

Modélisation Thermo-Acoustique Et Optimisation Multiobjectif Robuste Des Murs Végétalisés Par Différences Finies Et Apprentissage Automatique

RAJAONARISON Lalaina Dina^{1,1}, RAJAONARISON Eddie Frank^{1,2}, RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa^{1,3}, TOVONIRINA Mamiharizo Jackie^{1,4}

^{1,2,3,4}Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences - Université d'Antananarivo

Auteur correspondant: RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa, andriatianatolo@gmail.com



Résumé: Les murs végétalisés constituent une solution passive susceptible d'améliorer simultanément le confort thermique des bâtiments et l'atténuation acoustique en milieu urbain. Cette étude vise à modéliser leur comportement thermo-acoustique, à comparer plusieurs modèles substitutifs et à identifier des configurations robustes conciliant réduction du flux thermique et amélioration de l'absorption sonore. Le transfert de chaleur unidimensionnel a été résolu par différences finies selon le schéma de Crank-Nicolson, tandis que la réponse acoustique du milieu poreux a été décrite à partir de l'impédance, de la résistivité à l'écoulement et de l'épaisseur. L'augmentation de l'épaisseur végétale de 2 à 15 cm réduit le facteur d'amortissement thermique d'environ 0,285 à 0,075, soit une diminution proche de 74 %. Les coefficients d'absorption dépassent 0,80 aux hautes fréquences pour des épaisseurs de 12 à 16 cm. Parmi les modèles évalués, le Gradient Boosting offre le meilleur compromis global, avec un R^2 moyen d'environ 0,981 et une NRMSE moyenne de 0,032. L'optimisation multiobjectif identifie des solutions robustes présentant des scores de désirabilité compris entre 0,846 et 0,906, principalement pour des épaisseurs de 12 à 14 cm et des taux de couverture supérieurs à 0,93.

Mots-clés : murs végétalisés ; transfert thermique ; absorption acoustique ; apprentissage automatique ; optimisation multiobjectif.

Abstract: Green walls are passive systems that can simultaneously improve building thermal comfort and reduce environmental noise in urban areas. This study aims to model their coupled thermo-acoustic behaviour, compare several surrogate modelling approaches, and identify robust configurations that balance heat-flux reduction with enhanced sound absorption. One-dimensional heat transfer was solved using the finite-difference method with a Crank–Nicolson scheme, whereas the acoustic response of the porous layer was described from its impedance, airflow resistivity, porosity, and thickness. Increasing the vegetated-layer thickness from 2 to 15 cm reduced the thermal damping factor from approximately 0.285 to 0.075, corresponding to a decrease of nearly 74%. Sound absorption coefficients exceeded 0.80 at high frequencies for thicknesses between 12 and 16 cm. Among the machine-learning models evaluated, Gradient Boosting provided the best overall compromise, with a mean R^2 of about 0.981 and a mean NRMSE of 0.032. Multiobjective optimisation identified robust solutions with desirability scores ranging from 0.846 to 0.906, mainly associated with thicknesses of 12–14 cm and vegetation coverage ratios above 0.93. These findings demonstrate the value of combining numerical modelling, surrogate learning, and robust optimisation for designing high-performance green walls.

Keywords: green walls; heat transfer; sound absorption; machine learning; multiobjective optimisation.

1. INTRODUCTION

L'urbanisation rapide, l'augmentation des besoins de refroidissement des bâtiments et l'exposition croissante des populations au bruit environnemental renforcent la nécessité de développer des enveloppes constructives capables d'assurer plusieurs fonctions simultanément. Dans ce contexte, les murs végétalisés constituent une solution fondée sur la nature susceptible de contribuer à la

régulation thermique, à l'amélioration du confort acoustique et à la réduction de l'empreinte environnementale des bâtiments. Leur fonctionnement repose sur plusieurs mécanismes complémentaires, notamment l'ombrage de la façade, l'évapotranspiration, l'augmentation de la résistance thermique, la création d'une lame d'air et la modification des échanges convectifs à proximité de la paroi. Les performances obtenues dépendent toutefois du climat, des espèces végétales, de la configuration constructive, des propriétés du substrat et des conditions d'exploitation [1]. Sur le plan thermique, les systèmes végétalisés verticaux peuvent réduire les températures superficielles, atténuer l'amplitude des sollicitations extérieures et retarder leur transmission vers l'ambiance intérieure. Les murs végétalisés comportant un substrat continu ou modulaire présentent généralement une inertie et une résistance thermique plus élevées que les façades végétalisées reposant principalement sur des plantes grimpantes. Leur efficacité varie néanmoins selon l'orientation, le rayonnement solaire, la disponibilité en eau et l'épaisseur des différentes couches. Des essais réalisés à l'échelle du bâtiment ont montré que les murs végétalisés pouvaient améliorer les performances en période de chauffage comme de refroidissement, avec une relation importante entre le rayonnement reçu et les économies d'énergie obtenues [2]. Ces observations soulignent l'intérêt d'étudier non seulement la température maximale, mais également le facteur d'amortissement, le déphasage de l'onde thermique, la profondeur de pénétration de la perturbation et les flux transmis à travers les interfaces. Les murs végétalisés peuvent également participer à l'atténuation du bruit grâce à l'absorption, à la réflexion multiple et à la diffusion des ondes sonores par le feuillage, le substrat, les cavités d'air et les éléments structuraux. Leurs propriétés acoustiques sont fortement dépendantes de la fréquence ainsi que de paramètres tels que l'épaisseur poreuse, la porosité, la couverture végétale et la résistivité au passage de l'air. Des mesures en laboratoire ont notamment mis en évidence un indice d'affaiblissement acoustique pondéré d'environ 15 dB et un coefficient d'absorption pondéré proche de 0,40 pour certains systèmes végétalisés [3]. Une analyse fréquentielle est donc indispensable, car une configuration efficace dans les hautes fréquences peut demeurer peu performante dans les basses fréquences. La détermination de cartes fréquence-épaisseur et fréquence-résistivité permet alors d'identifier les domaines de conception favorables et d'éviter une évaluation limitée à une valeur acoustique moyenne. La représentation simultanée des phénomènes thermiques et acoustiques nécessite des modèles capables de prendre en compte les conditions aux limites, la discontinuité des propriétés entre couches et le caractère transitoire des sollicitations. Pour le transfert thermique, la méthode des différences finies constitue une approche adaptée à la discrétisation de l'équation de la chaleur dans les parois multicouches. Le schéma implicite de Crank-Nicolson, fondé sur une approximation centrée entre deux niveaux temporels, permet de combiner stabilité numérique et précision temporelle pour l'étude de la conduction non stationnaire [4]. Son utilisation doit néanmoins être accompagnée d'une vérification de la convergence spatiale et temporelle, de la continuité du flux aux interfaces et de la fermeture du bilan énergétique. Ces diagnostics sont essentiels pour distinguer les variations physiques du système des erreurs produites par le maillage ou par le choix du pas de temps. Bien que les simulations physiques apportent une description détaillée des phénomènes, leur répétition sur un vaste domaine paramétrique peut devenir coûteuse, notamment lorsqu'il faut explorer simultanément plusieurs épaisseurs, conductivités, porosités, résistivités et taux de couverture. Les modèles d'apprentissage automatique peuvent servir de modèles substitutifs en apprenant les relations entre les paramètres de conception et les réponses thermo-acoustiques obtenues par simulation. Parmi ces approches, le Gradient Boosting construit progressivement un ensemble de prédicteurs élémentaires afin de réduire les résidus d'apprentissage dans l'espace fonctionnel [5]. Sa comparaison avec des réseaux de neurones multicouches, des forêts aléatoires et des arbres extrêmement randomisés permet d'évaluer non seulement la précision prédictive, mais aussi la restitution de la variabilité, la stabilité entre les différentes sorties et le coût d'inférence. L'intégration de modèles substitutifs dans une procédure d'optimisation permet d'explorer un nombre beaucoup plus élevé de configurations que ne le permettrait l'utilisation exclusive du modèle physique. Dans le domaine de la performance des bâtiments, cette approche a montré qu'un modèle d'apprentissage automatique pouvait reproduire les résultats de simulations complexes tout en réduisant fortement le temps nécessaire à l'évaluation des solutions. Des travaux antérieurs ont rapporté des temps d'exécution jusqu'à 100 fois plus courts dans des processus d'optimisation de bâtiments, tout en maintenant des performances proches de celles du modèle de simulation initial [6]. Cette accélération est particulièrement importante lorsque les objectifs étudiés sont antagonistes, comme la minimisation du flux thermique et la maximisation de l'absorption acoustique. Dans un problème multiobjectif, il n'existe généralement pas une solution unique optimisant simultanément toutes les réponses, mais un ensemble de solutions non dominées constituant le front de Pareto. Le principe de classement par non-dominance permet de sélectionner les configurations pour lesquelles aucune performance ne peut être améliorée sans dégrader au moins un autre objectif [7]. Une conception performante dans les conditions

