

PERFORMANCE ACOUSTIQUE DES MURS VEGETALISES EN BETON DE POZZOLANES NATURELLES : ANALYSE DE L'ATTENUATION DU BRUIT CYCLONIQUE

Rajaonarison L Dina P, Rajaonarison Henintsoa K, Rajaonarison Ken E, Rajaonarison Eddie

Franck (*)

Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra, Antananarivo 101, Madagascar

(*) e-mail : heryzaiany@gmail.com

Résumé

Cet article vise à approfondir la compréhension de la performance acoustique des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles et leur capacité à atténuer le bruit cyclonique. Elle adopte une approche méthodologique rigoureuse et multidisciplinaire, combinant des méthodes expérimentales, des techniques de mesure et d'analyse, ainsi que des outils de modélisation. Les résultats obtenus démontrent que les murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles sont des solutions efficaces pour répondre aux besoins d'atténuation acoustique dans les environnements urbains. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour orienter la conception, la construction et l'implantation de murs végétalisés dans les villes, contribuant ainsi à créer des environnements urbains plus durables et plus agréables pour les habitants.

Mots clés : Murs végétalisés, Béton de pouzzolane, Acoustique, Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).

I. INTRODUCTION

Dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, le développement durable et la construction écologique prennent une place prépondérante [1], avec une attention particulière portée aux murs végétalisés [2]. Ces structures, composées de substrats et de plantes spécifiques, contribuent à l'amélioration de l'environnement urbain en offrant des avantages environnementaux, esthétiques et fonctionnels. Ils jouent un rôle clé dans la réduction des îlots de chaleur, la promotion de la biodiversité et l'atténuation des nuisances sonores, tout en améliorant la qualité de l'air et le confort des bâtiments [3].

Cependant, l'efficacité acoustique de ces murs, en particulier face au bruit des cyclones tropicaux, soulève des interrogations [4]. Le bruit intense de ces événements peut affecter le sommeil, la santé auditive et psychologique, et la sécurité des résidents [5]. Cette recherche se concentre donc sur l'analyse de la performance acoustique des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles, avec un accent sur leur capacité à réduire le bruit cyclonique. L'objectif est de comprendre les interactions entre la végétation, les matériaux de construction et le bruit environnemental pour concevoir des solutions urbaines durables et résistantes au changement climatique.

Les murs végétalisés sont envisagés comme une innovation pour améliorer la performance acoustique des espaces urbains, agissant comme des barrières absorbantes contre le bruit. Cette étude vise à combler les lacunes de connaissances sur leur interaction avec le bruit cyclonique, afin d'améliorer le confort et la sécurité des zones urbaines touchées par ces phénomènes extrêmes. En

approfondissant la compréhension de la performance acoustique des murs végétalisés, l'étude aspire à optimiser leur conception et à encourager leur adoption pour des villes plus durables et résilientes.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Description des matériaux et des méthodes expérimentales utilisés

Pour mener notre étude sur la performance acoustique des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles, nous avons utilisé une combinaison de matériaux et de méthodes expérimentales spécifiquement adaptées à nos objectifs de recherche.

II.1.1. Béton de pouzzolanes naturelles

Nous avons utilisé du béton fabriqué à partir de pouzzolanes naturelles comme matériau de base pour la construction des murs végétalisés. Ce matériau a été choisi pour sa durabilité, sa résistance mécanique et sa capacité à réagir avec la végétation. Les matériaux suivants ont été utilisés pour produire les différents bétons considérés dans le programme expérimental.

II.1.1.1. Pouzzolane

Nous avons opté pour le site situé dans le massif d'Ankaratra pour effectuer cette étude pour les raisons suivantes :

- Le massif d'Ankaratra est localisé dans les Hautes-Terres Centrales Malagasy ;
- La pouzzolane d'Ambohinaorina est la plus utilisée et elle est exploitée par la cimenterie HOLCIM.

La figure 1 était élaborée par un logiciel SIG (Système d'Information Géographique) à partir d'une carte qui représente la zone. Tous les éléments représentés sont la synthèse de cette carte.

Le cône volcanique Ambohinaorina est le mieux conservé de tous les cônes volcaniques de la région de Betafo. Sa masse principale qui n'a jamais été évaluée est constituée par des produits de projection, parmi lesquels dominent largement les scories. Elles sont généralement noire violacée, mais on trouve également de couleur rouge brique.

Pour une localisation précise, nous avons indiqué dans le tableau 1 la route nationale (RN) ainsi que le point kilométrique (PK) de la carrière où les échantillons ont été prélevés.

Tableau 1: Localisation et description des échantillons

Carrière	Route	PK	Couleur	Forme	Etat surface	de Structure	Appellation
Ambohinaorina	RN34	21,75	Noire violacée	scoriacée	Très rugueux	Poreux	scories

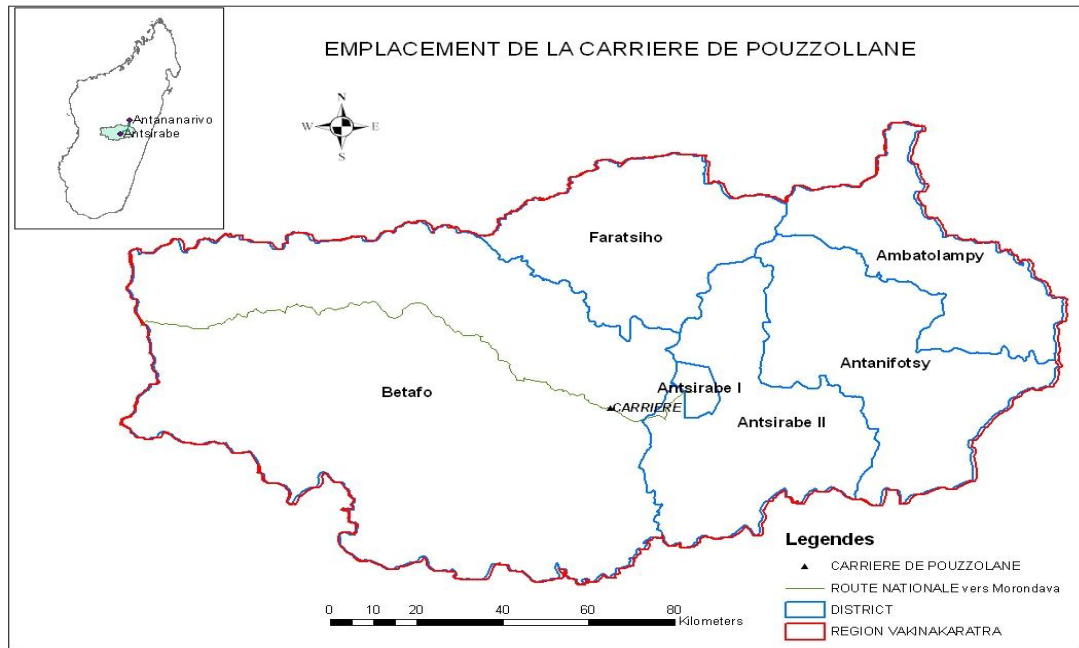
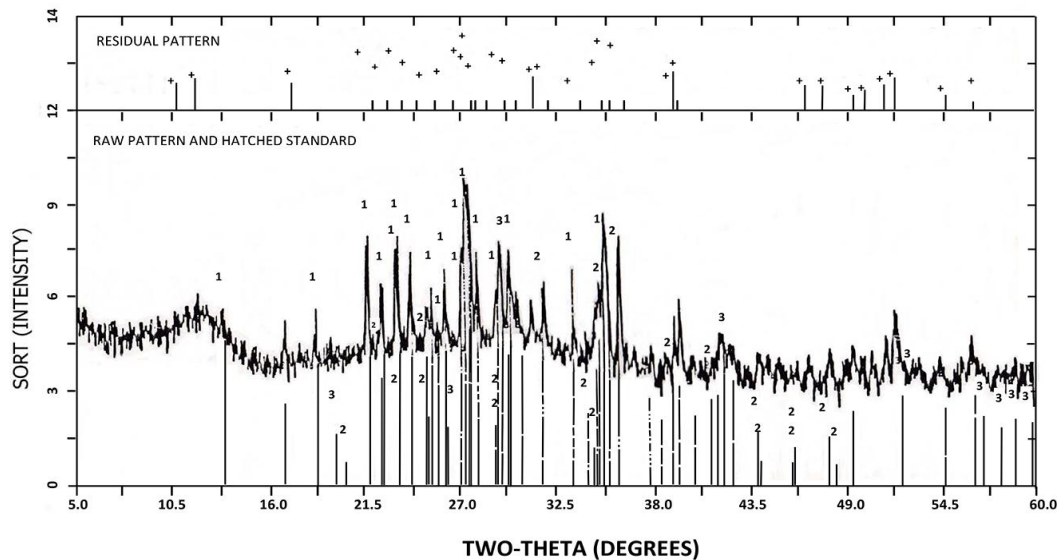


