

# ÉVALUATION ET OPTIMISATION DE L'ABSORPTION ACOUSTIQUE DES BETONS LEGERS VEGETALISES POUR LA RESILIENCE DES STRUCTURES FACE AUX CYCLONES TROPICAUX

RAJAONARISON L Dina P (\*1), RANDRIANJA Roger (\*2), RAJAONARISON Eddie Frank(\*1)

(\*1) Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinankaratra

(\*2) Université d'Itasy

Auteur correspondant, e-mail : [heryzaiany@gmail.com](mailto:heryzaiany@gmail.com)

Antananarivo 101, Madagascar

## RESUME

Cette étude met en lumière l'utilisation de bétons légers végétalisés, dont la capacité à absorber le son peut non seulement améliorer le confort intérieur mais aussi augmenter la résilience des bâtiments face aux cyclones en réduisant les vibrations et les contraintes. En tirant parti des propriétés acoustiques des matériaux végétalisés et des avantages des bétons légers, cette méthode vise à optimiser la performance des infrastructures dans les zones à risque. Elle souligne l'importance de renforcer la solidité des structures pour faire face aux défis environnementaux, notamment dans les régions sujettes aux cyclones, et propose une solution novatrice pour améliorer à la fois la résistance structurelle et les performances acoustiques, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique et à la promotion du développement durable.

**Mots clés : Murs végétalisés, Cyclone, Acoustique, Bétons légers, Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).**

## ABSTRACT

This study highlights the use of green lightweight concretes, whose sound-absorbing capacity can not only improve indoor comfort but also increase the resilience of buildings to cyclones by reducing vibrations and stresses. By taking advantage of the acoustic properties of green materials and the benefits of green lightweight concretes, this method aims to optimize the performance of infrastructure in at-risk areas. It highlights the importance of strengthening the strength of structures to meet environmental challenges, particularly in cyclone-prone regions, and proposes an innovative solution to improve both structural strength and acoustic performance, thereby contributing to the fight against climate change and the promotion of sustainable development.

**Keywords: Green walls, Cyclone, Acoustics, Lightweight concrete, Artificial Neural Networks (ANN).**

## **INTRODUCTION**

Les cyclones tropicaux constituent une menace majeure pour les régions côtières et insulaires [1]. Leurs vents violents et leurs précipitations torrentielles causent d'importants dommages aux infrastructures et aux habitats humains [2]. Face à l'intensification et à la fréquence accrue de ces phénomènes liés aux changements climatiques, il est essentiel de développer des stratégies de résilience pour protéger les structures et les communautés vulnérables.

L'absorption acoustique des matériaux de construction, en plus d'améliorer le confort intérieur, peut renforcer la résilience des structures face aux cyclones en réduisant les vibrations et les contraintes induites [3]. L'article propose d'évaluer et d'optimiser l'absorption acoustique des bétons légers végétalisés comme une stratégie innovante pour renforcer la résilience des structures exposées aux cyclones tropicaux. En combinant les propriétés acoustiques des matériaux végétalisés avec les avantages des bétons légers, cette approche promet d'améliorer la performance globale des infrastructures dans les zones à risque. L'étude examine les fondements théoriques de l'absorption acoustique, les caractéristiques des bétons légers végétalisés et les impacts des cyclones sur les structures. Une méthodologie expérimentale rigoureuse permettra d'évaluer l'efficacité de cette solution et de proposer des recommandations pratiques pour son application en ingénierie civile et en construction durable.

Face aux défis environnementaux croissants, la résilience des structures est devenue une préoccupation majeure, surtout dans les régions exposées aux cyclones tropicaux. Avec l'urbanisation croissante dans ces zones, il est impératif de développer des stratégies garantissant la sécurité et la durabilité des infrastructures. L'étude de l'absorption acoustique des bétons légers végétalisés dans ce contexte est particulièrement importante. Elle offre une approche novatrice pour renforcer la résistance des structures tout en améliorant leur performance acoustique [4]. Cette recherche est pertinente pour la lutte contre le changement climatique, en atténuant les impacts des cyclones exacerbés par ces changements et en promouvant un développement durable. Pour les professionnels de l'ingénierie et de la construction, cette étude fournit des données empiriques sur l'efficacité des bétons légers végétalisés, offrant des perspectives précieuses pour leur application dans des projets réels. L'intégration des résultats de cette recherche dans les pratiques de conception et de construction contribuera à créer des bâtiments plus sûrs, durables et confortables pour les populations exposées aux risques cycloniques.

## **I. MATERIELS ET METHODES**

Les cyclones tropicaux, également appelés ouragans ou typhons selon les régions, sont parmi les phénomènes météorologiques les plus puissants et destructeurs, causant des dégâts considérables aux bâtiments, infrastructures et habitations en raison des vents violents, des pluies torrentielles, des inondations et des ondes de tempête [5]. L'absorption acoustique est un phénomène essentiel en acoustique des matériaux et en science du son, désignant la capacité d'un matériau à convertir l'énergie sonore en chaleur plutôt qu'à la renvoyer [6]. Cette capacité dépend de divers facteurs tels que la composition, la structure poreuse, l'épaisseur et la densité du matériau [6].

Malgré les progrès dans l'étude de l'absorption acoustique des matériaux végétalisés, des lacunes persistent. Il est notamment nécessaire de développer des normes de test harmonisées pour

évaluer les performances acoustiques de ces matériaux et de standardiser les méthodes de caractérisation de leurs propriétés physiques et acoustiques.

Dans le cadre de cet article, cette revue de littérature fournira une base solide pour évaluer le potentiel des bétons légers végétalisés en tant que matériaux absorbants acoustiques et identifier les opportunités d'optimisation pour améliorer leur performance dans des environnements soumis aux cyclones tropicaux. Les connaissances tirées des études antérieures sur l'absorption acoustique des matériaux végétalisés seront cruciales pour guider la méthodologie expérimentale et l'analyse des données de cette thèse.

### **I.1. Mécanismes de dommage causé par les cyclones tropicaux**

Sur fond d'amélioration de la vie humaine, les scientifiques explorent constamment des méthodes fiables pour résoudre les problèmes. Cependant, nous sommes encore en train de comprendre pleinement les phénomènes naturels, en modélisant ces phénomènes pour en prévoir l'évolution dans le temps et l'espace.

Les cyclones tropicaux peuvent exercer des forces extrêmes sur les structures, entraînant divers types de dommages. Voici les principaux mécanismes de dommage causés par les cyclones tropicaux : Vent fort, Pression atmosphérique, Ondes de tempête, Pluies torrentielles. En comprenant les mécanismes de dommage, il est possible de concevoir des structures plus résilientes capables de résister aux forces extrêmes des cyclones tropicaux.

Un choix utilisé pour représenter les données pluviométriques est la distribution gamma définie par la loi de fonction de densité de probabilité:

$$f(x) = [(x/\beta)^{\alpha-1} / \beta \Gamma(\alpha)] e^{-x/\beta} \quad (1)$$

Avec  $x$ ,  $\alpha$ ,  $\beta > 0$ , où  $\alpha$  est le paramètre de forme de la distribution tandis que  $\beta$  est le paramètre d'échelle.

La quantité  $\Gamma(\alpha)$  est une valeur de la fonction mathématique standard appelée fonction gamma, définie par l'intégrale définie :

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (\text{wilks, 1995}). \quad (2)$$

Pour compléter les valeurs manquantes, différentes méthodes peuvent être utilisées, mais le choix dépend de la longueur et de la distance séparant l'écart. La méthode très simple est exprimée par cette relation suivante:

$$P_m = (P_{m-1} + P_{m+1}) / 2. \quad (3)$$

Autrement dit, la seule valeur manquante du mois  $m$  peut attribuer la moyenne entre les enregistrements de précipitations du mois précédent ( $m-1$ ) et ceux du mois suivant ( $m + 1$ ) [7].

la méthode la plus couramment utilisée pour l'interpolation sur une grille régulière à partir de points espacés de manière aléatoire est basée sur le calcul d'une moyenne pondérée de points d'échantillonnage représentatifs, qui serait écrite comme suit:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n z_i w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (4)$$

où  $Z_p$  est la valeur interpolée,  $Z_i$  est la valeur de la précipitation à l'emplacement ( $x_i, y_i$ ),  $w_i$  est la fonction de pondération et  $n = n_b$  est le nombre de points d'échantillon. La fonction de pondération  $w_i$  est donnée par  $w_i = 1/d_i^2$  où  $d_i$  est la distance entre  $z_p$  et  $z_i$ . Dans cette méthode, les poids sont calculés en utilisant un rayon de recherche et la fonction de pondération pour  $d_i/R < 1$  et  $w_i = 0$  pour  $d_i/R \geq 1$  [7]. En effet, l'aspect spatial de la climatologie des précipitations sur Madagascar peut être adapté à partir de cette méthode. Cependant, le choix de  $R$  dépend de la densité des points de données et doit être choisi de manière à ce que le cercle d'échantillonnage comprenne au moins cinq points d'échantillonnage.

Pour comprendre la structure, donnons d'abord les équations qui obéissent à l'évolution de l'atmosphère dans un cyclone tropical:

L'équation de mouvement écrite par unité de masse sous la forme suivante:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad} p - 2\vec{\Omega} \wedge \vec{u} - g\vec{k} + \vec{F}f \quad (5)$$

Où  $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$  représente le vecteur de vent en trois dimensions (ms-1),  $\rho$  la densité de l'air sec (unité kg.m-3),  $p$  la pression de l'air (unité Pa),  $g$  la gravité (unité m.s-2) et  $\vec{\Omega}$  la vitesse angulaire de la rotation terrestre (unités-1).