nominales peut néanmoins devenir moins efficace lorsque les propriétés des matériaux, la couverture végétale ou les sollicitations environnementales varient. L'évaluation de la robustesse doit par conséquent compléter le classement nominal en mesurant la stabilité des performances sous perturbations paramétriques. La présente étude propose ainsi un cadre intégré de modélisation thermo-acoustique et d'optimisation multiobjectif robuste des murs végétalisés par différences finies et apprentissage automatique. Le transfert thermique unidimensionnel est résolu par le schéma de Crank–Nicolson, tandis que le comportement acoustique est caractérisé à partir de l'impédance complexe, de l'absorption, de la résistivité au passage de l'air et de l'épaisseur poreuse. Plusieurs modèles substitutifs sont ensuite comparés selon leurs erreurs, leur capacité à reproduire la variabilité des sorties et leur coût d'inférence. Enfin, une analyse de sensibilité, une recherche de solutions de Pareto et une évaluation de robustesse sont mises en œuvre afin d'identifier les configurations conciliant faible transfert thermique, absorption acoustique élevée et stabilité face aux incertitudes de conception.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

La modélisation thermo-acoustique et l'analyse multiobjectif ont été réalisées dans un environnement Python 3. Les opérations matricielles, les calculs vectorisés et la manipulation des tableaux multidimensionnels ont été assurés par NumPy [8]. Les résultats issus des simulations, des modèles substitutifs et des analyses de sensibilité ont été structurés et exportés avec pandas [9]. Les graphiques scientifiques ont été produits avec Matplotlib sous la forme de planches A4 en orientation paysage, chaque planche regroupant quatre représentations disposées deux par deux [10]. Les traitements statistiques complémentaires ont mobilisé SciPy, tandis que la construction, l'entraînement et la comparaison des modèles d'apprentissage automatique ont été effectués avec scikit-learn [11].

Le système physique étudié a été représenté par un mur bicouche composé d'une couche végétalisée poreuse et d'une paroi minérale. Dans la configuration de référence, la couche végétalisée présentait une épaisseur de 8 cm, une conductivité thermique de $0,35 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, une masse volumique de $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et une capacité thermique massique de $1\,400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. La couche minérale avait une épaisseur de 15 cm, une conductivité thermique de $1,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, une masse volumique de $2\,300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et une capacité thermique massique de $880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Des épaisseurs végétales comprises entre 2 et 15 cm ont également été étudiées afin d'évaluer leur influence sur l'amortissement et le déphasage de l'onde thermique.

Le transfert thermique a été considéré comme unidimensionnel et transitoire. La paroi a été discrétisée en 121 nœuds répartis uniformément sur son épaisseur totale. L'évolution temporelle a été simulée pendant 24 h avec un pas de 300 s. La température initiale de l'ensemble du mur et la température de l'air intérieur ont été fixées à 24°C . La sollicitation extérieure a été représentée par un cycle journalier dont la température moyenne était de 33°C , l'amplitude de 8°C et le maximum situé à 15 h. Les coefficients de convection extérieur et intérieur ont été respectivement fixés à 18 et $8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

La résolution temporelle a reposé sur le schéma implicite de Crank–Nicolson. Une discrétisation conservatrice a été utilisée afin de représenter les échanges de chaleur entre les nœuds et de préserver le bilan énergétique. À l'interface entre la couche végétalisée et le mur minéral, la conductivité équivalente a été déterminée à partir de la moyenne harmonique des conductivités adjacentes. Cette procédure garantit une représentation cohérente du changement de matériau et limite les discontinuités numériques du flux thermique. À chaque pas de temps, le système linéaire creux obtenu a été résolu avec les outils de calcul scientifique de SciPy.

La qualité numérique de la résolution thermique a été contrôlée selon plusieurs critères. La convergence spatiale a été évaluée à l'aide de maillages comprenant entre 31 et 241 nœuds. La sensibilité temporelle a été examinée pour des pas compris entre 120 et 1 800 s. Les températures calculées à la face intérieure ont été comparées à une solution numérique de référence obtenue avec un maillage plus fin et un pas temporel réduit. La continuité du flux a été vérifiée de part et d'autre de l'interface, tandis que la conservation globale de l'énergie a été évaluée en comparant l'énergie stockée dans la paroi au flux net intégré au cours du temps.

