

Confort Thermo-Acoustique Durable Face Au Bruit Routier : Analyse Des Déterminants Et Stratégies Constructives Appliquées A L'hôpital Befelatanana

RAKOTOARISON Tantely Heritiana Désirée¹, RAJAONARISON Eddie Frank¹, RAKOTOSON
Andriatiana Tolontsoa¹, TOVONIRINA Mamiharizo Jackie¹

¹Ecole Doctorale en INGENIERIE ET GEOSCIENCES
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

Corresponding Author : RAKOTOARISON Tantely Heritiana Désirée, tantely.andriamanantena0880@gmail.com



Résumé : Cette étude analyse les principaux déterminants du confort thermo-acoustique durable de l'Hôpital Befelatanana face au bruit routier, en considérant simultanément le trafic, la distance, l'atténuation atmosphérique, les écrans bâtis et les performances des matériaux d'enveloppe. Les résultats montrent qu'un trafic de 3 000 véhicules/jour engendre une correction acoustique de +4,77 dB par rapport au débit de référence de 1 000 véhicules/jour, tandis que 8 000 véhicules/jour produisent +9,03 dB et 10 000 véhicules/jour près de +10 dB. Pour la propagation, le coefficient calibré $k_d = 20,71$ correspond à une atténuation moyenne d'environ 6,23 dB par doublement de distance et atteint environ 20,7 dB à 100 m. L'atténuation atmosphérique reste secondaire : avec $\alpha_{eff} = 0,005$ dB/m, elle n'est que de 0,50 dB à 100 m. Les écrans bâtis apportent un gain additionnel de 3 à 10 dB, portant l'atténuation totale jusqu'à environ 31,2 dB à 100 m. L'analyse des isolants montre enfin qu'aucun matériau ne domine tous les critères : la laine de roche/verre offre un compromis favorable avec $\lambda \approx 0,035$ W/m·K et un score acoustique de 4/5. La stratégie optimale combine donc recul, écran, zones tampons et enveloppe performante. Cette approche intégrée favorise la réduction de l'exposition sonore, l'efficacité énergétique et la durabilité hospitalière.

Mots-clés : bruit routier ; confort thermo-acoustique ; atténuation acoustique ; enveloppe du bâtiment ; Hôpital Befelatanana.

Abstract: This study analyzes the main determinants of sustainable thermo-acoustic comfort at Befelatanana Hospital under road traffic noise, considering traffic flow, distance, atmospheric attenuation, built barriers, and building-envelope performance. The results show that a traffic flow of 3,000 vehicles/day produces an acoustic correction of +4.77 dB relative to the reference flow of 1,000 vehicles/day, while 8,000 vehicles/day generates +9.03 dB, and 10,000 vehicles/day nearly +10 dB. Regarding sound propagation, the calibrated coefficient $k_d = 20.71$ corresponds to an average attenuation of approximately 6.23 dB per doubling of distance, reaching about 20.7 dB at 100 m. Atmospheric attenuation remains secondary: with $\alpha_{eff} = 0.005$ dB/m, it reaches only 0.50 dB at 100 m. Built barriers provide an additional attenuation of 3–10 dB, increasing total attenuation to approximately 31.2 dB at 100 m. The insulation-material analysis shows that no single material performs best for all criteria; rock/glass wool provides a favorable compromise with $\lambda \approx 0.035$ W/m·K and an acoustic score of 4/5. The optimal strategy therefore combines building setback, barriers, buffer zones, and a high-performance envelope, thereby improving noise reduction, energy efficiency, and hospital sustainability.

Keywords: road traffic noise; thermo-acoustic comfort; acoustic attenuation; building envelope; Befelatanana Hospital..

1. INTRODUCTION

Dans les établissements hospitaliers implantés en milieu urbain dense, la qualité de l'environnement intérieur constitue un enjeu majeur, car patients et personnel sont simultanément exposés aux contraintes acoustiques extérieures et aux exigences de confort