En négligeant les forces de frottements et en faisant l'hypothèse de f-plan et de la pellicule mince, l'équation de mouvement devient:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad} p - f(\vec{k} \wedge \vec{u}) - g\vec{k} \quad (6)$$

Avec  $f = 2\Omega \sin\varphi$  (unité s-1) représente le paramètre de Coriolis.

En règle générale, le flux de direction classique a été largement utilisé pour la prévision de trajectoire de cyclone tropical et la compréhension du mouvement d'un cyclone tropical [8] [9].

Cette équation (4) est souvent décomposée en une équation pour le vent horizontal  $\vec{V}_h$  :

$$\frac{d\vec{V}_h}{dt} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad}_h p - f(\vec{k} \wedge \vec{V}_h) \text{ avec } \vec{V}_h = u\vec{i} + v\vec{j}, \text{ ce qui donne :}$$

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - fv \\ \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - fu \end{cases} \quad (7)$$

et une équation pour la vitesse verticale  $w$  :

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (8)$$

Compte tenu des interactions complexes entre la circulation des cyclones tropicaux et son environnement, le mouvement des cyclones tropicaux ne devrait pas ressembler à une feuille dirigée uniquement par les courants dans le cours d'eau. Il reste donc deux problèmes fondamentaux concernant le principe de pilotage. Premièrement, pourquoi la direction classique peut-elle jouer un rôle dominant dans le mouvement des cyclones tropicaux? Deuxièmement, quand le mouvement d'un cyclone tropical peut-il s'écarter considérablement de la direction classique?

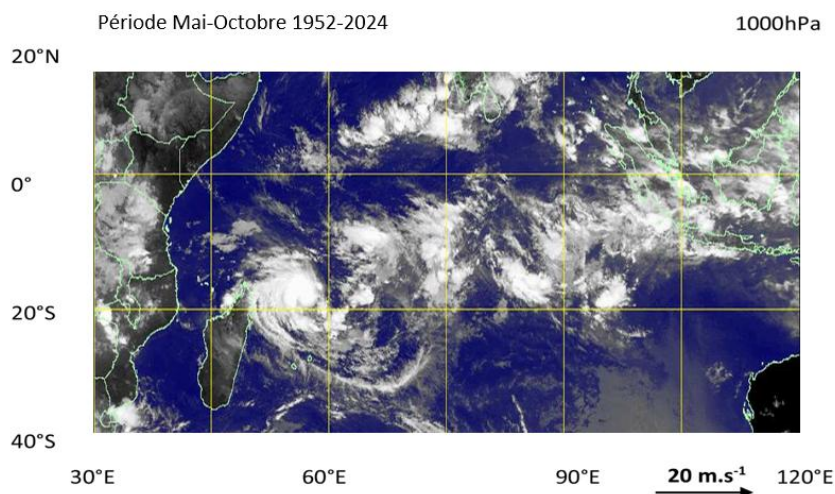


Fig.1 : Vitesse climatique moyenne de 1 000 hPa sur le sud de l'océan Indien entre 1952 et 2024, hiver austral

Lorsqu'on se trouve sous le tropique (30°N-30°S), l'hypothèse du f-plan n'est plus valide, il faut faire l'hypothèse du  $\beta$ -plan équatorial et l'équation de mouvement horizontal s'écrit :

$$\frac{d\vec{V}_h}{dt} = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad}_h p - \beta y (\vec{k} \wedge \vec{V}_h) \quad (9)$$

L'équation d'état qui s'écrit, en considérant l'atmosphère comme un gaz parfait, sous la forme :

$$p = \rho R_d T \quad (10)$$

où  $p$  est la pression,  $\rho$  la densité de l'air,  $R_d$  la constante des gaz parfaits pour l'air sec et  $T$  la température.

Si l'air contient de la vapeur d'eau, cette équation d'état est donnée approximativement par :

$$p = \rho R_d T (1 + 0.61 q_v) \quad (11)$$

où  $q_v$  est l'humidité spécifique (unité kg.kg<sup>-1</sup>).

Pour la prévision des intensités cycloniques, notre objectif est d'utiliser uniquement les variables prédictrices qui offrent les meilleures performances du modèle de réseau de neurones. Dans notre cas, nous utiliserons l'"algorithme de Gram-Schmidt amélioré" pour trier les variables pertinentes. L'algorithme d'orthogonalisation de Gram-Schmidt considère la valeur de la variable prédictrice et la sortie requise comme un vecteur, c'est-à-dire

$$X = \begin{pmatrix} x_1^1 & \cdots & x_p^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^N & \cdots & x_p^N \end{pmatrix} = (X_1 X_2 \dots X_p) \text{ la matrice d'entrée,}$$

Où

$$X_p = \begin{pmatrix} x_p^1 \\ \vdots \\ x_p^N \end{pmatrix} \text{ le vecteur de l'entrée } p, \text{ et}$$

$$e^x = Y = \begin{pmatrix} y^1 \\ \vdots \\ y^N \end{pmatrix} \text{ le vecteur de sortie}$$

$N$  étant le nombre d'échantillons. À chaque itération, nous devons trouver le vecteur d'entrée qui explique le mieux la sortie. Pour cela, nous calculons la valeur maximale du carré du cosinus de l'angle entre le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie :

$$\max_{1 \leq i \leq p} [\cos^2(X_i, Y)] = \max_{1 \leq i \leq p} \left[ \left( \frac{X_i^T Y}{\sqrt{(X_i^T X_i)(Y^T Y)}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Et après chaque itération, nous éliminons le meilleur vecteur d'entrée, et sa contribution en projetant tous les vecteurs d'entrée restants et le vecteur de sortie sur son sous-espace orthogonal.

Les résultats des tests seront validés et interprétés à la lumière des objectifs de recherche et des hypothèses formulées dans le cadre de la thèse. Les implications pratiques des résultats seront discutées, et des recommandations pour la conception et l'utilisation des bétons légers végétalisés seront formulées.

## I.2. Choix des matériaux et des compositions de béton léger

Les matériaux suivants ont été utilisés pour produire les différents bétons considérés dans le programme expérimental.

### I.2.1 Pouzzolane

Nous avons opté pour le site situé dans le massif d'Ankaratra pour effectuer cette étude

L'analyse chimique est appliquée sur des échantillons de pouzzolanes réduites en poudre. 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 CuK $\alpha$  monochromatique avec une longueur d'onde  $\lambda = 1,7903 \text{ \AA}$  à une tension de 40 kV et un courant de 30 mA. Les résultats obtenus des pouzzolanes sont montrés sur la figure 2.

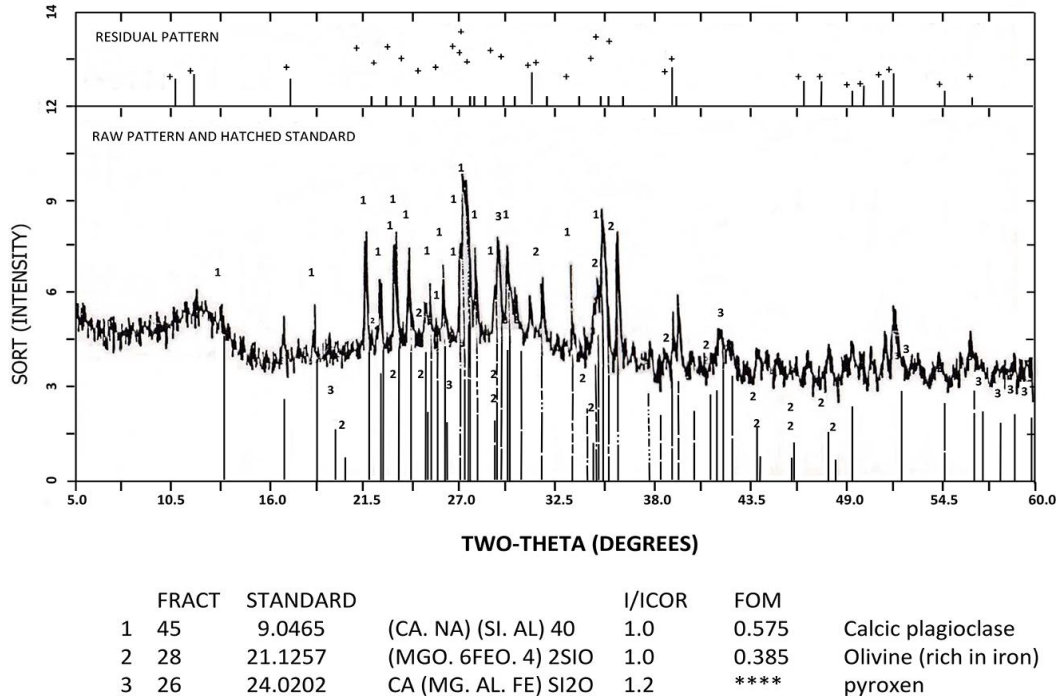


Fig. 2 Diffractogramme de l'échantillon

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 : SiO<sub>2</sub> de 43 à 55% ; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 12 à 24% ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 8 à 20%. Ces limites ont pour but essentiel d'assurer la bonne cimentation, cohésion entre les éléments chimiques.