La réponse thermique dynamique a été caractérisée par la température maximale de la face intérieure, le flux thermique de pic, le facteur d'amortissement, le déphasage journalier et la profondeur de pénétration de la perturbation. Le facteur d'amortissement a été obtenu en comparant les amplitudes fondamentales des températures extérieure et intérieure. Le déphasage a été estimé à partir de la différence entre les phases des deux signaux journaliers. La profondeur de pénétration correspondait à la position

maximale atteinte par une perturbation représentant respectivement 25, 50 et 75 % de la variation observée à la surface extérieure. Des boucles d'hystérésis température-flux ont également été tracées afin d'illustrer l'inertie et le stockage thermique de la paroi.

La caractérisation acoustique a été réalisée dans une bande fréquentielle comprise entre 80 et 5 000 Hz, discrétisée selon une échelle logarithmique. L'air a été défini par une masse volumique de $1,21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et une célérité du son de $343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le milieu végétalisé poreux était caractérisé par une porosité de référence de 0,78, une résistivité au passage de l'air de $25\,000 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, un facteur de tortuosité de 1,35, une épaisseur de 8 cm et un taux de couverture de 0,85.

L'impédance acoustique caractéristique du matériau a été estimée avec le modèle empirique de Delany et Bazley, qui relie les propriétés acoustiques des matériaux fibreux à la fréquence et à leur résistance au passage de l'air [12]. La propagation dans la couche poreuse a ensuite été décrite par un nombre d'onde complexe, une densité équivalente et une impédance d'entrée. Le matériau a été supposé adossé à une paroi rigide. Le coefficient de réflexion, le coefficient d'absorption et la perte d'insertion ont été calculés pour chaque fréquence. Les résultats ont également été regroupés selon des bandes de tiers d'octave afin de faciliter leur interprétation acoustique. L'analyse paramétrique acoustique a porté sur des épaisseurs poreuses comprises entre 2 et 16 cm et des résistivités comprises entre 5 000 et 80 000 $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$. Des cartes fréquence-épaisseur et fréquence-résistivité ont été construites afin d'identifier les domaines associés aux coefficients d'absorption les plus élevés. Pour chaque fréquence, la résistivité produisant l'absorption maximale a été retenue comme valeur optimale. La fréquence correspondant au maximum d'absorption a également été déterminée pour chaque épaisseur et comparée à la fréquence caractéristique théorique associée à une résonance de quart d'onde. Une campagne paramétrique de 720 configurations a été générée par échantillonnage Latin Hypercube. Cette méthode a été retenue pour répartir efficacement les simulations dans l'ensemble du domaine de conception et éviter une concentration excessive des points dans certaines régions [13]. Les variables d'entrée comprenaient l'épaisseur végétale, la conductivité thermique, la porosité, la résistivité au passage de l'air, le taux de couverture, le coefficient de convection extérieure et la température extérieure maximale. Les intervalles explorés étaient respectivement de 2 à 15 cm, de 0,15 à 0,70 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, de 0,40 à 0,95, de 5 000 à 80 000 $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, de 0,35 à 1,00, de 5 à 28 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et de 30 à 45 °C. Quatre variables de sortie ont été retenues : le flux thermique maximal, la température maximale de la face intérieure, l'absorption acoustique moyenne entre 250 et 2 000 Hz et la perte d'insertion moyenne dans la même bande. Les données ont été réparties aléatoirement entre un ensemble d'apprentissage représentant 78 % des configurations et un ensemble de test indépendant représentant 22 %. La même partition a été conservée pour tous les modèles afin de garantir une comparaison équitable. Quatre modèles substitutifs ont été évalués. Le perceptron multicouche comprenait trois couches cachées de 96, 48 et 24 neurones, associées à une fonction d'activation rectifiée linéaire. L'apprentissage utilisait l'optimiseur Adam, un taux d'apprentissage initial de 0,0008, une régularisation de 0,0003 et un maximum de 1 400 itérations. Un arrêt anticipé était appliqué lorsqu'aucune amélioration n'était observée sur l'ensemble de validation interne. Les variables d'entrée étaient centrées et réduites avant l'apprentissage du réseau. Le modèle Random Forest comportait 350 arbres, avec au moins deux observations dans chaque feuille et 90 % des variables disponibles à chaque division. Le modèle Extra Trees utilisait également 350 arbres, avec une observation minimale par feuille et l'ensemble des variables disponibles. Le Gradient Boosting était constitué de 260 estimateurs par variable de sortie, avec un taux d'apprentissage de 0,035, une profondeur maximale de trois niveaux et une fonction de perte robuste de type Huber. Un modèle indépendant était ajusté pour chacune des quatre sorties. La parallélisation de cette étape a été désactivée afin d'éviter une duplication excessive de la mémoire lors de l'exécution sous Windows. Les modèles ont été comparés à partir du coefficient de détermination, de l'erreur quadratique moyenne, de sa racine carrée, de l'erreur absolue moyenne et de l'erreur quadratique normalisée. La corrélation entre les observations et les prévisions, le rapport entre leurs écarts-types, le temps d'apprentissage et le temps d'inférence par échantillon ont également été calculés. Le modèle présentant l'erreur normalisée moyenne la plus faible sur les quatre sorties a été retenu pour les analyses d'interprétabilité et d'optimisation. La sensibilité globale a été étudiée par importance des variables par permutation et par coefficients de corrélation partielle sur les rangs. L'importance par permutation mesure la dégradation de la performance lorsqu'une variable est réorganisée aléatoirement. L'analyse PRCC a été employée pour isoler la relation monotone entre chaque entrée et chaque sortie après retrait de l'influence linéaire des autres paramètres. Cette méthode est adaptée à l'analyse globale de modèles comportant plusieurs facteurs incertains et interdépendants [14]. Des courbes de dépendance partielle et des surfaces de réponse ont ensuite été produites pour visualiser l'effet de l'épaisseur et de la porosité sur les réponses thermo-acoustiques. L'incertitude prédictive a été estimée à partir d'un

