément tous les critères. La laine de roche/verre, avec une conductivité d'environ 0,035 W/m·K et un score acoustique de 4/5, constitue le compromis thermo-acoustique le plus équilibré parmi les matériaux étudiés. L'analyse multicritère confirme toutefois que le choix optimal dépend de la priorité accordée aux performances thermique et acoustique. Enfin, les analyses bootstrap et leave-one-out montrent une stabilité satisfaisante du modèle. L'amélioration du confort de l'Hôpital Befelatanana repose ainsi sur une approche combinant maîtrise de l'exposition routière, choix raisonné des matériaux et optimisation multicritère des dispositions constructives.

REFERENCES

- [1] .World Health Organization Regional Office for Europe. Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2018.
- [2] . Simons KS, Verweij E, Lemmens PMC, Jelfs S, Park M, Spronk PE, et al. Noise in the intensive care unit and its influence on sleep quality: a multicenter observational study in Dutch intensive care units. *Critical Care*. 2018;22:250. doi:10.1186/s13054-018-2182-y.
- [3] Sun T, Luo A, Lu Y, Zhen M, Zhang Y, Bian G. Research on indoor thermal comfort of orthopedic patients in hospital. *Scientific Reports*. 2025;15:9053. doi:10.1038/s41598-025-93245-5.

- [4] International Organization for Standardization. ISO 7730:2025 — Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: ISO; 2025.
- [5] Gullbrekken L, Grynning S, Gaarder JE. Thermal performance of insulated constructions—Experimental studies. *Buildings*. 2019;9(2):49. doi:10.3390/buildings9020049.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 12354-1:2017 — Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 1: Airborne sound insulation between rooms. Geneva: ISO; 2017.
- [7] Cascone S, Anastasi V, Caponetto R. Performance optimization of building envelope through BIM and multi-criteria analysis. *Sustainability*. 2025;17(12):5294. doi:10.3390/su17125294.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 61672-1:2013 — Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications. Geneva: IEC; 2013.
- [9] International Electrotechnical Commission. IEC 60942:2017 — Electroacoustics — Sound calibrators. Geneva: IEC; 2017.
- [10] International Organization for Standardization. ISO 1996-2:2017 — Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels. Geneva: ISO; 2017.
- [11] International Organization for Standardization. ISO 10456:2007 — Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Geneva: ISO; 2007
- [12] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Traffic Noise Screening Tool 1.0: User's Guide. Report FHWA-HEP-22-005. Washington, DC: Federal Highway Administration; 2021.
- [13] Fishburn PC. Additive utilities with incomplete product sets: application to priorities and assignments. *Operations Research*. 1967;15(3):537–542. doi:10.1287/opre.15.3.537.
- [14] Harris CR, Millman KJ, van der Walt SJ, et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020;585:357–362. doi:10.1038/s41586-020-2649-2.
- [15] Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*. 2020;17:261–272. doi:10.1038/s41592-019-0686-2.
- [16] Efron B. Bootstrap methods: another look at the jackknife. *The Annals of Statistics*. 1979;7(1):1–26. doi:10.1214/aos/1176344552.
- [17] Stone M. Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1974;36(2):111–133. doi:10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x.