### I.2.2 Ciment

Le ciment utilisé lors de nos expériences est de type I [10]. Les propriétés physiques et la composition chimique de ce ciment sont énumérées dans le tableau 6.

Tableau 1: Propriétés physiques et chimiques du ciment

Gravité spécifique (g/cm <sup>3</sup> )		3,15	ASTM C 188-03
Surface spécifique (cm <sup>2</sup> /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 <sub>2</sub>	20,5	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,52	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,71	
	CaO	63,93	
	MgO	2,39	
	K <sub>2</sub> O	1,01	
	SO <sub>3</sub>	3,3	
	Na <sub>2</sub> O	0,19	
	LOI	0,97	

### ***1.2.3 Eau***

De l'eau potable répondant aux exigences de la norme ASTM C 1602-06 [11] a été utilisée pour mélanger les bétons, et de l'eau de chaux saturée [12] a été utilisée pour durcir les échantillons.

### ***1.2.4 Méthodes d'essai***

Pour les mélanges, le volume réel ( $V_r$ ) de granulats de pouzzolanes est constant pour les variantes notées par lots Bb.1 à Bb.6. De cette considération, nous avons procédé à une diminution progressive du dosage en ciment afin de se satisfaire sur les résultats d'indice des vides. La quantité des fines pouzzolaniques utilisée a été calculée pour satisfaire la valeur du volume absolu total du mélange (en substitution du ciment). Il est à noter que pour les lots Bb.7 et Bb.8, nous avons diminué la quantité de  $V_r$  afin que son efficacité soit significative sur l'indice des vides. Le Tableau 2 donne la composition des mélanges réalisés dans la présente étude.

*Tableau 2: Composition des bétons binaires.  $V_c$  est le volume du ciment,  $V_f$  est le volume des fines,  $V_{ab}$  est le volume absolu des granulats dans 1 m<sup>3</sup> de béton et  $V_r$  est le volume réel des granulats de pouzzolane*

<b>Dénomination</b>	<b>Bb.1</b>	<b>Bb.2</b>	<b>Bb.3</b>	<b>Bb.4</b>	<b>Bb.5</b>	<b>Bb.6</b>	<b>Bb.7</b>	<b>Bb.8</b>
[01] $V_c$	146	140	122	120	115	85	134	120
[01] $V_f$	182	222	139	77	00	00	254	287
[01] $V_{ab}$	301	301	301	301	301	301	243	188

Les objectifs principaux pour les bétons courants et les bétons de granulats légers sont distincts, mais complémentaires. Pour les bétons courants, l'accent est mis sur la maximisation de la résistance mécanique en minimisant la porosité. Pour les bétons de granulats légers, il est important de concilier une faible porosité avec une masse volumique faible et des propriétés physiques et mécaniques adéquates.

### I.3 Méthodes de caractérisation acoustique

La caractérisation acoustique des bétons légers végétalisés est essentielle pour évaluer leur capacité à absorber les ondes sonores dans différentes conditions. Cette section décrit les méthodes expérimentales qui seront utilisées pour caractériser l'absorption acoustique des échantillons de béton léger végétalisé.

La transformation de l'équation d'onde dans l'espace réciproque est un outil important pour l'étude de la propagation des ondes acoustiques dans les solides homogènes anisotropes. Elle permet de simplifier les calculs et d'obtenir des solutions analytiques pour des géométries simples. En régime harmonique, l'équation d'onde dans un solide homogène anisotrope s'écrit:

$$-\rho\omega^2 u_i = C_{ijkl} u_{l,jk}, i, j, k, l = 1,2,3 \quad (13)$$

- $u_i(x, y, z, t)$ : Composante selon  $i$  du champ de déplacement au point  $(x, y, z)$  et à l'instant  $t$ .
- $\omega$ : Pulsation, fréquence angulaire de l'onde acoustique.
- $\rho$ : Densité du solide.
- $C_{ijkl}$ : Composantes du tenseur des rigidités du solide. Dans le cas orthotrope, le nombre de composantes est réduit à 9.

L'équation d'onde dans un solide homogène anisotrope, exprimée dans le domaine spatial, est complexe car elle implique des dérivées spatiales dans les trois directions  $(x, y, z)$ . Cette complexité rend sa résolution directe difficile. Pour simplifier la résolution de l'équation d'onde, on la transforme dans l'espace réciproque des vecteurs d'ondes. Cette transformation permet de remplacer les dérivées spatiales par des multiplications par les vecteurs d'ondes. On définit pour cela les déplacements particuliers dans l'espace de Fourier :

$$\hat{u}_\alpha(k_x, k_y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{R^2} u_\alpha(x, y, z) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy, \alpha = x, y, z \quad (14)$$

Dans ce cas, l'équation de propagation peut se mettre sous une forme matricielle :

$$\left( \bar{Z} - i\bar{Y} \frac{\partial}{\partial z} - \bar{X} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \begin{pmatrix} \hat{u}_x(k_x, k_y, z) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y, z) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y, z) \end{pmatrix} = 0 \quad (15)$$

où  $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ , sont des matrices  $3 \times 3$  dont les éléments sont explicités dans [13]. La transformation de l'équation de propagation dans l'espace réciproque présente plusieurs avantages:

- Elle permet de simplifier considérablement l'équation de propagation et de la ramener à une équation différentielle ordinaire simple.



- Elle facilite la résolution de l'équation pour des géométries complexes.
- Elle permet d'obtenir des solutions analytiques pour des cas simples.

Cherchons en une solution de la forme :

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_x(k_x, k_y, z) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y, z) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{u}_x(k_x, k_y) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y) \end{pmatrix} \exp(i\gamma z) \quad (16)$$

Par substitution dans l'expression (15), il vient :

$$\bar{D}(k_x, k_y, \gamma) \begin{pmatrix} \hat{u}_x(k_x, k_y) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y) \end{pmatrix} = 0, \quad (17)$$

$$\bar{D}(k_x, k_y, \gamma) = \begin{pmatrix} A + C_{55}\gamma^2 & B & \gamma C \\ B & D + C_{44}\gamma^2 & \gamma E \\ \gamma C & \gamma E & F + C_{33}\gamma^2 \end{pmatrix}$$

où :

$$\begin{cases} A = K_x^2 C_{11} + K_y^2 C_{66} - \rho\omega^2, B = K_x K_y (C_{12} + C_{66}), C = K_x (C_{13} + C_{55}) \\ D = K_x^2 C_{66} + K_y^2 C_{22} - \rho\omega^2, E = K_y (C_{23} + C_{44}), F = K_x^2 C_{55} + K_y^2 C_{44} - \rho\omega^2 \end{cases} \quad (18)$$

L'expression (5) possède des solutions non triviales uniquement lorsque le déterminant de la matrice D est nul, ce qui conduit à l'annulation d'un polynôme de degré 3 en  $\gamma^2$ . Ce système a donc trois solutions, notées  $z_{12}$ ,  $z_{22}$  et  $z_{32}$ , permettant de déterminer les 6 racines de  $\gamma$  :  $\gamma_1 = z_1$ ,  $\gamma_2 = -z_1$ ,  $\gamma_3 = z_2$ ,  $\gamma_4 = -z_2$ ,  $\gamma_5 = z_3$ ,  $\gamma_6 = -z_3$ . En substituant ces solutions dans la relation de compatibilité (17), on obtient les composantes des vecteurs déplacements (non normés) correspondants à chacune des 6 racines.

$$\begin{pmatrix} W_{xj} \\ W_{yj} \\ W_{zj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (F + C_{33}\gamma_j^2)(D + C_{44}\gamma_j^2) - E^2\gamma_j^2 \\ EC\gamma_j^2 - (F + C_{33}\gamma_j^2)B \\ EB\gamma_j - C\gamma_j(D + C_{44}\gamma_j^2) \end{pmatrix}, j = [1,6] \quad (19)$$

La solution générale des déplacements particulières dans la paroi est obtenue par une combinaison linéaire de ces vecteurs :

$$\hat{u}_\alpha(k_x, k_y, z) = \sum_{j=1}^6 A_j W_{\alpha j} \exp(i\gamma_j z), \alpha = x, y, z \quad (20)$$

Comme prévu, la théorie confirme l'existence de 6 ondes (3 montantes et 3 descendantes) dans la plaque, en raison du couplage des 3 modes de propagation dans un solide anisotrope [14].