ensemble bootstrap de 16 modèles Extra Trees. Pour chaque modèle, l'ensemble d'apprentissage a été rééchantillonné avec remise, puis une forêt de 90 arbres a été ajustée. Les distributions de prévisions obtenues ont permis de construire des intervalles correspondant à des niveaux nominaux compris entre 50 et 95 %. Leur qualité a été évaluée à partir de la couverture empirique, de la largeur moyenne, de la distribution des résidus standardisés et de la relation entre largeur d'intervalle et erreur absolue. Le bootstrap permet d'estimer la variabilité d'un indicateur ou d'une prévision par rééchantillonnage répété des données disponibles [15]. L'optimisation multiobjectif visait simultanément à minimiser le flux thermique de pic et la température intérieure, tout en maximisant l'absorption acoustique et la perte d'insertion. Chaque objectif a été normalisé entre zéro et un, puis les quatre performances ont été agrégées dans un indice global de désirabilité. Les configurations non dominées ont été identifiées afin de construire le front de Pareto. Les dix solutions présentant les meilleurs scores ont été retenues pour l'analyse de robustesse. La robustesse de chaque solution sélectionnée a été évaluée par 120 perturbations aléatoires. L'épaisseur et la conductivité variaient avec un écart-type relatif de 5 %, la porosité avec un écart-type absolu de 0,025, la résistivité avec une dispersion logarithmique de 0,08, le taux de couverture avec un écart-type de 0,03, le coefficient de convection avec une variation relative de 4 % et la température extérieure avec un écart-type de 0,7 °C. Pour chaque conception, le score nominal, la performance robuste moyenne, l'écart-type et le cinquième percentile ont été calculés. Le classement final privilégiait ainsi les configurations associant une performance thermo-acoustique élevée à une faible sensibilité aux incertitudes de conception.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Influence de l'épaisseur végétale sur l'amortissement, le déphasage et la propagation de l'onde thermique dans un mur bicouche

La figure ci-après présente la réponse dynamique du système végétalisé soumis à une sollicitation thermique journalière. Elle met en relation l'épaisseur de la couche végétale avec le facteur d'amortissement et le déphasage de l'onde thermique, puis décrit la progression de la perturbation dans l'épaisseur du mur et les relations cycliques entre température et flux thermique aux faces extérieure et intérieure. Ces indicateurs permettent d'évaluer simultanément la réduction des fluctuations thermiques, la vitesse de propagation de la chaleur et la capacité du système à limiter les transferts vers l'ambiance intérieure.

Planche 1 - Analyse dynamique avancée du transfert thermique

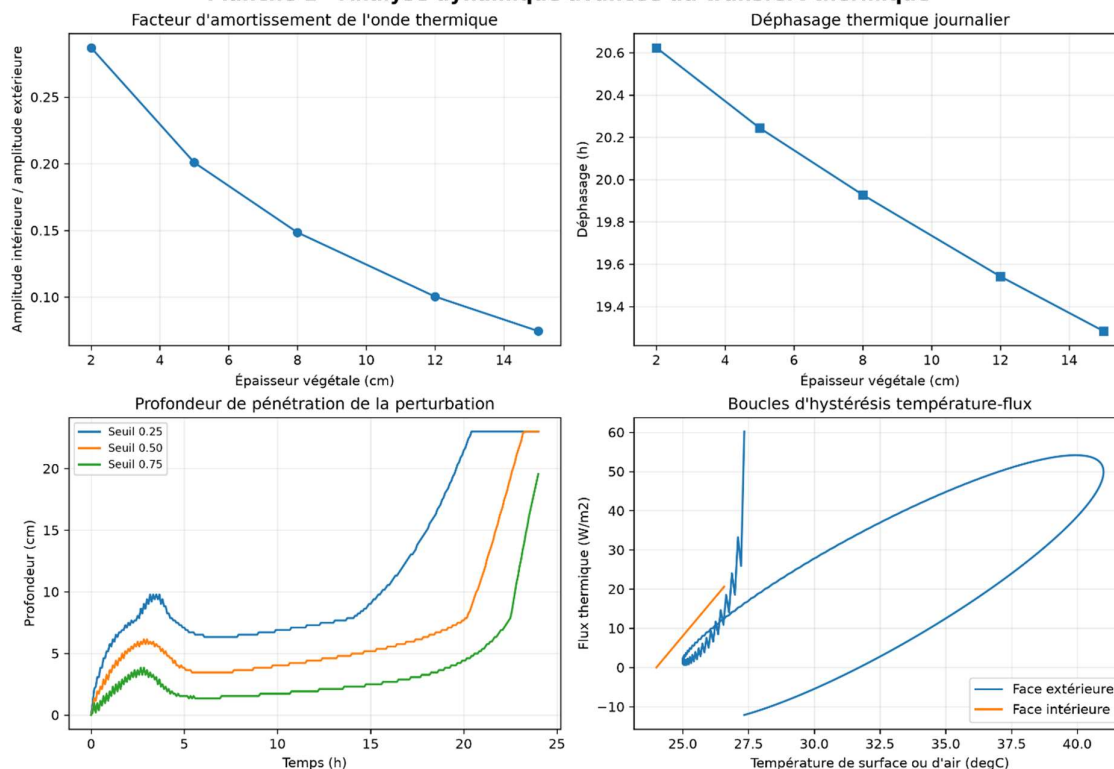


Figure 1: Influence de l'épaisseur végétale sur l'amortissement, le déphasage et la propagation de l'onde thermique dans un mur bicouche

Source : Auteur

Interprétation

L'augmentation de l'épaisseur végétale entraîne une diminution marquée du facteur d'amortissement. Celui-ci passe d'environ 0,285 pour une épaisseur de 2 cm à 0,200 à 5 cm, 0,148 à 8 cm, 0,100 à 12 cm et 0,075 à 15 cm. Ainsi, le passage de 2 à 15 cm réduit d'environ 74 % l'amplitude thermique transmise vers la face intérieure. La diminution devient toutefois moins prononcée au-delà de 8 à 12 cm, ce qui suggère l'apparition de rendements thermiques décroissants pour les épaisseurs les plus élevées. Le déphasage extrait du cycle journalier varie parallèlement d'environ 20,6 h à 2 cm à 19,3 h à 15 cm, soit un déplacement de phase proche de 1,3 h. Cette valeur étant exprimée sur une période de 24 h, elle doit être interprétée comme une position de phase cyclique plutôt que comme un temps de traversée direct. Combinée à la forte réduction d'amplitude, elle indique que l'épaisseur végétale modifie sensiblement la réponse temporelle du mur et retarde l'apparition du signal thermique intérieur par rapport à la sollicitation extérieure. L'analyse de la profondeur de pénétration montre que la perturbation reste initialement concentrée dans les premières couches du système. Durant les premières heures, les profondeurs maximales atteignent approximativement 9,5 cm pour le seuil relatif de 0,25, 6 cm pour le seuil de 0,50 et 3,5 cm pour le seuil de 0,75. Après une phase de diminution et de stabilisation, la progression reprend à partir d'environ 12 à 15 h. Le seuil de 0,25 atteint la profondeur totale du mur, proche de 23 cm, vers 20 à 21 h, tandis que le seuil de 0,50 l'atteint vers 23 h. Le seuil le plus élevé, égal à 0,75, demeure inférieur à 20 cm à la fin du cycle, confirmant que les variations thermiques les plus intenses pénètrent plus lentement dans la paroi. Les boucles d'hystérésis mettent enfin en évidence une forte dissymétrie entre les deux faces. À l'extérieur, la température varie