thermique. Parmi les nuisances environnementales, le bruit routier représente une source importante de perturbation, susceptible d'affecter le repos, le sommeil, la récupération des patients et les conditions de travail du personnel soignant [1]. Les effets sanitaires du bruit ne se limitent pas à l'audition : une exposition prolongée peut également provoquer gêne, perturbation du sommeil, stress physiologique et diminution des performances cognitives [2]. Dans les hôpitaux, plusieurs travaux montrent que les niveaux sonores peuvent dépasser les conditions recommandées pour les espaces destinés au repos et aux soins [3], ce qui justifie une approche spécifique de la maîtrise acoustique [4]. Dans le cas de l'Hôpital Befelatanana, l'exposition au bruit dépend notamment du débit de circulation des voies environnantes, de la distance entre les sources routières et le bâtiment, ainsi que des caractéristiques de propagation sonore. L'évaluation de cette propagation nécessite de considérer l'absorption atmosphérique [5], mais aussi la divergence géométrique, les effets du sol, les obstacles et les écrans susceptibles de modifier les niveaux acoustiques reçus [6]. Parallèlement, l'amélioration du confort hospitalier ne peut être dissociée de la performance thermique de l'enveloppe, les choix constructifs devant assurer des conditions intérieures adaptées tout en limitant les consommations énergétiques [7]. Dans cette perspective, la présente étude vise à analyser la sensibilité du niveau sonore au débit journalier du trafic, au coefficient de décroissance acoustique k_d , au coefficient d'atténuation atmosphérique α_{eff} et à la distance de propagation. Elle évalue également l'apport des écrans bâtis et compare plusieurs matériaux isolants selon leurs performances thermiques et acoustiques. L'objectif final est de proposer une stratégie constructive intégrée combinant recul, zones tampons, écrans et enveloppe performante afin d'améliorer durablement le confort thermo-acoustique de l'Hôpital Befelatanana face au bruit routier.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le dispositif méthodologique retenu pour l'évaluation du confort thermo-acoustique de l'Hôpital Befelatanana repose sur une approche combinant caractérisation du trafic routier, mesures acoustiques, modélisation de la propagation sonore, analyse de sensibilité et comparaison des performances thermo-acoustiques des solutions constructives. Les matériels nécessaires à la caractérisation acoustique comprennent un sonomètre intégrateur répondant de préférence aux exigences de la classe 1 définies par la norme IEC 61672-1, un calibre acoustique, un trépied permettant de stabiliser le microphone, ainsi qu'un dispositif de mesure des distances entre les voies de circulation, les points de réception et les façades du bâtiment. Les sonomètres de classe 1 sont adaptés aux mesures environnementales nécessitant une précision élevée [8]. Les relevés acoustiques peuvent être réalisés selon les principes de l'ISO 1996-2, qui encadre la détermination des niveaux de pression acoustique environnementale par mesure directe ou par extrapolation à l'aide de calculs [9]. La caractérisation de la source routière repose parallèlement sur des comptages du nombre de véhicules circulant sur les voies bordant l'hôpital. Les débits journaliers considérés sont de 1 000 véhicules/jour pour la situation de référence, 3 000 véhicules/jour pour la voie secondaire et 8 000 véhicules/jour pour l'axe principal, avec un scénario supplémentaire porté à 10 000 véhicules/jour pour l'analyse de sensibilité. L'influence du trafic est représentée par un modèle logarithmique de correction acoustique relative au débit de référence. Ce choix traduit le caractère logarithmique de l'échelle des décibels et s'inscrit dans les approches de modélisation du bruit routier dans lesquelles l'émission dépend notamment du volume et de la composition du trafic. Le cadre méthodologique CNOSSOS-EU est utilisé comme référence conceptuelle pour la représentation des émissions associées au trafic routier et leur propagation vers les récepteurs [10]. La propagation entre la voie et l'hôpital est étudiée pour des distances comprises principalement entre 10 et 100 m. La décroissance spatiale est représentée par un modèle logarithmique d'atténuation avec la distance, dont l'intensité est contrôlée par un coefficient effectif de décroissance acoustique k_d . Une valeur calibrée de 20,71 est retenue pour le scénario central et comparée aux valeurs 15 et 25 afin d'évaluer la sensibilité du modèle. Cette valeur centrale correspond dans l'étude à une décroissance moyenne d'environ 6,23 dB par doublement de distance. Cette représentation simplifiée est cohérente avec les principes généraux de calcul de la propagation acoustique extérieure, qui prennent notamment en considération la divergence géométrique, les effets du sol, les obstacles et les phénomènes d'écran [11]. La version actuelle de l'ISO 9613-2 fournit précisément une méthode d'ingénierie destinée à la prédiction des niveaux de pression acoustique en extérieur [11]. L'effet de l'atmosphère est intégré au modèle au moyen d'une atténuation linéaire avec la distance caractérisée par un coefficient effectif α_{eff} . Quatre scénarios sont examinés, correspondant à 0,000, 0,002, 0,005 et 0,010 dB/m, la valeur 0,005 dB/m étant adoptée comme scénario central. Cette paramétrisation permet d'isoler l'influence de l'absorption atmosphérique par rapport à celle de la décroissance géométrique. Le modèle s'appuie sur les principes de l'ISO 9613-1, selon lesquels l'absorption atmosphérique varie notamment avec la fréquence acoustique et les conditions de température, d'humidité et de pression [12]. L'efficacité des

