

Performance énergétique des bâtiments à toiture végétalisée

Jaurès RATSIMBAZAFIHARIVOLA^{1*}, Alain RAVOLANIRINA² et Hery Tiana RAKOTONDAMIARANA¹

¹ Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME), Université d'Antananarivo, BP 566 Antananarivo 101, Madagascar

² Laboratoire de la Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), Université d'Antananarivo, BP 566 Antananarivo 101, Madagascar

* Correspondance, courriel : anpproba@gmail.com

Résumé

Cet article a pour objectif l'étude de la performance énergétique des bâtiments revêtus d'une toiture végétalisée. Les méthodes numériques de discrétisation, d'adimensionalisation, ainsi que le double balayage ont été utilisées afin de pouvoir mettre en place un code de calcul adapté à la résolution du système régissant les différents transferts au niveau de la toiture. Une analyse de sensibilité paramétrique globale du modèle en observant l'énergie consommée par la toiture en période diurne et en période nocturne à l'aide de l'outil GoSAT a également été effectuée afin d'identifier les paramètres les plus influents ainsi que les sens de leurs effets.

Mots-clés : *toit vert, analyse de sensibilité globale, système complexe, performance énergétique.*

Abstract

Performance énergétique des bâtiments à toiture végétalisée

The objective of this paper is to study the energy performance of buildings with green roofs. The numerical methods of discretization, adimensionalisation, as well as the double scanning were used in order to be able to set up a calculation code adapted to the resolution of the system governing the various transfers at the level of the roof. A global parametric sensitivity analysis of the model by observing the energy consumed by the roof during the diurnal and night time periods using the GoSAT tool was also carried out in order to identify the most influential parameters as well as the senses of their effects.

Keywords : *green roof, global sensitivity analysis, complex system, energy performance.*

Nomenclature

Lettres latines

D_0	Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air libre, ($m^2.s^{-1}$)	ε
D_{vT}	Coefficient de diffusivité non isotherme de vapeur, ($Kg.m^2.s^{-1}.K^{-1}$)	ε_g
		ε_p

Lettres grecques

	Porosité du sol
	Emissivité du sol
	Emissivité du feuillage de la canopée

e_a	Pression de vapeur dans l'air de la canopée, (Pa)	ε_{st}	Emissivité de la toiture ordinaire
e_g	Pression de vapeur sur la surface du sol, (Pa)	θ_a	Humidité spécifique de l'air de la canopée, (kg.kg ⁻¹)
e_p	Pression de vapeur sur la surface des feuilles, (Pa)		
e_c	Pression caractéristique, (Pa)		
E_{diurne}	Energie consommée par le bâtiment en période diurne, (kWh/m ²)	$\Lambda(T)$	Chaleur latente de vaporisation à la température T, (J.kg ⁻¹)
$E_{nocturne}$	Energie consommée par le bâtiment en période nocturne, (kWh/m ²)	λ_g	Conductivité thermique effective du sol, (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
$h_{cond,g}$	Coefficient d'échange par conduction à travers la couche du sol, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	λ_s	Conductivité thermique du support, (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
$h_{cond,s}$	Coefficient d'échange par conduction à travers la couche du support (ou de la toiture ordinaire), (W.m ⁻² .K ⁻¹)	ρ	Densité apparente du sol, (kg.m ⁻³)
$h_{conv,a-g}$	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	ρ_∞	Réflectance d'une canopée dense
$h_{conv,a-o}$	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et l'air ambiant, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	ρ_a	Masse volumique de l'air, (kg.m ⁻³)
$h_{conv,p-a}$	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et les feuilles, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	ρ_g	Réflectance du sol
$h_{conv,a-s}$	Coefficient d'échange convectif entre l'air extérieur et la face supérieure de la toiture ordinaire, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	ρ_s	Gravité spécifique des particules, (kg.m ⁻³)
$h_{conv,g-a}$	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol ($h_{cvga} = h_{cva_g}$), (W.m ⁻² .K ⁻¹)	ρ_t	Réflectance du tissu des feuilles
$h_{conv,sb-i}$	Coefficient d'échange convectif entre la face inférieure du support (ou toiture ordinaire) et l'air intérieur du bâtiment, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	$(\rho C)_a$	Capacité calorifique spécifique de l'air, (J.m ⁻³ .K ⁻¹)
$h_{conv,p-a}$	Coefficient d'échange convectif entre le feuillage et l'air de la canopée ($h_{cvpa} = h_{cva_p}$), (W.m ⁻² .K ⁻¹)	$(\rho C)_g$	Capacité calorifique spécifique du sol, (J.m ⁻³ .K ⁻¹)
$h_{dif,g-i}$	Coefficient d'échange par diffusion non isotherme de vapeur à travers la couche inférieure du sol, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	$(\rho C)_p$	Capacité calorifique spécifique des feuilles, (J.m ⁻³ .K ⁻¹)
$h_{dif,g-s}$	Coefficient d'échange par diffusion non isotherme de vapeur à travers la couche supérieure du sol, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	$(\rho C)_s$	Capacité calorifique spécifique du support, (J.m ⁻³ .K ⁻¹)
h_r	Coefficient d'échange radiatif, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$h_{r,g-p}$	Coefficient d'échange radiatif entre la face supérieure du sol et le feuillage, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	φ	Flux thermique traversant la toiture, (W.m ⁻²)
$h_{r,p-g}$	Coefficient d'échange radiatif entre les feuilles et la face supérieure sol, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	φ_a	Flux thermique absorbé, (W.m ⁻²)
$h_{r,p-s}$	Coefficient d'échange radiatif entre les feuilles et la voûte céleste, (W.m ⁻² .K ⁻¹)	φ_r	Flux thermique réfléchi, (W.m ⁻²)
$h_{r,sky-st}$	Coefficient d'échange radiatif entre la voûte céleste et la face supérieure de la toiture ordinaire,	φ_t	Flux thermique transmis, (W.m ⁻²)