Figure 1 : Site d'Ambohinaorina

Une méthode particulière appelée méthode des poudres s'applique aux échantillons émiétés. Elle utilise un faisceau de rayon X monochromatiques. Cette opération permet de déceler que l'échantillon en poudre est formé d'un grand nombre de petits cristaux présentant une orientation quelconque.

L'appareillage utilisé est un diffractomètre SIEMENS D500 en utilisant un rayonnement CuKa monochromatique avec une longueur d'onde $k = 1,7903 \text{ \AA}$ à une tension de 40 kV et un courant de 30 mA. Les résultats obtenus des pouzzolanes d'Ambohinaorina sont montrés sur la figure 2.



FRACT	STANDARD		I/ICOR	FOM	
1	9.0465	(CA. NA) (SI. AL) 40	1.0	0.575	Calcic plagioclase
2	21.1257	(MGO. 6FEO. 4) 2SIO	1.0	0.385	Olivine (rich in iron)
3	24.0202	CA (MG. AL. FE) SI2O	1.2	****	pyroxen

Figure 2 : Diffractogramme de l'échantillon d'Ambohinaorina.

Le tableau 2 montre des résultats d'analyses chimiques sur ces échantillons. Rappelons que, La norme NFP 18 308 [6] a pour objet de définir la pouzzolane et de fixer les caractéristiques auxquelles elle doit satisfaire, ainsi que les essais propres à déterminer. Elle ne vise pas la pouzzolane destinée à d'autres usages que la confection des bétons de construction. Roche naturelle, de couleur généralement noire ou rouge, constituée par des scories volcaniques, les teneurs moyennes en silice, alumine et oxyde ferrique de la pouzzolane doivent s'inscrire dans les limites suivantes : SiO₂ de 43 à 55% ; Al₂O₃ de 12 à 24% ; Fe₂O₃ de 8 à 20%. Ces limites ont pour but essentiel d'assurer la bonne cimentation, cohésion entre les éléments chimiques.

Tableau 2: Résultats d'analyses chimiques des pouzzolanes d'Antsirabe-Betafo

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	PF	Total
44,63	13,04	12,48	12,08	09,56	01,33	00,02	02,29	00,21	02,40	00,11	00,71	01,15	100,01

De cette analyse, on peut constater que pour les pouzzolanes d'Ambohinaorina, la proportion d'alumine, de silice et d'oxyde de fer correspond parfaitement aux limites des caractéristiques fixées par la norme française NFP18 308 dans le domaine de pouzzolanes.

Chaque échantillon prélevé a fait l'objet d'une évaluation fine des masses volumiques apparentes et réelles ainsi que de la teneur en eau à l'état naturel.

- pg: la masse volumique apparente des granulats à l'état naturel est égale à 1.47 T /m³ (les vides intergranulaires sont pris en compte). Cette masse volumique est indispensable pour la détermination de la masse des granulats à utiliser dans la confection des bétons, et notamment pour les bétons cavernaux.

- ρ_r : la masse volumique réelle des granulats prémouillés est égale à 2.89 T /m³ (les vides intergranulaires ne sont pas considérés). Elle est nécessaire dans le domaine de calcul de la masse granulaire à mettre en œuvre dans la composition des bétons.
- W : la teneur en eau des granulats à l'état naturel est égale à 6%. La quantité d'eau à admettre pour avoir un bon mortier est celle strictement nécessaire pour obtenir un mortier plastique.

Si les pouzzolanes sont trop sèches, on obtient des compacités élevées et des résistances élevées, mais le mortier est peu adhérent et très peu maniable. Tout excès d'eau, par contre, provoque une chute de résistance, d'imperméabilité [7] et une consommation supplémentaire de ciment. L'effet hygrométrique du site porte aussi atteinte sur la teneur en eau de granulats dans la mesure où l'humidité augmente cet effet.

II.1.1.2. Ciment

Le ciment utilisé lors de nos expériences est de type I [8] [9]. Les propriétés physiques et la composition chimique de ce ciment sont énumérées dans le tableau 3.

Tableau 3: Propriétés physiques et chimiques du ciment

Gravité spécifique (g/cm ³)	3,15	ASTM C 188-03
Surface spécifique (cm ² /g)	3897	ASTM C 204-05
Réglage de l'heure initiale (min)	30	ASTM C 191-04
Résistance à la compression (MPa)		
	1 d	10,4
	3 d	21,3
	7 d	33,5
	28 d	43,6
Composition chimique, % en masse		
	SiO ₂	20,5
	Al ₂ O ₃	4.52
	Fe ₂ O ₃	2.71
	CaO	63.93
	MgO	2.39
	K ₂ O	1.01
	SO ₃	3.3
	Na ₂ O	0.19
	LOI	0.97

II.1.1.3. Eau

De l'eau potable répondant aux exigences de la norme ASTM C 1602-06 [10] a été utilisée pour mélanger les bétons, et de l'eau de chaux saturée [11] a été utilisée pour durcir les échantillons.

II.1.2. Substrat végétal

Nous avons sélectionné un substrat spécialement conçu pour favoriser la croissance des plantes tout en offrant un support structurel adéquat. Ce substrat a été choisi pour sa capacité à retenir l'eau et les nutriments nécessaires à la croissance des plantes.

II.1.3. Plantes

Nous avons choisi une sélection de plantes adaptées aux conditions environnementales locales et capables de résister aux stress thermiques et acoustiques. Ces plantes ont été cultivées dans des pépinières spécialisées et transplantées sur les murs végétalisés lors de la phase d'installation.

II.2. Mise en place des essais d'atténuation acoustique

Pour évaluer l'atténuation acoustique des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles, nous avons mis en place des essais sur le terrain visant à mesurer les niveaux de bruit à proximité des murs dans différentes conditions environnementales. Voici les étapes que nous avons suivies pour réaliser ces essais :

II.2.1. Sélection des sites d'essai

Nous avons choisi plusieurs sites d'essai représentatifs de différents environnements urbains pour installer nos murs végétalisés. Ces sites ont été sélectionnés en fonction de leur exposition au bruit urbain et de leur accessibilité pour les mesures.

II.2.2. Installation des murs végétalisés

Sur chaque site d'essai, nous avons installé des murs végétalisés en utilisant du béton de pouzzolanes naturelles comme matériau de construction. Les murs ont été construits selon les spécifications techniques pour assurer une structure solide et durable.

II.2.3. Mesure des niveaux de bruit

Nous avons utilisé un sonomètre pour mesurer les niveaux de bruit à proximité des murs végétalisés dans différentes conditions environnementales. Les mesures ont été effectuées à différentes hauteurs et distances des murs pour évaluer leur capacité d'atténuation acoustique.

II.2.4. Collecte des données

Nous avons effectué des mesures de bruit à différents moments de la journée et dans différentes conditions météorologiques pour capturer les variations de bruit ambiant. Les mesures ont été enregistrées à intervalles réguliers pour obtenir une vue d'ensemble de la performance acoustique des murs végétalisés.