protections physiques est ensuite évaluée à l'aide d'un modèle additif d'écran. Le scénario sans écran est comparé à des gains supplémentaires de 3, 6 et 10 dB, appliqués à l'atténuation obtenue par propagation naturelle. Cette analyse permet d'estimer l'intérêt d'un écran bâti ou d'un obstacle interposé lorsque l'augmentation du recul du bâtiment devient difficile dans un environnement urbain dense. L'évaluation de la protection de l'enveloppe est complétée par les principes de l'ISO 12354-3, qui propose un modèle de calcul permettant d'estimer l'isolement acoustique d'une façade à partir des performances de ses différents éléments et de considérer notamment le bruit routier extérieur [13]. Enfin, l'étude thermo-acoustique des matériaux repose sur une comparaison multicritère de leur conductivité thermique et de leur aptitude relative à contribuer à l'isolation acoustique. Le polyuréthane, le polystyrène expansé, la laine de roche ou de verre, la fibre de bois, le liège et la ouate de cellulose sont comparés à partir de leurs propriétés thermiques et de scores acoustiques harmonisés. Les valeurs de conductivité thermique sont interprétées conformément aux principes de caractérisation des propriétés hygrothermiques des produits du bâtiment définis par l'ISO 10456 [14]. L'ensemble des résultats est ensuite intégré dans une analyse de sensibilité croisée trafic–distance–propagation–écran–enveloppe afin d'identifier les paramètres dominants et de déterminer une stratégie constructive combinant recul par rapport aux voies, zones tampons, écrans bâtis et amélioration thermo-acoustique de la façade.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 1- Sensibilité du niveau sonore au débit journalier du trafic routier par rapport au débit de référence

La Figure ci-dessous présente l'influence du débit journalier de circulation sur la correction du niveau sonore routier, en prenant comme situation de référence un débit de 1 000 véhicules/jour. Cette analyse permet de quantifier l'augmentation de l'exposition acoustique associée à l'intensification du trafic et de comparer les contributions d'une voie secondaire et de l'axe principal desservant l'environnement de l'Hôpital Befelatanana.

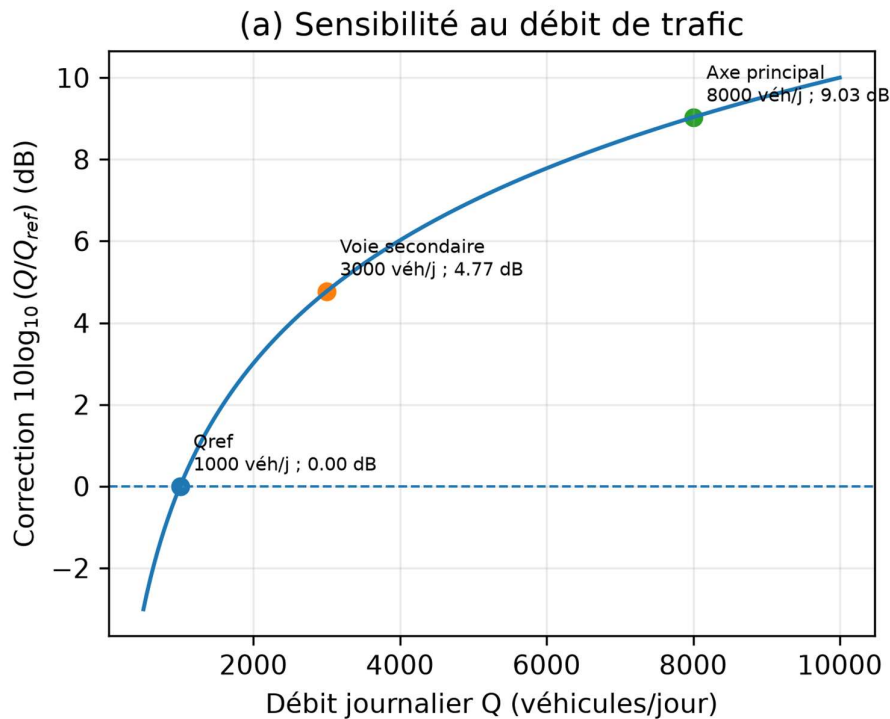


Figure 1: Sensibilité du niveau sonore au débit journalier du trafic routier par rapport au débit de référence