approximativement de 27 à 41 °C et le flux principal atteint près de 54 W/m², avec quelques pointes transitoires proches de 60 W/m². À l'intérieur, la plage thermique reste limitée à environ 24–27 °C et le flux demeure généralement inférieur à 20 W/m². La surface beaucoup plus faible de la boucle intérieure traduit une atténuation importante de l'énergie thermique transmise. Dans l'ensemble, ces résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur végétale améliore principalement la protection thermique par réduction de l'amplitude, limitation de la pénétration rapide de la chaleur et diminution du flux atteignant la face intérieure.

3.2 Cartographie paramétrique de l'absorption acoustique et détermination des conditions optimales de conception du milieu poreux végétalisé

La figure ci-après analyse l'influence conjointe de la fréquence, de l'épaisseur de la couche poreuse et de sa résistivité au passage de l'air sur les performances acoustiques du système végétalisé. Les deux cartes présentent l'évolution du coefficient d'absorption, tandis que les graphiques inférieurs identifient la résistivité optimale selon la fréquence et comparent la fréquence caractéristique du modèle poreux à l'approximation théorique du quart d'onde. Cette représentation permet ainsi de repérer les domaines de conception favorables à une atténuation acoustique élevée.

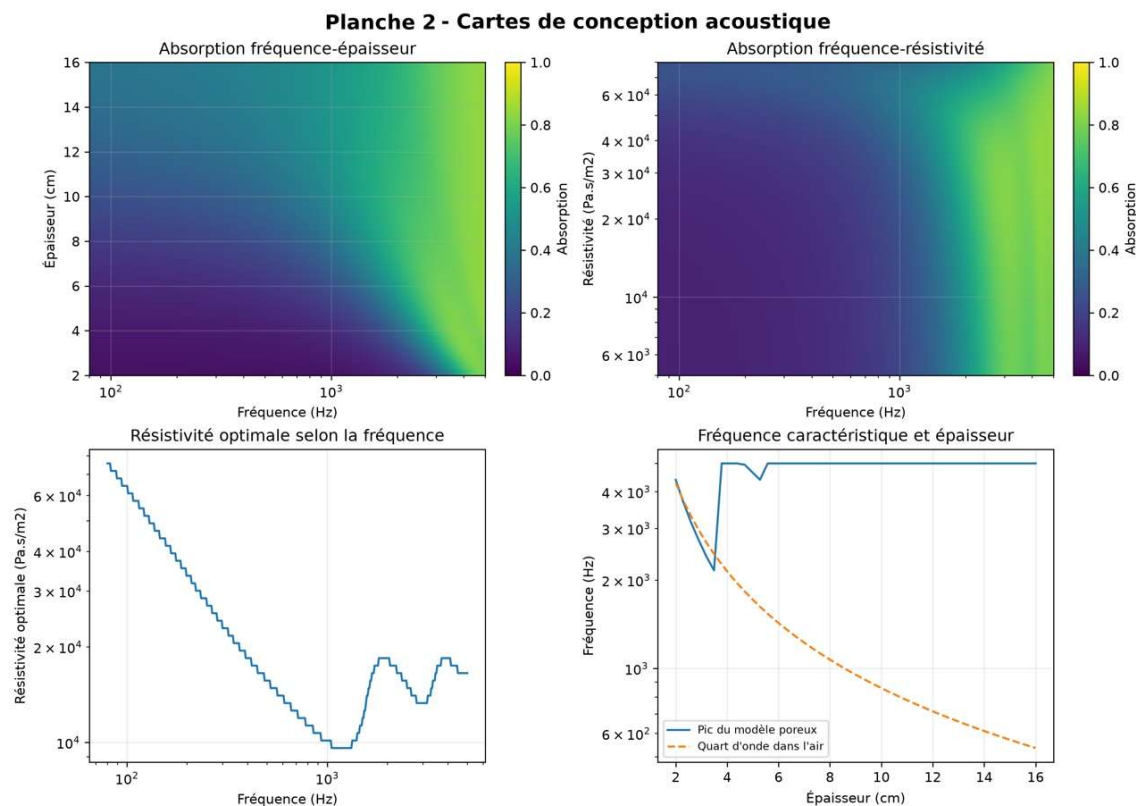


Figure 2: Cartographie paramétrique de l'absorption acoustique et détermination des conditions optimales de conception du milieu poreux végétalisé

Source : Auteur

Interprétation

La carte fréquence–épaisseur montre que l'absorption demeure faible aux basses fréquences, particulièrement en dessous de 300 à 500 Hz, où elle reste généralement inférieure à 0,20, quelle que soit l'épaisseur considérée. L'augmentation de l'épaisseur

améliore progressivement la réponse acoustique, surtout au-delà de 1 000 Hz. Pour une couche de 2 cm, une absorption supérieure à 0,60 n'est obtenue qu'aux fréquences proches de 4 000 à 5 000 Hz. En revanche, pour des épaisseurs comprises entre 12 et 16 cm, le coefficient atteint approximativement 0,50 à 0,60 autour de 1 500 à 2 000 Hz et dépasse 0,80 aux fréquences les plus élevées. L'effet de l'épaisseur apparaît donc principalement dans les moyennes et hautes fréquences, sans amélioration majeure du comportement aux très basses fréquences. La carte fréquence-résistivité indique également une faible absorption en dessous de 500 Hz. À partir d'environ 1 000 Hz, les performances augmentent avec la résistivité, mais cette relation n'est pas strictement monotone. Les coefficients les plus élevés, proches de 0,80 à 0,90, sont obtenus entre environ 2 500 et 5 000 Hz pour des résistivités comprises approximativement entre