II.2.5. Analyse des données

Nous avons analysé les données recueillies pour évaluer l'atténuation acoustique des murs végétalisés en fonction de facteurs tels que la densité de la végétation, l'épaisseur du substrat et l'exposition au bruit urbain. Cette analyse nous a permis de quantifier l'efficacité des murs végétalisés dans la réduction du bruit et de comparer les performances entre différents sites d'essai.

II.3. Protocole d'analyse pour évaluer l'efficacité des murs végétalisés

Pour évaluer l'efficacité des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles, nous avons mis en place un protocole d'analyse comprenant plusieurs étapes clés. Voici les principales étapes de ce protocole :

II.3.1. Traitement des données

Nous avons collecté un ensemble de données sur la performance acoustique des murs végétalisés à partir des essais sur le terrain. Ces données comprenaient les mesures de température et de bruit recueillies à différents moments de la journée et dans différentes conditions environnementales.

II.3.2. Analyse statistique

Nous avons utilisé des techniques d'analyse statistique pour évaluer les relations entre les variables mesurées et pour identifier les facteurs qui influencent l'efficacité des murs végétalisés. Cela nous a permis de quantifier l'impact de la densité de la végétation, de l'épaisseur du substrat et d'autres paramètres sur la performance thermique et acoustique des murs.

II.4. Modélisation numérique

Le comportement acoustique étant relativement complexe, le cas d'un écoulement dans un tube cylindrique va être traité afin d'exposer les phénomènes se produisant lors de la propagation du son. Ceci permettra de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu et de définir les paramètres qui sont utilisés dans la caractérisation des propriétés acoustiques.

Nous avons donc utilisé un tube cylindrique. A l'une de ses extrémités est un couvercle métallique contre lequel s'appuie l'échantillon E à étudier. Le couvercle se visse et nous pouvons par conséquent l'enlever, changer le matériau et le remettre.

Le problème de transmission de l'énergie acoustique, qui est fonction des coefficients d'absorption d'un matériau, a au moins deux intérêts, l'un d'ordre pratique lié à notre confort personnel, l'autre d'ordre fondamental, car transmission implique propagation, vibrations de structures, rayonnement, chapitres clés de l'acoustique.

Nous allons démontrer à partir des formules fondamentales [12] comment peut-on trouver le coefficient d'absorption d'un matériau.

Considérons une onde incidente tombante sur un échantillon E, placée sur le fond d'un tube cylindrique, dont on veut mesurer le coefficient d'absorption :

$$\Delta_{pi} = A \cos(\omega t + qx)$$

L'onde de retour a pour expression :

$$\Delta_{pr} = B \cos(\omega t - qx)$$

Avec $\omega = \frac{2\pi}{T}$ et $q = \frac{2\pi}{\lambda}$. T est la période et la quantité λ est appelée la longueur d'onde. Les grandeurs ω et q jouent comme T et λ des rôles analogues l'un vis-à-vis de l'espace, l'autre vis-à-vis du temps, mais q n'a pas reçu de nom particulier, tandis que ω est appelée la pulsation.

Le quotient $\frac{B}{A}$ est le coefficient de réflexion $re^{j\delta}$. δ étant le décalage de phase, fonction de ω c'est-à-dire de la fréquence.

En un point d'abscisse x quelconque, l'on aura

$$\Delta_p = (Ae^{jqx} + B e^{-jqx}) e^{j\omega t} = (Ae^{jqx} + rAe^{j(\delta - qx)}) e^{j\omega t}$$

$$\Delta_p = A e^{j(\omega t + qx)} [1 + r e^{j(\delta - 2qx)}]$$

Le module a pour expression

$$|\Delta_p| = A \left([1 + r \cos(\delta - 2qx)]^2 + r^2 \sin^2(\delta - 2qx) \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= A \left(1 + 2r \cos(\delta - 2qx) + r^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Les maxima et minima ont respectivement pour amplitude

$$\Delta_{pM} = A(1+r) \text{ et } \Delta_{pm} = A(1-r)$$

D'où

$$n = \frac{\Delta_{pM}}{\Delta_{pm}} = \frac{1+r}{1-r} \text{ ou } r = \frac{n-1}{n+1}$$

Les énergies sont proportionnelles aux carrés des surpressions [Biblio n°].

Le coefficient d'absorption aura donc pour valeur :

$$\alpha = \frac{A^2 - A^2 r^2}{A^2} = 1 - r^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \frac{4n}{(n+1)^2}$$

$$\alpha = \frac{4}{n + 2 + \frac{1}{n}}$$

La durée d'audibilité d'un son est la même en tous les points d'une salle et ne dépend pas des positions relatives de la source et de l'auditeur, ni de celles des surfaces absorbantes et réfléchissantes.

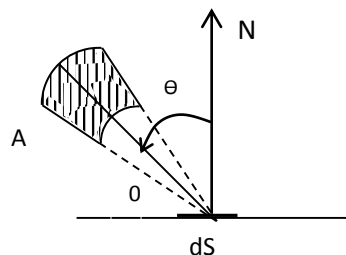


Figure 3 : Détermination de l'élément de volume

Considérons une surface dS . Elle reçoit de l'énergie de tous les points d'un hémisphère. Soit en particulier un volume dV situé en A dans une direction faisant l'angle Θ avec la normale. Si E est la densité d'énergie supposée uniforme, son énergie est $E dV$. A un certain moment, le son étant supposé se diffuser également dans toutes les directions, cette énergie est répartie sur une sphère de rayon r et la surface dS reçoit la quantité :

$$d_3W = \frac{E dV}{4\pi r^2} dS \cos \Theta$$

L'angle solide du cône d'ouverture Θ vaut $2\pi(1-\cos \Theta)$. Sa différentielle est $2\pi \sin \Theta d\Theta$ et cet angle correspond à un volume $2\pi \sin \Theta d\Theta \cdot r^2 dr = dV$.

La surface dS recevra donc de ce volume et en un temps dt égal à $\frac{dr}{c}$, c étant la célérité du son :

$$d_3W = \frac{E dS}{4\pi r^2} 2\pi r^2 \sin \Theta \cos \Theta d\Theta \cdot c dt$$

$$d_2W = \frac{c E dS}{2} \sin \Theta d(\sin \Theta) \cdot dt$$

Si nous intégrons de 0 à $\frac{\pi}{2}$, nous obtiendrons $d_2W = \frac{c E}{4} dS dt$

Supposons maintenant qu'il y ait dans une salle fermée une source de son de puissance P et que le coefficient moyen d'absorption des surfaces dont la somme est S soit α , l'augmentation d'énergie de la salle de volume V en un temps dt sera de :

$$V d\underline{E} = P dt - \frac{1}{4} c \underline{E} \alpha S dt ; \text{ la surface } S \text{ ayant en effet reçu l'énergie } \frac{1}{4} c \underline{E} S dt.$$

En régime permanent, $d\underline{E}$ est nulle et l'on aura $\underline{E}_0 = \frac{4P}{c \alpha S}$. Mais supposons maintenant que brusquement P devienne nulle. Il restera $d\underline{E} = - \frac{c \alpha S \underline{E}}{4V} dt$. D'où $\underline{E} = \underline{E}_0 e^{-\frac{c \alpha S \underline{E}_0}{4V} t}$

Soit:

$$t = \frac{4V}{c \alpha S} \text{Log} \frac{\underline{E}_0}{\underline{E}}$$

On a l'habitude de définir ce que l'on appelle le temps de réverbération d'une salle par le temps au bout duquel la densité d'énergie est devenue la millionième partie de la densité initiale. Si nous désignons ce temps par Tr , nous aurons :

$$Tr = \frac{4V}{c\alpha S} \text{Log } 10^6 = \frac{4V}{c\alpha S} 6.2,3 = 55,2 \frac{V}{\alpha cS}$$

Et si nous prenons le mètre comme unité de longueur et en faisant $c = 340 \text{ m.s-1}$,

$$Tr = 0,16 \frac{V}{\alpha S} = 0,16 \frac{V}{A}$$

Cette formule nous a donné les coefficients d'absorptions des murs végétalisés en béton léger de pouzzolanes d'Ambohinaorina en fonction du dosage du béton utilisé.

