



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



Mémoire pour l'obtention du **Diplôme d'Etudes Approfondies** en Physique

Option : **ENERGETIQUE**

MISE AU POINT D'UN CODE DE CALCUL POUR L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE

Présentée par

RAFIEFERANTSOA Mika Harisetry

Le 20 Décembre 2011

Membres du JURY

Président	: Monsieur RAKOTOMALALA Minoson	Professeur titulaire à l'Université d'Antananarivo
Examineurs	: Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo Monsieur RASAMIMANANA François de Salle	Professeur titulaire à l'Université d'Antananarivo Maître de Conférences à l'Université d'Antananarivo
Rapporteur	: Monsieur RAKOTONDRAMIANANA Hery Tiana	Maître de Conférences à l'Université d'Antananarivo



Institut pour la Maîtrise de l'Energie



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



Mémoire pour l'obtention du **Diplôme d'Etudes Approfondies** en Physique

Option : ENERGETIQUE

MISE AU POINT D'UN CODE DE CALCUL POUR L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES DIFFÉRENTES COMPOSANTES D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE

Présentée par

RAFIEFERANTSOA Mika Harisetry



20 Décembre 2011

Remerciements

Le présent travail n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de certaines personnes. Et je ne suis pas non plus capable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont pu jouer à mes côtés pour en arriver là. Cependant, je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Mes premiers remerciements vont d'abord à Monsieur ANDRIANANTENAINA Bruno Jacques, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, de nous avoir autorisé la présentation de ce mémoire.

Je remercie également Monsieur RAKOTOMALALA Minoson, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo et Directeur de l'IME (Institut pour la Maîtrise de l'énergie), d'avoir bien voulu m'intégrer dans son équipe et d'avoir accepté la présidence de ce mémoire malgré ses lourdes occupations.

Ma joie est immense de pouvoir exprimer mes respectueuses reconnaissances à Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo, Professeur titulaire à l'Université d'Antananarivo, Chef de Département de Physique et à Monsieur RASAMIMANANA François de Salle, Maître de Conférences à l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté de faire partie des membres du jury et d'examiner ce travail malgré leurs multiples tâches.

Je tiens aussi à remercier mon encadreur, qui m'a accompagné tout au long de mon travail. Sa disponibilité et ses généreux secours au cours de certains de mes moments difficiles ont été d'une très grande qualité, et d'un immense réconfort ; merci infiniment Monsieur RAKOTONDAMIARANA Hery Tiana.

Je ne saurais comment ne pas avoir une pensée sincère et profonde à mes collègues à l'IME et à mes chers compagnons d'aventure de la Faculté des Sciences.

Il y a aussi tous ceux qui ne savent voir aucun de mes défauts, qui partagent mes chagrins et mes joies, qui n'ont épargné aucun effort pour me soutenir moralement et physiquement : ce sont ma mère, mon père et mon frère ; je leur adresse mon entière affection.

La liste de ceux qui ont apporté une contribution à cette œuvre, est bien longue et afin de ne pas en oublier, j'espère qu'ils accepteront le loisir que je leur laisse, en découvrant les contributions qu'ils ont pu m'apporter au détour des pages à venir.

Je vous adresse tous mes sentiments de reconnaissance renouvelée. Comment peut-on échouer avec une telle armée derrière soi ?

Enfin, si je cite le nom de Celui-ci en dernier ressort, c'est plutôt parce qu'IL est toute ma vie, le socle et le ressort de toutes mes actions, l'auteur de la réalisation de mes rêves, et de ma mission sur la terre. Celui qui est toujours là, lorsque tout semble me quitter. Il s'agit de mon Maître et Sauveur Jésus-Christ. Dans les douleurs et les pleurs les plus internes, secrètes, sincères et profondes, Toi tu étais toujours présent et plein de ton immense Miséricorde, et de ton Grand Amour du Dieu à qui rien n'est impossible. Aucun remerciement n'est trop grand pour Toi, et merci de m'avoir permis d'arriver à ce niveau-ci dans ma vie. Je ne peux que compter sur toi pour continuer le reste de la réalisation de mes rêves, et de la mission que Tu m'as confiée, parce que même si les hommes m'abandonnent, je sais que Toi, tu ne m'abandonneras jamais.

«Donne-moi l'intelligence, pour que je garde ta loi Et que je l'observe de tout mon cœur!»

Psaume 119:34

"La science sans religion est boiteuse, la religion sans science est aveugle."

Albert Einstein

TABLE DES MATIERES

Nomenclature	2
Liste des figures	8
Liste des tableaux	8
INTRODUCTION	9

Chapitre I :

PRESENTATION DU MODELE DE LA TOITURE VEGETALISEE

I.1 – DESCRIPTION DE LA TOITURE VEGETALISEE	11
I.2 – MODELE MATHEMATIQUE ASSOCIE A LA TOITURE	12
I.2-1 Equations de bilan énergétique	15
I.2-2 Modèle des coefficients d'échange thermique.....	16
I.2-3 Apport solaire au système.....	22
I.2-4 Modèle des flux de vaporisation.....	25
I.3 – METHODE DE RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS DE BILAN	28
I.3-1 Equations de bilan thermique	28
I.3-2 Equation de bilan massique	28
I.3-3 Méthode de calcul.....	29

Chapitre II :

PRESENTATION DES RESULTATS DE SIMULATION ET COMMENTAIRES

II.1 Evolution des températures des différents éléments de la toiture	32
II.2 Influences des paramètres	33
II.2-1 Influences des paramètres de la canopée	34
II.2-2 Influences des paramètres du sol.....	39
II.2-3 Influences des paramètres du support.....	43
II.2-4 Influences de la position du toit.....	47
CONCLUSION	50
ANNEXE	51
REFERENCES	67

