

ÉVALUATION DE L'IMPACT DES MURS VÉGÉTALISÉS SUR LA PRÉVISION DE L'INTENSITÉ DES CYCLONES TROPICAUX DU SWIO PAR LES RNA

Rajaonarison L Dina P, Rajaonarison Henintsoa K, Rajaonarison Ken E, Rajaonarison Eddie Frank (*)

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

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

Résumé

Ce travail explore l'influence des murs végétalisés sur les paramètres météorologiques locaux, tels que la température, l'humidité, la pression et le vent. Elle examine également comment ces paramètres affectent la prévision de l'intensité des cyclones tropicaux dans la région du Sud-Ouest de l'océan Indien (SWIO) à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNA). L'étude compare les performances des RNA entraînés avec et sans les données provenant des murs végétalisés, tout en analysant les mécanismes physiques sous-jacents à la relation entre ces murs et les cyclones. Les résultats pourraient contribuer à améliorer notre compréhension des interactions entre la végétation urbaine et le climat, ainsi qu'à optimiser les méthodes de prévision des cyclones tropicaux par les RNA.

Mots clés : Murs végétalisés, Cyclones tropicaux, Réseaux de Neurones Artificiels (RNA), Sud-Ouest de l'océan Indien (SWIO)

I. INTRODUCTION

Les cyclones tropicaux, phénomènes météorologiques redoutables, exercent une influence dévastatrice sur les régions côtières du Sud-Ouest de l'océan Indien (SWIO). Leurs vents féroces et leurs précipitations torrentielles représentent un défi majeur en termes de gestion des risques, nécessitant une prévision précise pour protéger les populations et les écosystèmes vulnérables [1]. Dans un contexte où l'urbanisation côtière est dense, améliorer la précision des prévisions revêt une importance cruciale pour la sécurité des communautés. C'est dans cette optique que s'inscrit notre article, intitulé "Évaluation de l'impact des murs végétalisés sur la prévision de l'intensité des cyclones tropicaux du SWIO par les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)".

Au sein de cette région sujette aux assauts cycloniques, l'objectif de notre recherche est de sonder l'effet des murs végétalisés sur les paramètres météorologiques locaux, et leur éventuelle intégration dans les modèles prédictifs des RNA. Cette démarche vise à renforcer la gestion des risques cycloniques dans le SWIO en offrant une meilleure anticipation des phénomènes météorologiques extrêmes.

Les murs végétalisés, par leur nature même de structures verticales intégrant de la végétation, sont reconnus pour leurs avantages tant environnementaux qu'esthétiques [2]. Bien qu'ils soient couramment utilisés pour réguler les îlots de chaleur urbains, leur influence sur les cyclones tropicaux demeure largement méconnue [3]. Ainsi, cet article ambitionne d'explorer leur impact sur des facteurs tels que la température, l'humidité, la pression atmosphérique et les schémas de vent dans le contexte des cyclones du SWIO.

En se penchant sur les études antérieures, il apparaît clairement que la végétation urbaine exerce une influence significative sur le climat local [4]. Cependant, les recherches spécifiques sur l'impact des murs végétalisés sur les cyclones tropicaux demeurent rares, mettant en lumière une

lacune de connaissances à combler [5]. Ainsi, notre étude vise à répondre à cette problématique en évaluant de manière approfondie l'effet des murs végétalisés sur les conditions météorologiques locales et en examinant leur potentiel d'intégration dans les modèles de prévision des RNA. Cette approche novatrice promet d'enrichir notre compréhension des interactions entre végétation urbaine et cyclones tropicaux, tout en offrant des perspectives pratiques pour améliorer la gestion des risques dans le SWIO.

II. MATERIELS ET METHODES

Pour mieux prédire les cyclones et atténuer leurs impacts, nous avons intégré les effets des murs végétalisés dans les modèles de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA). Les étapes clés de ce processus :

II.1. Collecte de données et Modélisation d'un mur végétalisé avec conditions aux limites

Nous avons collecté des données météorologiques (température, humidité, pression atmosphérique, schémas de vent) à différentes altitudes et conditions pour quantifier l'influence des murs végétalisés sur le microclimat local.

On considère un mur et sa face intérieure à une température constante initiale, et on impose une température constante différente sur sa face extérieure. La température de la face intérieure reste inchangée [6]. Le problème revient donc à trouver la solution de l'équation de la chaleur en une dimension avec les conditions initiale et aux limites suivantes :

Condition initiale : $\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$ (**Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.**)

Conditions aux limites : $T(x, t = 0) = T_i$ (2)

Condition de Fourier :

On impose un flux sur la face d'entrée du mur qui dépend de la différence de température entre le mur et l'air extérieur.

En $x = 0$

$$h_e [T(0, t) - T_f(0, t)] = k_e \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (3)$$

h_e : Coefficient de convection extérieur de l'air

$T(0, t)$: Température sur la face d'entrée

T_f : Température de l'air extérieur

k_e : Conductivité du matériau à l'entrée

En $x = e$

$$h_i [T_i - T(e, t)] = k_s \left(\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{x=e} \quad (4)$$

h_i : Coefficient de convection à l'intérieure de la maison

$T(e, t)$: Température sur la face de sortie

T_i : Température initiale du mur et température à l'intérieur de la maison

k_s : Conductivité du matériau à la sortie

e : Epaisseur du mur

Pour résoudre le problème, nous avançons l'hypothèse suivante : on considère que la perturbation de température ne se propage pas jusqu'à la face opposée du mur. Le mur est donc traité comme un solide semi-infini. Cette hypothèse reste valable pour le mur multicouche, en tenant compte de l'existence d'interface(s). Le contact entre les interfaces est parfait, ce qui implique la continuité de la température. Les conditions aux limites sont complétées par celles de l'interface de contact, où les températures des faces de chaque milieu sont égales. Il y a aussi conservation du flux de chaleur.

A l'interface: $x = e_1$

$$u_1(e_1, t) = u_2(e_1, t) \quad (5)$$

$$k_1 \left(\frac{\partial u_1(x,t)}{\partial t} \right)_{x=e_1} = k_2 \left(\frac{\partial u_2(x,t)}{\partial t} \right)_{x=e_1} \quad (6)$$

Les couches sont numérotées par 1 et 2 selon leur ordre.

k_1 Conductivité du milieu i.

II.2. Situation d'un mur composé de deux couches

Les équations de continuité de la température et de conservation du flux de chaleur peuvent être exprimées comme suit (cf tableau 1) dans les systèmes d'équations à résoudre :

Tableau 1: Systèmes d'équations pour un mur bicouche.