$1.5 \cdot 10^4$ et $5 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$. Une résistivité excessivement élevée ne garantit donc pas systématiquement la meilleure absorption, car elle peut limiter la pénétration de l'onde dans le matériau poreux. La résistivité optimale décroît fortement avec la fréquence, passant d'environ $7 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ autour de 80 à 100 Hz à près de $1 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$ vers 1 000 Hz. Au-delà, elle varie entre approximativement $1.0 \cdot 10^4$ et $1.8 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}^2$, avec plusieurs maxima locaux entre 1 500 et 4 000 Hz. Cette évolution met en évidence la nécessité d'adapter les propriétés du substrat à la bande fréquentielle visée plutôt que d'utiliser une valeur unique de résistivité pour l'ensemble du spectre. L'approximation du quart d'onde prévoit une diminution régulière de la fréquence caractéristique, d'environ 4 300 Hz pour une épaisseur de 2 cm à près de 540 Hz pour 16 cm. Le modèle poreux présente cependant une évolution différente : la fréquence du maximum d'absorption diminue jusqu'à environ 2 100 Hz vers 3,5 cm, puis se stabilise principalement autour de 4 500 à 4 700 Hz. Cet écart montre que la réponse acoustique ne dépend pas uniquement de l'épaisseur, mais également de l'impédance complexe, de la résistivité, de la porosité et des conditions de fond rigide. Le plateau proche de la limite supérieure du domaine fréquentiel simulé suggère par ailleurs que certains maxima pourraient se situer au-delà de 5 000 Hz, ce qui justifierait l'extension de la bande de calcul pour confirmer leur position réelle.

3.3 Comparaison des performances prédictives et du coût de calcul de quatre modèles substitutifs thermo-acoustiques

La figure ci-dessous compare quatre approches de modélisation substitutive, à savoir le perceptron multicouche, la forêt aléatoire, les arbres extrêmement randomisés et le Gradient Boosting. L'évaluation porte sur quatre variables de sortie : le flux thermique, la température intérieure, le coefficient d'absorption et la perte d'insertion acoustique. Les coefficients de détermination et les NRMSE renseignent sur la précision de chaque modèle, tandis que le diagramme corrélation-variabilité évalue leur capacité à reproduire la dispersion des données. Le dernier graphique met en relation l'erreur moyenne et le temps d'inférence afin d'identifier le meilleur compromis entre précision et efficacité de calcul.

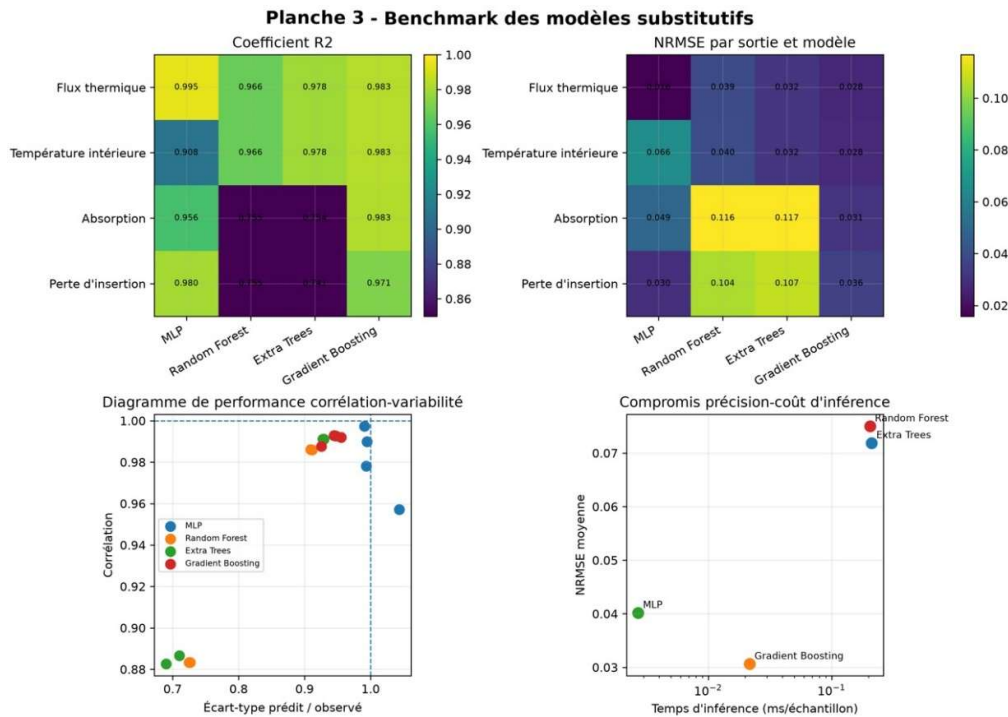


Figure 3: Comparaison des performances prédictives et du coût de calcul de quatre modèles substitutifs thermo-acoustiques

Source : Auteur

Interprétation

Le perceptron multicouche présente la meilleure prévision du flux thermique, avec un coefficient R^2 de 0,995 et une NRMSE de 0,016. Il fournit également de bonnes performances pour la perte d'insertion, avec un R^2 de 0,980 et une NRMSE de 0,030. Sa précision est toutefois moins homogène pour la température intérieure, pour laquelle le R^2 diminue à 0,908 et la NRMSE atteint 0,066. Pour l'absorption acoustique, ses performances restent satisfaisantes, avec un R^2 de 0,956 et une NRMSE de 0,049. Le Gradient Boosting offre les résultats les plus réguliers sur l'ensemble des sorties. Les coefficients R^2 atteignent 0,983 pour le flux thermique, la température intérieure et l'absorption, puis 0,971 pour la perte d'insertion. Les NRMSE correspondantes demeurent faibles, entre 0,028 et 0,036. Sa NRMSE moyenne est ainsi proche de 0,031, contre environ 0,040 pour le MLP, 0,072 pour Extra Trees et 0,075 pour Random Forest. Le Gradient Boosting constitue donc le modèle globalement le plus précis lorsque les performances des quatre variables sont considérées simultanément. Les deux modèles fondés sur les arbres reproduisent correctement les variables thermiques. Random Forest obtient un R^2 de 0,966 pour le flux et la température, tandis qu'Extra Trees atteint 0,978 pour ces deux sorties. Leurs performances diminuent cependant nettement pour les variables acoustiques. Pour l'absorption, les coefficients R^2 sont respectivement de 0,755 et 0,754, avec des NRMSE de 0,116 et 0,117. Pour la perte d'insertion, ils ne dépassent pas 0,755 et 0,741, tandis que les NRMSE atteignent 0,104 et 0,107. Cette dégradation indique que ces modèles représentent moins efficacement les relations acoustiques complexes présentes dans les données. Le diagramme corrélation-variabilité confirme cette hiérarchie. Les points du Gradient Boosting sont regroupés autour de corrélations proches de 0,99 et de rapports d'écart-types compris approximativement entre 0,93 et 0,96, traduisant une bonne reproduction de la variabilité observée. Le MLP présente également des corrélations élevées, généralement comprises entre 0,96 et 1,00, avec des rapports d'écart-types proches de l'unité. À l'inverse, certaines sorties acoustiques des modèles Random Forest et Extra Trees

présentent des corrélations proches de 0,88 et des rapports d'écarts-types d'environ 0,69 à 0,73, ce qui révèle une sous-estimation de leur variabilité.