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. Coefficients d'absorption acoustique

La figure 4 présente les coefficients d'absorption sonore des murs végétalisés en béton binaire, en mettant en lumière l'impact des pouzzolanes fines. Il met en relation la fréquence du son en kHz sur l'axe horizontal avec le coefficient d'absorption sur l'axe vertical, mesurant ainsi l'efficacité de l'absorption sonore du matériau.

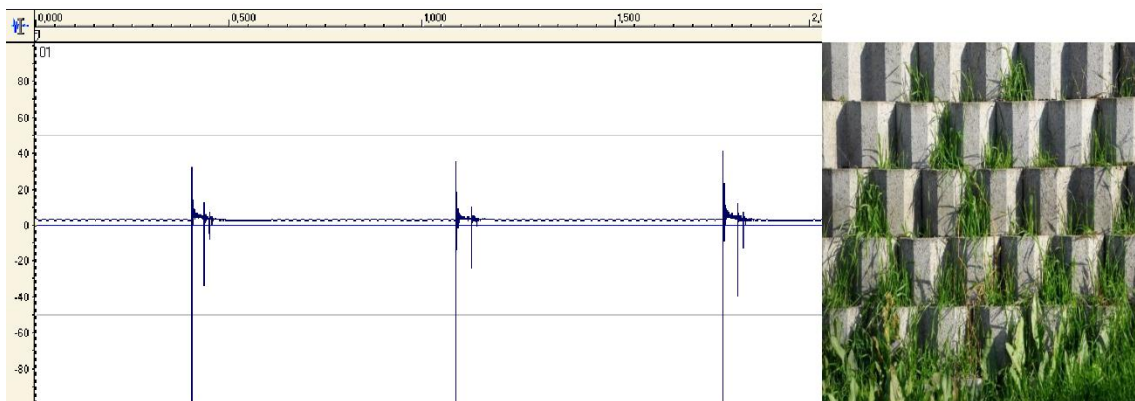


Figure 4 : coefficients d'absorption sonore des murs végétalisés en béton binaire

Les lignes droites observées suggèrent que les pouzzolanes favorisent la formation de réseaux qui absorbent efficacement les sons de courtes longueurs d'onde.

La variation des pics sur le graphique peut être attribuée à des facteurs tels que la masse volumique du béton et les dimensions de la plaque, qui influent sur la perception de la hauteur du son. Généralement, le coefficient d'absorption augmente avec la fréquence du son, ce qui est caractéristique des matériaux poreux comme les bétons contenant des pouzzolanes. Cependant, au-delà de 1 kHz, le coefficient d'absorption ne suit plus cette tendance et peut même diminuer ou se stabiliser. Ceci suggère que la capacité d'absorption sonore des murs végétalisés avec des pouzzolanes fines varie selon la fréquence, atteignant une efficacité optimale à des fréquences spécifiques. Les pics d'absorption correspondent probablement à des fréquences où le matériau est le plus efficace pour absorber le son, tandis que les zones plates indiquent des fréquences moins bien absorbées.

La figure 5 représente les coefficients d'absorption des bétons ternaires de la série A. Les pics sur le graphique signalent des niveaux élevés d'absorption sonore, correspondant potentiellement à des fréquences de résonance spécifiques du matériau. Une augmentation de la rigidité de la plaque, notée avec un dosage en ciment plus élevé (350 Kg/m³) par rapport à un dosage inférieur (300 Kg/m³), suggère une densité accrue et donc une capacité potentielle à absorber des fréquences plus élevées.

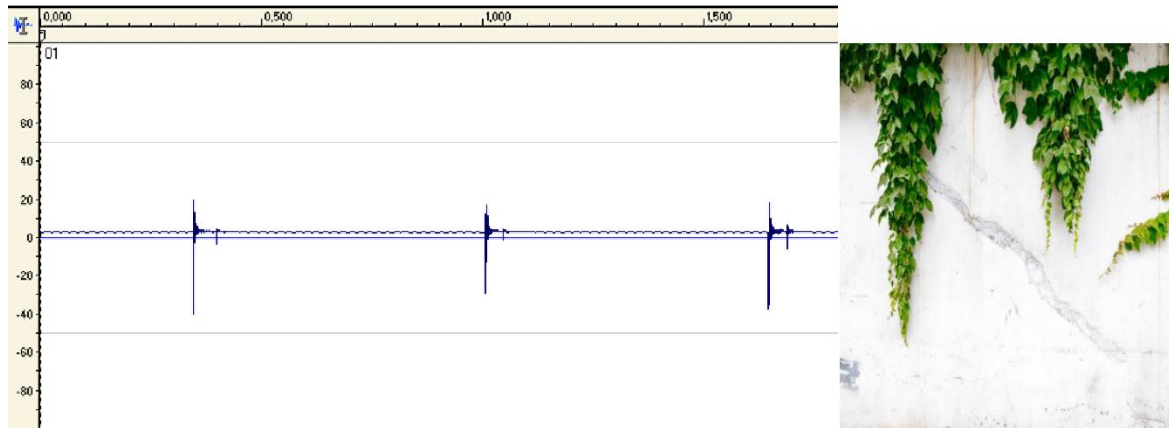


Figure 5 : coefficients d'absorption sonore des murs végétalisés des bétons ternaires de la série A

Un indice des vides absolus de 23% reflète la porosité du béton, qui influe directement sur son absorption sonore. Une valeur plus basse signifie moins de vide, ce qui peut favoriser une meilleure absorption à certaines fréquences. Une hausse d'environ 50% des coefficients d'absorption avec un dosage en ciment de 350 Kg/m³ indique une meilleure performance du béton dans l'absorption sonore à des fréquences moyennes par rapport à un dosage inférieur. En somme, le graphique montre comment le dosage en ciment et la porosité influencent l'absorption sonore du béton ternaire de la série A, avec une meilleure performance à des fréquences moyennes pour un dosage en ciment plus élevé et une porosité réduite. Ces observations peuvent guider la conception de matériaux de construction optimisés pour l'isolation acoustique.

La fréquence du son le plus aigu est conditionnée par divers facteurs tels que la longueur de la plaque, le module d'Young du béton, et sa masse volumique. Ces paramètres influencent la capacité du matériau à vibrer et donc à émettre des sons à différentes fréquences. Pour les échantillons B.b-1 et B.b-2, le graphique (figure 6) révèle une absorption relativement constante sur toute la plage de fréquences, avec des coefficients d'absorption α_{max} variant entre 0,14 et 0,18. Cela suggère une bonne isolation acoustique sur un large spectre de fréquences.

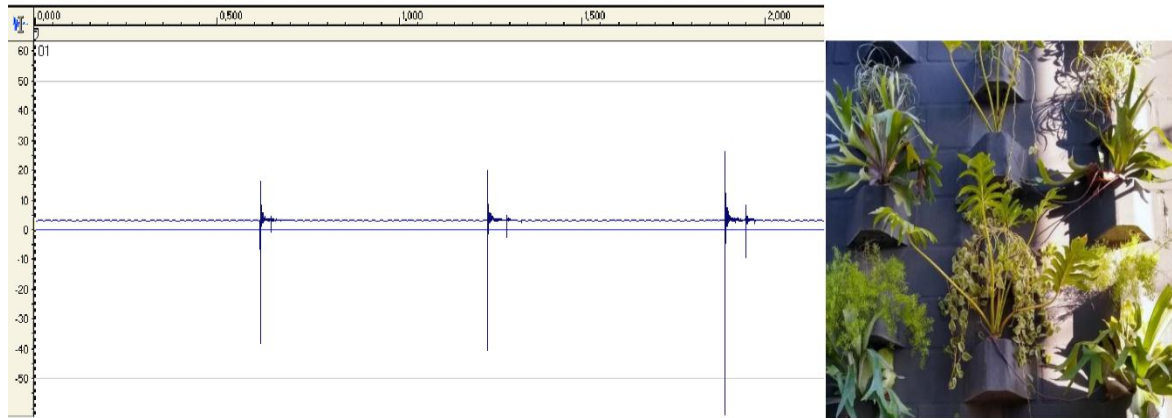


Figure 6 : coefficients d'absorption sonore des murs végétalisés des bétons ternaires de la série B

Les bétons B.b.4, B.b.5 et B.b.6, avec des dosages plus faibles, présentent une meilleure absorption pour les sons de fréquences moyennes et élevées. Cette observation peut être attribuée à une structure plus poreuse favorisant une meilleure dissipation de l'énergie sonore.