Source : Auteur

Interprétation

Les résultats mettent en évidence une augmentation logarithmique du niveau sonore avec le débit de circulation. Pour le débit de référence de 1 000 véhicules/jour, la correction acoustique est fixée à 0 dB. Lorsque le trafic atteint 3 000 véhicules/jour, représentatif de la voie secondaire, la correction augmente à +4,77 dB. Pour l'axe principal, caractérisé par un débit de 8 000 véhicules/jour, elle atteint +9,03 dB. À 10 000 véhicules/jour, l'augmentation est proche de +10 dB par rapport à la situation de référence. La courbe montre également que l'augmentation n'est pas linéaire : la correction progresse rapidement aux faibles débits puis plus modérément lorsque le trafic devient élevé. Ainsi, le passage de 1 000 à 3 000 véhicules/jour entraîne déjà une augmentation de près de 4,8 dB, tandis que le passage de 3 000 à 8 000 véhicules/jour ajoute environ 4,3 dB supplémentaires. Ces résultats confirment que le débit de circulation constitue un paramètre déterminant de l'exposition acoustique de l'Hôpital Befelatanana. L'axe principal, avec 8 000 véhicules/jour, génère une contribution acoustique nettement supérieure à celle de la voie secondaire. La maîtrise du confort acoustique hospitalier doit donc intégrer prioritairement l'intensité du trafic des voies les plus fréquentées, en complément de la distance aux infrastructures routières et des performances isolantes de l'enveloppe.

3.2 2- Sensibilité de l'atténuation acoustique à la variation du coefficient de décroissance k_d

La Figure suivante présente l'influence du coefficient de décroissance acoustique k_d sur l'atténuation spatiale du bruit routier en fonction de la distance. Trois valeurs ont été comparées, soit 15,00, 20,71 et 25,00, afin d'évaluer la sensibilité du modèle à ce paramètre et de situer la réponse obtenue avec la valeur calibrée pour le site étudié.

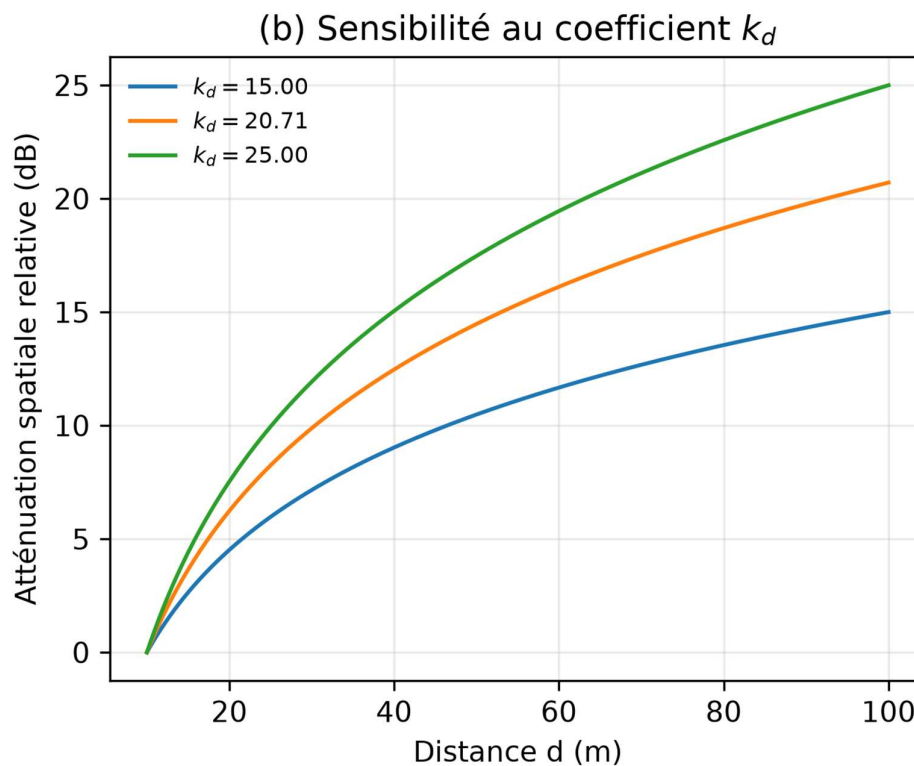


Figure 2: Sensibilité de l'atténuation acoustique à la variation du coefficient de décroissance k_d
Source : Auteur

Interprétation

Les résultats montrent que l'atténuation acoustique augmente à la fois avec la distance et avec la valeur du coefficient k_d . À 20 m, l'atténuation est d'environ 4,5 dB pour $k_d = 15$, 6,2 dB pour la valeur calibrée $k_d = 20,71$, et 7,5 dB pour $k_d = 25$. À 40 m, ces valeurs atteignent respectivement environ 9,0 dB, 12,5 dB et 15,0 dB. À une distance de 100 m, l'écart entre les scénarios devient plus marqué : l'atténuation est proche de 15 dB pour $k_d = 15$, de 20,7 dB pour $k_d = 20,71$, et de 25 dB pour $k_d = 25$. La valeur calibrée occupe ainsi une position intermédiaire entre les deux scénarios de sensibilité. Cette analyse confirme que le coefficient k_d contrôle directement l'intensité de la décroissance spatiale du bruit. Une augmentation de ce coefficient traduit une atténuation plus rapide avec l'éloignement, tandis qu'une valeur plus faible correspond à une propagation plus persistante. La valeur calibrée de 20,71 fournit donc une réponse intermédiaire et cohérente pour représenter les conditions acoustiques observées autour de l'Hôpital Befelatanana.