Écrivons cette dernière relation aux deux interfaces avec l'air, à  $z=0$  et à  $z=h$ . Il en résulte :

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_x(k_x, k_y, h) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y, h) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y, h) \\ \hat{u}_x(k_x, k_y, 0) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y, 0) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y, 0) \end{pmatrix} = \bar{R}(k_x, k_y) \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$\bar{R}$  est une matrice de transfert pour une couche solide homogène, orthotrope ou isotrope. Pour exprimer les éléments de contraintes  $\hat{T}_{xz}(k_x, k_y, z)$ ,  $\hat{T}_{yz}(k_x, k_y, z)$  et  $\hat{T}_{zz}(k_x, k_y, z)$ , on insère la solution (20) dans la loi de comportement du solide et on utilise la relation reliant le tenseur des déformations au vecteur déplacement [14]. En spécifiant le système obtenu aux positions  $z=0$  et  $z=h$ , une seconde relation matricielle émerge :

$$\begin{pmatrix} \hat{T}_x(k_x, k_y, h) \\ \hat{T}_y(k_x, k_y, h) \\ \hat{T}_z(k_x, k_y, h) \\ \hat{T}_x(k_x, k_y, 0) \\ \hat{T}_y(k_x, k_y, 0) \\ \hat{T}_z(k_x, k_y, 0) \end{pmatrix} = \bar{P}(k_x, k_y) \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$\bar{P}$  est également une matrice  $6 \times 6$  dont les éléments sont connus. La matrice reliant les contraintes et les déplacements particulières à l'entrée et à la sortie de la lame solide est finalement obtenue en éliminant simplement la matrice des constantes  $A_i$  :

$$\begin{pmatrix} \hat{T}_{zx}(k_x, k_y, h) \\ \hat{T}_{zy}(k_x, k_y, h) \\ \hat{T}_{zz}(k_x, k_y, h) \\ \hat{T}_{zx}(k_x, k_y, 0) \\ \hat{T}_{zy}(k_x, k_y, 0) \\ \hat{T}_{zz}(k_x, k_y, 0) \end{pmatrix} = \bar{S}(k_x, k_y) \begin{pmatrix} \hat{u}_x(k_x, k_y, h) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y, h) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y, h) \\ \hat{u}_x(k_x, k_y, 0) \\ \hat{u}_y(k_x, k_y, 0) \\ \hat{u}_z(k_x, k_y, 0) \end{pmatrix}, \bar{S} = \bar{P}\bar{R}^{-1} \quad (23)$$

Pour exprimer le coefficient de transmission de la plaque, on réécrit ce système en tenant compte du fait que le fluide entourant la paroi (l'air) est considéré comme parfait, ce qui implique que les contraintes  $\hat{T}_{xz}$  et  $\hat{T}_{yz}$  sont nulles en  $z=0$  et  $z=h$ . Cette condition permet d'éliminer les déplacements tangentiels  $\hat{u}_x$  et  $\hat{u}_y$  (inconnus si l'on néglige la viscosité de l'air) au profit des déplacements normaux  $\hat{u}_z$  à l'entrée et à la sortie de la plaque. En réinjectant les relations obtenues dans le système (23), on obtient un système matriciel  $2 \times 2$  reliant uniquement les contraintes normales et les vitesses normales à l'entrée et à la sortie du solide :

$$\begin{pmatrix} \hat{T}_{zz}(z=h) \\ \hat{T}_{zz}(z=0) \end{pmatrix} = \bar{L} \begin{pmatrix} \hat{V}_z(z=h) \\ \hat{V}_z(z=0) \end{pmatrix} \quad (24)$$

$\bar{L}$  est une matrice  $2 \times 2$  dont les éléments dépendent uniquement de ceux de la matrice  $6 \times 6 \bar{S}$ . Ces deux grandeurs étant continues à l'interface entre l'air et la paroi, les relations de continuité se formulent ainsi :

$$\begin{cases} T_{zz}(z = h) = -p_a^{\text{air}}(z = h) = -i\rho_{\text{air}} \omega(\phi_i + \phi_r) \\ T_{zz}(z = 0) = -p_a^{\text{air}}(0) = -i\rho_{\text{air}} \omega\phi_t \\ V_z(z = h) = V_z^{\text{air}}(h) = i \frac{\omega}{C_{\text{air}}} \cos(\theta)(\phi_r - \phi_i) \\ V_z(z = 0) = V_z^{\text{air}}(0) = -i \frac{\omega}{C_{\text{air}}} \cos(\theta)(\phi_t) \end{cases} \quad (25)$$

$\phi_i$ ,  $\phi_r$  et  $\phi_t$  représentent respectivement les potentiels de vitesse des ondes planes incidente, réfléchie et transmise. Le coefficient de transmission de la plaque est finalement exprimé comme suit :

$$\tau(\omega, \theta, \varphi) = \left| \frac{2ZL_{21}}{L_{12}L_{21} - (L_{11} + Z)(L_{22} - Z)} \right|^2, Z = \frac{Z_{\text{air}}}{\cos(\theta)} \quad (26)$$

- $\theta$  représente l'affaiblissement acoustique en décibels (dB),
- $L_1$ ) est l'intensité acoustique à l'entrée,
- $L_2$  est l'intensité acoustique à la sortie.

Alors que l'affaiblissement acoustique en champ diffus s'obtient conformément à l'expression ci-après :

$$\alpha = -20 \log_{10} \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \quad (27)$$

où :

- $\alpha$  représente l'affaiblissement acoustique en décibels (dB),
- $I_1$  est l'intensité acoustique à l'entrée,
- $I_2$  est l'intensité acoustique à la sortie.

Les murs végétalisés, constitués de plusieurs couches de matériaux, présentent des propriétés acoustiques complexes. Le formalisme des matrices de transfert, développé par Le Ridant[15], offre une approche efficace pour analyser la transmission acoustique à travers ces systèmes multicouches.

Pour chaque couche "p" du mur végétalisé, on définit un vecteur d'état  $\psi_p$  qui regroupe les composantes des champs de contraintes et de déplacements:

$$\psi_p = (T_{xz}, T_{yz}, T_{zz}, u_x, u_y, u_z) \quad (28)$$

où:

- $T_{xz}, T_{yz}, T_{zz}$ : Composantes des contraintes tangentiels et normales dans le plan de la couche.
- $u_x, u_y, u_z$ : Composantes des déplacements dans les directions x, y et z.

Le vecteur d'état est considéré continu à l'interface entre deux couches, supposant une adhérence parfaite entre elles.

Les relations de continuité à l'interface entre deux couches permettent de relier les vecteurs d'état des couches adjacentes. Ces relations expriment la conservation des contraintes et des déplacements à l'interface.

Pour chaque couche, on définit une matrice de transfert  $T_p$  qui relie le vecteur d'état à l'entrée de la couche à celui à la sortie:

$$\psi_{p+1} = T_p * \psi_p \quad (29)$$

En appliquant successivement les matrices de transfert de chaque couche, on obtient une matrice de transfert globale  $T$  qui relie le vecteur d'état à la surface supérieure du mur végétalisé à celui à la surface inférieure:

$$\psi_N = T * \psi_1 \quad (30)$$

Le formalisme des matrices de transfert présente plusieurs avantages pour l'analyse de la transmission acoustique dans les murs végétalisés:

- Il permet de résoudre le problème de transmission acoustique pour des systèmes multicouches complexes.
- Il est relativement simple à mettre en œuvre.
- Il peut être facilement implémenté dans des logiciels de simulation numérique.

## **Conclusion**

Le formalisme des matrices de transfert est un outil précieux pour l'étude de la transmission acoustique dans les murs végétalisés. Il permet de simplifier les calculs et d'obtenir des résultats précis pour des configurations géométriques complexes.

## **II. RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

### **II.1 Impact des cyclones tropicaux sur les structures**

Nous avons évalué la résilience des structures face aux cyclones tropicaux pour garantir leur capacité à résister aux forces extrêmes induites par ces événements météorologiques. Voici les principaux aspects à prendre en compte :

#### **II.1.1 Analyse de scénarios extrêmes**

Nous avons pris en compte une gamme de scénarios extrêmes, y compris des événements météorologiques de forte intensité et des conditions environnementales défavorables, pour garantir que les structures sont capables de résister à une variété de conditions et de prévenir les dommages potentiels.

L'Âge est obtenu en sélectionnant la source de date liée à l'intensité du phénomène cyclonique. Le moment où l'intensité est passée de 35 nœuds a été choisi comme origine de la date. Ensuite, nous comptons le temps écoulé avant cette origine en nombre négatif, et le temps écoulé après en nombre positif.

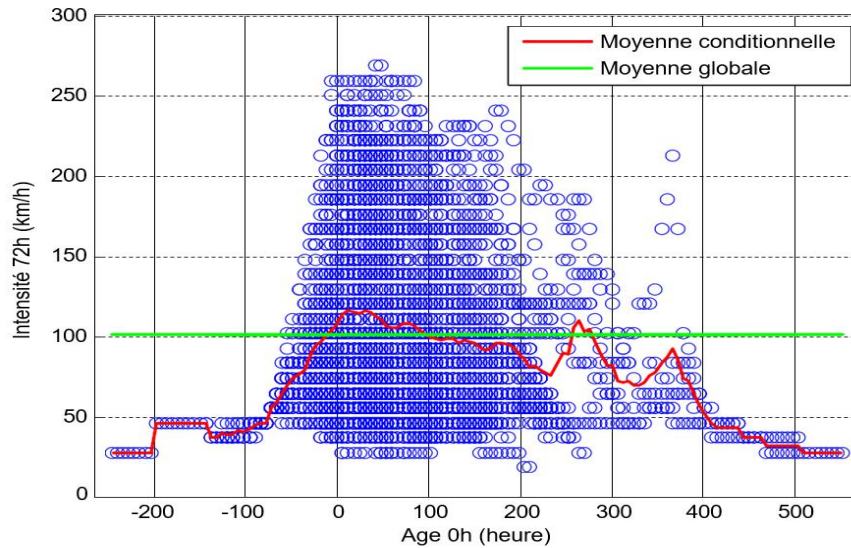


Fig.3 : Intensité à 72h en fonction de l'âge du phénomène cyclonique.

La figure 3 montre le taux d'intensité du cyclone en fonction de l'âge en 72 heures. En général, l'intensité est maximale quelques heures après la sélection de l'origine (courbe rouge sur la figure).