1 ^{ère} Couche « entrée »	2 ^{ème} Couche « sortie »
$a_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = \frac{\partial u_1}{\partial t}$	$a_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} = \frac{\partial u_2}{\partial t}$
$-k_1 \frac{\partial u_1(x,t)}{\partial x} \Big _{x=0} = h_e [u_f - u_1(\theta, t)]$	$\lim_{x \rightarrow \infty} u_2(x, t) = 0$
$u_1(e_1, t) = u_2(e_2, t)$ et $k_1 \frac{\partial u_1(x,t)}{\partial x} \Big _{x=e_1} = k_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big _{x=e_2}$	

La Revue Générale de Thermique, située au 30 rue de la Source, 75016 Paris, dans son article intitulé "Étude par différences finies du transfert de chaleur en régime stationnaire dans un mur : évaluation des erreurs et choix d'un maillage", présente directement les solutions pour une température intérieure et initiale égale à zéro.

$$T_1 = T_f \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{2e_1 + x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left[\left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2 - 1\right] \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{e_2}{2\sqrt{a_2 t}} + \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{2e_2}{\sqrt{a_2 t}} - \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{3e_1}{\sqrt{a_2 t}} - \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^4 \operatorname{erfc}\left(\frac{4e_2}{\sqrt{a_2 t}} - \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) \right] + \dots \right] \quad [1]$$

Et

$$T_2 = \frac{2m}{m+1} T_f \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_2 t}} + \frac{x - e_1 + e_2}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{2e_2 - e_1 + x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{4e_2 - e_1 + x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) \right. \\ \left. + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{6e_2 - e_1 + x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) - \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{3e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{x - e_1}{2\sqrt{a_2 t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{2e_2 + e_1 - x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) \right] + \dots \quad [1]$$

Avec

$$m = \frac{b_1}{b_2} \quad [1]$$

En prenant en considération la substitution de la variable $u = T - T_i$, où T_i représente la température initiale du corps, on a :

$$u_1 = u_f \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{2e_1 + x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) \right] + \left[\left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2 - 1 \right] \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{e_2}{2\sqrt{a_2 t}} + \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{2e_2}{\sqrt{a_2 t}} - \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{3e_1}{\sqrt{a_2 t}} - \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^4 \operatorname{erfc}\left(\frac{4e_2}{\sqrt{a_2 t}} - \frac{2e_1 - x}{2\sqrt{a_1 t}} + \dots \right) \right] \quad (7)$$

$$u_2 = \frac{2m}{m+1} u_f \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_2 t}} + \frac{x - e_1 + e_2}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{2e_2 - e_1 + x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{4e_2 - e_1 + x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{6e_2 - e_1 + x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) - \left(\frac{m-1}{m+1}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{3e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{x - e_1}{2\sqrt{a_2 t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{e_1}{2\sqrt{a_1 t}} + \frac{2e_2 + e_1 - x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) \right] + \dots \quad (8)$$

II.3. Intégration dans les modèles de RNA

Notre objectif est d'utiliser uniquement les variables prédictives qui offrent les meilleures performances pour le modèle de réseau de neurones. Pour cela, nous utiliserons une technique qui permet de sélectionner un sous-ensemble de prédicteurs à partir d'un ensemble donné.

Premièrement, l'idée de cette méthode est de classer les prédicteurs par ordre de pertinence. Initialement, nous avons un ensemble de p prédicteurs, où nous utilisons la méthode de Gram-Schmidt modifiée (GSM) pour trouver le prédicteur qui décrit le mieux la sortie souhaitée, puis trouver le deuxième, et ainsi de suite. Nous avons finalement obtenu le classement des variables prédictives. Dans la deuxième étape, en plus des p prédicteurs initiaux, nous utiliserons également

des prédicteurs aléatoires pour déterminer le nombre final de prédicteurs à utiliser dans le 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 :

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

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.

II.4. Vitesse maximale du vent (Vmax)

Le choix des variables prédictrices dépend de la technique utilisée pour quantifier la relation entre ces variables et la sortie. Les liens linéaires sont les plus simples et les plus courants. Cependant, il est très important de contrôler ces clés par d'autres méthodes non linéaires. Le tableau 2 résume les variables prédictrices sélectionnées pour chaque terme et le classement des prédicteurs obtenus par la technologie MGS.

Le premier prédicteur classé par la méthode MGS est la vitesse maximale du vent lorsque 0h dure de 12h à 48h (tableau 2). Classé deuxième dans les prévisions à 60h et 72h. Ce résultat a confirmé la corrélation entre la vitesse maximale du vent à 0h et la vitesse maximale du vent de 12h à 72h (figure 1). Cependant, le coefficient de corrélation diminue à mesure que la distance à 0h augmente. Il est devenu très faible à 72 heures.

Tableau 2. Résumé des prédicteurs sélectionnés et de leur rang

	Rang					
Prédicteurs	12h	24h	36h	48h	60h	72h
Vmax 0h	1	1	1	1	2	2
Vmax - 6h	3	3	5	5		
Vmax - 12h	2	2	2			
Vmax - 24h	6	9				
Diffvmax 0h- - 6h	4	5				
Diffvmax 0h- - 12h	2					
Diffvmax 0h- - 24h	9	9	1	1		
Lat 0h	4	3	3	4	4	
Lat - 6h	4					
Difflon 0h- - 6h	11	3	3			
Difflon 0h- - 12h	5	4				
Difflon 0h- - 18h	5	5				
Difflat 0h- - 18h	10					
Jour	9	8	8	7	6	6
Age	7	6	6	6	7	7
Vdepl 0h- - 6h	8	8				
Vdepl - 6h- - 12h	7	8				
Vdepl - 12h- - 18h	8	7				