	$(W.m^{-2}.K^{-1})$		
h_s	Hauteur du soleil, ($^{\circ}$) ou (rad)	φ_i	Flux thermique incident, $(W.m^{-2})$
$h_{trans,p}$	Coefficient de transpiration, $(W.m^{-2}.Pa^{-1})$		Flux radiatif de grande longueur d'onde, $(W.m^{-2})$
k_1	Coefficient d'extinction moyenne des feuilles pour le rayonnement de grande longueur d'onde	$\varphi_{rad,TIR}$	
k_s	Coefficient d'extinction moyenne des feuilles pour le rayonnement de courte longueur d'onde	$\varphi_{rad,sol}$	Radiation solaire absorbée par les feuilles, $(W.m^{-2})$
LAI	Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)	φ_s	Radiation solaire arrivant au sommet de la canopée
L_c	Épaisseur de la canopée, (m)		Radiation solaire arrivant au sommet de la toiture ordinaire, $(W.m^{-2})$
L_g	Épaisseur du sol, (m)	φ_{sol}	
L_s	Épaisseur du support, (m)		Flux d'énergie dû à la transpiration des feuilles, $(W.m^{-2})$
P	Pression totale, (Pa)	$\varphi_{trans,p-a}$	
P_s	Pression de vapeur saturante, (Pa)		Flux de vapeur entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol, $(kg.m^{-2})$
P_v	Pression partielle de vapeur dans le sol, (Pa)	$\varphi_{vap,a-g}$	
R	Taux d'échange d'air, (s^{-1})		Flux de vapeur entre l'air de la canopée et l'air ambiant, $(kg.m^{-2})$
R_{dif}	Densité de flux du rayonnement solaire diffus arrivant au sommet de la canopée, $(W.m^{-2})$	$\varphi_{vap,a-m}$	
R_{difh}	Rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale, $(W.m^{-2})$		Flux de vapeur dû à la transpiration des feuilles, $(kg.m^{-2})$
R_{dir}	Densité de flux du rayonnement solaire direct arrivant au sommet de la canopée, $(W.m^{-2})$	$\varphi_{vap,a-p}$	
R_{dirh}	Rayonnement solaire direct sur une surface horizontale, $(W.m^{-2})$	ω	Humidité volumétrique du sol
r_e	Résistance externe de la canopée, $(s.m^{-1})$	ω_{fc}	Humidité volumétrique à la capacité du terrain
r_i	Résistance globale stomatale, $(s.m^{-1})$		Humidité volumétrique au point de fanaison
$r_{i,min}$	Résistance possible minimale, dont l'ampleur a une origine purement physiologique, $(s.m^{-1})$	$\omega_{\omega p}$	
R_v	Constante de gaz de la vapeur d'eau, $(J.kg^{-1}.K^{-1})$	$\delta_{air}(T')$	Pente de la courbe de pression de vapeur saturante, $(Pa.K^{-1})$
t	Temps, (s)		
t_c	Temps caractéristique, (s)		
T_a	Température au niveau de l'air dans la canopée, (K)		
T_{gt}	Température de la face supérieure du sol, (K)		
T_{in}	Température de la pièce interne du bâtiment, (K)		
T_p	Température au niveau du feuillage, (K)		
T_{sb}	Température au niveau de la face inférieure du support de la toiture, (K)		
T_{st}	Température au niveau de la face supérieure du support de la toiture, (K)		
T_{sky}	Température de la voûte céleste, (K)		
u	Vitesse du vent à l'air libre, $(m.s^{-1})$		

1. Introduction

Le toit vert est un moyen efficace pour renforcer le confort thermique des habitats [1, 3]. La modélisation des transferts de chaleur et de masse au niveau d'une toiture végétalisée demeure complexe et constitue encore un sujet d'actualité chez les thermiciens numériques. Notre travail a pour objectif, la reprise de l'étude numérique des modèles établis par Palomo Del Barrio, dans son article [Barrio E.P.D. « *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings* », Energy and Buildings, 27 (2) (1998), p.179 - 193] à l'exception de l'hypothèse simplificatrice négligeant la variation de l'humidité du substrat de croissance [4] afin de pouvoir étudier la performance des bâtiments revêtus d'une toiture végétalisée. L'intégralité du code de calcul sera mise en place sous environnement Matlab [5] et l'analyse de sensibilité du modèle sera effectué via l'outil GoSAT [6].

2. Méthodologie

2-1. Description du toit vert

Un toit vert se compose généralement de trois éléments : la canopée, le sol de croissance et le support du toit.