La figure 4 montre les nombres et l'écart type de cette distribution pour chaque valeur d'âge. Le nombre le plus élevé correspond à l'âge où la grandeur est maximale.

L'âge situe le phénomène dans le temps. Nous savons que l'intensité du phénomène de cyclone augmente généralement avant d'atteindre un maximum, puis diminue. En utilisant cette variable, nous pouvons connaître la phase de développement du phénomène, et cela facilitera sa prévision.

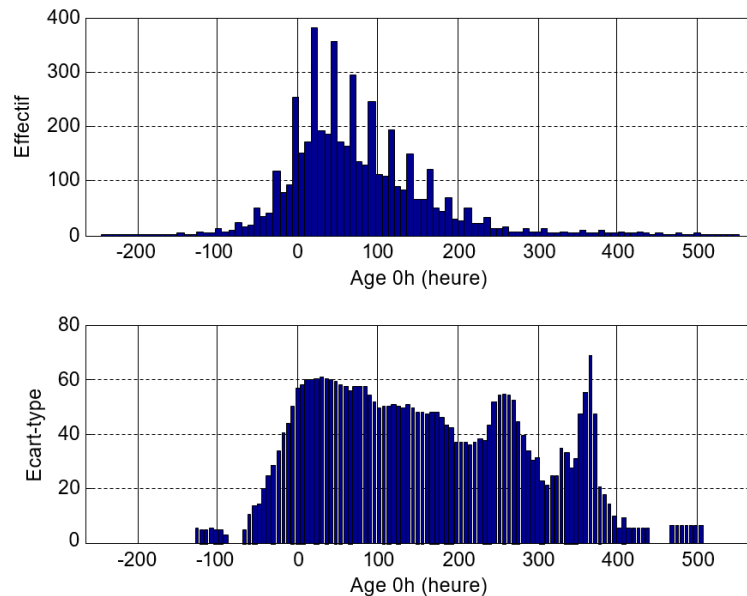


Fig.4 : Effectifs (en haut) et écart- types (en bas) des intensités à 72h pour chaque âge.

## II.1.2 Modélisation des charges

Nous avons modélisé les charges exercées par les cyclones tropicaux, telles que les vents, les pressions atmosphériques, les ondes de tempête et les pluies torrentielles. Des simulations numériques et des tests en soufflerie ont été utilisés pour évaluer l'impact de ces charges sur les différentes parties de la structure.

Dans ce travail, un réseau de neurones à deux couches cachées est utilisé (Figure 5). La fonction d'activation dans une couche cachée est une fonction sigmoïde, tandis que pour la couche de sortie nous utilisons une fonction linéaire. La sortie du réseau est l'intensité du cyclone à 12h, 24h, 36h, 48h, 60h ou 72h.

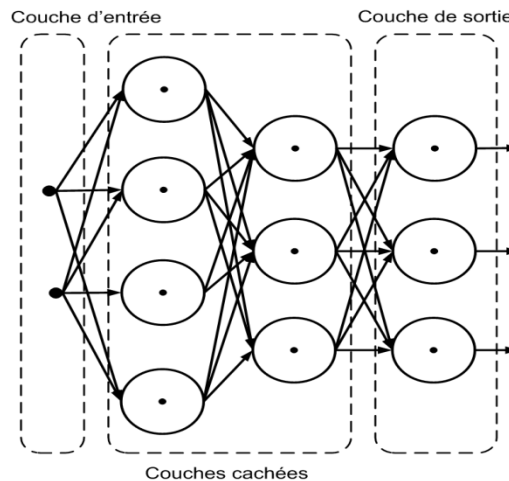


Fig.5 : Schéma représentatif d'un PMC à deux couches cachées

Typiquement, il est structuré en plusieurs couches, où les sorties d'une couche servent d'entrée à la couche suivante dans la hiérarchie. Un réseau de neurones d'approximation universelle est constitué d'un Perceptron Multicouche (PMC) à deux couches. Dans la première couche, les fonctions d'activation sont des fonctions intégrables au sens de Riemann, qui ne sont pas polynomiales. La deuxième couche utilise une fonction d'activation linéaire.

La circulation cyclonique actuelle représentée dans le bassin centre-sud de l'océan Indien par exemple est en train de se déplacer vers le sud, laissant la circulation anticyclonique croissante.

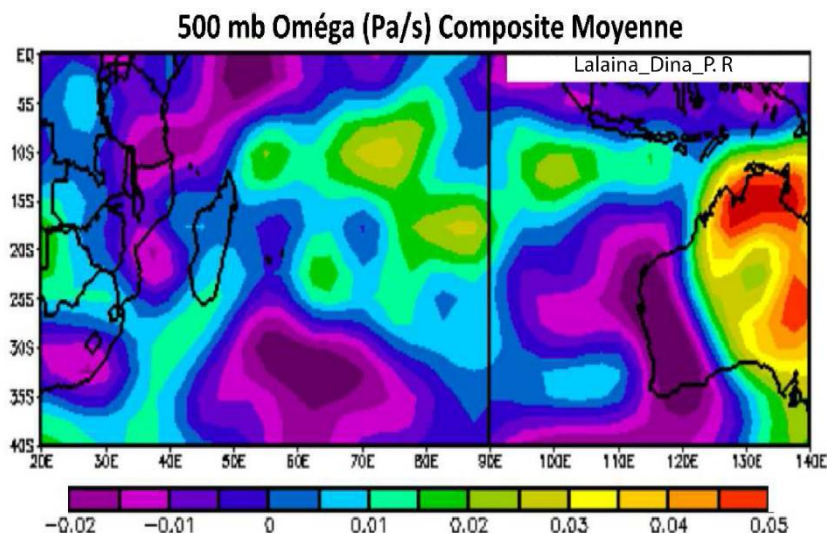


Fig.6: Profils composites moyens de février pour la climatologie de 2000 à 2024: Oméga à mi-hauteur

En règle générale, on inspecte presque dans la zone extratropicale un gradient de température de l'océan chaud et petit, situé à plus de 5° de l'équateur, un creux de surface recouvert d'un léger cisaillement du vent dans la troposphère et une condition essentielle de débordement intense et divergent dans la haute troposphère selon la figure 6. En conséquence, ces conditions jouent un rôle important et inhibent le cyclone tropical qui frappe Madagascar, ce qui constitue un record en décembre et janvier.

En intégrant ces éléments dans l'évaluation de la résilience des structures, nous pouvons concevoir et construire des bâtiments et des infrastructures capables de résister aux forces extrêmes des cyclones tropicaux et de limiter les dommages potentiels causés par ces événements météorologiques dévastateurs. En adaptant les compositions de béton léger végétalisé pour optimiser leur absorption acoustique, nous avons renforcé la résilience des structures face aux cyclones tropicaux tout en améliorant le confort acoustique des occupants. Cette approche intégrée permet de concevoir des bâtiments et des infrastructures durables et résilients, capables de faire face aux défis posés par les événements météorologiques extrêmes.

## II.2 Mur en béton léger de pouzzolane

Le béton est un matériau composite caractérisé par une microstructure poreuse avec des pores de différentes tailles et de distribution aléatoire. La structure poreuse et la distribution des pores au sein du béton jouent un rôle très important non seulement sur la résistance mécanique, mais aussi sur les caractéristiques acoustiques. Le réseau poreux est aussi le récipient de l'eau liquide, de l'eau en forme de vapeur et de l'air sec. Pour ces raisons, la porosité (et sa distribution) devient un paramètre très important pour la caractérisation du béton.

### II.1.1 Indices des vides

Le tableau 3 représente les indices des vides intergranulaires et absolus.

Tableau 3: indices des vides des bétons

Mélange n°	1	2	3	4	5	6	7	8
$e_{ab}$	0,16	0,11	0,25	0,36	0,53	0,61	0,22	0,35
$e_i$	0,59	0,51	0,78	1,01	1,40	1,59	0,58	0,68
$V_r / (V_r + V_f + V_c)$	0,62	0,60	0,67	0,73	0,82	0,86	0,53	0,45
$V_{ab} / (V_{ab} + V_f + V_c)$	0,48	0,45	0,54	0,60	0,72	0,78	0,39	0,32

- ✓  $e_i$ : indice des vides intergranulaires
- ✓  $e_{ab}$ : indice des vides absolus

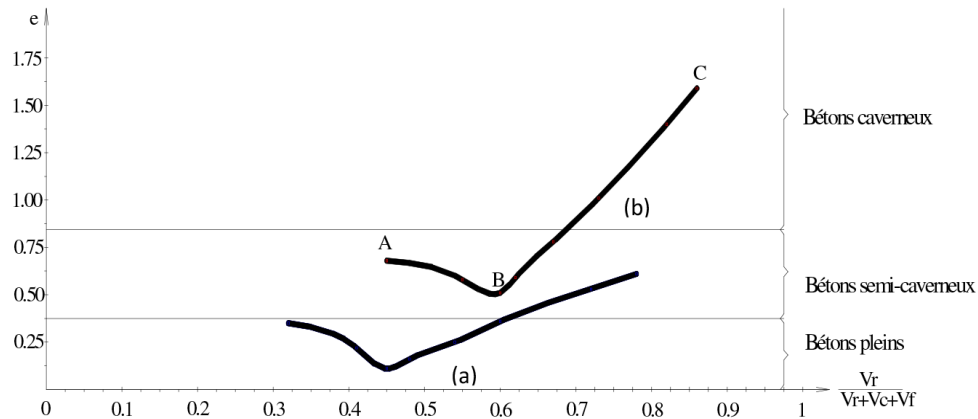


Fig. 7 : Variation de l'indice des vides

Les variations des indices des vides sont présentées sur la figure 7 :

- La courbe (a) montre les variations de l'indice des vides absolus en fonction du rapport du volume absolu des gravillons pouzzolaniques sur le volume absolu des granulats et du ciment.

$$e_{ab} = f(V_{ab} / (V_{ab} + V_f + V_c))$$

- La courbe (b) fait état des variations de l'indice des vides entre les granulats en fonction du rapport du volume réel des gravillons pouzzolaniques sur le volume réel total de granulats et du ciment.

$$e_i = f(V_r / (V_r + V_f + V_c))$$

Divers points qui sont assez importants sont à exposer :

- Le point B relatif au mélange de porosité minimale correspond au rapport  $V_r / (V_r + V_f + V_c) = 0.6$  environ par contre, selon BARON [16] ce minimum correspond à 0.8 pour les granulats courants.
- La branche BC est presque rectiligne, ce qui signifie que les grains fins occupent entièrement les interstices entre les gros granulats. La conséquence d'interférence granulaire est donc presque inexistante.