3- Sensibilité de l'atténuation atmosphérique au coefficient effectif α_{eff} en fonction de la distance

La Figure suivante présente l'influence du coefficient effectif d'atténuation atmosphérique α_{eff} sur la diminution du niveau sonore avec la distance. Quatre scénarios, compris entre 0 et 0,010 dB/m, ont été comparés afin d'évaluer la contribution spécifique de l'absorption atmosphérique à la propagation du bruit routier autour de l'Hôpital Befelatanana.

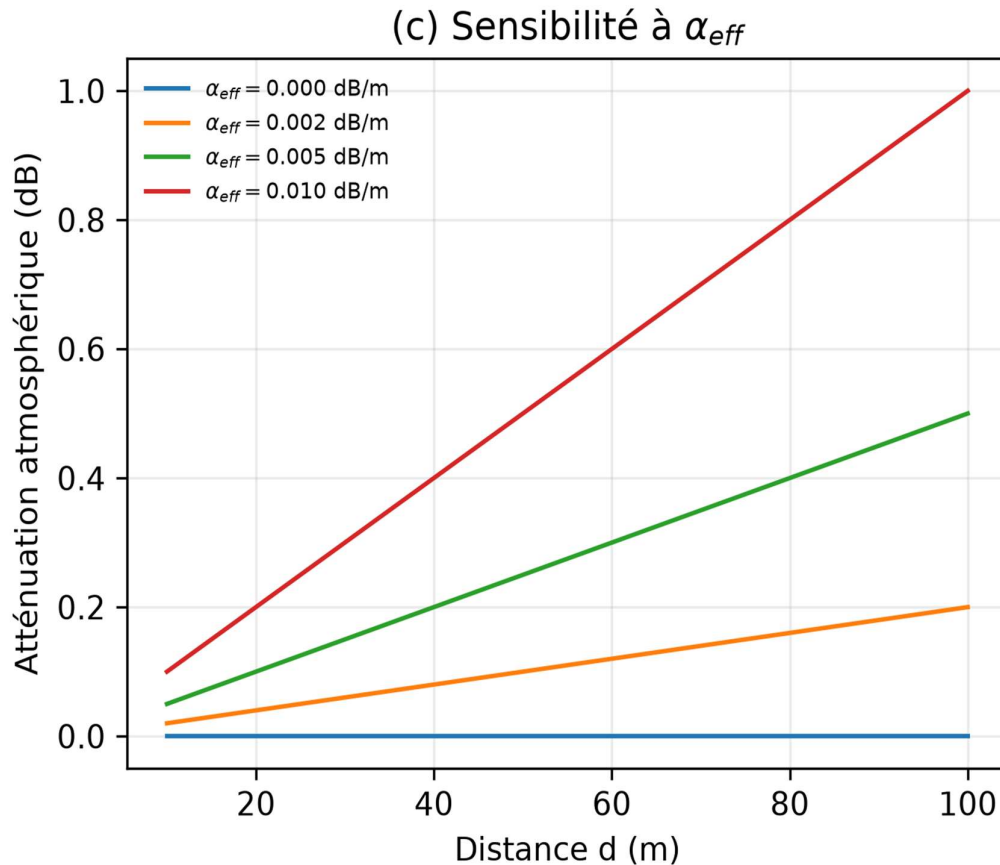


Figure 3: Sensibilité de l'atténuation atmosphérique au coefficient effectif α_{eff} en fonction de la distance
Source : Auteur

Interprétation

Les résultats montrent que l'atténuation atmosphérique augmente linéairement avec la distance et avec la valeur de α_{eff} . En l'absence d'absorption atmosphérique, soit 0,000 dB/m, aucune atténuation supplémentaire n'est observée. Pour un coefficient de 0,002 dB/m, l'atténuation atteint environ 0,08 dB à 40 m, 0,16 dB à 80 m et 0,20 dB à 100 m. Lorsque α_{eff} atteint 0,005 dB/m, l'atténuation est d'environ 0,20 dB à 40 m, 0,40 dB à 80 m et 0,50 dB à 100 m. Le scénario le plus élevé, 0,010 dB/m, conduit respectivement à environ 0,40 dB, 0,80 dB et 1,00 dB aux mêmes distances. Cette analyse montre que l'absorption atmosphérique apporte une atténuation supplémentaire relativement faible sur les distances étudiées, comparativement à l'effet de la divergence géométrique représentée par le coefficient k_d . Même dans le scénario le plus défavorable, l'atténuation ne dépasse qu'environ 1 dB à 100 m. Dans le contexte de l'Hôpital Befelatanana, la distance à la voie et le débit de circulation demeurent donc les facteurs dominants de l'exposition acoustique, tandis que l'effet atmosphérique joue un rôle complémentaire.