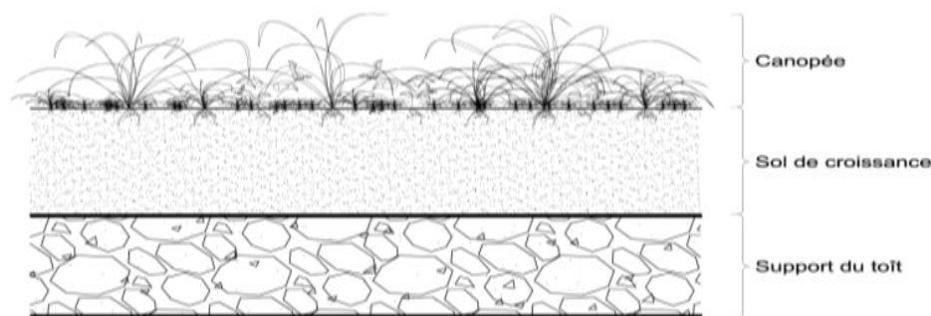


Figure 1 : Schéma descriptif d'une toiture végétalisée [7]

2-2. Modèle mathématique associé aux toits considérés

2-2-1. Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses suivantes sont adoptées pour la modélisation mathématique de la toiture végétalisée [8, 9] :

- Le toit est censé être suffisamment grand pour supposer l'homogénéité horizontale. On suppose les flux de chaleur et de masse comme étant essentiellement verticaux, de manière à utiliser des modèles unidimensionnels pour décrire le comportement thermique des composants de la toiture ;
- Le support de la toiture est supposé comme étant une couche homogène d'un matériau solide ayant des propriétés thermophysiques constantes ;
- La température interne du bâtiment est considérée comme connue, uniforme et constante.

2-2-2. Équations des bilans thermiques du toit vert

- Au niveau du sol de croissance des végétaux

$$\begin{cases} (\rho C)_g(\omega, t) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(\lambda_g(\omega, t) + \Lambda \cdot D_{vT}(\omega, t)) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} + \Lambda \cdot D_{v\omega}(\omega, t) \cdot \frac{\partial \omega(z, t)}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial \omega(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_\omega(\omega, t) \cdot \frac{\partial \omega(z, t)}{\partial z} + D_T(\omega, t) \cdot \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(z, t)}{\partial z} + \varphi(z, t) \end{cases} \quad (1)$$

■ *Au niveau de la canopée*

■ *Au niveau des feuilles :*

$$(\rho C)_p \cdot d \cdot LAI \cdot \frac{dT_p}{dt} = \varphi_{rdsol} + \varphi_{rdTIR} + \varphi_{cvpa} + \varphi_{trpa} \quad (2)$$

■ *Au niveau de l'air de la canopée :*

$$(\rho C)_a \cdot L_c \cdot \frac{dT_a}{dt} = \varphi_{cvap} + \varphi_{cvag} + \varphi_{cvam} \quad (3)$$

■ *Bilan de vapeur :*

$$\rho_a \cdot L_c \cdot \frac{d\theta_a}{dt} = \varphi_{vapap} + \varphi_{vapag} + \varphi_{vapam} \quad (4)$$

■ *Au niveau du support de la toiture*

$$(\rho C)_s \frac{\partial T_s(z, t)}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s(z, t)}{\partial z^2} \quad (5)$$

Les conditions aux limites suivantes, découplant le support du reste de la toiture, sont adoptées [4] :

$$\begin{cases} T_s(z = 0, t) = T_{support, top}(t) \\ -\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=L_s} = h_{in} \cdot (T_{support, bottom}(t) - T_{in}) \end{cases} \quad (6)$$

Où, $z = 0$ signifie la surface supérieure de la couche du support de la toiture et $z = L_s$, la surface inférieure en contact avec l'air intérieur. L_s est l'épaisseur de la couche du support, T_{in} la température de l'air intérieur, $T_{support, top}$ la température imposée à la surface supérieure, et $T_{support, bottom}$ est la température à sa surface inférieure du soutien.

La **Formule** de Hottel et Woertz dans [10] a été retenue pour déterminer h_{in} , supposant que le support est directement en contact avec l'air intérieur de la pièce, telle que :

$$h_{in} = \frac{1,162 \cdot (5,05 - 1,39 \cdot a + 0,277 \cdot a^2)}{|T_{in} - T_{sb}|^{0,25}} \quad (7)$$

● *Modèle de couplage canopée-sol*

La continuité des variables d'état à l'interface sol-canopée, implique :

$$T_g(t) = T_{soil, top} e_g(t) = p_v(T_{soil, top}, \omega_{soil, top}) \quad (8)$$

telle que pression partielle de l'eau p_v est calculée par ***l'Équation (8)*** aux valeurs de la température et de l'humidité de la surface supérieure du sol. La continuité de la densité de flux de chaleur à l'interface sol-canopée, implique :

$$(-(\lambda + \Lambda D_{vT}) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z}) \Big|_{z=0} = (1 - \rho_s) k_s \varphi_s + [\tau_1 \sigma T_{sky}^4 + (1 - \tau_1) \sigma T_p^4 - \sigma T_g^4] - h_g (T_g - T_a) - \Lambda \tilde{h}_g (e_g - e_a) \quad (9)$$

Cette ***Équation*** représente le bilan énergétique à la surface supérieure du sol quand on suppose qu'il n'y a aucun stockage d'énergie. La continuité de la densité de flux de vapeur à l'interface sol-canopée, implique :

$$(-D_{vT} \frac{\partial T(z,t)}{\partial z})_{z=0} = -\tilde{h}_g (e_g - e_a) \quad (10)$$

- ***Modèle de couplage sol-support***

D'une manière analogue que précédemment, nous pouvons écrire pour l'interface de support-sol :
Continuité de température :

$$T_{soil,bottom}(t) = T_{support,top}(t) \quad (11)$$

Continuité de flux de chaleur :

$$(-(\lambda + \Lambda D_{vT}) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z})_{z=L} = -\lambda_s (\frac{\partial T_s(z,t)}{\partial z})_{z=0} \quad (12)$$

On suppose que le support de la toiture est imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau.