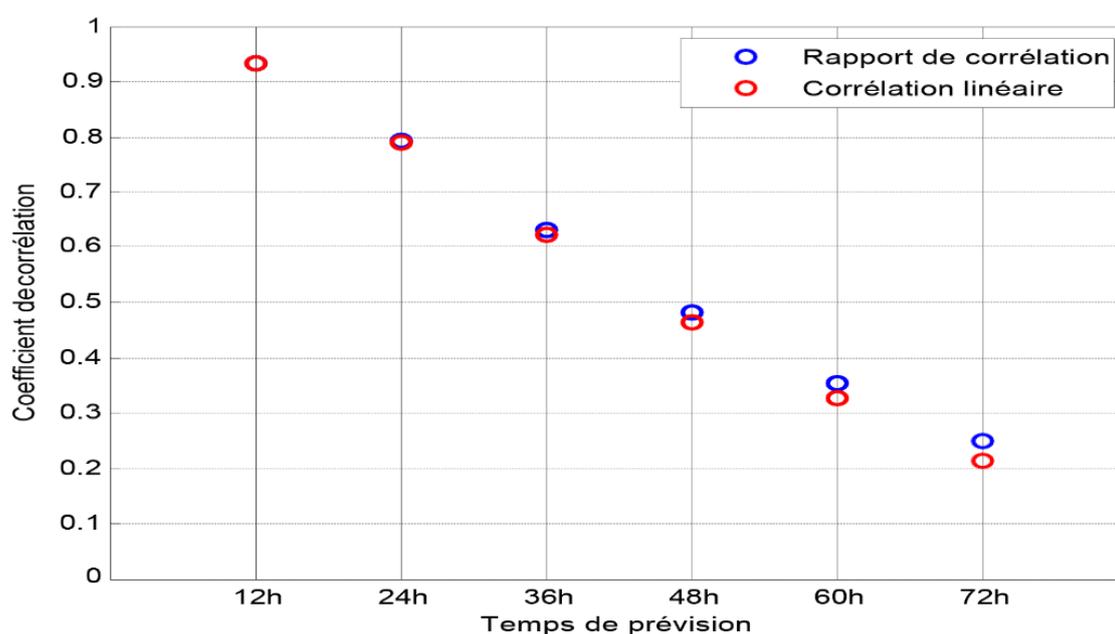


Figure 1. Corrélations entre l'intensité à 0h et les intensités de 12h à 72h.

II.5. Situation d'un mur composé de plusieurs couches

La discrétisation de l'équation de conservation de flux de chaleur par la méthode de différences finies s'opère de la manière suivante : la méthode implique l'extension de chaque milieu

par une maille fictive dans l'autre milieu. Initialement, il est nécessaire de définir cette maille fictive dans chaque milieu avant de la prolonger de part et d'autre [7].

La Figure 2 représente la disposition des points de contrôle à l'interface.

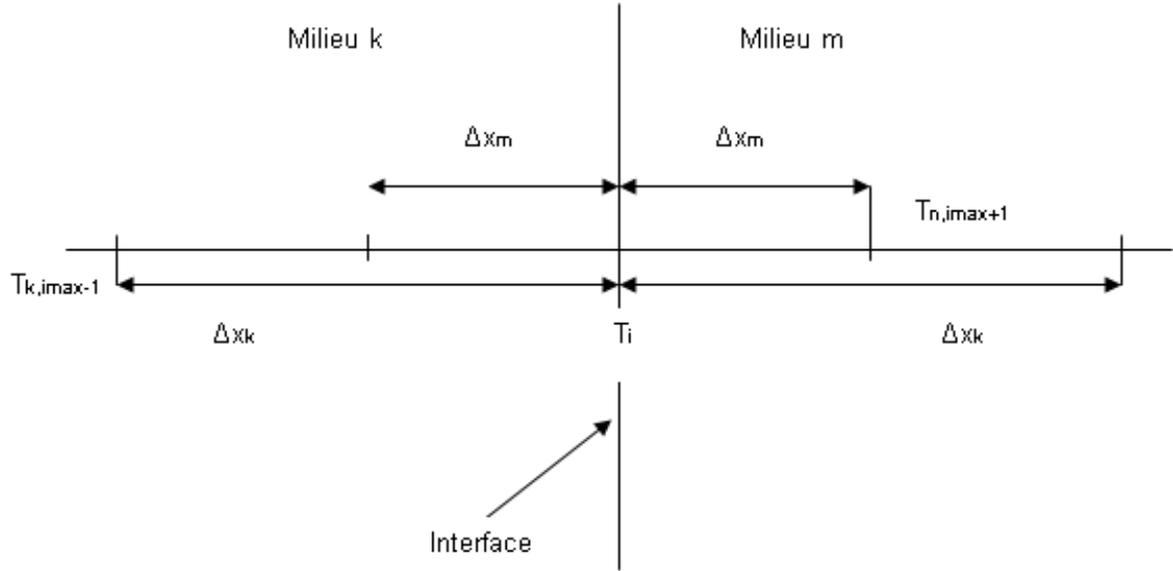


Figure 2 . Disposition des points de contrôle à l'interface

On a :

$$\begin{aligned}
 & -u_{imax-1}^j + u_{imax}^j \left[\left(1 - \frac{1}{M_k}\right) + K_a \left(1 + \frac{1}{M_m}\right) \right] - K_a u_{imax+1}^j \\
 & = u_{imax-1}^{j+1} - u_{imax}^{j+1} \left[\left(1 + \frac{1}{M_k}\right) + K_a \left(1 + \frac{1}{M_m}\right) \right] + K_a u_{imax+1}^{j+1}
 \end{aligned}$$

Avec :

$$K_a = \frac{k_m \Delta x_k}{K_k \Delta x_m} ; M_m = \frac{a_m \Delta t}{\Delta x_m^2} ; M_k = \frac{a_k \Delta t}{\Delta x_k^2} \quad (9)$$

k_i : Conductivité du milieu i

Δx_i : Pas d'espace du milieu i

a_i : Diffusivité du milieu i

Δt : Pas de temps

Pour récapituler, les équations à résoudre pour le cas d'un mur bicouche, en prenant en considération la variable modifiée $u=T-T_i$, sont les suivantes :

- Équation qui régit le transfert thermique pour chaque milieu :

$$u_{i-1}^{j+1} - 2 \left(1 + \frac{1}{M}\right) u_i^{j+1} + u_{i+1}^{j+1} = -u_{i-1}^j + 2 \left(1 - \frac{1}{M}\right) u_i^j - u_{i+1}^j \quad (10)$$

- Formule décrivant la température à l'interface d'entrée

$$u_1^{j+1} - \left(1 + \frac{1}{M} + \frac{h_e}{k} \Delta x\right) u_0^{j+1} = -u_1^j + \left(1 - \frac{1}{M} + \frac{h_e}{k} \Delta x\right) u_0^j - 2 \frac{h_e}{k} \Delta x * u_f \quad (11)$$

La condition à l'interface stipule que la température doit être continue entre les deux milieux, c'est-à-dire que la température du milieu 1 doit être égale à la température du milieu 2 (umilieu 1 = umilieu 2). De plus, la conservation du flux thermique doit être respectée. Cela signifie que le flux de chaleur doit être conservé à l'interface entre les deux milieux [8]

$$\begin{aligned} -u_{imax-1}^j + u_{imax}^j \left[\left(1 - \frac{1}{M_k}\right) + K_a \left(1 + \frac{1}{M_m}\right) \right] - K_a u_{imax+1}^j \\ = u_{imax-1}^{j+1} - u_{imax}^{j+1} \left[\left(1 + \frac{1}{M_k}\right) + K \left(1 + \frac{1}{M_m}\right) \right] + K_a u_{imax+1}^{j+1} \end{aligned}$$

Avec :

$$K_a = \frac{k_m \Delta x_k}{k_k \Delta x_m}; M_m = \frac{a_m * \Delta t}{\Delta x_m^2}; M_k = \frac{a_k * \Delta t}{\Delta x_k^2} \quad (12)$$

Les auteurs Bransier, M. Abgrall et J. Padet ont choisi les paramètres de pas de temps et d'espace pour le mur bicouche [1] selon les hypothèses suivantes :

Pour la première couche, le paramètre M1, caractéristique du schéma aux différences finies, est défini comme suit :

$$M_1 = \frac{a_1 \Delta t}{\Delta x_1^2} = 1 \quad (13)$$

Le pas d'espace Δx_1 est tel que :

$$\Delta x_1 = 0,36 \frac{k_1}{h_e} \quad (14)$$

Le pas de temps est tel que :

$$\Delta t = \left(0,36 \frac{k_1}{h_e \sqrt{a}}\right)^2 \quad (15)$$

Pour la deuxième couche, le paramètre M2, caractéristique du schéma aux différences finies, est défini comme suit :

$$M_2 = 1 \quad (16)$$

Ils ont présenté ces diverses formulations à titre d'illustration uniquement.