3.3 4- Synthèse intégrée des déterminants du confort thermo-acoustique durable et des stratégies constructives face au bruit routier : cas de l'Hôpital Befelatanana

La Figure ci-dessous présente une synthèse des principaux mécanismes influençant le confort acoustique et thermique de l'Hôpital Befelatanana dans un contexte urbain exposé au bruit routier. Elle met en relation les caractéristiques du trafic, la propagation sonore avec la distance, les dispositions constructives de protection et le choix des matériaux d'enveloppe. La lecture conjointe des quatre représentations permet ainsi d'apprécier les effets respectifs du débit routier, du recul, des écrans bâtis et des performances thermo-acoustiques des isolants dans une perspective de conception hospitalière durable.

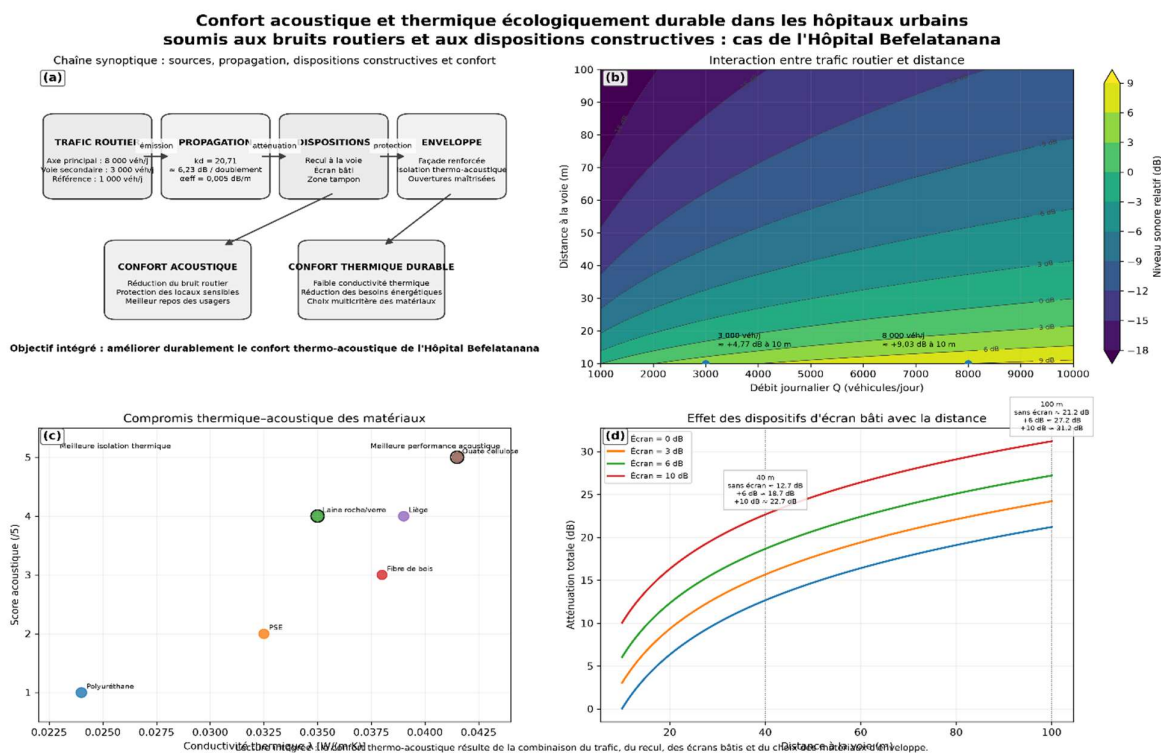


Figure 4: Synthèse intégrée des déterminants du confort thermo-acoustique durable et des stratégies constructives face au bruit routier : cas de l'Hôpital Befelatanana