NOMENCLATURE

Alphabets latins :

a	Angle d'inclinaison du toit par rapport à l'horizontale	[°] ou [rad]
alb	Albédo du sol	[]
az _s	Azimut du soleil	[°] ou [rad]
az _t	Azimut du toit	[°] ou [rad]
CLO	Courte longueur d'onde	-----
CO ₂	Concentration de CO ₂ dans l'air de la canopée	[ppmv]
D	Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air	[m ² . s ⁻¹]
d	Epaisseur moyenne des feuilles	[m]
D ₀	Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air libre	[m ² . s ⁻¹]
D _{vT}	Coefficient de diffusivité non isotherme de vapeur	[kg. m ² . s ⁻¹ . K ⁻¹]
e _a	Pression de vapeur dans l'air de la canopée	[Pa]
e _g	Pression de vapeur sur la surface du sol	[Pa]
e _p	Pression de vapeur sur la surface des feuilles	[Pa]
f	Coefficient pour permettre de représenter qu'une canopée s'évapore plus (f < 1) ou moins (f > 1) par rapport à une culture de tomate.	[]
F _{pg}	Facteur de forme géométrique entre les feuilles et le sol.	[]
F _{ps}	Facteur de forme géométrique entre la toiture et la voute céleste	[]
g	Accélération de pesanteur	[m. s ⁻²]
GLO	Grande longueur d'onde	-----
h _{cdg}	Coefficient d'échange par conduction à travers la couche du sol	[W. m ⁻² . K ⁻¹]
h _{cds}	Coefficient d'échange par conduction à travers la couche du support	[W. m ⁻² . K ⁻¹]

h_{cvag}	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{cvam}	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et l'air ambiant	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{cvap}	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et les feuilles	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{cvga}	Coefficient d'échange convectif entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol ($h_{cvag}=h_{cvga}$)	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{cvi}	Coefficient d'échange convectif entre la face inférieure du support et l'air intérieur du bâtiment	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{cvpa}	Coefficient d'échange convectif entre le feuillage et l'air de la canopée ($h_{cvap}=h_{cvpa}$)	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{difgi}	Coefficient d'échange par diffusion non isotherme de vapeur à travers la couche inférieure du sol	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{difgs}	Coefficient d'échange par diffusion non isotherme de vapeur à travers la couche supérieure du sol	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{rgp}	Coefficient d'échange radiatif entre la face supérieure du sol et le feuillage	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{rpg}	Coefficient d'échange radiatif entre les feuilles et la face supérieure sol	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_{rps}	Coefficient d'échange radiatif entre les feuilles et la voûte céleste	$[W. m^{-2}. K^{-1}]$
h_s	Hauteur du soleil	$[^{\circ}]$ ou $[rad]$
h_{trpa}	Coefficient de transpiration	$[W. m^{-2}. Pa^{-1}]$

k_1	Coefficient d'extinction moyenne des feuilles pour le rayonnement de grande longueur d'onde	[]
k_s	Coefficient d'extinction	[]
k_s	Coefficient d'extinction moyenne des feuilles pour le rayonnement de courte longueur d'onde	[]
LAI	Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)	[]
L_c	Epaisseur de la canopée	[m]
L_g	Epaisseur du sol	[m]
L_s	Epaisseur du support	[m]
P	Pression totale	[Pa]
p_s	Pression de vapeur saturante	[Pa]
p_v	Pression partielle de vapeur dans le sol	[Pa]
R	Taux d'échange d'air	[ach]
R_{dif}	Densité de flux du rayonnement solaire diffus arrivant au sommet de la canopée	[W. m ⁻²]
R_{dir}	Densité de flux du rayonnement solaire direct arrivant au sommet de la canopée	[W. m ⁻²]
R_{dirh}	Rayonnement solaire direct sur une surface horizontale (fourni par les données météorologiques)	[W. m ⁻²]
r_e	Résistance externe de la canopée	[s. m ⁻¹]
r_i	Résistance globale stomatale	[s. m ⁻¹]
\tilde{r}_1	Fonctions sans dimensions supérieures à l'unité évaluant quantitativement l'accroissement relatif de la résistance interne	[]
r_{min}	Résistance possible minimale, dont l'ampleur a une origine purement physiologique	[s. m ⁻¹]

R_v	Constante de gaz de la vapeur d'eau	$[J. kg^{-1}. K^{-1}]$
S	Surface du toit considéré	$[m^2]$
t	temps	$[s]$
T_a	Température moyenne de l'air dans la canopée	$[K]$
T_{gt}	Température moyenne de la face supérieure du sol	$[K]$
T_{in}	Température interne du bâtiment	$[K]$
T_m	Température de l'air ambiant	$[K]$
T_p	Température moyenne des feuilles	$[K]$
T_{sb}	Température moyenne de la face inférieure du support	$[K]$
T_{sky}	Température de la voûte céleste	$[K]$
T_{st}	Température moyenne de la face supérieure du support	$[K]$
u	Vitesse du vent à l'air libre	$[m. s^{-1}]$
v	Vitesse du vent dans la canopée	$[m. s^{-1}]$

Alphabets grecs :

α	Valeur adimensionnelle constante	$[]$
α_l	Angle d'inclinaison moyenne des feuilles par rapport à l'horizontal	$[^\circ]$
γ	Constante psychrométrique thermodynamique	$[Pa. K^{-1}]$
ε	Porosité du sol	$[]$
ε_g	Emissivité du sol	$[]$
ε_p	Emissivité du feuillage de la canopée	$[]$
Θ_1	Angle d'incidence du rayonnement solaire direct sur un toit incliné	$[rad]$
Θ_a	Humidité spécifique moyenne de l'air de la canopée	$[kg. kg^{-1}]$

Λ	Chaleur latente de vaporisation	[J. kg ⁻¹]
$\Lambda(T_i)$	Chaleur latente de vaporisation à la température T_i	[J. kg ⁻¹]
λ_g	Conductivité thermique effective du sol	[W. m ⁻¹ . K ⁻¹]
λ_s	Conductivité thermique du support	[W. m ⁻¹ . K ⁻¹]
ρ	Densité apparente du sol	[kg. m ⁻³]
ρ_∞	Réflectance d'une canopée dense	[]
ρ_a	Masse volumique de l'air	[kg. m ⁻³]
ρ_g	Réflectance du sol	[]
ρ_s	Gravité spécifique des particules	[kg. m ⁻³]
ρ_t	Réflectance du tissu des feuilles	[]
$(\rho C)_a$	Capacité calorifique spécifique de l'air	[J.m ⁻³ . K ⁻¹]
$(\rho C)_g$	Capacité calorifique spécifique du sol	[J.m ⁻³ . K ⁻¹]
$(\rho C)_p$	Capacité calorifique spécifique des feuilles	[J.m ⁻³ . K ⁻¹]
$(\rho C)_s$	Capacité calorifique spécifique du support	[J.m ⁻³ . K ⁻¹]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W. m ⁻² . K ⁻⁴]
τ_t	Facteur de transmission du tissu des feuilles	[]
τ_t	Facteur de transmission du tissu des feuilles	[]
Φ_{pg}	Facteur de forme gris pour l'échange radiatif entre les feuilles et le sol.	[]
Φ_{ps}	Facteur de forme gris pour l'échange radiatif entre les feuilles et la voûte céleste	[]
φ_{rdsol}	Radiation solaire absorbée par les feuilles	[W. m ⁻²]
φ_s	Radiation solaire arrivant au sommet de la canopée	[W. m ⁻²]
φ_{trpa}	Flux d'énergie dû à la transpiration des feuilles	[W. m ⁻²]