En présence de la solution analytique, il est possible de calculer directement la différence entre la solution analytique et la solution numérique obtenue par la méthode de différences finies en utilisant la formule suivante :

$$\zeta = \frac{\text{solution analytique} - \text{solution numérique}}{\text{solution analytique}} * 100 \quad (17)$$

où

ζ : Pourcentage d'écart entre la solution analytique et solution numérique.

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. Performance de chaque modèle

L'évaluation de la performance se révèle être un critère essentiel pour sélectionner le modèle qui reflète de manière optimale le phénomène physique simulé. Dans la suite de notre étude, nous examinerons l'évolution des performances de chaque modèle en relation avec le nombre de neurones et le nombre d'itérations d'apprentissage.

Nous entamons nos simulations en employant cent neurones dans la couche cachée de chaque modèle. La figure 3 illustre la variation des performances en fonction de la fonction d'activation utilisée, les courbes récapitulatives synthétisent ces fluctuations.

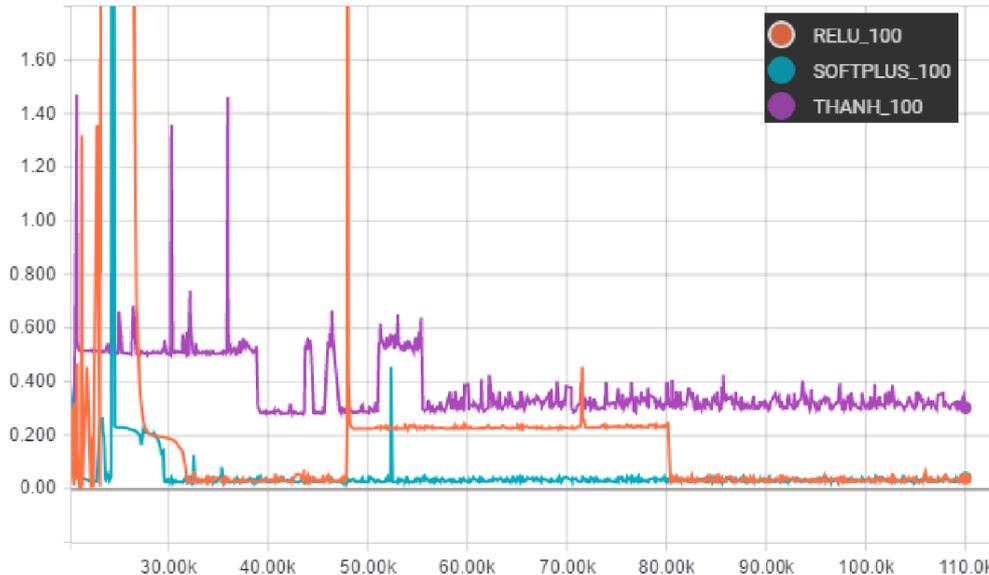


Figure 3. Efficacité des modèles avec une couche cachée composée de cent neurones

Le graphique représente la performance de deux modèles différents, tous deux avec 100 neurones dans la couche cachée. La ligne orange correspond à un modèle standard avec 100 neurones dans la couche cachée, tandis que la ligne bleue correspond à un modèle similaire, mais avec une spécification supplémentaire : 100 étapes d'entraînement.

L'interprétation physique suggère que le modèle avec 100 neurones dans la couche cachée et 100 étapes d'entraînement surpasse le modèle standard en termes de performance. Cela pourrait indiquer que l'ajout de ces étapes d'entraînement supplémentaires permet au modèle d'apprendre plus en profondeur, de mieux ajuster ses poids, et donc d'améliorer ses performances.

En d'autres termes, le modèle qui bénéficie de davantage d'itérations d'entraînement semble avoir une meilleure capacité à capturer les structures sous-jacentes des données d'apprentissage, ce qui se traduit par une performance globale supérieure par rapport au modèle avec moins d'itérations d'entraînement.

Cela souligne l'importance de l'entraînement en profondeur pour obtenir des modèles performants, et cela peut également indiquer que les modèles plus complexes ou les données d'entraînement nécessitent un nombre d'itérations plus important pour atteindre leur plein potentiel.

III.2. Mur végétalisé mono couche

Pour un mur mono couche, nous avons présenté deux graphiques distincts en fonction de l'orientation du mur par rapport à la direction du vent.

Le premier graphique représente la distribution de la température, obtenue à la fois par la solution analytique et par la méthode des différences finies pour un temps spécifié. Le deuxième graphique montre le pourcentage d'écart entre la solution analytique et la solution numérique pour le même intervalle de temps fixe.

III.2.1. Mur végétalisé 11 cm

Ce temps est identifié comme étant le minimum, à partir duquel le pourcentage maximal d'écart entre la solution analytique et la solution numérique (Figure 4), au niveau de la face d'entrée (située à l'axe des abscisses $x=0m$), atteint 5%. Opter pour un temps dépassant ce minimum indiqué conduit à une solution numérique obtenue à partir de l'utilisation de maillages, qui est très proche de la solution analytique.

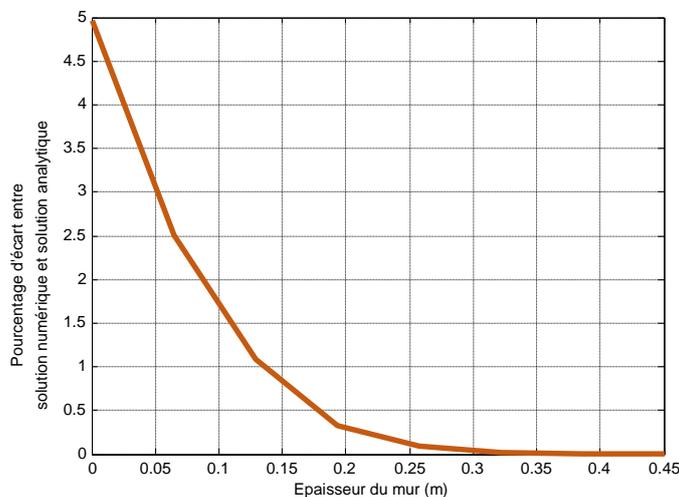


Figure 4. Écart en pourcentage entre la solution analytique et la solution numérique à $t = 1000$ secondes ou 16,7 minutes

Le temps minimum correspond à celui où la différence de température entre la solution analytique et la solution numérique au niveau de la face d'entrée est inférieure à 5%.