La présence d'une quantité accrue de fines dans le mélange des bétons B.b-1 et B.b-2 pourrait expliquer leur imperméabilité supérieure et leur coefficient d'absorption plus élevé, les rendant ainsi plus efficaces pour atténuer les bruits de cyclones. Le graphique met en évidence comment la composition et la structure physique des bétons ternaires de la série B influent sur leur capacité d'absorption sonore, un élément crucial pour la réduction du bruit, en particulier ceux engendrés par les cyclones.

L'analyse de la figure 7 concernant les coefficients d'absorption des bétons ternaires série C révèle :

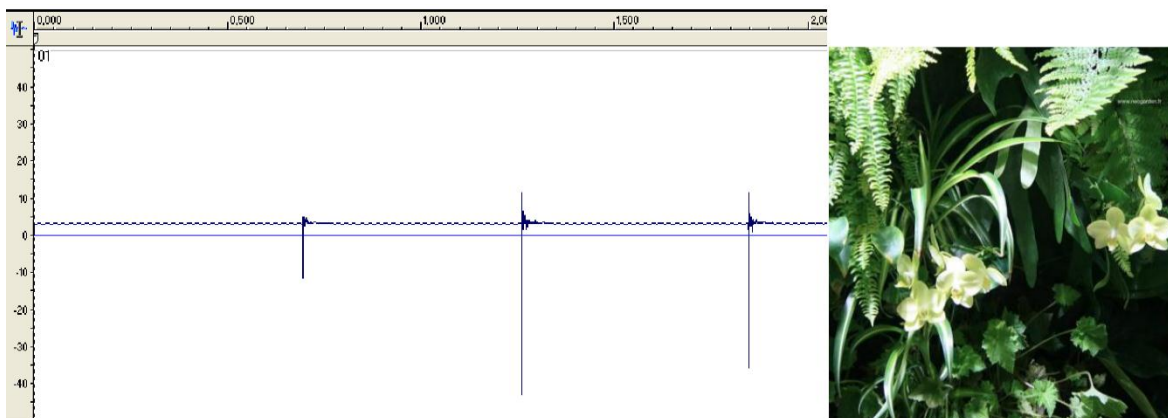


Figure 7 : coefficients d'absorption sonore des murs végétalisés des bétons ternaires de la série B

Sur l'axe horizontal du graphique, la représentation probable est le temps ou la fréquence des ondes sonores. L'axe vertical indique l'amplitude des ondes sonores, pouvant être corrélée à l'intensité du son perçu. Les trois pics observés sur le graphique suggèrent des points où l'absorption sonore est plus prononcée, vraisemblablement dus à des obstacles rencontrés qui absorbent une partie de l'énergie sonore. Le coefficient d'absorption α_{max} de 0,27 pour le béton C-1 indique que 27% du son est absorbé par les échantillons. Ceci pourrait être visualisé sur le

graphique par une diminution de l'amplitude de l'onde après chaque pic. La traînée sonore mentionnée semble correspondre à la partie du graphique où l'amplitude de l'onde diminue progressivement, reflétant la décroissance du son après son absorption par l'obstacle. La proportion de pouzzolane présente dans la plaque influe sur la longueur de la traînée sonore, une plus grande quantité de pouzzolane conduisant à une traînée plus étendue, ce qui témoigne d'une meilleure absorption du son. Les caractéristiques physiques telles que les dimensions et la masse volumique impactent les modes vibratoires de la plaque et, par conséquent, le coefficient d'absorption du matériau. Cette figure illustre donc l'influence de la composition et des propriétés physiques du béton sur son comportement acoustique, un élément crucial dans la conception de matériaux présentant des caractéristiques spécifiques d'isolation sonore.

La variation de α est au maximum d'un peu plus de 37 % à basse fréquence et de pratiquement 47% pour $f=500\text{Hz}$, pour les deux types d'indice des vides. Plus l'indice des vides est élevé et plus le son traverse facilement le béton. Pour toutes les fréquences, pour une valeur de l'indice des vides intergranulaires égale à 0.5, α compris entre 0.14 et 0.36, soit environ une valeur de 0.25 ± 0.11 . Acoustiquement les vides intergranulaires jouent ainsi beaucoup de rôle dans le comportement du béton.

Par définition, α est un coefficient adimensionnel, variant entre 0 et 1. La valeur 0 correspond à un matériau totalement réfléchissant et la valeur 1 correspond à un matériau totalement absorbant. L'absorption dépend de la fréquence principalement. Ceci signifie qu'un même échantillon peut être par exemple faiblement absorbant aux basses fréquences et fortement aux hautes fréquences. Ceci explique pourquoi la valeur de α doit toujours s'accompagner de la fréquence à laquelle la mesure est réalisée.

La figure 8 suivante illustre la variation du coefficient d'absorption α en fonction des vides du béton pour les 3 fréquences 250Hz, 500Hz et 1000Hz.