φ_{vapag}	Flux de vapeur entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol	$[\text{kg. m}^{-2}]$
φ_{vapam}	Flux de vapeur entre l'air de la canopée et l'air ambiant	$[\text{kg. m}^{-2}]$
φ_{vapap}	Flux de vapeur dû à la transpiration des feuilles	$[\text{kg. m}^{-2}]$
ψ	Potentiel total d'eau en équilibre avec la vapeur	$[\text{m}]$
ω	Humidité volumétrique du sol	$[\]$
ω_{fc}	Humidité volumétrique à la capacité du terrain	$[\]$
ω_{wp}	Humidité volumétrique au point de fanaison	$[\]$

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1: Schéma descriptif d'une toiture végétalisée	11
Figure I- 2: Schéma descriptif des échanges thermiques et massique au niveau de la toiture. 13	
Figure I- 3: Schéma électrique équivalent aux transferts thermiques et massique au niveau du toit vert	14
Figure I- 4: Organigramme du code de calcul associé à la toiture végétalisée	30
Figure II- 1: Données météorologiques et Températures de la toiture.....	32
Figure II- 2: Influence de la longueur caractéristique des feuilles	34
Figure II- 3: Influence du coefficient d'extinction	35
Figure II- 4: Influence de la réflectivité moyenne des feuilles	36
Figure II- 5: Influence de la transmittance moyenne des feuilles	37
Figure II- 6: Influence de LAI.....	38
Figure II- 7: Influence de la densité apparente du sol	39
Figure II- 8: Influence de l'humidité du sol.....	40
Figure II- 9: Influence de la réflectivité du sol.....	41
Figure II- 10: Influence de l'épaisseur de la couche du sol	42
Figure II- 11: Influence de la conductivité thermique du support.....	43
Figure II- 12: Influence de la conductivité thermique du support.....	44
Figure II- 13: Influence de l'épaisseur du support de la toiture.....	45
Figure II- 14: Influence de la température interne du bâtiment	46
Figure II- 15: Toit orienté vers l'Ouest	47
Figure II- 16: Toit orienté vers l'Est	47
Figure II- 17: Toit orienté vers le Sud.....	48
Figure II- 18: Toit orienté vers le Nord.....	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeur du coefficient d'extinction pour le rayonnement GLO	24
Tableau 2: Gamme de variation des paramètres considérés.....	33

INTRODUCTION :

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction du corps humain vis-à-vis de l'environnement thermique. En jouant sur des paramètres vitaux comme la température, les mouvements de l'air et l'humidité, un équilibre adéquat peut être atteint. L'ajustement de ces paramètres s'obtient par isolation thermique, par amélioration des performances des fenêtres et/ou par choix des systèmes de chauffage, d'aération ou de rafraîchissement adaptés au bâtiment et au mode d'occupation. Le besoin de confort thermique est ainsi une préoccupation évidente pour l'homme. L'installation de la toiture végétalisée au niveau d'un bâtiment fait partie des procédés utilisés à cet effet. Connue également sous l'appellation de « toiture végétale » ou « toit vert », la toiture végétalisée définit un système de plantation permanente occupant une surface de la toiture d'un bâtiment, permettant la pousse et la survie des différents types de plantes.

Plusieurs travaux ont été déjà menés dans ce domaine. Nous pouvons citer par exemple les travaux d'Elena Paloma Del Barrio [4] et [5] qui proposent un modèle en couche épaisse de la partie végétalisée de la toiture. Pour notre travail, nous allons considérer le cas où la partie végétale est une couche mince.

L'objectif de notre travail consiste à étudier théoriquement le comportement thermique d'une toiture végétalisée en modélisant mathématiquement le système de la toiture afin de procéder à une simulation du comportement de ce système vis-à-vis des sollicitations extérieures. Ce travail se subdivise en deux chapitres.

- Le premier chapitre sera consacré à la présentation du modèle de la toiture végétalisée étudié ; il s'agit de la description de la toiture végétalisée ensuite la présentation proprement dite du modèle associé à la toiture et enfin la méthode de résolution du modèle mathématique en vue de la mise au point d'un code de calcul susmentionné. Pour ne pas alourdir le contenu du présent mémoire, nous avons décliné en annexe le code de calcul.
- Le deuxième chapitre présentera les résultats de simulation du code de calcul ainsi que les commentaires de ces résultats.

Chapitre I

PRESENTATION DU MODELE DE LA TOITURE VEGETALISEE

I.1 – DESCRIPTION DE LA TOITURE VÉGÉTALISÉE :

La figure I-1 représente la description schématique d'une portion horizontale de toiture végétalisée.

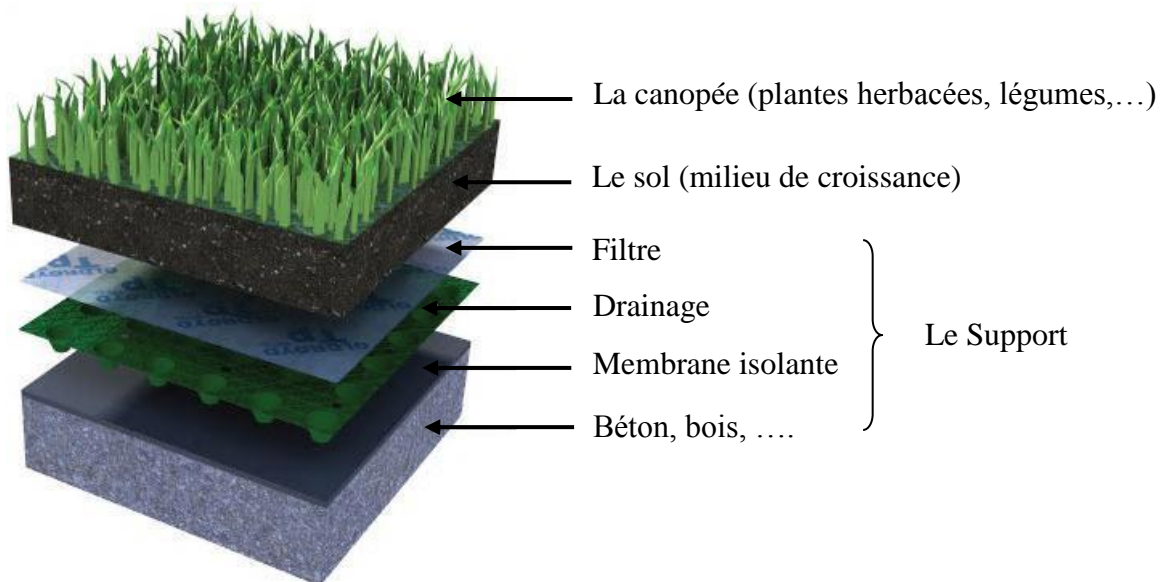


Figure I- 1: Schéma descriptif d'une toiture végétalisée

Une toiture végétalisée se compose généralement par les éléments ci-dessous.