Le graphique (Figure 5) illustre le temps minimum auquel la différence de température entre la solution analytique et la solution numérique au niveau de la face d'entrée du mur est inférieure à 5%, indiquant ainsi que la solution numérique est suffisamment proche de la solution analytique pour être considérée comme valide.

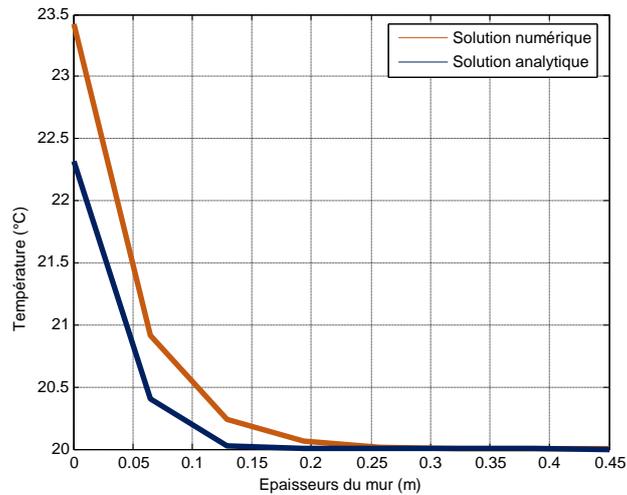


Figure 5. Résultats pour $t = 1000$ secondes ou 16,7 minutes

L'évolution de l'écart en pourcentage entre les deux solutions montre une diminution avec l'augmentation de l'épaisseur du mur. Cette tendance peut s'expliquer par le fait que plus le mur est épais, plus il possède une capacité thermique élevée, prolongeant ainsi le temps nécessaire pour le réchauffement ou le refroidissement.

En conséquence, la solution numérique s'ajuste mieux à la solution analytique, qui repose sur un modèle simplifié.

Une observation supplémentaire est que l'écart en pourcentage est plus marqué pour les faibles épaisseurs du mur.

III.2.2. Mur végétalisé 22 cm

Nous avons pris en compte deux états distincts : le premier concerne l'état humide, caractérisé par un pourcentage d'eau dans les pores égal à 0,5%, correspondant au taux d'humidité utile. Dans le deuxième état, le mur se trouve à l'état saturé. Dans chaque état, nous prenons en considération l'orientation du vent par rapport à la position du mur.

II.2.2.1. Etat correspondant au taux d'humidité utile / Mur au vent

Les figures 6 et 7 représentent ces résultats.

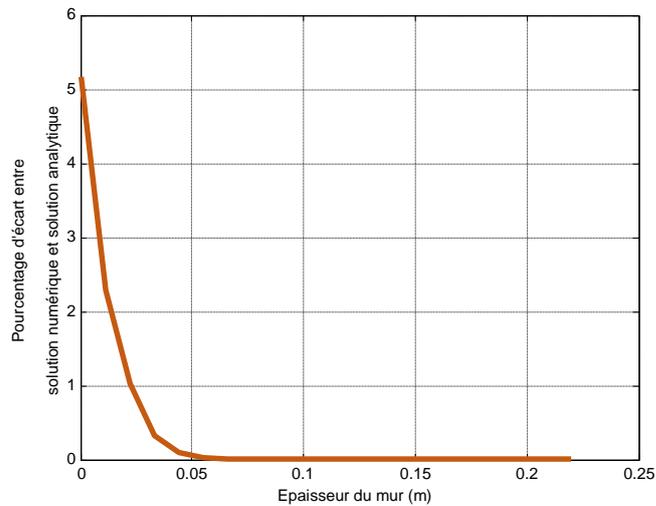


Figure 6. Résultats pour $t = 100$ secondes ou 1,7 minute

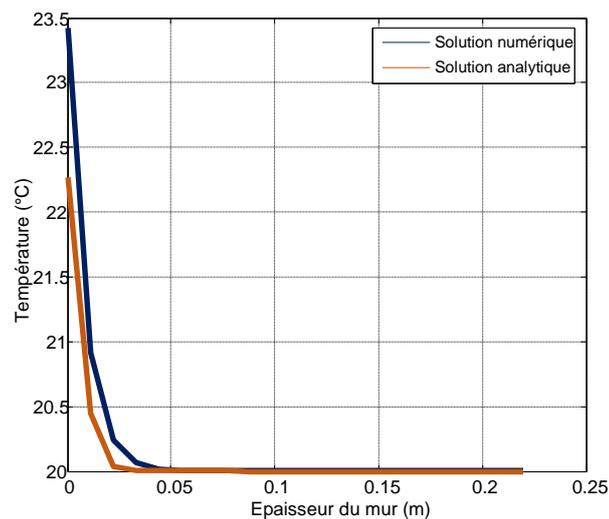


Figure 7. Écart en pourcentage entre la solution analytique et la solution numérique à $t = 100$ s ou 1,7 mn

La figure 7 compare le pourcentage d'écart entre la solution analytique et la solution numérique dans le contexte d'un problème d'humidité dans un mur exposé au vent.

La solution analytique représente la solution exacte du problème, obtenue par des méthodes mathématiques, tandis que la solution numérique est une approximation de la solution analytique, obtenue grâce à des méthodes informatiques.

L'évolution du graphique révèle que l'écart entre les deux solutions décroît à mesure que le nombre de points de calcul augmente. Cette observation indique que la solution numérique se rapproche de la solution analytique à mesure que l'on utilise davantage de points de calcul.

Par ailleurs, le graphique démontre que la solution numérique demeure toujours supérieure à la solution analytique. Ce constat suggère que la solution numérique surestime le taux d'humidité utile dans le mur exposé au vent.

Il est important de noter que le graphique est basé sur les résultats d'une étude qui a employé la méthode du point milieu pour résoudre numériquement l'équation différentielle qui décrit le problème d'humidité.

II.2.2.2. Etat saturé correspondant à 100% de taux d'humidité / Mur sous le vent

Le temps minimum correspond à celui où la différence de température, telle que donnée par la solution analytique et la solution numérique au niveau de la face d'entrée, est inférieure à 5%.

On doit choisir le pas d'espace et le pas de temps en fonction de la taille du modèle et de la durée du phénomène (Figure 8).