2-3. Systèmes après discrétisation

- ***Au niveau du sol de croissance des végétaux***

Les ***Équations*** étant écrites sous forme de loi de conservation, elles sont par la suite intégrées sur des points de l'objet assimilé simplement à un petit volume élémentaires de forme simple. Il en découle de ***l'Équation (1)*** la mise en place de la suivante forme matricielle :

$$A \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[B \cdot \frac{\partial U}{\partial z} \right] + S \quad (13)$$

Avec successivement :

$$A = \begin{bmatrix} \rho C_p & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, U = [T, \omega], B = \begin{bmatrix} \lambda + \Lambda D_{vT} & \Lambda D_{vT} \\ D_T & D_\omega \end{bmatrix} \text{ et } S = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial K}{\partial z} + \varphi \end{bmatrix}$$

Les volumes de contrôle étant choisis réguliers, on peut supposer que le nœud P occupe une position d'indice i , le nœud O, la position d'indice $i - 1$, le nœud E, la position d'indice $i + 1$, etc. La discrétisation de ***l'Équation (1)*** par la méthode des volumes finis [11] donne :

$$AA(i)U_{i-1}^{n+1} + BB(i)U_i^{n+1} + CC(i)U_{i+1}^{n+1} = DD(i) \quad (14)$$

Avec successivement :

$$\begin{aligned}
 AA(i) &= -\frac{\Delta t}{2\Delta z} [B_i^{n+1} + B_{i-1}^{n+1}] \\
 BB(i) &= \Delta z \cdot A(U_i^{n+1}) + \frac{\Delta t}{2\Delta z} [B_{i-1}^{n+1} + 2B_i^{n+1} + B_{i+1}^{n+1}] \\
 CC(i) &= -\frac{\Delta t}{2\Delta z} [B_{i+1}^{n+1} + B_i^{n+1}] \\
 DD(i) &= \Delta z \cdot A(U_i^n) U_i^n + G_i^{n+1} \\
 G_i^{n+1} &= \begin{bmatrix} 0 \\ (K_{i-1}^{n+1} - K_{i+1}^{n+1}) \frac{\Delta t}{2} + \overline{\varphi} \Delta t \Delta z \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Le principe du double balayage [12] permet d'écrire :

$$U_i^{n+1} = \alpha(i) U_{i+1}^{n+1} + \beta(i) \quad (15)$$

Ou encore

$$U_{i-1}^{n+1} = \alpha(i-1) U_i^{n+1} + \beta(i-1) \quad (16)$$

En introduisant l'équation (15) dans (14), il vient :

$$AA(i) \alpha(i-1) U_i^{n+1} + BB(i) U_{i+1}^{n+1} + CC(i) U_{i+1}^{n+1} + AA(i) \beta(i-1) = DD(i) \quad (17)$$

L'Équation (16) peut se mettre sous la forme :

$$U_i^{n+1} = EE(i) U_{i+1}^{n+1} + FF(i) \quad (18)$$

Avec successivement

$$EE(i) = -[AA(i) \alpha(i-1) + BB(i)]^{-1} CC(i) \quad (19)$$

$$FF(i) = [AA(i) \alpha(i-1) + BB(i)]^{-1} [DD(i) - AA(i) \beta(i-1)] \quad (20)$$

Ainsi une comparaison entre **l'Équation (15)** et **l'Équation (19)** donne :

$$\alpha(i) = -[AA(i) \alpha(i-1) + BB(i)]^{-1} CC(i) \quad (21)$$

$$\beta(i) = [AA(i) \alpha(i-1) + BB(i)]^{-1} [DD(i) - AA(i) \beta(i-1)] \quad (22)$$

Les **Formules** de récurrences (21) et (22) sont amorcées à l'aide de la donnée de la matrice $\alpha(1)$ et du vecteur colonne $\beta(1)$ issue des conditions aux limites.

Lors du premier balayage allant de $i = 2, \dots, i_{max}$ on détermine la matrice fonction α et le vecteur fonction β .

■ *Au niveau de la canopée*

En appliquant la méthode de discrétisation par différence finie [13] et la méthode d'adimensionalisation [14] au système **d'Équations (2) à (4)**, nous obtenons le système **d'Équations** adimensionnées suivant :

$$((\rho C)_p dLAI) \frac{dT_p}{dt} (h_{r,g-p} + h_{r,sky-p} + h_{conv,a-p} + H_1 \delta_{air}(T')) \cdot T_p (h_{conv,a-p} + H_1 \delta_{air}(T')) \cdot T_a + (2LAI \frac{(\rho C)_a}{\gamma(\tau_e + \tau_i)}) \cdot e_a + h_{r,g-p} \cdot T_g + [1 - \tau_s - (1 - \tau_s) \rho_\infty] (1 + \tau_s \rho_g) \varphi_s - H_1 e_a^* + h_{r,sky-p} T_{sky} \quad (23)$$

$$((\rho C)_a L_c) \cdot \frac{dT_a}{dt} = h_{conv,p-a} \cdot T_p - (h_{conv,p-a} + h_g + h_{a-\infty}) \cdot T_a + h_g \cdot T_g + h_{a-\infty} T_\infty \quad (24)$$

$$\left(\frac{\rho_a L_c P \varepsilon}{[P - (1 - \varepsilon) e_{a0}]^2} \right) \frac{de_a}{dt} = (H_1 \delta_{air}(T')) \cdot T_p - (H_1 \delta_{air}(T')) \cdot T_a - (H_1 + \tilde{h}_g + \tilde{h}_{a\infty}) \cdot e_a + (H_1 e_a^* + \tilde{h}_g e_g + \tilde{h}_{a\infty} e_\infty) \quad (25)$$