I.1-1 Le support :

Le support est constitué par la structure, la couche d'étanchéité et la couche éventuelle de drainage et de filtration.

- La structure :

Elle peut être en béton, acier ou bois et doit supporter le poids de l'installation prévue qui peut doubler voire tripler lorsqu'elle est gorgée d'eau en cas de pluie.

- La couche d'étanchéité : (bâches spéciales en plastique ou des éléments étanches non métalliques)

Comme pour toute toiture, elle est essentielle. L'importance de la couche d'étanchéité ne doit jamais être sous-estimée. Le complexe isolant doit être résistant à la compression et aux racines.

- La couche éventuelle de drainage et de filtration :

Cette couche dépend particulièrement de l'épaisseur et de la nature du substrat. Constituée d'agréats minéraux, de polystyrène, ou matelas synthétique, elle assure l'évacuation de l'eau en excès et évite l'asphyxie des racines de certains végétaux dans le cas d'une faible pente. Le choix des matériaux peut également dans certaines régions sèches permettre une rétention d'eau et constituer ainsi une réserve nécessaire au bon développement des végétaux. Fréquemment, le polyéthylène gaufré, créant un espace de drainage d'environ 10 mm de

hauteur dirigeant l'eau de pluie vers le drain du toit ou vers les gouttières extérieures, est utilisé. Pour éviter son colmatage par des particules du sol, il est vraisemblablement possible de lui adjoindre un filtre géotextile non-tissé qui retient les fines particules du sol et laisse l'eau s'égoutter. Ce géotextile absorbe aussi l'eau qui la traverse, offrant un milieu humide pour les racines des plantes.

Dans notre cas, ces différents constituants du support sont groupés en une couche, supposée compacte et homogène ayant des propriétés thermophysiques constantes.

I.1-2 Le sol ou le substrat de croissance :

Sa composition est généralement un mélange de terre et/ou de compost végétal de feuilles ou d'écorces mélangé à des agrégats de pierres légères et absorbantes.

I.2-3 La canopée ou la couche végétale :

Une telle toiture verte peut accueillir différentes sortes de végétaux (sédums, plantes herbacées, plantes grasses ou de rocaille) et changera d'aspect en fonction des saisons et de la floraison de ces plantes. Mais dans la plupart des cas, la végétation ne sera qu'herbacée.

I.2 – MODELE MATHEMATIQUE ASSOCIE A LA TOITURE :

Une description schématique des différents transferts thermiques et massique ayant lieu au niveau du toit est représentée par la figure I-2. Et la figure I-3, quant à elle, représente le schéma électrique équivalent à ces échanges de chaleur et de masse.

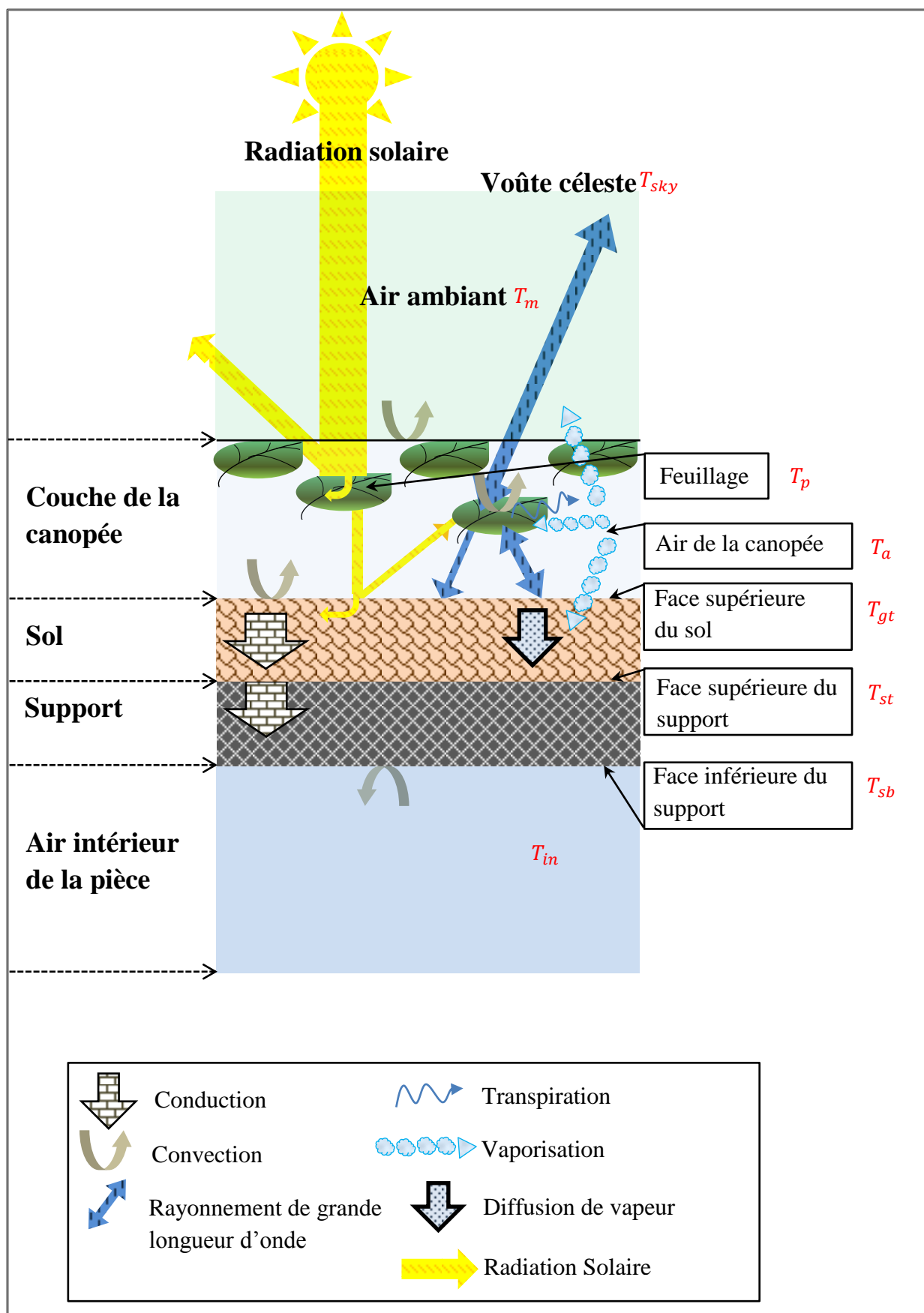


Figure I- 2: Schéma descriptif des échanges thermiques et massique au niveau de la toiture