Source : Auteur

Interprétation

Le schéma synoptique présenté en (a) montre que la maîtrise du confort intérieur repose sur une chaîne d'actions successives allant de la source sonore jusqu'à l'enveloppe du bâtiment. Le scénario retenu considère un trafic de 8 000 véhicules/jour sur l'axe principal et de 3 000 véhicules/jour sur la voie secondaire, pour un débit de référence fixé à 1 000 véhicules/jour. La propagation est représentée par un coefficient de décroissance acoustique de 20,71, correspondant à une atténuation moyenne d'environ 6,23 dB à chaque doublement de distance. Une atténuation atmosphérique effective de 0,005 dB/m complète cette décroissance. La réduction de l'exposition ne dépend toutefois pas uniquement de la propagation naturelle : elle repose également sur le recul du bâtiment, la présence d'un écran bâti, l'aménagement de zones tampons et l'amélioration des performances de la façade. Cette organisation conduit simultanément à une amélioration du confort acoustique des locaux sensibles et à une meilleure maîtrise thermique de l'enveloppe. La représentation trafic-distance en (b) confirme l'effet antagoniste du débit de circulation et de l'éloignement. À une distance de 10 m, le passage du débit de référence de 1 000 véhicules/jour à 3 000 véhicules/jour entraîne une augmentation d'environ +4,77 dB, tandis qu'un trafic de 8 000 véhicules/jour provoque une hausse d'environ +9,03 dB. Pour 10 000 véhicules/jour, cette augmentation approche +10 dB. Inversement, lorsque la distance augmente, les isocontours se déplacent vers des niveaux relatifs progressivement négatifs. Pour les trafics élevés, une diminution proche de -6 dB nécessite des distances de plusieurs dizaines de mètres, de l'ordre de 50 à 60 m, tandis qu'une réduction voisine de -9 dB n'est atteinte qu'à des distances proches de 75 à 80 m. Ces résultats montrent qu'une voie fortement circulée impose un recul nettement plus important pour obtenir un niveau acoustique comparable à celui d'une voie moins fréquentée. Le diagramme thermo-acoustique des matériaux présenté en (c) met en évidence l'absence de matériau dominant simultanément sur les deux critères. Le polyuréthane, avec une conductivité thermique voisine de 0,024 W/m·K, présente la meilleure performance thermique du groupe étudié, mais son score acoustique reste limité à 1/5. Le polystyrène expansé, autour de 0,032–0,033 W/m·K, conserve une bonne performance thermique mais n'obtient qu'un score acoustique de 2/5. La laine de roche/verre, caractérisée par une conductivité proche de 0,035 W/m·K et un score acoustique de 4/5, se situe dans une zone de compromis particulièrement favorable. La fibre de bois, avec environ 0,038 W/m·K, atteint 3/5 en acoustique, tandis que le liège, proche de 0,039 W/m·K, obtient 4/5. Enfin, la ouate de cellulose, malgré une conductivité plus élevée de l'ordre de 0,041 W/m·K, présente le meilleur score acoustique avec 5/5. Cette répartition confirme que le choix d'un isolant destiné à un bâtiment hospitalier doit reposer sur une optimisation multicritère plutôt que sur la seule conductivité thermique. Les courbes de la partie (d) montrent l'effet complémentaire des dispositifs d'écran bâti sur l'atténuation globale. Sans écran, l'atténuation obtenue à 40 m est d'environ 12,7 dB et atteint près de 21,2 dB à 100 m. Un écran offrant un gain de 3 dB porte ces valeurs à environ 15,7 dB à 40 m et 24,2 dB à 100 m. Avec un gain de 6 dB, l'atténuation totale atteint près de 18,7 dB à 40 m et 27,2 dB à 100 m, tandis qu'un écran de 10 dB permet d'obtenir approximativement 22,7 dB à 40 m et 31,2 dB à 100 m. La quasi-parallélité des courbes traduit le caractère additif de l'efficacité de l'écran dans le modèle considéré, alors que la croissance logarithmique de l'atténuation avec la distance demeure assurée par le coefficient de décroissance acoustique. La figure met ainsi en évidence que l'amélioration du confort thermo-acoustique de l'Hôpital Befelatanana ne peut reposer sur une action unique. Une augmentation du recul par rapport aux voies réduit sensiblement le bruit, mais cette solution devient rapidement contraignante dans un tissu urbain dense lorsque le trafic atteint plusieurs milliers de véhicules par jour. Les écrans bâtis permettent alors d'apporter un gain supplémentaire de 3 à 10 dB, tandis que le renforcement de l'enveloppe complète la protection au niveau des espaces de soins. Sur le plan thermique, le choix d'isolants à faible conductivité permet parallèlement de réduire les transferts de chaleur et les besoins énergétiques du bâtiment. La combinaison du recul, de la protection par écran, de l'organisation des zones tampons et d'un choix multicritère des matériaux apparaît donc comme la stratégie la plus cohérente pour concilier réduction du bruit routier, performance thermique et durabilité des dispositions constructives dans le cas de l'Hôpital Befelatanana.