Cette propriété se justifie par la forme déchiquetée des grains du gravillon qui peuvent admettre l'insertion des fines dans les creux que présente leur surface. De ce fait, on peut dire que la loi régissant la variation de l'indice des vides absolus est la plus convenable pour les bétons légers car elle considère les vides dans les grains.

Comme pour les bétons ordinaires, il s'avère possible d'exploiter l'une ou l'autre des courbes de la figure n°3 afin d'obtenir le mélange d'indice des vides souhaité. Néanmoins, comme les buts poursuivis ne sont pas les mêmes pour le cas des bétons ordinaires, dans lesquels on cherche les mélanges de porosité minimale et les bétons légers, il est nécessaire de définir le domaine utile des mélanges à granulats poreux. Pour le cas des bétons de granulats poreux qui fait l'objet de cette étude, le domaine utile des bétons s'élargit logiquement entre le mélange à porosité minimale et celui à dosage minimal en ciment. Dans cette limitation de domaine, on peut définir successivement les sous domaines suivants selon les variations de l'indice des vides :

- Un domaine des bétons pleins où l'indice des vides est faible ;
- Un domaine des bétons caverneux où l'indice des vides est élevé ;
- Un domaine des bétons semi-caverneux compris entre les deux domaines précédents.



Les variations des indices de vides absolus et intergranulaires sont données en fonction de la proportion en sable pour pouvoir suivre la perturbation du sable sur les vides du béton.

### II.1.2 Coefficients d'absorption acoustiques

La figure 8 donne les coefficients d'absorption de bétons légers de pouzzolane.

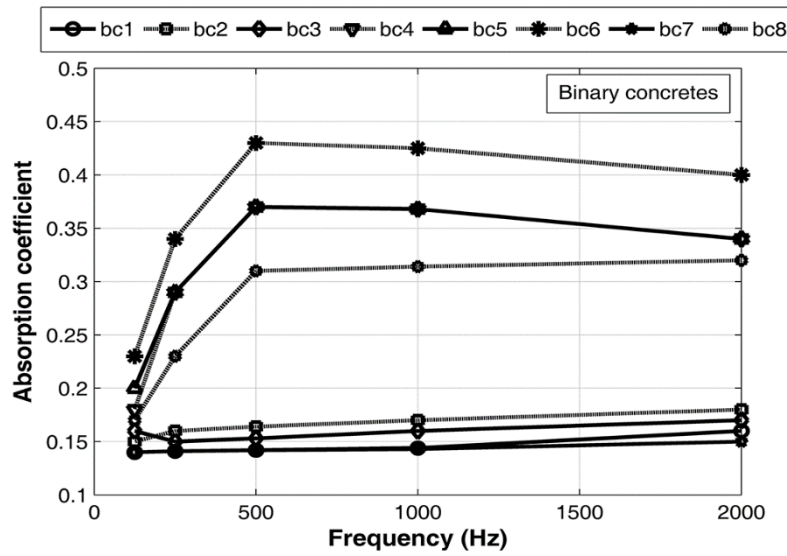


Fig. 8 : Coefficients d'absorptions «  $\alpha$  » des bétons

D'une manière générale, le coefficient d'absorption augmente avec la fréquence sauf aux fréquences au-delà de 1 kHz. Les bétons de plus faible dosage absorbent davantage aux basses fréquences, c'est-à-dire les plus intéressantes en pratique, tandis que souvent aux fréquences plus élevées ce sont les bétons de dosages les plus élevés qui sont les plus absorbants. Les coefficients d'absorptions obtenus avec les pouzzolanes fines, à porosité égale du béton, sont plus faibles. En effet, pour une indice des vides absolus faible égale à environ 23%, nous avons observé une augmentation d'environ 50% des coefficients d'absorptions obtenus avec le dosage en ciment 350 Kg/m<sup>3</sup> par rapport à ceux obtenus avec le dosage en ciment 300 Kg/m<sup>3</sup>, en moyenne fréquence.

La variation des coefficients d'absorptions de quelques matériaux est donnée par le tableau 4 en fonction de la fréquence

Tableau 4: Coefficient d'absorption de quelques matériaux

Description	Fréquence en Hz				
	125	250	500	1000	2000
Plastique	0,07	0,17	0,50	0,60	0,68
Briques	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05

Béton banché	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Béton de bois	0,62	0,68	0,77	0,65	0,59
Béton cellulaire	0,24	0,29	0,32	0,28	0,23

---

Parmi les bétons légers, seul le béton de bois est utilisé actuellement pour ses qualités acoustiques. Il absorbe plus de 75% de l'énergie de l'onde incidente en moyenne fréquence. Quelques matériaux comme les briques et le béton banché sont peu perméables et ne laissent pas pénétrer l'onde acoustique. Le béton cellulaire n'absorbe pas plus de 35% du son qui lui traverse. Pour le dosage 350Kg/m<sup>3</sup>, du béton de pouzzolane, les coefficients d'absorptions se trouvent entre 0.32 et 0.44, valeurs, qui sont élevées par rapport à d'autres matériaux de constructions.

### II.3 Mur en béton léger végétalisé

Les mesures d'absorption acoustique ont été effectuées sur trois espèces végétales:

- **Armeria maritima (AM)**, communément appelée gazon d'armérie ou passe-pierre, est une plante vivace capable de résister aux vents violents et aux conditions climatiques spécifiques des cyclones. Elle est originaire des régions côtières d'Europe et d'Asie du Nord.
- **Calluna vulgaris (CV)**, plus connue sous le nom de bruyère commune ou callune, est un arbuste nain à feuilles persistantes originaire d'Europe occidentale et d'Afrique du Nord. Elle est également connue pour sa résistance aux vents violents et aux conditions climatiques difficiles.
- **Cytisus praecox (CP)**, également appelé genêt précoce ou genêt d'Espagne, est un arbuste à feuilles caduques originaire d'Europe du Sud et d'Afrique du Nord. Il est apprécié pour sa floraison précoce et sa capacité à fixer l'azote dans le sol.

Ces trois espèces végétales ont été choisies pour leur résistance aux conditions climatiques extrêmes et leur potentiel d'absorption acoustique.

Elles ont été réalisées en incidence normale avec des échantillons d'une épaisseur de 10 cm sur une gamme de fréquences allant de 150 à 2000 Hz.

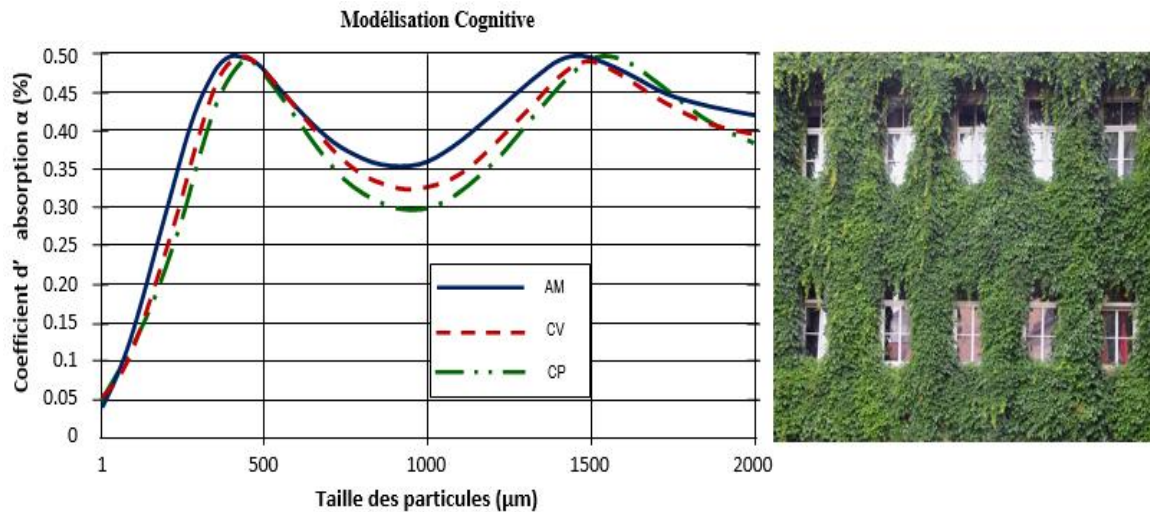


Fig.9 : Influence de végétale sur l'absorption acoustique du mur végétalisé des bétons caverneux

Comme on peut le voir sur la figure 9, il y a une très légère variation de l'absorption acoustique entre les différentes espèces végétales. De plus l'Armeria maritima était légèrement plus efficace aux basses fréquences et aux fréquences moyennes, tandis que les Calluna vulgaris et Cytisus praecox avaient le même comportement.