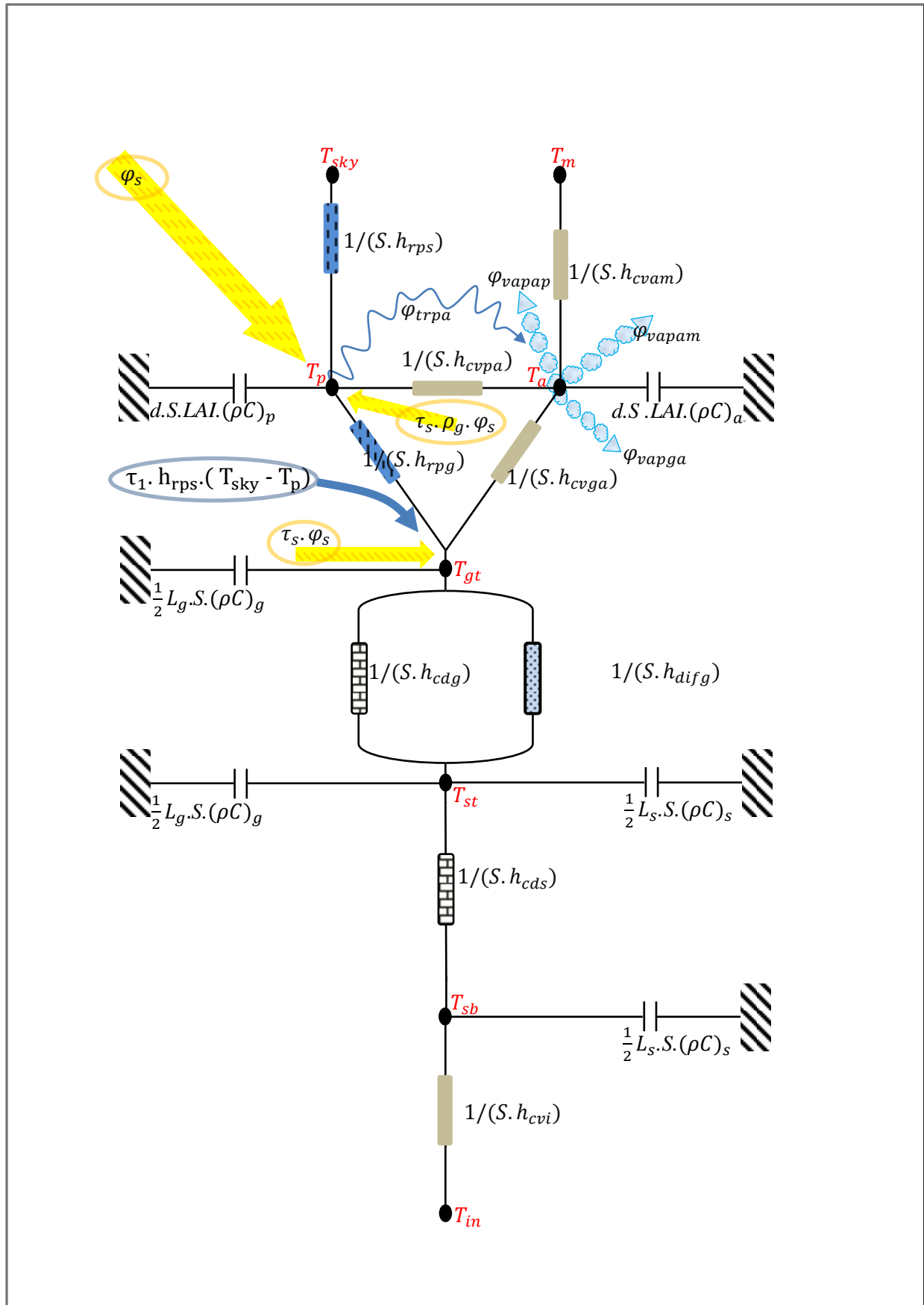


Figure I- 3: Schéma électrique équivalent aux transferts thermiques et massique au niveau du toit vert

I.2-1 Equations de bilan énergétique :

Par analogie électrique (c'est-à-dire application de la loi d'Ohm sur chaque nœud de températures du circuit électrique équivalent Figure I -3) on aboutit aux équations aux dérivées partielles non linéaires ci-dessous qui traduisent les différents bilans énergétiques du modèle de toiture à considérer.

I.2-1-1 Equations de bilan thermique :

Au niveau des feuilles (nœud T_p) :

$$d.LAI.(\rho C)_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = \varphi_{rdsol} - \varphi_{trpa} + h_{rps} \cdot (T_{sky} - T_p) + h_{rpg} \cdot (T_{gt} - T_p) + h_{cvpa} \cdot (T_a - T_p) \quad (1)$$

Au niveau de l'air de la canopée (nœud T_a) :

$$L_c \cdot (\rho C)_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} = h_{cvam} \cdot (T_m - T_a) + h_{cvap} \cdot (T_p - T_a) + h_{cvag} \cdot (T_{gt} - T_a) \quad (2)$$

Au niveau de la face supérieure du sol (nœud T_{gt}) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot L_g \cdot (\rho C)_g \cdot \frac{\partial T_{gt}}{\partial t} = \\ h_{cvga} \cdot (T_a - T_{gt}) + h_{rgp} \cdot (T_p - T_{gt}) + \tau_1 \cdot h_{rps} \cdot (T_{sky} - T_p) + \\ (h_{cdg} + h_{difgs}) \cdot (T_{st} - T_{gt}) + (1 - \rho_g) \cdot \tau_s \cdot \varphi_s + \Lambda(T_{gt}) \cdot \varphi_{vapga} \end{aligned} \quad (3)$$

Au niveau de la face supérieure du support (nœud T_{st}) :

$$\frac{1}{2} \cdot (L_g \cdot (\rho C)_g + L_s \cdot (\rho C)_s) \cdot \frac{\partial T_{st}}{\partial t} = (h_{cdg} + h_{difgi}) \cdot (T_{gt} - T_{st}) + h_{cds} \cdot (T_{sb} - T_{st}) \quad (4)$$