■ *Au niveau du support de la toiture*

La discrétisation de **l'Équation (5)** par la méthode des volumes [11] finis donne :

$$T_{si}^{n+1} = \frac{\gamma}{(1+2\gamma)} T_{si+1}^{n+1} + \frac{\gamma}{(1+2\gamma)} T_{si-1}^{n+1} + \frac{1}{(1+2\gamma)} T_{si}^n \quad (26)$$

$$\text{avec, } \gamma = \frac{\lambda_s \Delta t}{(\rho C)_s \Delta z^2}$$

3. Résultats et discussion

Sur la **Figure 2** est présenté deux courbes du flux thermique dont l'une est obtenue par simulation avec des données météorologiques de la région d'Antananarivo tandis que l'autre est obtenue expérimentalement au Laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion [15].

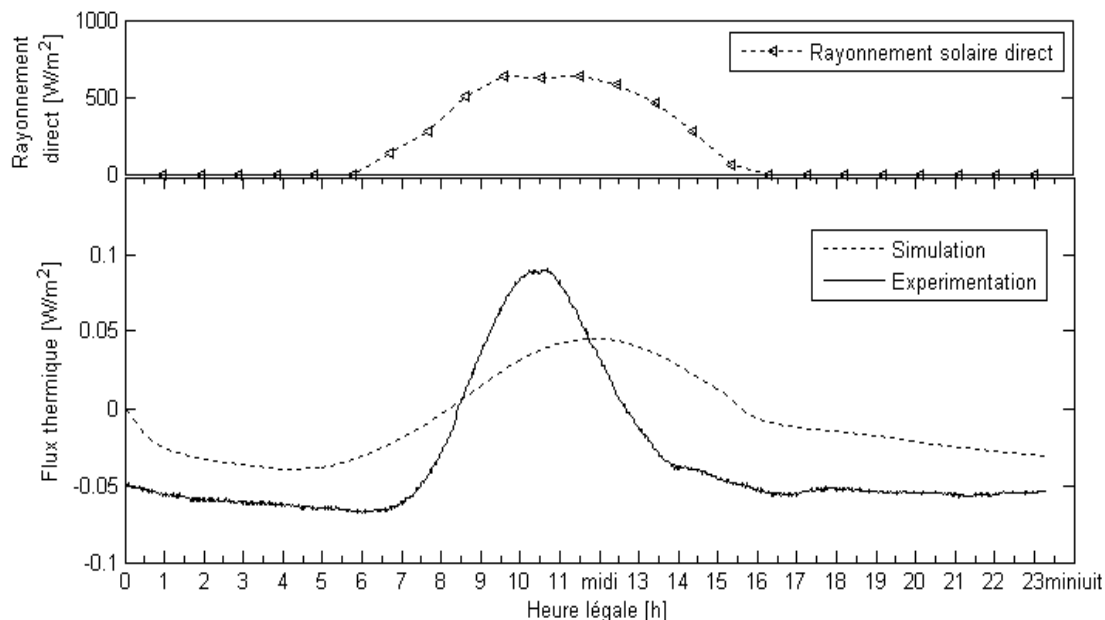


Figure 2 : Comparaison des flux de chaleur traversant la toiture

Ces résultats sur la **Figure** précédente représentent la comparaison des flux de chaleur traversant un toit végétal, l'une est obtenue par simulation avec des données météorologiques de la région d'Antananarivo tandis que l'autre est obtenue expérimentalement au Laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion [15]. Nous pouvons y noter deux cas de valeurs du flux thermique φ traversant le toit vert : $\varphi < 0$ et $\varphi > 0$. Ainsi, $\varphi > 0$ signifie qu'il y a gain de chaleur par la toiture améliorant ainsi le confort du bâtiment tout en réduisant sa consommation énergétique. Cette phase est observée entre 09:00 et 15:00 pour la simulation. Dans les autres heures, on observe une valeur négative de φ signifiant une perte, absorption de chaleur par le toit ce qui donne une sensation de fraîcheur. Dans cette même **Figure** est également montré l'apport solaire (Rayonnement solaire direct) au système ayant contribué considérablement au remonté de la valeur du flux thermique φ , l'allure de sa courbe épouse bien celle du flux φ dont il est le principal contributeur. La **Figure 3** donne une allure de l'évolution de la température au niveau de la toiture obtenue par simulation pendant la première journée du mois de Juin 2007. La température calculée des feuilles T_p restent très voisines de la température de l'air de la canopée T_a . Cela est dû au phénomène de l'évapotranspiration [16]. Cette observation est conforme aux résultats obtenus antérieurement [9].