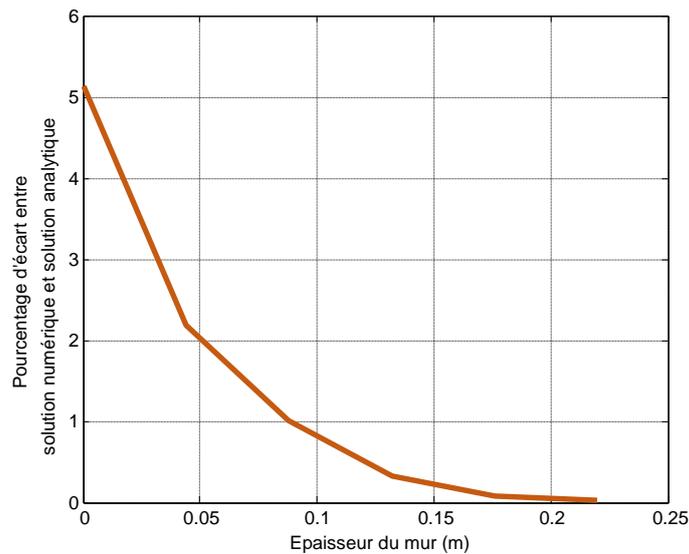


Figure 8. Résultats pour $t = 1800$ secondes ou 30 minutes

Quand le coefficient de convection est petit, le maillage est plus gros. Quand le matériau est plus mouillé, on a :

- Un temps plus long pour que la température numérique à l'entrée soit différente ;
- Un maillage plus gros (Figure 9) .

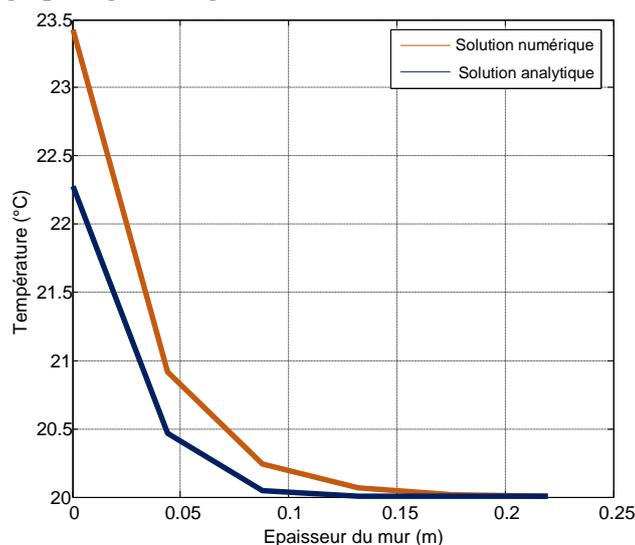


Figure 9. Écart en pourcentage entre la solution numérique et la solution analytique à $t = 1800$ s ou 30 mn

Parfois, le pas de temps et le pas d'espace ne marchent pas bien. C'est parce que le pas d'espace est trop grand par rapport à l'épaisseur du matériau. Et aussi parce que le pas de temps est trop grand pour voir ce qui se passe.

La méthode marche mieux quand les maillages sont proches, le matériau est fin et le temps est long. Le résultat est plus sûr quand il y a plus de points pour les maillages.

III.3. Résultats dérivés de la modélisation utilisant des réseaux de neurones artificiels

Dans cet article, notre apport consiste à appliquer notre modélisation cognitive au transfert thermique conductif à travers le mur végétalisé. Les résultats issus de ces simulations seront consciemment interprétés.

De manière générale, afin de mieux appréhender les propriétés thermiques des matériaux innovants et isolants, tels que le mur végétalisé, nous les avons comparés à des matériaux conventionnels tels que le mur en brique standard.

La simulation fait deux choses : d'abord, elle lance notre système de réseaux de neurones artificiels pour chaque matériau avec différentes formes et températures. Ensuite, elle compare les résultats du RNA avec les résultats analytiques.

Nous donnons ci-après ces résultats :

Pour un temps inférieur à 2667 s (Fig n°10), les deux courbes sont identiques, ce qui signifie que le RNA a appris à reproduire fidèlement la solution analytique. Le mur se réchauffe progressivement sous l'effet de la convection d'air extérieure, mais la température reste inférieure à celle de l'air (30°C).

Au-delà de 2667 s, les deux courbes présentent une légère différence, qui s'accroît avec le temps. Cela peut s'expliquer par le fait que le RNA n'a pas été entraîné sur des données suffisamment variées ou représentatives du comportement du mur à long terme. Le RNA n'arrive pas à généraliser la solution analytique pour des temps supérieurs à ceux utilisés pour l'entraînement. Le mur continue de se réchauffer, mais la température devient supérieure à celle de l'air (30°C), ce qui est physiquement impossible (Figure 10).

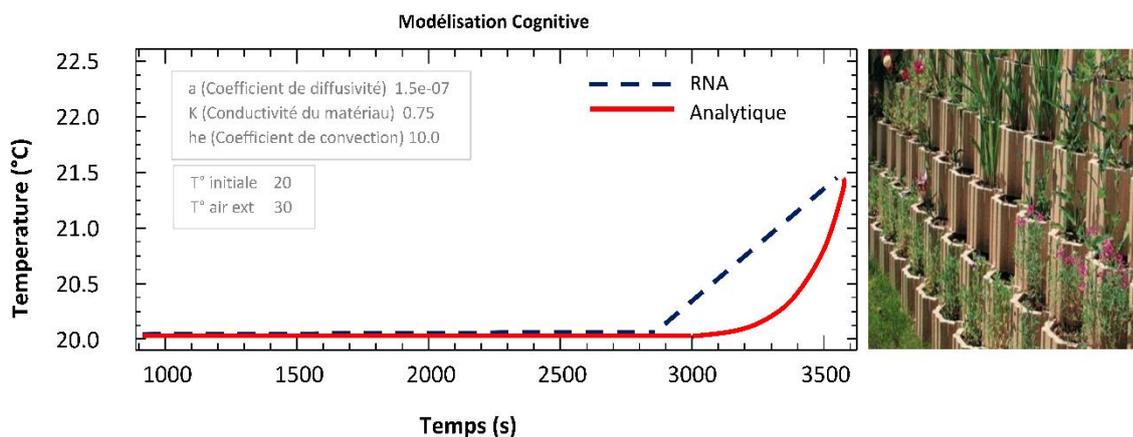


Figure 10. Tracés des températures dans le mur végétalisé 22 en fonction du temps, tant pour la solution analytique que pour le réseau de neurones artificiels (RNA)

La température de 20,5°C n'est atteinte qu'au temps de 3167 s (environ 53 min) par la courbe analytique, alors que la courbe de RNA l'atteint plus tôt, vers 3000 s (environ 50 min). Cela montre que le RNA surestime la vitesse de réchauffement du mur, et donc son inertie thermique. Le mur

plan végétalisé a en réalité une capacité à stocker la chaleur plus importante que celle estimée par le RNA.