Au niveau de la face inférieure du support (nœud T_{sb}) :

$$\frac{1}{2} \cdot L_s \cdot (\rho C)_s \cdot \frac{\partial T_{sb}}{\partial t} = h_{cds} \cdot (T_{st} - T_{sb}) + h_{cvi} \cdot (T_{in} - T_{sb}) \quad (5)$$

I.2-1-2 Equation de bilan massique :

Au niveau de l'air de la canopée :

$$\rho_a \cdot L_c \cdot \frac{\partial \Theta_a}{\partial t} = \varphi_{vapap} + \varphi_{vapag} + \varphi_{vapam} \quad (6)$$

I.2-2 Modèle des coefficients d'échange thermique :

I.2-2-1 Echange par conduction :

I.2-2-1-a- Pour le sol :

Le coefficient d'échange thermique par conduction est formulé comme suit

$$h_{cdg} = 2. \frac{\lambda_g}{L_g} \quad (7)$$

où

λ_g : conductivité thermique du sol [$W. m^{-1}. K^{-1}$]

L_g : épaisseur du sol [m]

La conductivité thermique du sol est une variable dépendante de la teneur en humidité et de la température du sol. Elle est distinctement différente pour chaque type de sol et doit être spécifiquement déterminée. Toutefois, nous pouvons proposer un modèle de corrélation pour évaluer ce paramètre [11] :

$$\lambda_g(\omega).10^7 = [2,1.(\frac{\rho}{1000})^{(1,2 - 2\omega)} . \exp(-0,7. (\omega - 0,2)^2) + (\frac{\rho}{1000})^{(0,8 - 2\omega)}]. (\rho C)_g(\omega) \quad (8)$$

dans laquelle

ρ : densité apparente du sol [$kg. m^{-3}$]

ω : humidité volumétrique du sol []

Pour être cohérente avec la corrélation précédente (eq.8), la formule suivante, proposée par le même auteur, est utilisée pour évaluer la capacité calorifique spécifique du sol :

$$(\rho C)_g(\omega) = 4180 (0.2 + \omega) \rho \quad (9)$$

où

ρ : densité apparente du sol [$kg. m^{-3}$]

ω : humidité volumétrique du sol []

1.2-2-1-b- Pour le support :

Le coefficient d'échange thermique du support peut se calculer comme précédemment

$$h_{cds} = 2 \cdot \frac{\lambda_s}{L_s} \quad (10)$$

avec

λ_s : conductivité thermique du support [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

L_s : épaisseur du support [m]

Tout en considérant l'homogénéité de l'ensemble des matériaux solides composant le support, la conductivité thermique de cette couche reste constante.

1.2-2-2 Echange par convection :

1.2-2-2-a- Entre l'air de la canopée et les feuillages :

Ce coefficient d'échange convectif est exprimé comme suit [4]

$$h_{cvpa} = h_{cvap} = 2 \cdot LAI \cdot \frac{(\rho C)_p}{r_e} \quad (11)$$

r_e étant la résistance externe de la canopée [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$].

Nous retenons la corrélation proposée par [3], qui est issue d'un travail expérimental complet, pour déterminer ce paramètre telle que :

$$r_e = \frac{a \cdot l^m}{(l|T_a - T_p| + b \cdot u^2)^n} \quad (12)$$

où l : longueur caractéristique des feuilles [m] ; u : vitesse du vent [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] ; a , b , m , n sont des coefficients empiriques ($a = 1174$, $b = 207$, $m = 0.5$, $n = 0.25$ pour le culture de tomate)

1.2-2-2-b-Entre l'air de la canopée et l'air ambiant :

Le coefficient du transfert thermique convectif entre l'air de la canopée et l'air ambiant est décrit par [4] :

$$h_{cvam} = R \cdot L_c \cdot (\rho C)_a \quad (13)$$

dans lequel

R : taux d'échange d'air [ach]

L_c : épaisseur de la canopée [m]

1.2-2-2-c- Entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol :

Avec la référence [7] pour une relation traduisant une convection mixte nous avons :

$$h_{cvag} = \frac{(\rho C)_a}{1045} \cdot [1.14 \cdot (|T_a - T_{gt}|^{0.5}) + 6.97 \cdot v^{1.6}]^{0.5} \quad (14)$$

où

v : vitesse du vent dans la canopée [m. s⁻¹]

La vitesse du vent v [m. s⁻¹] dans la canopée est prise approximativement égale à celle de l'air libre u [m. s⁻¹] vue que nous avons considéré une canopée à couche mince (v ≈ u).

1.2-2-2-d- Entre l'air intérieur de la pièce et la face inférieure du support :

Nous retenons la formule de Hottel et Woertz dans [7] pour déterminer le coefficient d'échange convectif entre l'air intérieur de la pièce et la face inférieure du support (on considère que le support est directement en contact avec l'air intérieur de la pièce) :

$$h_{cvi} = \frac{1.162 \cdot (5.05 - 1.39 \cdot a + 0.277 \cdot a^2)}{|T_{in} - T_{sb}|^{0.25}} \quad (15)$$

a: angle d'inclinaison du toit [°] ou [rad]

1.2-2-3 Echange par rayonnement :

1.2-2-3-a- Entre les feuilles et la voûte céleste :

Le coefficient d'échange thermique radiatif est :

$$h_{rps} = \sigma \cdot \Phi_{ps} \cdot (T_p^2 + T_s^2) \cdot (T_p + T_s) \quad (16)$$

où

Φ_{ps} : facteur de forme gris pour l'échange radiatif entre les feuilles et la voûte céleste []

L'aire de la surface foliaire par rapport à celle de la voûte céleste est pratiquement négligeable. De plus, en considérant le ciel comme corps noir, nous obtenons le facteur de forme gris :

$$\Phi_{ps} = \frac{1}{\frac{1-\epsilon_p}{\epsilon_p} + \frac{1}{F_{ps}}} \quad (17)$$

dans lequel

F_{ps} : facteur de forme géométrique entre la toiture et la voûte céleste []

$$F_{ps} = \frac{1+\cos(a)}{2} \quad (18)$$

où

a: angle d'inclinaison du toit [°] ou [rad]

ε_p : émissivité du feuillage de la canopée

1.2-2-3-b- Entre les feuilles et la surface supérieure du sol :