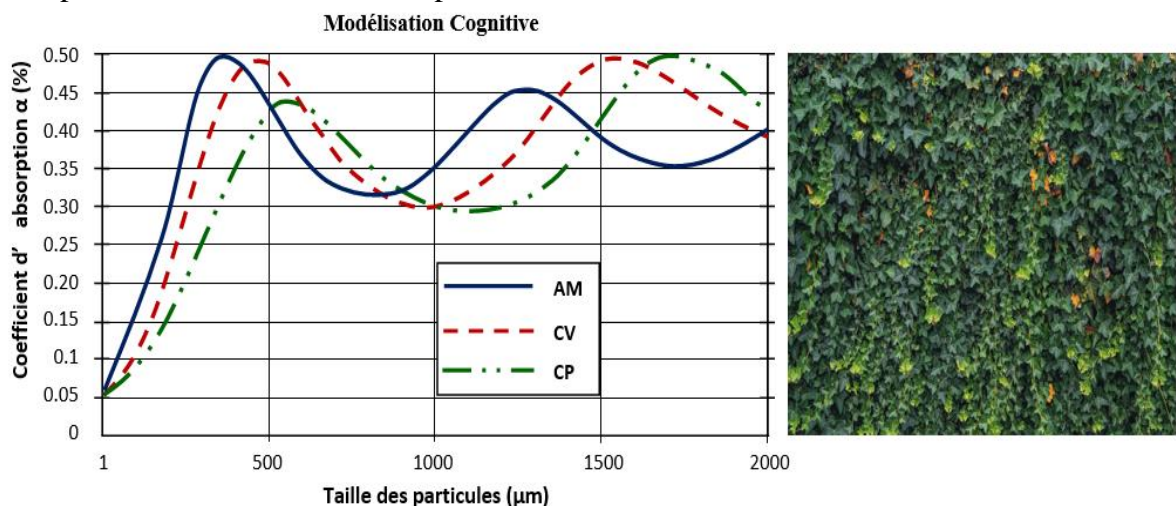


Fig.10 : Influence de végétale sur l'absorption acoustique du mur végétalisé des bétons semi-caverneux

La figure 10 montre qu'une diminution de la taille des grains entraîne un déplacement des pics d'absorption vers les basses fréquences et rend la pouzzolane globalement plus absorbante. Cet effet de la taille des particules est beaucoup plus marqué dans la figure 2 que dans la figure 1. De plus, on note dans toutes les configurations, un excellent niveau d'absorption acoustique avec  $\alpha \geq 0,3$  pour les fréquences supérieures à 300Hz.

Étant donné l'importance de la taille des particules comme indiqué ci-dessus, il est d'abord nécessaire de garantir la précision des résultats attendus en effectuant des expériences préliminaires. Des mesures de coefficients d'absorption des murs végétalisés ont été effectuées en fonction de la granulométrie et la teneur en eau de la pouzzolane. Les résultats sont présentés dans les figures 11 et 12.

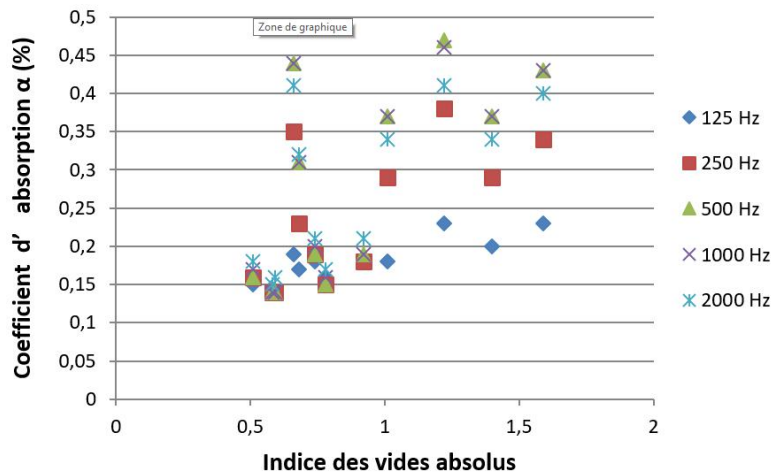


Fig.11 : Coefficient absorption acoustique du mur végétalisé en *Cytisus praecox* en fonction de l'indice des vides intergranulaires

En général, à l'exception des fréquences supérieures à 1 kHz, le coefficient d'absorption augmente également avec la fréquence. De plus, on a observé que les murs végétalisés des bétons à faible dosage absorbent plus aux basses fréquences que ceux à dosage plus élevé, et inversement, les murs végétalisés des bétons à dosage plus élevé absorbent plus aux hautes fréquences que ceux à faible dosage. Par conséquent, les bétons à faible dosage sont les plus intéressants en pratique.

Contrairement à l'échantillon des bétons semi-caverneux, aucun événement n'a été détecté dans la partie pré-pic de l'échantillon des bétons caverneux. Cela peut être dû à la nature des bétons de l'échantillon des bétons semi-caverneux qui possède une phase élastique plus importante que les bétons de l'échantillon des bétons caverneux.

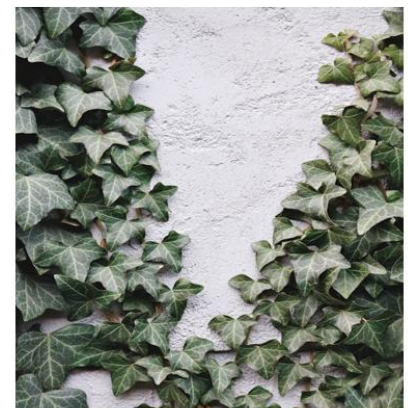
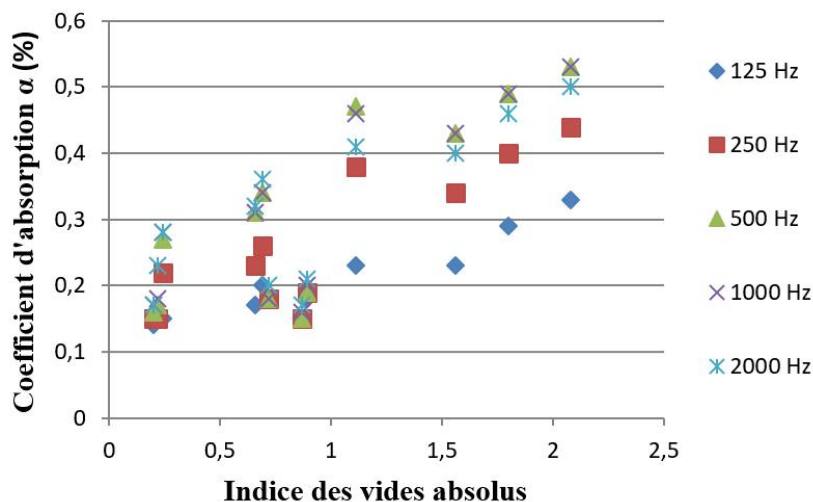


Fig.12 : Coefficient absorption acoustique du mur végétalisé en *Armeria maritima* en fonction de l'indice des vides absolus

La moyenne des coefficients d'absorption obtenue pour le mur végétalisé en béton semi-caverneux est d'environ 0,28, ce qui signifie qu'environ 28% du son est absorbé par le mur végétalisé. Cela pourrait s'expliquer par la présence d'une plus grande quantité d'alcalis dans le

mélange, ce qui rendrait les bétons plus déformables et moins perméables que le mur végétalisé en bétons caverneux.

Comparons maintenant la différence entre la méthode analytique et la méthode de réseau de neurones artificiels pour l'estimation du coefficient d'absorption acoustique du mur végétalisé. La figure 13 ci-après montre deux courbes qui représentent le coefficient d'absorption du mur végétalisé en fonction de la fréquence.

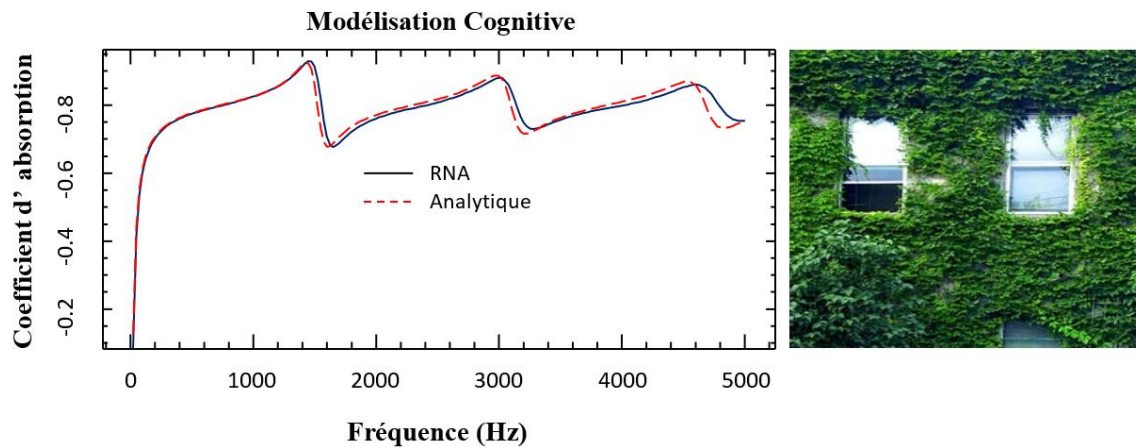


Fig.13 : Comment le son est absorbé par le mur 11cm avec des plantes bien arrangées, calculé par deux méthodes, quand le son change de vitesse.