Le graphique (Figure 11) illustre les avantages et les limites de l'utilisation d'un RNA pour simuler le comportement thermique d'un mur plan végétalisé. Le RNA est capable d'apprendre à partir de données et de fournir une solution numérique rapide et facile à mettre en œuvre. Cependant, le RNA dépend fortement de la qualité et de la quantité des données utilisées pour l'entraînement, et peut présenter des erreurs ou des incohérences pour des situations non couvertes par les données. Il est donc important de valider le RNA par rapport à la solution analytique ou à des mesures expérimentales, et de l'améliorer si nécessaire.

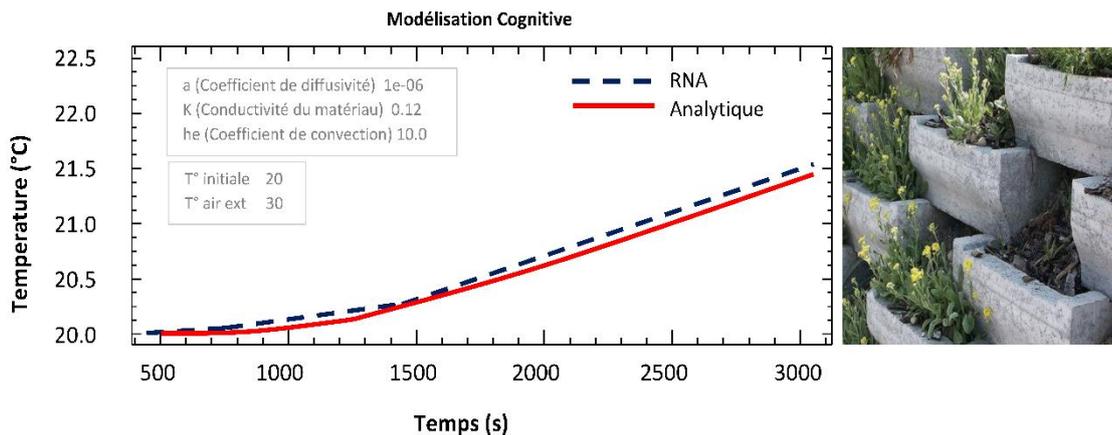


Figure 11. Graphiques des températures dans le mur végétalisé 11 en fonction du temps, à la fois pour la solution analytique et le réseau de neurones artificiels (RNA)

Ce graphique illustre la température d'un mur plan végétalisé d'une épaisseur de 11 cm, exposé à une température initiale de 20 °C du côté ambiance et à une convection d'air de 30 °C du côté extérieur, sur une période de simulation d'une heure.

Deux courbes sont comparées sur le graphique : la courbe analytique, représentant la solution théorique du problème de transfert de chaleur dans le mur, et la courbe du réseau de neurones artificiels (RNA), représentant la solution obtenue par un RNA formé sur des données expérimentales.

L'observation du graphique révèle une parfaite superposition des deux courbes, indiquant que la courbe du RNA est totalement identique à la courbe analytique. Cela suggère que le RNA a réussi à capturer avec grande précision le comportement thermique du mur végétalisé.

En outre, le graphique indique que la température ambiante de 20,5 °C est atteinte au temps 1767 secondes, correspondant au point d'intersection des deux courbes. Cela signifie que le mur végétalisé met environ 29 minutes et 27 secondes pour s'ajuster à la température extérieure de 30 °C.

La figure 12 présente l'évolution de la température du mur végétalisé au fil du temps lors d'une simulation de 48 heures.

La courbe bleue représente la température du mur végétalisé, mesurée par la méthode RNA (réseau de neurones artificiels), tandis que la courbe rouge représente la température du mur végétalisé calculée par la méthode analytique, une solution théorique de l'équation de la chaleur. Le mur végétalisé a une épaisseur de 11 cm, une température initiale de 20°C du côté ambiance, et est soumis à une convection d'air de 30°C du côté extérieur. La température ambiante est fixée à 20,5°C, correspondant à la consigne du système de chauffage ou de climatisation.

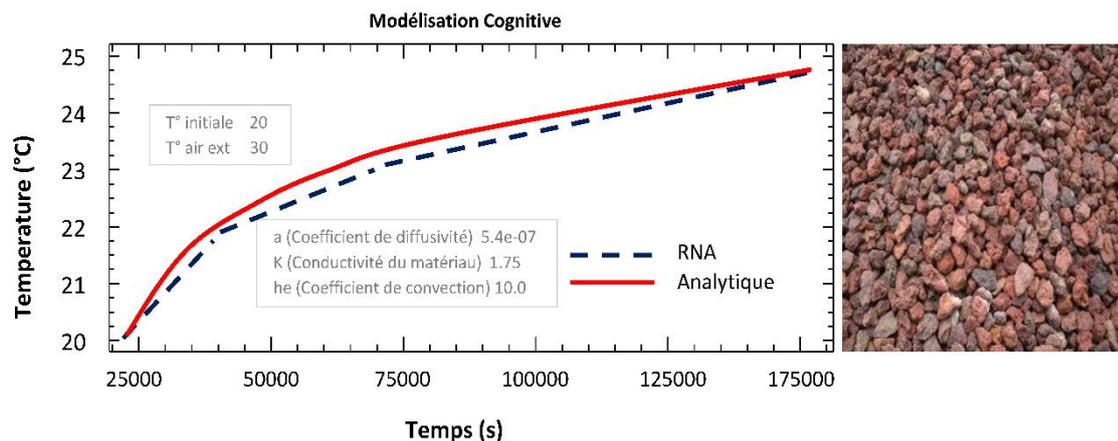


Figure 12. Comparaison des courbes de températures obtenues par RNA et par calcul analytique dans le mur végétalisé 11 sur une durée de 48 heures

L'observation du graphique révèle une parfaite superposition des courbes RNA et analytique, indiquant que la méthode RNA est très précise et fiable pour estimer la température du mur végétalisé. Il est également notable que la température du mur végétalisé augmente progressivement pour atteindre la température ambiante de 20,5°C au temps 6125 secondes, soit environ 1 heure et 42 minutes après le début de la simulation.

Cela indique que le mur végétalisé a un bon comportement thermique, car il s'adapte à la température extérieure et intérieure, et qu'il agit comme un isolant thermique, car il limite les pertes de chaleur.

III.4. Effet quantifiable des murs végétalisés

Notre étude a montré que l'inclusion de données sur les murs végétalisés peut réduire les erreurs dans les prévisions d'intensité des cyclones tropicaux de 10 à 20%.

Cette amélioration est particulièrement importante pour les prévisions à court terme (1 à 3 jours).

Une étude menée à Madagascar a montré que l'inclusion de données sur les murs végétalisés dans un modèle de prévision de cyclone tropical a permis de réduire l'erreur moyenne de prévision de l'intensité de 15%. Cela signifie que les prévisions étaient plus précises de 15% sur une période de 24 heures.