De la même manière que précédemment :

$$h_{rpg} = \sigma \cdot \Phi_{pg} \cdot (T_p^2 + T_g^2) \cdot (T_p + T_g) \quad (19)$$

où

Φ_{pg} : facteur de forme gris pour l'échange radiatif entre les feuilles et le sol []

$$\Phi_{pg} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p} + \frac{1}{F_{pg}} + \frac{(1-\varepsilon_g)}{\varepsilon_g}} \quad (20)$$

avec

F_{pg} : facteur de forme géométrique entre les feuilles et le sol []

ε_p : émissivité du feuillage de la canopée []

ε_g : émissivité de la face supérieure du sol []

En considérant la distance moyenne entre les feuilles et la face supérieure du sol petite devant la dimension du toit :

$$F_{pg} \approx 1 \quad (21)$$

1.2-2-4 Transfert de chaleur par diffusion de vapeur dans le sol :

1.2-2-4-a- Face supérieure du sol :

Le coefficient d'échange de chaleur par diffusion de vapeur selon la référence [4] est

$$h_{difgs} = \Lambda(T_{gt}) \cdot D_{vT_{gt}}(\omega) \quad (22)$$

où

$\Lambda(T_{gt})$: chaleur latente de vaporisation [$J \cdot kg^{-1}$] à la température T_{gt} [K] :

$$\Lambda(T_{gt}) = 4186.9.(597 - 0.56.(T_{gt} - 273.15)) \quad (23)$$

$D_{vT_{gt}}(\omega)$: coefficient de diffusivité non isotherme de vapeur [$kg \cdot m^2 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$]

Après avoir considéré une série d'hypothèses, la référence [4] propose la relation suivante :

$$D_{vT_{gt}}(\omega) = - \left(\frac{\Lambda(T_{gt}) \cdot D}{R_v^2 T_{gt}^3} \cdot \frac{P \cdot p_v}{P - p_v} \right) \quad (24)$$

où

D : coefficient de diffusion de vapeur dans l'air [$m^2 \cdot s^{-1}$]

R_v : constante de gaz de la vapeur d'eau [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

T_{gt} : température absolue de la face supérieure du sol [K]

P : pression totale [Pa]

p_v : pression partielle de vapeur dans le sol [Pa] qui est donnée par la relation thermodynamique

$$p_v = p_s \cdot \exp\left(\frac{g\psi}{R_v T}\right) \quad (25)$$

où

p_s : pression de vapeur saturante [Pa]

L'équation de Bertrand est utilisée pour le calcul de la pression de vapeur saturante.

$$p_s = 10^{(17.443 - \frac{2795}{T} - 3.868 \cdot \log_{10}(T))} \quad (26)$$

g : accélération de pesanteur [$m \cdot s^{-2}$]

ψ : potentiel total d'eau en équilibre avec la vapeur [m]

La diffusion de vapeur dans un milieu poreux est évidemment plus lente que dans l'air libre ; on s'accorde, ainsi, à exprimer D de eq.24 comme fonction linéaire de la porosité du milieu [4]

$$D = \alpha \cdot D_0 \cdot \varepsilon \quad (27)$$

où

D_0 : coefficient de diffusion de vapeur dans l'air libre [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

ε : porosité du sol []

α : valeur adimensionnelle constante comprise entre 0.58 et 0.67 [9]

Pour des systèmes idéaux de boules, indépendamment des systèmes d'emballage, la relation entre la densité et la porosité est exprimée comme suit [11] :

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (28)$$

avec

ρ : densité apparente du sol [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

$$\rho = \left(\frac{\text{masse des particules}}{\text{volume total du corps se dispersant}} \right) \quad (29)$$

ρ_s : gravité spécifique des particules [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

$$\rho_s = \left(\frac{\text{masse des particules seches}}{\text{volume occupé par les phases solides}} \right) \quad (30)$$

Si ρ et ρ_s sont connues alors nous pouvons calculer ε à partir de (eq.28).

D'une part, une quantité d'eau inférieure au point de fanaison rend le sol absolument incultivable. D'autre part, une humidité du sol supérieure à la capacité du sol peut détruire la racine des plantes par asphyxie. Nous considérerons ainsi l'humidité comprise entre ces deux limites.

Le potentiel d'eau se définit comme son état de liaison au sol ou l'énergie qu'il faudrait fournir pour l'extraire du sol.

Le potentiel total d'eau ψ [m] en équilibre avec la vapeur, est évalué par la relation fonctionnelle suivante [4]

$$\psi = \psi_{\omega_p} + \frac{\psi_{f_c} - \psi_{\omega_p}}{\omega_{f_c} - \omega_{\omega_p}} \cdot (\omega - \omega_{\omega_p}) \quad (31)$$

dans laquelle

ω_{ω_p} : humidité volumétrique au point de fanaison []

ω_{f_c} : humidité volumétrique à la capacité du sol []

ψ_{ω_p} : potentiel d'eau au point de fanaison [m]

ψ_{f_c} : potentiel d'eau à la capacité du sol [m]

I.2-2-4-b-Face inférieure du sol :

D'une manière préalable, nous retenons la relation ci-avant pour calculer le coefficient de diffusion non isotherme de vapeur à la face inférieure du sol :

$$h_{\text{difgi}} = \Lambda(T_{\text{st}}) \cdot D_{vT_{\text{st}}}(\omega) \quad (32)$$

Où $\Lambda(T_{\text{st}})$ et $D_{vT_{\text{st}}}(\omega)$ sont respectivement la chaleur latente de vaporisation [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] et la diffusivité non isotherme de vapeur [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] à température T_{st} [K] et à humidité volumétrique ω [] du sol. Elles se calculent de façon semblable que précédemment.

I.2-2-5 Transfert de chaleur par transpiration des feuilles :

Nous avons adopté la pression de vapeur comme une fonction de contrainte appropriée, le flux d'énergie consommée pour laisser l'eau dans les feuilles s'évaporer peut ainsi être calculé par [4]

$$\varphi_{\text{trpa}} = h_{\text{trpa}}(e_p - e_a) \quad (33)$$

$$\text{Avec } h_{\text{trpa}} = 2 \cdot \text{LAI} \cdot \frac{(\rho C)_a}{r_e + r_i} \quad (34)$$

Nous avons retenu l'équation d'Antoine pour le calcul des pressions de vapeur [13]

$$\log_{10} e_i = 8.07131 - \frac{1730.63}{233.426 + T}$$

où

e_i : pression de vapeur au point i [mmHg]

T : température du milieu considéré [°C]

(760 mmHg = 101.325 kPa = 1.000 atm = pression normale) et ($T[\text{K}] = T[^\circ\text{C}] + 273.15$)

I.2-3 Apport solaire au système :