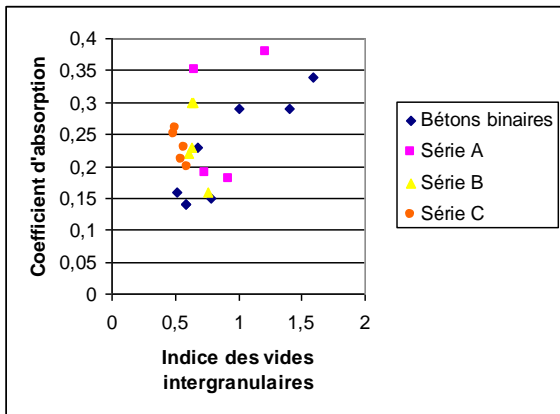


Figure 8 -a : $\alpha=f(ei)$: fréquence 250 Hz

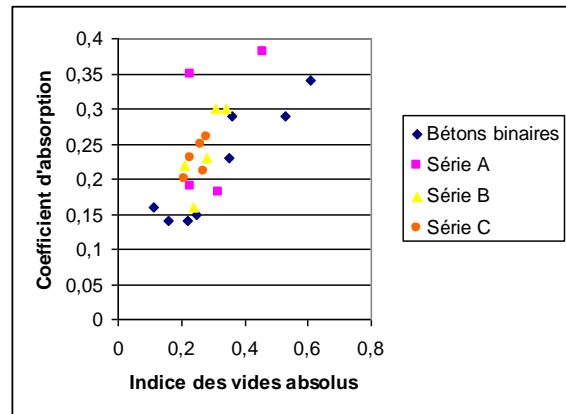


Figure 8 -b : $\alpha=f(eab)$: fréquence 250 Hz

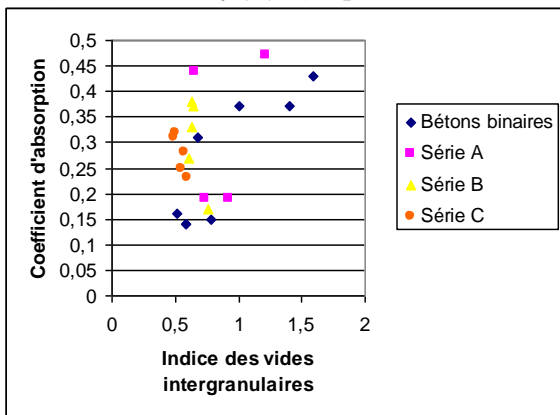


Figure 8 -c : $\alpha=f(ei)$: fréquence 500 Hz

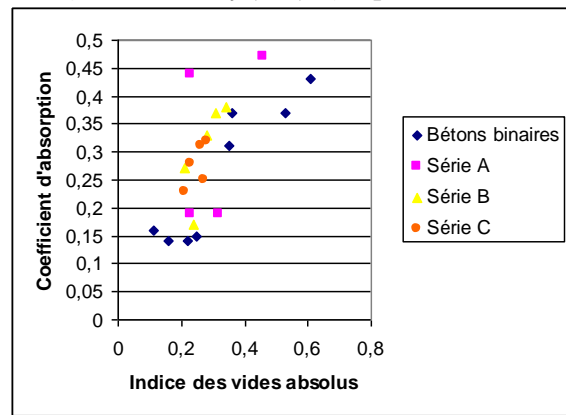


Figure 8 -d : $\alpha=f(eab)$: fréquence 500 Hz

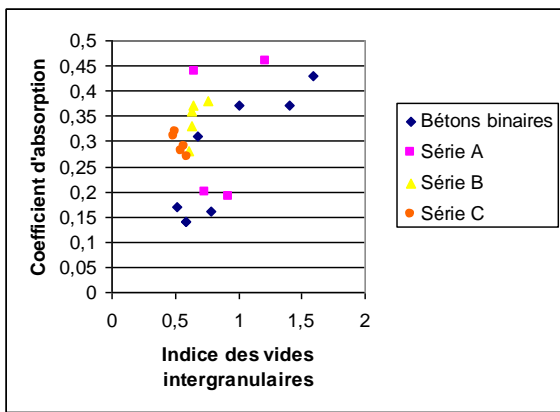


Figure 8 -e : $\alpha=f(ei)$: fréquence 1000 Hz

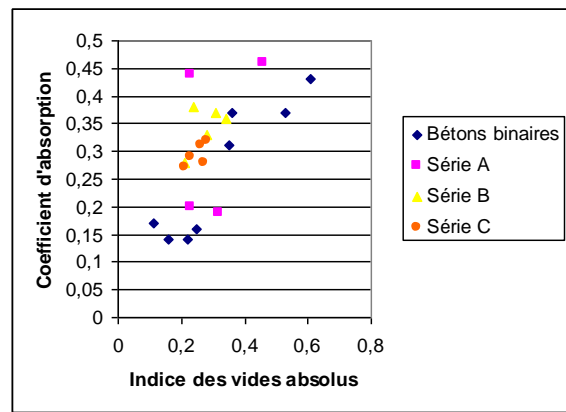


Figure 8 -f : $\alpha=f(eab)$: fréquence 1000 Hz

Figure 8 : Variation des coefficients d'absorption des murs végétalisés en fonction des vides du béton.

La variation de α est au maximum d'un peu plus de 37 % à basse fréquence et de pratiquement 47% pour $f=500\text{Hz}$, pour les deux types d'indice des vides. Plus l'indice des vides est élevé et plus le son traverse facilement le béton. Pour toutes les fréquences, pour une valeur de l'indice des vides intergranulaires égale à 0.5, α compris entre 0.14 et 0.36, soit environ une valeur de 0.25 ± 0.11 . Acoustiquement les vides intergranulaires jouent ainsi beaucoup de rôle dans le comportement du béton.

Etant donné ces résultats, les essais ont été poursuivis en utilisant les deux bétons les plus absorbants, béton ternaire A-1 et béton binaire Bb-6, séparées par 5 cm de couche d'air, la dernière plaque étant contre le fond du couvercle. Le tableau 4 montre les résultats obtenus en fonction des fréquences. La figure 9 illustre la variation du coefficient d'absorption des murs végétalisés avec une certaine couche d'air entre le béton et le fond du couvercle.

Tableau 4: Coefficient d'absorption de ponts acoustiques en fonction de fréquences.

Couche d'air (cm)	Fréquence en Hz				
	125	250	500	1000	2000
5	0,81	0,87	0,92	0,62	0,37

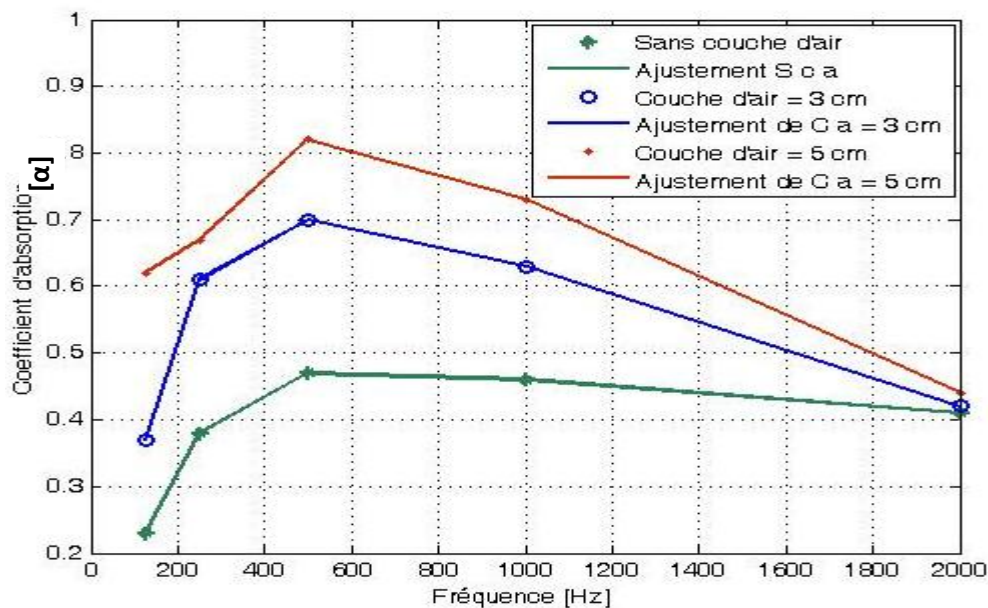


Figure 9 : Variation du coefficient d'absorption des murs végétalisés avec une certaine couche d'air entre le béton et le fond du couvercle.

Il est important de noter que le béton ternaire A-1 placé derrière le béton binaire B.b-6 améliore l'absorption des murs végétalisés en basse et moyenne fréquence. Il semble qu'il y a là un moyen d'avoir une absorption considérable du son et d'améliorer à ce point de vue le rendement des bétons utilisés.

III.2. Évaluation de l'effet du désordre de végétalisation sur le coefficient d'absorption du mur végétalisé

Le désordre de végétalisation est une mesure de la variabilité de la répartition de la végétation sur le mur. Il peut être quantifié par le coefficient de variation (CV) de la densité de végétation, qui est le rapport entre l'écart-type et la moyenne de la densité de végétation. Plus le CV est élevé, plus le désordre de végétalisation est important. Dans ce paragraphe, nous comparons les performances acoustiques de trois murs végétalisés des bétons ternaires, pour un CV de 0,4, qui correspond à un désordre de végétalisation plus important que le cas précédent (CV de 0,2). Nous utilisons la méthode analytique et la méthode de réseau de neurones artificiels (RNA) pour estimer le coefficient d'absorption du mur végétalisé en fonction de la fréquence. Le coefficient d'absorption est une mesure de la capacité d'un matériau à absorber l'énergie sonore. Plus il est proche de 1,

plus le matériau est absorbant. Nous présentons les résultats sous forme de graphiques, où la courbe en pointillés représente la méthode analytique et la courbe en trait plein représente la méthode de RNA. Nous discutons ensuite des différences observées entre les deux méthodes et entre les différentes épaisseurs de mur.

La figure 10 compare deux méthodes pour estimer le coefficient d'absorption du mur végétalisé, c'est-à-dire recouvert de plantes, pour un désordre plus important, c'est-à-dire une variation aléatoire des propriétés du matériau.