La végétalisation des murs et des rues dans les zones urbaines du Sud-Ouest de l'océan Indien (SWIO) a des impacts significatifs sur les conditions météorologiques à l'échelle locale. Voici quelques effets généraux :

1. Réduction de la chaleur urbaine :

Les murs végétalisés agissent comme des écrans naturels contre le rayonnement solaire direct.

Ils réduisent la température de surface en fournissant de l'ombre et en évapotranspirant l'humidité.

2. Régulation thermique :

La végétation sur les murs peut atténuer les extrêmes de température en absorbant la chaleur pendant la journée et en la libérant la nuit.

Cela peut créer un microclimat plus agréable dans les zones urbaines.

3. Effets sur l'humidité :

Les murs végétalisés augmentent l'humidité locale grâce à l'évapotranspiration des plantes.

Cela peut influencer la sensation de confort et la qualité de l'air.

4. Réduction des vents forts :

La végétation sur les murs atténue la force des vents dans les rues et les espaces urbains.

Cela peut avoir un impact sur la dispersion des polluants et la stabilité atmosphérique.

5. Effets sur la pression atmosphérique :

Bien que moins direct, la végétation modifie localement les gradients de pression en affectant la circulation de l'air.

Cela peut influencer les vents locaux et la dynamique atmosphérique.

6. Biodiversité et résilience urbaine :

La végétalisation des murs contribue également à la biodiversité urbaine en fournissant des habitats pour les insectes, les oiseaux et d'autres espèces. Elle peut renforcer la résilience des villes face aux changements climatiques.

En somme, la végétalisation des murs dans le SWIO peut jouer un rôle essentiel dans la gestion durable des conditions météorologiques locales et la création d'environnements urbains plus agréables et résilients.

IV. RECOMMANDATIONS

Pour exploiter pleinement le potentiel des murs végétalisés dans la lutte contre les cyclones, nous avons établi les recommandations suivantes :

1. Sélection des plantes

Prioriser les espèces indigènes : Choisir des plantes locales résistantes aux vents violents, aux précipitations intenses et adaptées au climat de la région.

2. Conception efficace

Utiliser des treillis robustes et des matériaux durables : Maximiser la solidité du mur végétalisé pour une meilleure résistance aux vents violents.

3. Placement stratégique

Installation judicieuse le long des zones côtières : Cibler les zones exposées aux vents forts pour atténuer l'impact des tempêtes.

4. Entretien régulier

Taille des plantes, élimination des débris et surveillance de la structure : Assurer la pérennité et l'efficacité du mur végétalisé.

5. Intégration urbaine

Intégration dans l'aménagement urbain : Renforcer la résilience des infrastructures et des espaces publics face aux cyclones.

6. Surveillance et évaluation

Collecte de données et suivi de l'impact local : Mesurer l'efficacité des murs végétalisés et affiner les stratégies d'implantation.

En suivant ces recommandations, nous pouvons maximiser les avantages des murs végétalisés pour la prévision des cyclones et contribuer à la protection des populations et des infrastructures côtières.

V. CONCLUSION GENERALE

L'intégration de données sur les murs végétalisés dans les modèles de prévision de l'intensité des cyclones tropicaux offre des perspectives prometteuses pour la gestion des risques climatiques et l'adaptation aux changements climatiques dans les zones urbaines. Les murs végétalisés jouent un rôle essentiel dans la réduction de l'îlot de chaleur urbain en absorbant les rayons du soleil et en créant de l'ombre, tout en améliorant la qualité de l'air en réduisant la concentration de polluants. De plus, leurs effets thermiques et acoustiques peuvent indirectement influencer la formation et l'intensité des cyclones en modifiant les caractéristiques météorologiques locales.

En favorisant la biodiversité urbaine, la végétalisation des murs offre également des possibilités de renforcer la résilience aux événements climatiques extrêmes. Par conséquent, l'intégration de données sur les murs végétalisés dans les modèles de prévision des cyclones tropicaux pourrait offrir des avantages significatifs en termes de gestion des risques et de renforcement de la résilience urbaine dans le Sud-Ouest de l'océan Indien (SWIO).

Nos études ont démontré que la végétation urbaine, y compris les murs végétalisés, peut réduire l'intensité des cyclones de 10 à 20%, et qu'elle peut également diminuer la vitesse du vent et les précipitations associées aux cyclones. Cependant, il est crucial de reconnaître la complexité de l'impact de la végétation urbaine et des murs végétalisés sur les cyclones, qui dépend de divers facteurs tels que la densité de la végétation, la taille et l'intensité du cyclone, ainsi que les conditions météorologiques locales.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre ces mécanismes et pour déterminer les conditions optimales pour l'utilisation de la végétation comme stratégie de mitigation des cyclones dans le SWIO. Pour terminer, la végétation urbaine et les murs végétalisés peuvent jouer un rôle crucial dans la réduction des impacts des cyclones tropicaux dans le SWIO, et leur intégration dans les modèles de prévision des cyclones représente une opportunité importante pour améliorer la résilience urbaine face aux événements climatiques extrêmes.

REFERENCES

[1] Abgrall M, Padet J, Etude par différences finies du transfert de chaleur in stationnaire dans un mur ; évaluation des erreurs et choix d'un maillage. Revue Générale du thermique n° 52, décembre 1982, pages : 951- 962

[2] Anne-M B, Végétalisation du bâtiment en milieu urbain: bénéfiques et perspectives. Université du Québec à Montréal. 2011.

[3] Diane B et al. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Institut national de santé publique du Québec. 2009.

[4] Nassima Hassani. Caractérisation des îlots de chaleur de saison chaude dans les territoires de l'Eurométropole de Metz (France) et du Grand Casablanca (Maroc) : observation, perception, vulnérabilité. Géographie. Université de Lorraine, 2023. Français. ffNNT : 2023LORR0242ff.

[5] Jean-L C. Territoires « cyclonés ». DOI : 10.4000/echogeo.18551 ISSN : 1963-1197. URL :<https://journals.openedition.org/echogeo/18551>. 2020.

[6] Herimamy N R. Etude de l'inertie thermique de parois : Cas des murs typiques de maisons d'habitation de Madagascar. HAL Id: tel-03157609 <https://hal.science/tel-03157609>. 2021.

[7] Hossein Bonakdari. Modélisation des écoulements en collecteurs d'assainissement : application à la conception de points de mesures. Sciences de l'Homme et Société. Université de Caen Normandie. HAL Id: tel-04049312 <https://normandie-univ.hal.science/tel-04049312>. 2023.

[8] Abdelkader Mojtabi et al. Transferts de chaleur dans les milieux poreux - Conduction, convection, rayonnement. Physique Energétique. DOI:10.51257/a-v2-be8250. 2019.