La courbe en pointillés est obtenue par une méthode analytique, qui repose sur un modèle mathématique du mur végétalisé. La courbe en trait plein est obtenue par une méthode de réseau de neurones artificiels (RNA), qui repose sur un apprentissage automatique à partir de données expérimentales.

On observe que les deux courbes sont assez proches, ce qui suggère une bonne concordance entre les deux méthodes. On peut donc dire qu'il y a une équivalence entre les RNA et la méthode analytique pour les pores différents de section variable.

On remarque aussi que le coefficient d'absorption augmente avec la fréquence, ce qui signifie que le mur végétalisé absorbe mieux les sons aigus que les sons graves. Cela est conforme aux propriétés des matériaux poreux ou fibreux, qui sont souvent utilisés pour réaliser des murs végétalisés.

Le coefficient d'absorption atteint des valeurs élevées (supérieures à 0,8) à partir de 1000 Hz environ, ce qui indique que le mur végétalisé a une bonne performance acoustique. Il peut donc contribuer à réduire le bruit et à améliorer la qualité sonore dans les environnements urbains

## II.4 Applications et implications pratiques

L'utilisation de bétons légers végétalisés dans les régions exposées aux cyclones tropicaux offre plusieurs avantages économiques et environnementaux significatifs :

1. **Réduction des coûts de construction** : Les bétons légers végétalisés peuvent réduire les coûts de construction en raison de leur poids plus léger, ce qui permet d'économiser sur les matériaux de

structure, les fondations et les coûts de transport. De plus, l'utilisation de matériaux durables et écologiques peut réduire les coûts d'entretien à long terme des bâtiments et des infrastructures.

2. **Amélioration de l'efficacité énergétique** : Les propriétés d'isolation thermique et acoustique des bétons légers végétalisés peuvent contribuer à réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation des bâtiments, ce qui entraîne des économies sur les factures d'énergie à long terme. Cela peut être particulièrement bénéfique dans les régions exposées aux cyclones tropicaux, où les températures peuvent être extrêmes.
3. **Promotion du développement durable** : L'utilisation de matériaux durables et écologiques dans la construction, tels que les bétons légers végétalisés, contribue à promouvoir le développement durable en réduisant l'empreinte environnementale des bâtiments et des infrastructures. En favorisant l'utilisation de matériaux renouvelables et recyclables, leur utilisation peut contribuer à atténuer les effets du changement climatique et à préserver les ressources naturelles.
4. **Création d'emplois locaux** : La production et l'utilisation de bétons légers végétalisés peuvent créer des opportunités d'emploi locales dans les industries de la construction et des matériaux de construction. La fabrication de ces matériaux nécessite souvent des compétences spécialisées, ce qui peut stimuler l'économie locale et créer des emplois dans les communautés touchées par les cyclones tropicaux.
5. **Réduction des déchets de construction** : L'utilisation de matériaux durables et recyclables, tels que les bétons légers végétalisés, peut contribuer à réduire les déchets de construction et de démolition, ce qui réduit l'impact environnemental global de l'industrie de la construction. En favorisant la réutilisation et le recyclage des matériaux, leur utilisation peut contribuer à promouvoir une économie circulaire et à réduire la dépendance aux ressources non renouvelables.

En conclusion, l'utilisation de bétons légers végétalisés dans les régions exposées aux cyclones tropicaux offre des avantages économiques et environnementaux significatifs, notamment en réduisant les coûts de construction, en améliorant l'efficacité énergétique, en promouvant le développement durable, en créant des emplois locaux et en réduisant les déchets de construction. Ces avantages font des bétons légers végétalisés une solution attrayante pour renforcer la résilience des bâtiments et des infrastructures face aux événements météorologiques extrêmes et pour promouvoir des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement.

### III. CONCLUSION

Cet article a exploré l'évaluation et l'optimisation de l'absorption acoustique des bétons légers végétalisés pour renforcer la résilience des structures dans les régions exposées aux cyclones tropicaux. Les principales conclusions mettent en lumière plusieurs aspects importants. L'étude a d'abord souligné l'importance de ce sujet en raison de la menace sérieuse que représentent les cyclones tropicaux pour les structures dans les régions côtières et insulaires. Il est crucial de développer des solutions innovantes pour renforcer la résilience des structures face à ces événements météorologiques extrêmes.

Les bétons légers végétalisés ont démontré un potentiel notable pour améliorer la résilience des structures. Ils permettent de réduire le poids des structures, d'augmenter l'isolation thermique, d'améliorer la durabilité et d'optimiser l'absorption acoustique. L'optimisation de cette absorption acoustique peut être réalisée en ajustant la composition des matériaux, la porosité et la densité, en intégrant des matériaux absorbants et en concevant des revêtements acoustiques spécifiques. L'utilisation de bétons légers végétalisés a également entraîné des avantages économiques, tels que la réduction des coûts de construction et des factures d'énergie, ainsi que des avantages environnementaux, tels que la promotion du développement durable et la réduction des déchets de

construction. Des recommandations ont été proposées pour guider la mise en œuvre de ces matériaux dans les régions exposées aux cyclones tropicaux et pour orienter les futures recherches dans ce domaine. Cet article a apporté plusieurs contributions significatives à la recherche sur les matériaux de construction. Il a fourni de nouvelles informations sur les propriétés acoustiques des bétons légers végétalisés, développé des méthodologies expérimentales et numériques novatrices pour évaluer leur absorption acoustique, proposé des solutions pratiques pour améliorer la résilience des structures, et souligné les avantages économiques et environnementaux de ces matériaux.

Pour les travaux futurs, il est suggéré d'optimiser davantage les compositions des bétons légers végétalisés en explorant de nouveaux matériaux et techniques, de mener des études sur le terrain pour évaluer leur performance dans des conditions réelles, d'examiner leur impact sur la qualité de l'air intérieur, de réaliser des analyses du cycle de vie pour évaluer leur empreinte environnementale et d'explorer leur applicabilité dans d'autres contextes climatiques.

## REFERENCES

- [1] Philippe Caroff, Samuel Westrelin. Cyclone en vue : mieux vaut prévenir. Centre Météorologique Régional Spécialisé- Direction Régionale de Météo France à La Réunion. 2023.
- [2] Isabelle Mayer Jouanjean. L'île de La Réunion sous l'œil du cyclone au XXème siècle. Histoire, Société, et catastrophe Naturelle.. Histoire. Université de la Réunion, 2011.
- [3] Philippe Strauss et al, Convergence des actions Bruit, Climat, Air, Énergie pour une planification performante. ADEME. ISBN : 979-1-02971-132-9 - Mars 2019.
- [4] Arnaud Dubourg, Intégration de structures absorbantes acoustiques innovantes au sein d'une turbosoufflante. École Polytechnique de Montréal. 2015.
- [5] Pascal Saffache, Le risque cyclonique Avant [Pendant] Après. Le magazine du Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement (CAUE) n°16. 2017.
- [6] Stéphane Gasser. Etude des propriétés acoustiques et mécaniques d'un matériau métallique poreux modèle à base de sphères creuses de nickel. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2003.
- [7] Guillaume Chagnaud. Évolutions du régime pluviométrique au Sahel Ouest-Africain : détection, éléments d'attribution et projections. Météorologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022.
- [8] Joris Pianezze, Christelle Barthe. Rapport de synthèse sur les paramétrisations des flux turbulents par vent fort : ReNovRisk-Cyclones (C3) Action 2 Sous-action 2.2. [Rapport de recherche] LACY; Région Réunion; Union Européenne; INTERREG-V océan Indien. 2019.
- [9] Fabrice Chauvin et Jean-Francois Royer, Des cyclones et des hommes- Météo-France - Centre national de recherche météorologique (CNRM) 42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex 1. DOI:10.4267/2042/17790. 2008.

- [10] Sébastien RITOUX et al, Ciments & bétons : émissions de poussières, Décryptage n°4. ATLH Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques. 2017.
- [11] ASTM C 1602-06 : Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.
- [12] J. Duchesne, Le mûrissement à l'eau de chaux des échantillons de béton en laboratoire est-il adapté au cas des bétons contenant des cendres volantes? Canadian Journal of Civil Engineering. 2000.
- [13] Houssam Khalil. Matrices structurées et matrices de Toeplitz par blocs de Toeplitz en calcul numérique et formel. Mathématiques [math]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2008.
- [14] Vahan Baronian. Couplage des méthodes modale et éléments finis pour la diffraction des ondes élastiques guidées : Application au Contrôle Non Destructif. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Polytechnique X, 2009.
- [15] Louise Le Ridant. Optimisation d'un transducteur multicouche opto-acoustique pour l'acoustique picoseconde. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2021.
- [16] Véronique Baroghel-Bouny. Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.