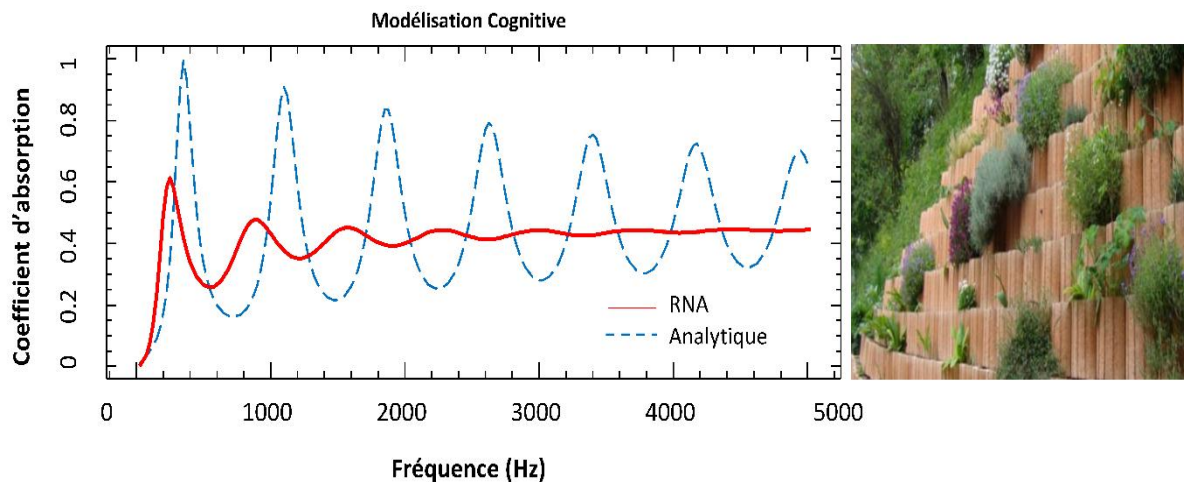


Figure 10 : Coefficient d'absorption d'un mur végétalisé de la série A pour un désordre plus important, calculé par une méthode analytique et un Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

Cette figure montre que le coefficient d'absorption du mur végétalisé augmente avec la fréquence, ce qui signifie qu'il absorbe mieux les sons aigus que les sons graves.

Le RNA du coefficient d'absorption du mur végétalisé ne suit pas exactement la courbe analytique, ce qui signifie que la méthode informatique n'est pas très précise pour ce type de matériau. Cela peut être dû au désordre plus important, qui rend le comportement acoustique du matériau plus complexe et moins prévisible.

Les pores du matériau ont des sections variables, ce qui signifie que les cavités à l'intérieur du matériau ont des tailles et des formes différentes. Cela peut influencer l'absorption acoustique du matériau, en fonction de la fréquence du son.

L'expérience a visé à mesurer le coefficient d'absorption acoustique d'un mur végétalisé des bétons de la série B, en analysant son comportement en fonction de la fréquence du son incident (figure 11). Les courbes du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence ont été tracées pour différentes valeurs de désordre, en utilisant les deux méthodes. Une observation notable est que les courbes ne concordent pas : la méthode analytique met en évidence une variation du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence et du désordre, tandis que la méthode du RNA révèle une courbe constante à partir de 3000 Hz, indépendante du désordre.

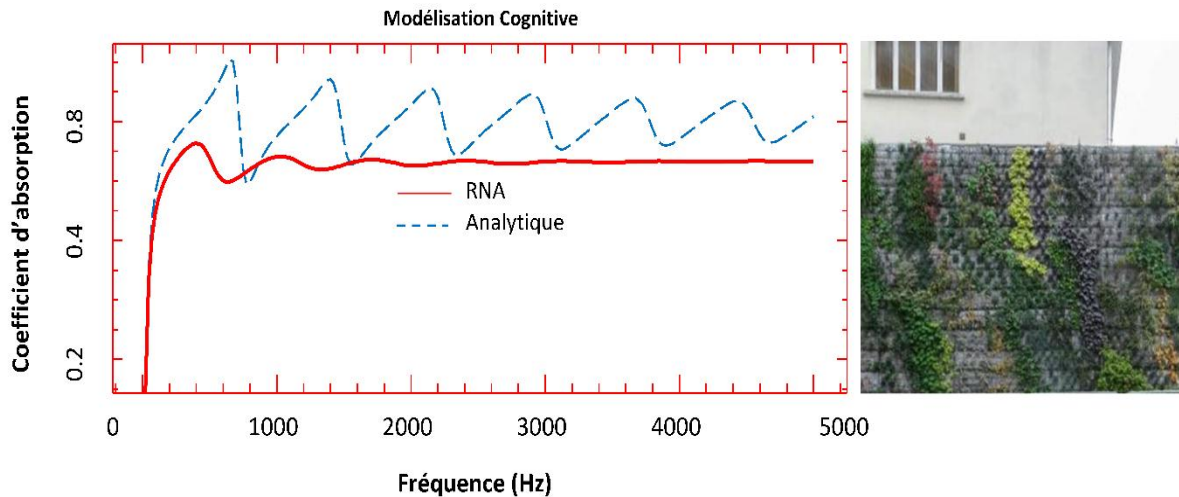


Figure 11 : Courbes analytique et RNA du coefficient d'absorption d'un mur végétalisé des bétons de la série B avec une augmentation du désordre, en relation avec la fréquence.

La méthode analytique ne prend pas en compte les effets non linéaires et les interactions entre les pores, qui peuvent être importants à haute fréquence et à fort désordre. La méthode du RNA, en revanche, peut capturer ces effets grâce à son apprentissage sur des données réelles. Cependant, il se peut aussi que le RNA soit surajusté aux données d'apprentissage, et qu'il ne soit pas capable de généraliser à des situations nouvelles. Il faudrait donc tester le RNA sur des données de validation, et comparer ses performances avec la méthode analytique.

La figure 12 compare deux approches différentes pour modéliser le coefficient d'absorption acoustique d'un mur végétalisé des bétons de la série C, en tenant compte de l'augmentation du désordre en relation avec la fréquence.

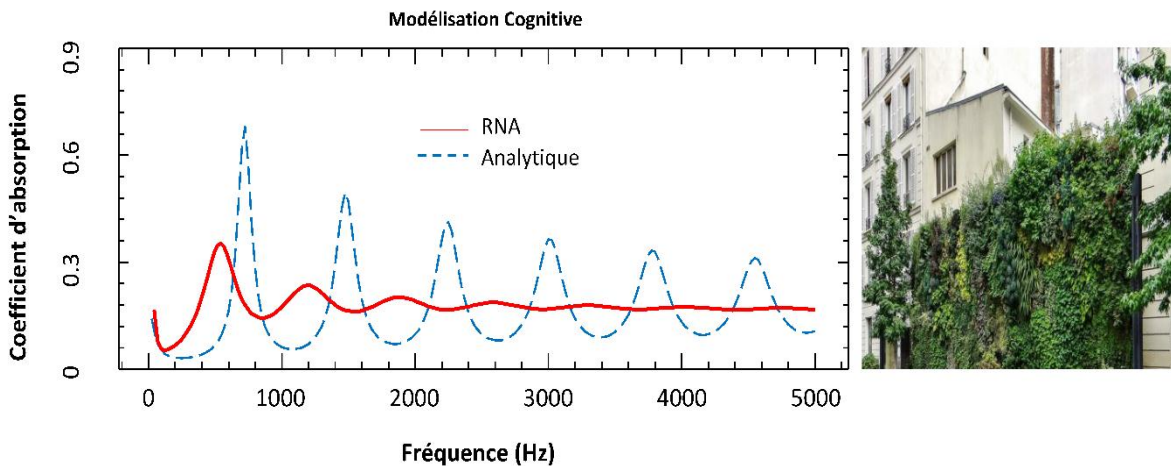


Figure 12 : Analyse comparative entre la courbe analytique et le réseau de neurones artificiels pour le coefficient d'absorption d'un mur végétalisé des bétons de la série C, en tenant compte de l'augmentation du désordre en relation avec la fréquence.