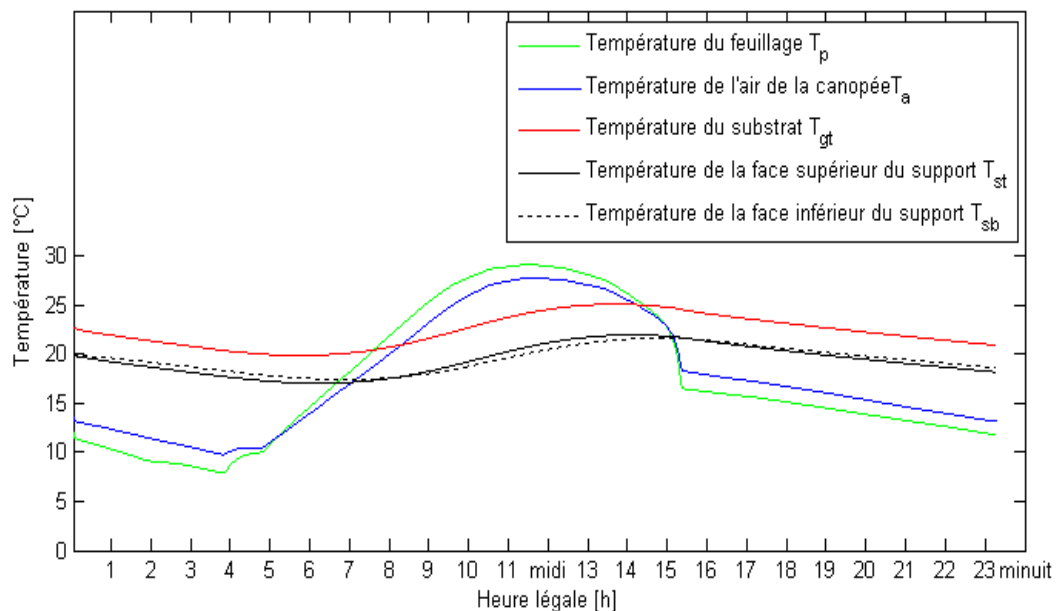


Figure 3 : Évolution des températures des différents éléments de la toiture

On peut également remarquer sur la **Figure 3** que les températures du substrat et celle de la face supérieure du support sont supérieures à celles des feuilles et de l'air de la canopée entre 00:00 et 07:00. Ensuite, le phénomène inverse se présente entre 07:00 et 15:30 (cas 2), c'est-à-dire que les températures des feuilles et de l'air de la canopée deviennent supérieures par rapport à celles du substrat et de la face supérieure du support. En effet, on est en présence de deux sources d'énergie : l'une à l'extérieur du bâtiment (Rayonnement solaire) et l'autre à l'intérieure (température maintenue constante égale à 20°C par hypothèse). En effet, la face inférieure du support reçoit beaucoup plus d'énergie par convection pendant la période nocturne où la température à l'intérieur devient supérieure à celle de l'extérieur. Par contre, les feuilles reçoivent beaucoup plus d'énergie solaire par rapport aux autres couches pendant la période diurne où la température à l'extérieur est supérieure à la température intérieure de la pièce sous le toit vert.

3-1. Résultats de l'analyse de sensibilité globale

3-1-1. Résultats de l'analyse de sensibilité de l'énergie consommée [17] par le bâtiment en période diurne (E_{diurne})

La **Figure 4** donne l'ordre chronologique d'influence des facteurs d'entrée du modèle de l'énergie consommée par la toiture en période diurne.

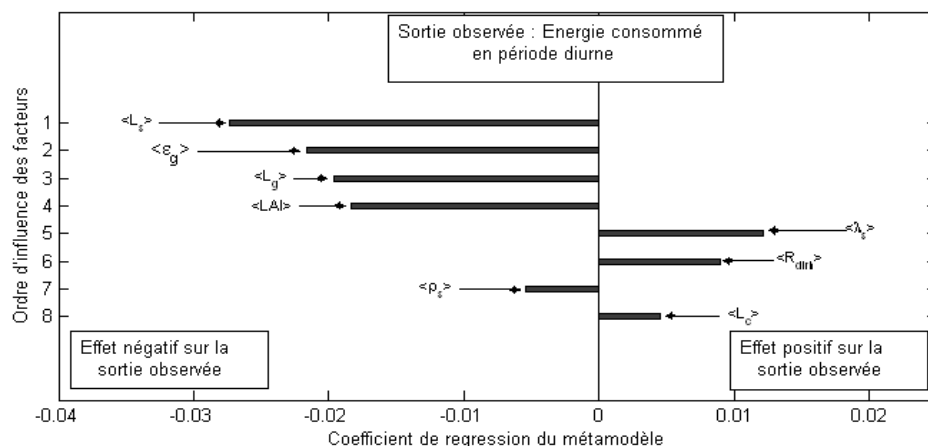


Figure 4 : Ordre de prépondérance des paramètres les plus influents associés au modèle de la toiture végétalisée

On peut dire que l'épaisseur L_s , l'émissivité du sol ε_g , l'épaisseur L_g de la couche de substrat, l'indice de surface foliaire LAI , la conductivité thermique λ_s du support, le rayonnement solaire direct arrivant sur une surface horizontale R_{dirh} , la densité ρ_s du support, suivi de l'épaisseur L_c de la couche de canopée sont les paramètres les plus influents. Les paramètres présentant un effet négatif ou effet positif en vue de la sortie du modèle, entraîne respectivement par leur accroissement une diminution ou une augmentation de la valeur de l'énergie consommée. La **Figure 5** nous présente l'ordre de prépondérance des interactions double associées au modèle de l'énergie consommée par la toiture verte en période diurne. Dans cette **Figure**, on remarque que l'ordre d'interaction double est caractérisé par les facteurs les plus influents cités précédemment à savoir l'épaisseur L_s , l'épaisseur L_g et le rayonnement solaire direct R_{dirh} .