4. DISCUSSION

Les résultats montrent que le confort acoustique de l'Hôpital Befelatanana est principalement déterminé par l'intensité du trafic routier et la distance séparant le bâtiment des voies de circulation. L'augmentation du débit de 1 000 à 8 000 véhicules/jour entraîne une hausse d'environ 9,03 dB, confirmant l'influence importante de la source routière. À l'inverse, l'éloignement permet une réduction progressive du niveau sonore, fortement dépendante du coefficient de décroissance acoustique kd . La valeur

calibrée de 20,71, correspondant à environ 6,23 dB d'atténuation par doublement de distance, fournit une représentation intermédiaire cohérente de la propagation observée. L'atténuation atmosphérique apparaît toutefois relativement faible sur les distances étudiées. Avec $\alpha_{eff} = 0,005$ dB/m, elle ne représente qu'environ 0,50 dB à 100 m, ce qui confirme son rôle secondaire par rapport à la distance et au trafic. Dans un contexte urbain dense où l'augmentation du recul peut être limitée, les écrans bâtis constituent donc une solution complémentaire efficace, avec des gains pouvant atteindre 3 à 10 dB. Enfin, l'analyse des matériaux montre que la performance thermo-acoustique ne peut être fondée sur un seul critère. La laine de roche ou de verre présente notamment un compromis intéressant entre faible conductivité thermique et bonne performance acoustique. Ainsi, l'amélioration durable du confort de l'Hôpital Befelatanana nécessite une stratégie intégrée associant maîtrise de l'exposition au trafic, recul, écrans, zones tampons et renforcement thermo-acoustique de l'enveloppe.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence les principaux paramètres qui gouvernent l'exposition au bruit routier et le confort thermo-acoustique de l'Hôpital Befelatanana. Les résultats montrent que le débit de circulation et la distance à la voie constituent les facteurs les plus influents, avec une augmentation pouvant atteindre +9,03 dB pour un trafic de 8 000 véhicules/jour par rapport à la référence de 1 000 véhicules/jour. Le coefficient de décroissance acoustique calibré à $k_d = 20,71$ traduit une atténuation moyenne d'environ 6,23 dB par doublement de distance, tandis que l'atténuation atmosphérique reste limitée à environ 0,50 dB à 100 m pour $\alpha_{eff} = 0,005$ dB/m. Dans les situations où le recul du bâtiment ne peut être suffisamment augmenté, l'utilisation d'écrans bâtis offre un gain complémentaire pouvant atteindre 3 à 10 dB. Par ailleurs, l'analyse des matériaux confirme que le choix de l'enveloppe doit intégrer simultanément les performances thermiques et acoustiques. Ainsi, l'amélioration durable du confort de l'Hôpital Befelatanana repose sur une approche combinée associant éloignement des sources routières, écrans acoustiques, zones tampons et enveloppe performante. Cette stratégie permet de réduire l'exposition sonore tout en améliorant l'efficacité thermique et la qualité environnementale des espaces hospitaliers.

Référence

- [1] World Health Organization, Environmental Noise Guidelines for the European Region, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, 2018.
- [2] Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S. & Stansfeld, S., "Auditory and non-auditory effects of noise on health," *The Lancet*, 383(9925), 1325–1332, 2014.
- [3] Busch-Vishniac, I. J., West, J. E., Barnhill, C., Hunter, T., Orellana, D. & Chivukula, R., "Noise levels in Johns Hopkins Hospital," *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(6), 3629–3645, 2005.
- [4] de Lima Andrade, E., da Cunha e Silva, D. C., de Lima, E. A., de Oliveira, R. A., Zannin, P. H. T. & Martins, A. C. G., "Environmental noise in hospitals: a systematic review," *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 19629–19642, 2021.
- [5] International Organization for Standardization, ISO 9613-1:1993 — Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, ISO, Geneva, 1993.
- [6] International Organization for Standardization, ISO 9613-2:2024 — Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors, ISO, Geneva, 2024.
- [7] Yuan, F., Yao, R., Sadrizadeh, S. & Li, B., "Thermal comfort in hospital buildings: A literature review," *Journal of Building Engineering*, 45, 103463, 2022.
- [8] International Electrotechnical Commission, IEC 61672-1:2013 — Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications, IEC, Geneva, 2013.
- [9] International Organization for Standardization, ISO 1996-2:2017 — Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels, ISO, Geneva, 2017.

-
- [10] Kephelopoulos, S., Paviotti, M. & Anfosso-Lédée, F., Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), EUR 25379 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012.
 - [11] International Organization for Standardization, ISO 9613-2:2024 — Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors, ISO, Geneva, 2024.
 - [12] International Organization for Standardization, ISO 9613-1:1993 — Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, ISO, Geneva, 1993.
 - [13] International Organization for Standardization, ISO 12354-3:2017 — Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound, ISO, Geneva, 2017.
 - [14] 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, ISO, Geneva, 2007.