Voici une interprétation détaillée de la figure :

- Courbe Analytique (en bleu) :

Modèle de Milieu Poreux : La courbe analytique est basée sur un modèle de milieu poreux qui prend en compte les propriétés physiques du substrat et du couvert végétal.

Pics de Résonance : Jusqu'à six pics sont observés sur la courbe analytique, correspondant aux fréquences de résonance des pores du mur végétalisé.

Coefficient d'Absorption Maximal : Le coefficient d'absorption acoustique atteint un maximum de 0,85. Cela indique que, à ces fréquences spécifiques, une grande partie du son incident est absorbée par le mur grâce aux effets de résonance et de diffusion dans les pores.

➤ Réseau de Neurones Artificiels (RNA) (en rouge) :

Modèle Statistique : Le RNA est un modèle statistique qui apprend à partir de données expérimentales plutôt que de se baser sur un modèle théorique.

Tendance Générale : Contrairement à la courbe analytique, le RNA ne reproduit pas les pics de résonance, mais suit une tendance générale de la courbe.

Coefficient d'Absorption Constant : À partir de 3500 Hz, le coefficient d'absorption acoustique reste presque constant, se situant entre 0,05 et 0,35. Cela suggère que, selon le modèle du RNA, une faible partie du son incident est absorbée par le mur, et cette absorption ne varie pas significativement avec la fréquence.

La courbe analytique offre une description détaillée des propriétés acoustiques du mur végétalisé en mettant en évidence les fréquences de résonance, tandis que le RNA, basé sur des données expérimentales, fournit une approximation plus générale du comportement acoustique du mur, sans reproduire les détails des pics de résonance. Les deux approches apportent des perspectives complémentaires sur la manière dont le mur réagit acoustiquement en fonction de la fréquence.

III.3. Analyse des résultats obtenus par rapport aux objectifs fixés

Les essais d'atténuation acoustique ont montré que les murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles ont une capacité significative à réduire les niveaux de bruit à proximité, en agissant comme des barrières physiques absorbantes. Nous avons constaté que la densité de la végétation et l'orientation des murs jouent un rôle important dans leur efficacité acoustique, avec des murs présentant une végétation dense et une orientation vers les sources de bruit offrant les performances les plus élevées. Ces résultats confirment notre objectif d'évaluer l'efficacité des murs végétalisés dans l'atténuation du bruit urbain et soulignent leur potentiel à améliorer le confort acoustique dans les environnements urbains.

Les résultats de notre étude mettent en évidence plusieurs facteurs clés qui influencent la performance des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles en termes d'atténuation acoustique. Voici quelques points de discussion sur ces facteurs :

Densité de la végétation : Nous avons observé que la densité de la végétation joue un rôle crucial dans la performance des murs végétalisés, tant du point de vue thermique qu'acoustique. Une végétation dense offre une plus grande surface d'absorption pour le bruit et une meilleure

couverture thermique, ce qui contribue à améliorer l'efficacité des murs végétalisés dans la régulation de la température et la réduction du bruit.

Épaisseur du substrat : L'épaisseur du substrat a également été identifiée comme un facteur important influençant la performance thermique des murs végétalisés. Un substrat plus épais offre une meilleure isolation thermique et une capacité thermique plus élevée, ce qui contribue à atténuer les variations de température à l'intérieur des bâtiments et à réduire les besoins en chauffage et en climatisation.

Orientation des murs : L'orientation des murs végétalisés par rapport aux sources de bruit et au soleil a un impact significatif sur leur efficacité acoustique et thermique. Les murs orientés vers les sources de bruit offrent une meilleure protection contre le bruit urbain, tandis que ceux orientés vers le soleil peuvent bénéficier d'un gain thermique passif, contribuant ainsi à réduire la consommation d'énergie pour le chauffage.

Type de végétation : Bien que notre étude se soit principalement concentrée sur l'effet de la densité de la végétation, le type de végétation utilisé sur les murs végétalisés peut également influencer leur performance. Certains types de plantes peuvent avoir une meilleure capacité d'absorption acoustique ou une plus grande résistance aux variations de température, ce qui peut avoir un impact sur l'efficacité des murs végétalisés dans différentes conditions environnementales.

En analysant ces facteurs, nous pouvons mieux comprendre les mécanismes sous-jacents qui régissent la performance des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles et formuler des recommandations pour optimiser leur conception et leur utilisation dans les environnements urbains. Ces discussions fournissent des indications précieuses pour guider la mise en œuvre de murs végétalisés efficaces et durables dans les villes, contribuant ainsi à créer des espaces urbains plus sains et plus confortables pour les habitants.

IV. CONCLUSION GENERALE

Notre étude a examiné la performance acoustique des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles, mettant en avant leur capacité à réguler la température et à atténuer le bruit urbain. Nos résultats ont montré que ces murs agissent efficacement comme des barrières absorbantes, avec la densité de la végétation et l'orientation par rapport aux sources de bruit comme des facteurs clés. De plus, nous avons souligné l'importance du type de végétation, de l'orientation des murs et de la qualité de la conception pour optimiser leur performance dans les environnements urbains.

L'objectif principal était d'évaluer l'efficacité acoustique de ces murs et d'analyser leur impact sur l'atténuation du bruit urbain, ce qui constitue une contribution significative à la compréhension de la construction durable. Nos résultats offrent des perspectives nouvelles pour intégrer ces solutions dans la conception urbaine afin d'améliorer la qualité de vie tout en favorisant la durabilité environnementale.

Nos recherches mettent en lumière le potentiel des murs végétalisés en béton de pouzzolanes naturelles pour améliorer la performance énergétique des bâtiments urbains et créer des

environnements plus sains et agréables pour les habitants. En fournissant des recommandations pratiques, notre étude ouvre la voie à leur adoption généralisée dans les pratiques de construction et les politiques urbaines axées sur la durabilité.

Malgré ces avancées, plusieurs limitations doivent être considérées, notamment la nécessité d'étudier d'autres types de murs végétalisés et de réaliser des essais sur le terrain pour valider nos résultats. De plus, d'autres aspects comme l'impact sur la biodiversité urbaine et la qualité de l'air méritent d'être explorés dans des recherches futures. En poursuivant ces pistes, nous pourrions approfondir notre compréhension et maximiser l'efficacité de ces murs végétalisés, contribuant ainsi à créer des villes plus durables pour les générations futures.

REFERENCES

- [1] Francois Valegeas. Concevoir et habiter un quartier dit durable : injonctions écologiques et dynamiques collectives à Beauregard (Rennes) et Les Brichères (Auxerre). Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2014.
- [2] Charline Weissenstein. Éco-profil : un outil d'assistance à l'éco-conception architecturale. Université de Lorraine-Sciences de l'architecture. 2012.
- [3] Jennifer Buyck. Urbanisme et humanités environnementales : Eco-critique des situations, pratiques et savoirs du projet urbain. Architecture, aménagement de l'espace. Université Grenoble Alpes, 2022.
- [4] Catherine Roche, Modes d'habiter et sensibilités environnementales émergentes : quels enjeux pour la qualité de vie ? OpenEdition Journals-developpementdurable/18070 ; DOI : <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.18070>. 2021.
- [5] Fabienne Anfosso-Lédée et al, Impacts sanitaires du bruit État des lieux Indicateurs bruit-santé. Agence française de sécurité sanitaire environnementale. 2004.
- [6] ASTM C 618: 2001. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, ASTM C618-00, Annual Book ASTM Standard 04.02: 310-313.
- [7] Sayad Youcef, Comportement des bétons dans les milieux agressifs (cas de Biskra). Université Mohamed Khider – Biskra- Modélisation des matériaux et structures. 2016.
- [8] ASTM C150. Standard specification for Portland cement; 2009.
- [9] NF EN 197-1. Cement. Part 1: composition, Specification and conformity criteria for common cements. (2001)
- [10] International ASTM. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2009.
- [11] Goufi Nourredine, Activation chimique de produits pouzzolaniques pour l'élaboration d'un nouveau ciment. Thèse en Sciences-Université d'USTOMB d'Oran. 2019.

[12] Véronique CEREZO, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2005.