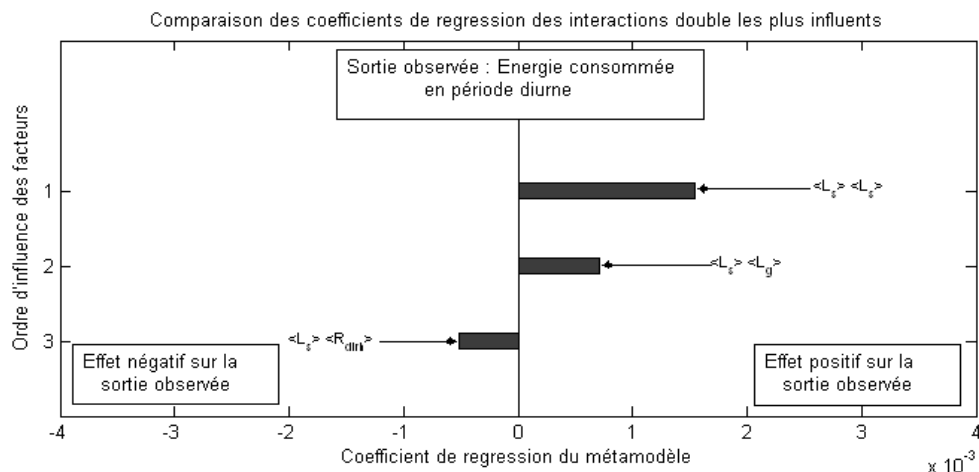


Figure 5 : Ordre de prépondérance des interactions double associées au modèle de la toiture végétalisée

3-1-2. Résultats de l'analyse de sensibilité de l'énergie consommée par le bâtiment en période nocturne (E_{nocturne})

Les **Figures 6 et 7** suivantes nous présentent les résultats de l'analyse de sensibilité de l'énergie consommée par le bâtiment en période nocturne.

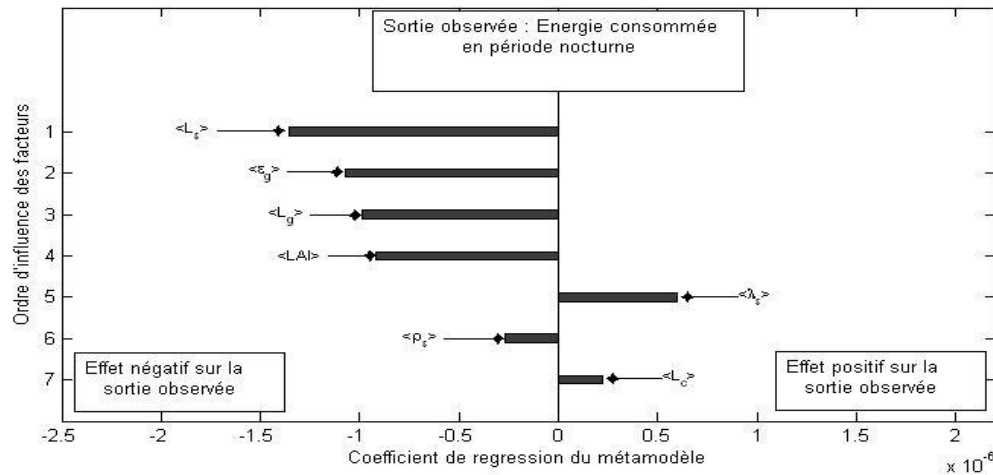


Figure 6 : *Ordre de prépondérance des facteurs les plus influents du modèle de la toiture en période nocturne*

Similairement au cas de l'énergie consommée en période diurne, la **Figure 6** montre que les paramètres les plus influents du modèle de l'énergie consommée par le bâtiment en période nocturne sont les suivantes : l'épaisseur L_s , l'émissivité du sol ε_g , l'épaisseur L_g de la couche de substrat, l'indice de surface foliaire LAI , la conductivité thermique λ_s du support la densité ρ_s du support, suivi de l'épaisseur L_c de la couche de canopée. Le paramètre caractéristique de la canopée notamment l'épaisseur L_c présente une faible influence positive sur la sortie observée en période nocturne. En effet, une couche assez épaisse de canopée permet de stabiliser la température au sein de la canopée en période nocturne ce qui entraîne une faible variation des températures des éléments du toit vert. Ainsi une augmentation de l'énergie consommée. La **Figure 7** nous présente l'ordre de prépondérance des interactions double associées au modèle de l'énergie consommée par la toiture verte en période nocturne. Dans cette **Figure**, on remarque que l'ordre d'interaction double est caractérisé par les facteurs les plus influents cités précédemment à savoir l'épaisseur L_s , l'épaisseur L_g .