3.4 Optimisation multiobjectif et évaluation de la robustesse des configurations thermo-acoustiques du système végétalisé

La figure suivante présente la recherche de configurations conciliant la réduction du flux thermique de pic et l'amélioration de l'absorption acoustique. Le front de Pareto permet d'identifier les solutions non dominées, tandis que les coordonnées parallèles décrivent les propriétés physiques des dix meilleurs compromis. La comparaison entre désirabilité nominale et désirabilité robuste évalue ensuite la sensibilité de ces configurations aux variations des paramètres, et le tableau récapitulatif fournit les caractéristiques des solutions les mieux classées.

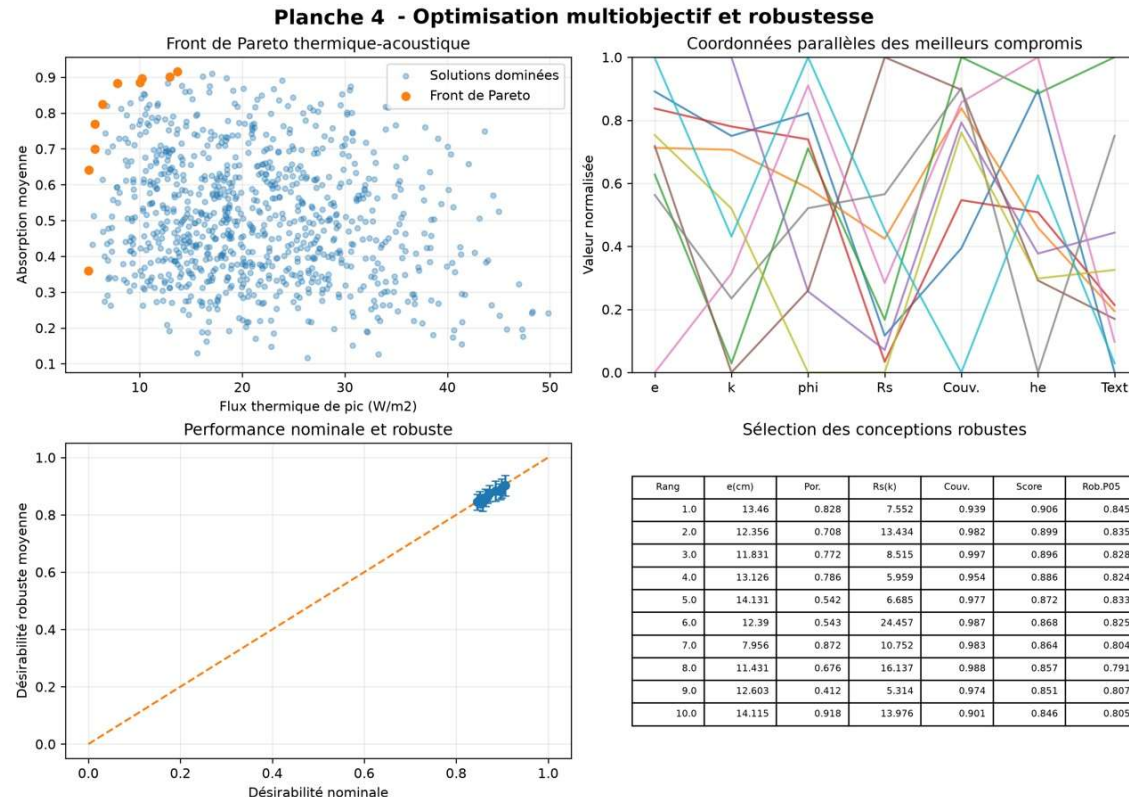


Figure 4: Optimisation multiobjectif et évaluation de la robustesse des configurations thermo-acoustiques du système végétalisé

Source : Auteur

Interprétation

Le front de Pareto montre que l'ensemble des configurations explorées couvre des flux thermiques compris approximativement entre 5 et 50 W/m² et des coefficients d'absorption moyens variant de 0,12 à 0,92. Les solutions non dominées se concentrent principalement entre 5 et 13 W/m². Pour les flux les plus faibles, proches de 5 à 6 W/m², l'absorption reste comprise entre environ 0,36 et 0,70. Une amélioration progressive de l'absorption est ensuite observée lorsque le flux admissible augmente légèrement : elle atteint environ 0,88 pour un flux proche de 8 W/m², puis dépasse 0,90 autour de 11 à 13 W/m². Ces résultats montrent qu'une absorption acoustique élevée peut être obtenue tout en maintenant le flux thermique à un niveau nettement inférieur à celui de

nombreuses solutions dominées. Les coordonnées parallèles indiquent que les meilleurs compromis ne correspondent pas à une combinaison unique de propriétés. Ils sont toutefois généralement associés à des épaisseurs végétales relativement élevées, comprises entre environ 8,0 et 14,1 cm, ainsi qu'à des taux de couverture supérieurs à 0,90. La porosité varie plus largement, de 0,412 à 0,918, tandis que la résistivité au passage de l'air s'étend approximativement de 5,3 à 24,5 kPa·s/m². Cette dispersion confirme que plusieurs associations entre épaisseur, porosité, résistivité et conditions convectives peuvent produire des performances globales comparables. La relation entre performance nominale et performance robuste est proche de la droite d'identité. Les désirabilités nominales des dix meilleures conceptions sont comprises entre 0,846 et 0,906, tandis que leurs performances robustes moyennes restent approximativement comprises entre 0,84 et 0,90. La faible longueur des barres d'erreur traduit une variabilité modérée sous perturbation des paramètres. La première configuration présente le score nominal le plus élevé, égal à 0,906, avec une performance robuste au cinquième percentile de 0,845. Elle combine une épaisseur de 13,46 cm, une porosité de 0,828, une résistivité de 7,552 kPa·s/m² et un taux de couverture de 0,939. La deuxième solution atteint un score de 0,899 et un niveau robuste de 0,835, avec une épaisseur de 12,36 cm et une couverture de 0,982. Les résultats montrent également que le classement nominal ne correspond pas toujours exactement au classement robuste. Par exemple, la cinquième conception présente un score nominal de 0,872, inférieur à ceux des quatre premières, mais son niveau robuste au cinquième percentile atteint 0,833, soit une valeur supérieure à celles des troisième et quatrième configuration. La sélection finale ne devrait donc pas reposer uniquement sur la performance moyenne, mais également sur le maintien des performances dans des conditions défavorables. Dans l'ensemble, les configurations caractérisées par une épaisseur proche de 12 à 14 cm, une couverture végétale supérieure à 0,93 et une résistivité modérée apparaissent comme les compromis thermo-acoustiques les plus performants et les plus stables.

4. DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence le potentiel des murs végétalisés comme solution multifonctionnelle pour l'amélioration simultanée des performances thermiques et acoustiques des bâtiments. Sur le plan thermique, l'augmentation de l'épaisseur végétale de 2 à 15 cm réduit le facteur d'amortissement d'environ 0,285 à 0,075, soit une diminution proche de 74 %. Cette évolution traduit une forte atténuation des fluctuations thermiques transmises vers l'intérieur. Toutefois, l'amélioration devient progressivement moins importante au-delà de 8 à 12 cm, ce qui suggère l'existence d'un seuil à partir duquel l'augmentation de l'épaisseur produit des gains supplémentaires limités. Sur le plan acoustique, les meilleures performances sont obtenues dans les moyennes et hautes fréquences. Pour des épaisseurs comprises entre 12 et 16 cm, le coefficient d'absorption dépasse 0,80 aux fréquences élevées. En revanche, l'absorption demeure relativement faible en dessous de 500 Hz. Cette dépendance fréquentielle montre que l'épaisseur ne constitue pas le seul paramètre déterminant et que la porosité ainsi que la résistivité au passage de l'air doivent également être ajustées selon la bande sonore ciblée. La comparaison des modèles substitutifs montre que le Gradient Boosting fournit le meilleur compromis global, avec un coefficient de détermination moyen d'environ 0,981 et une NRMSE moyenne de 0,032. Le perceptron multicouche présente également de bonnes performances et un temps d'inférence particulièrement faible, mais sa précision est moins homogène entre les différentes sorties. Les modèles fondés sur les arbres aléatoires reproduisent correctement les réponses thermiques, mais restent moins précis pour les variables acoustiques. L'optimisation multiobjectif identifie des configurations robustes caractérisées principalement par des épaisseurs de 12 à 14 cm et des taux de couverture supérieurs à 0,93. Les scores de désirabilité compris entre 0,846 et 0,906 confirment qu'il est possible d'obtenir un compromis satisfaisant entre faible transfert thermique, absorption acoustique élevée et stabilité face aux incertitudes. Ces résultats doivent néanmoins être confirmés par des mesures expérimentales afin de vérifier la représentativité des hypothèses numériques et des propriétés du matériau végétalisé.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de développer une approche intégrée de modélisation thermo-acoustique et d'optimisation robuste des murs végétalisés. Les résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur végétale améliore nettement l'atténuation thermique, avec une réduction d'environ 74 % du facteur d'amortissement entre 2 et 15 cm. Les performances acoustiques deviennent également élevées dans les moyennes et hautes fréquences, où le coefficient d'absorption peut dépasser 0,80 pour des épaisseurs de 12 à 16 cm. Parmi les modèles substitutifs évalués, le Gradient Boosting présente le meilleur compromis global, avec un R² moyen proche de 0,981 et une NRMSE moyenne de 0,032. L'optimisation multiobjectif identifie finalement des configurations performantes et

robustes, principalement associées à des épaisseurs de 12 à 14 cm et à des taux de couverture supérieurs à 0,93. L'approche proposée constitue ainsi un outil pertinent pour orienter la conception de murs végétalisés à hautes performances thermo-acoustiques.

REFERENCES

- [1] Pérez, G., Coma, J., Martorell, I. and Cabeza, L.F. (2014) 'Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, pp. 139–165. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.055.
- [2] Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M. and Cabeza, L.F. (2017) 'Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades', *Building and Environment*, 111, pp. 228–237. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.11.014.
- [3] Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L.F., Burés, S., Álvaro, J.E., Erkoreka, A. and Urrestarazu, M. (2015) 'Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings', *Applied Acoustics*, 89, pp. 46–56. doi: 10.1016/j.apacoust.2014.09.010.
- [4] Crank, J. and Nicolson, P. (1947) 'A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type', *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 43(1), pp. 50–67. doi: 10.1017/S0305004100023197.
- [5] Friedman, J.H. (2001) 'Greedy function approximation: A gradient boosting machine', *The Annals of Statistics*, 29(5), pp. 1189–1232. doi: 10.1214/aos/1013203451.
- [6] Araújo, G.R., Gomes, R., Gomes, M.G., Guedes, M.C. and Ferrão, P. (2023) 'Surrogate models for efficient multi-objective optimization of building performance', *Energies*, 16(10), article 4030. doi: 10.3390/en16104030.
- [7] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002) 'A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II', *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), pp. 182–197. doi: 10.1109/4235.996017.
- [8] Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D. et al. (2020) 'Array programming with NumPy', *Nature*, 585, pp. 357–362. doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [9] McKinney, W. (2010) 'Data structures for statistical computing in Python', in van der Walt, S. and Millman, J. (eds.) *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. Austin, Texas, pp. 56–61. doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.
- [10] Hunter, J.D. (2007) 'Matplotlib: A 2D graphics environment', *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90–95. doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [11] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O. et al. (2011) 'Scikit-learn: Machine learning in Python', *Journal of Machine Learning Research*, 12, pp. 2825–2830.
- [12] Delany, M.E. and Bazley, E.N. (1970) 'Acoustical properties of fibrous absorbent materials', *Applied Acoustics*, 3(2), pp. 105–116. doi: 10.1016/0003-682X(70)90031-9.
- [13] McKay, M.D., Beckman, R.J. and Conover, W.J. (1979) 'A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code', *Technometrics*, 21(2), pp. 239–245. doi: 10.1080/00401706.1979.10489755.
- [14] Marino, S., Hogue, I.B., Ray, C.J. and Kirschner, D.E. (2008) 'A methodology for performing global uncertainty and sensitivity analysis in systems biology', *Journal of Theoretical Biology*, 254(1), pp. 178–196. doi: 10.1016/j.jtbi.2008.04.011.
- [15] Efron, B. (1979) 'Bootstrap methods: Another look at the jackknife', *The Annals of Statistics*, 7(1), pp. 1–26. doi: 10.1214/aos/1176344552.