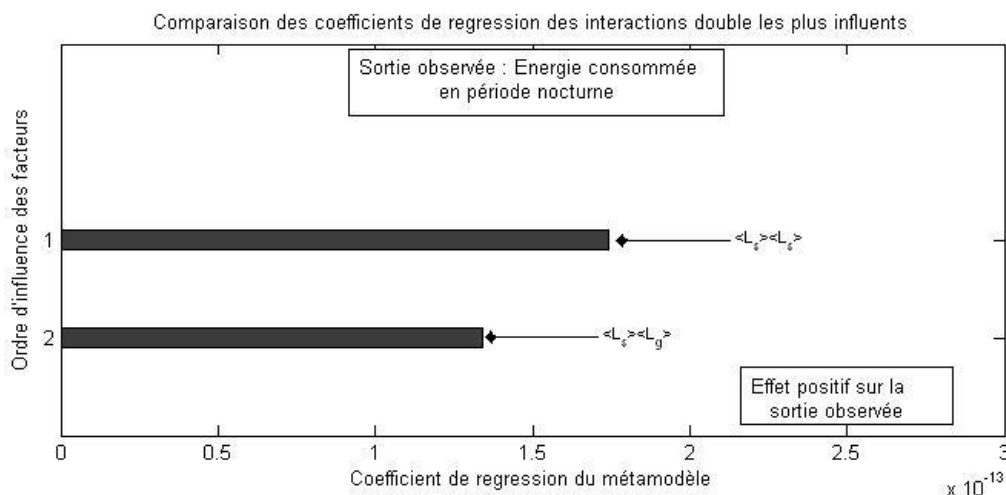


Figure 7 : *Ordre de prépondérance des interactions double les plus influents*

On constate que l'épaisseur L_s du support, L_g de la couche de substrat ont des effets positifs sur la sortie observée. L'une des conditions d'une isolation performante est, en effet, l'utilisation des isolants qui offrent la résistance thermique la plus forte. Plus l'épaisseur du matériau est importante, plus la résistance thermique augmente [18]. Par conséquent, plus la résistance thermique du système d'isolation est élevée, moins il y aura besoin de consommer de l'énergie. Or l'énergie qui n'est pas consommée est une énergie qui est économisée et ne pollue pas.

4. Conclusion

Ce travail a permis l'étude de la performance énergétique des bâtiments revêtus d'une toiture végétalisée en se basant sur le modèle établi par Palomo Del Barrio. Les résultats de l'analyse de sensibilité, en observant l'énergie consommée par la toiture en période diurne et en période nocturne à l'aide de l'outil GoSAT, nous ont permis de classer par ordre de prépondérance les effets linéaires les plus influents. On constate que la condition d'une isolation performante est d'utiliser des isolants qui offrent la résistance thermique la plus forte. Cela apporte une contribution aux travaux déjà réalisés dans la littérature en nous affranchissant ainsi d'une expérimentation très onéreuse. Ainsi, à travers les différentes étapes de ce travail, nous avons pu porter une analyse profonde sur la performance énergétique d'un modèle de bâtiment à toit vert.

Références

- [1] - «Végétalisation des bâtiments». Téléchargeable sur : <http://www.ekopolis.fr/sites/default/files/docs-joints/RES-1209-vegetalisation-des-batiments-rapport.pdf>
- [2] - A. NIACHOU, K. PAPAKONSTANTINO, M. SANTAMOURIS, A. TSANGRASSOULIS, G. MIHALAKAKOU, « Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance ». *Energy and Buildings*, (2001) 719 - 29
- [3] - R. FIORETTI, A. PALLA, L. G. LANZA, P. PRINCIPI, « Green roof energy and water performance in the Mediterranean climate ». *Build Environ*, (2010) 1980 - 904
- [4] - E. P. D. BARRIO, «Analysis of the green roofs cooling potential in buildings». *Energy and Buildings*, 27 (2) (1998) 179 - 193
- [5] - MATLAB, High-performance numeric computation and visualization software, The MathWorks
- [6] - H. T. RAKOTONDRIAMARANA, A. L. ANDRIAMAMONJY, « Matlab automation algorithm for performing global sensitivity analysis of complex system models with a derived FAST method ». *Journal of Computations & Modeling*, Vol. 3, N° 3 (2013) 17 - 56
- [7] - https://fr.wikipedia.org/wiki/Toiture_végétale
- [8] - D. MORAU, H. T. RAKOTONDRIAMARANA, A. L. ANDRIAMAMONJY, «Simple Model for the Theoretical Survey of the Green Roof Thermal Behavior». *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, 1 (2) (2012) 92 - 102
- [9] - A. L. Andriamamonjy, H. T. Rakotondramiarana, M. R. Rajaonahy, M. H. Rafieferantsoa, D. Morau « Proposition d'un modèle simple pour l'étude théorique du comportement thermique d'un couvert végétal ». Actes du 1er Congrès International Plasma-Energie (CIPE) du 16 au 20 Juillet 2012
- [10] - H. T. RAKOTONDRIAMARANA, « Etude théorique du séchage thermique et de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration-Mise au point des dispositifs pilotes de laboratoires pour la caractérisation expérimentale liée au séchage et à la méthanisation des boues ». Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, (2004)

- [11] - R. EYMARD, T. GALLOUËT et R. HERBIN, « The finite volume method », *Handbook of Numerical Analysis*, Vol. 7, (2000) 713 - 1020
- [12] - http://en.wikipedia.org/wiki/Tridiagonal_matrix_algorithm
- [13] - W. F. AMES, « Numerical Methods for Partial Differential Equations », (1977)
- [14] - <http://www.en.wikipedia.org/wiki/Nondimensionalization>, Academic Press, New York, San Francisco
- [15] - D. Morau, H. T. Rakotondramiarana, T. F. Ranaivoarisoa, A. L. Andriamamonjy, « Thermal Behavior of Green Roof in Reunion Island: Contribution towards a Net Zero Building ». *Energy Procedia*, Vol. 57, (2014) 1908 - 1921
- [16] - <https://fr.wikipedia.org/wiki/Evapotranspiration>
- [17] - J. SEBASTIEN, « Performance énergétique d'une toiture végétale au centre-ville de Montréal ». Summary of thesis. School of Higher Technology of Montreal, (2011), Téléchargeable sur : http://cremtl.qc.ca/fichierscre/files/normandie/Performance_toiture_verte_2011.pdf
- [18] - JEAN-FRANÇOIS SACADURA, « Initiation aux transferts thermiques, Lavoisier », Paris, (1993)