I.2-3-1 Rayonnement arrivant au sommet de la canopée :

Le rayonnement global φ_s [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] arrivant au sommet de la canopée est la somme du rayonnement solaire direct R_{dir} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] et du rayonnement solaire diffus R_{dif} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

$$\varphi_s = R_{\text{dir}} + R_{\text{dif}} \quad (35)$$

I.2-3-1-a- La densité de flux du rayonnement solaire direct :

$$R_{\text{dir}} = R_{\text{dirh}} \cdot \cos(\Theta_1) \quad (36)$$

où

R_{dirh} : rayonnement solaire direct [$W \cdot m^{-2}$] sur une surface horizontale (fournie par les données météorologiques)

Θ_1 : angle d'incidence [$^\circ$] ou [rad] du rayonnement solaire direct sur un toit incliné donné par

$$\cos(\Theta_1) = \cos(h_s) \cdot \sin(a) \cdot \cos(az_s - az_t) + \cos(a) \cdot \sin(h_s) \quad (37)$$

avec

h_s : hauteur du soleil [$^\circ$] ou [rad]

a : inclinaison du toit par rapport à l'horizontale [$^\circ$] ou [rad]

az_s : azimut du soleil [$^\circ$] ou [rad]

az_t : azimut du toit [$^\circ$] ou [rad]

Les azimuts sont mesurés par rapport au Sud ; comptés positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

Il est important de vérifier les données météorologiques dans le cas où ces conditions de mesure ne sont pas respectées.

I.2-3-1-b- La densité de flux du rayonnement solaire diffus :

$$R_{dif} = \frac{1+\cos(a)}{2} \cdot R_{dirh} + alb \cdot \frac{1-\cos(a)}{2} \cdot (R_{dirh} \cdot \sin(h_s) + R_{dirh}) \quad (38)$$

dans laquelle

alb : albédo du sol []

a : angle d'inclinaison du toit par rapport à l'horizontale [$^\circ$] ou [rad]

Le flux de rayonnement arrivant au sommet de la canopée est ainsi

$$\varphi_s = R_{dirh} \cdot \cos(\Theta_1) + \frac{1+\cos(a)}{2} \cdot R_{dirh} + alb \cdot \frac{1-\cos(a)}{2} \cdot (R_{dirh} \cdot \sin(h_s) + R_{dirh}) \quad (39)$$

I.2-3-2 Rayonnement solaire absorbé par la canopée :

Le rayonnement de courte longueur d'ondes transmis par une canopée est la somme de la radiation non interceptée et la radiation qui est transmise ou réfléchie (ou les deux) par n'importe quelle feuille de la canopée. La transmittivité d'onde courte $\tau_s(LAI)$ pour la radiation diffuse de courte longueur d'onde d'une canopée avec un indice de surface foliaire LAI peut être représentée, avec une exactitude raisonnable, par une loi exponentielle [6] telle que :

$$\tau_s(\text{LAI}) = \exp(-k_s \cdot \text{LAI}) \quad (40)$$

où

k_s : coefficient d'extinction [] de courte longueur d'onde du feuillage

Le coefficient d'extinction doit être fonction des propriétés optiques des feuilles et est calculé par [8]

$$k_s = [(1 - \tau_t)^2 - \rho_t^2]^{\frac{1}{2}} \cdot k_1 \quad (41)$$

Dans lequel

τ_t : facteur de transmission du tissu des feuilles []

ρ_t : réflectivité du tissu des feuilles []

k_1 : coefficient d'extinction grande longueur d'onde []

k_1 peut être calculé analytiquement pour quelques distributions d'angle de feuilles idéalisées.

Valeur de k_1 déduite de la littérature [2] :

Distribution des feuilles	k_1
Horizontale	1 : 1.5
Conique ($\alpha_1 = 45^\circ$) (α_1 étant l'angle moyenne d'inclinaison des feuilles)	0.829
Verticale ($\alpha_1 = 90^\circ$) (α_1 étant l'angle moyenne d'inclinaison des feuilles)	0.436
Sphérique	0.684 : 0.81

Tableau 1: Valeur du coefficient d'extinction pour le rayonnement GLO

La réflectivité $\rho_s(\text{LAI})$ d'une canopée est toujours inférieure à celle des feuilles qui la compose. Le désordre et l'ombrage dans la canopée provoque une absorption de rayonnement. La canopée se comportera comme dense à l'égard de la fraction de la radiation incidente qu'elle rencontre.

$$\text{Nous aurons alors [1] : } \rho_s(\text{LAI}) = (1 - \tau_1(\text{LAI})) \cdot \rho_\infty \quad (42)$$

ρ_∞ : réflectivité d'une canopée dense []

Une canopée absorbe une fraction de $(1 - \tau_s - \rho_s)$ de la radiation qu'elle reçoit.

Le flux net de radiation solaire absorbé par la canopée s'écrit alors :

$$\varphi_{\text{rdsol}} = (1 - \tau_s - \rho_s) \cdot (1 + \tau_s \cdot \rho_g) \varphi_s \quad (43)$$

où

$$\tau_s, \rho_g, \varphi_s : \text{radiation solaire réfléchi par le sol [W. m}^{-2}] \quad (44)$$

ρ_g : réflectivité de la face supérieure du sol []

φ_s : radiation solaire arrivant au sommet de la canopée [W. m⁻²]

I.2-4 Modèle des flux de vaporisation :

I.2-4-a- Entre l'air de la canopée et les feuilles :

Nous rejoignons la référence [4] pour exprimer le flux de vaporisation entre l'air de la canopée et les feuilles.

$$\varphi_{\text{vapap}} = 2.LAI \cdot \frac{(\rho C)_a}{r_e + r_i} (e_p - e_a) \quad (45)$$

avec

r_e : résistance externe de la canopée [s. m⁻¹]

e_p et e_a : pressions de vapeur d'eau respectivement à la surface des feuilles et dans l'air de la canopée

r_i : résistance globale stomatale [s. m⁻¹]

$$r_i = r_{\min} \cdot \tilde{r}_1(\varphi_s) \cdot \tilde{r}_1(T_p) \cdot \tilde{r}_1(\text{CO}_2) \cdot \tilde{r}_1(e_p - e_a) \quad (46)$$

où

r_{\min} : résistance possible minimale, dont l'ampleur a une origine purement physiologique

\tilde{r}_1 : fonctions sans dimensions supérieures à l'unité évaluant quantitativement l'accroissement relatif de la résistance interne, chaque fois qu'un paramètre limite le taux de transfert de vapeur d'eau.

$$\tilde{r}_1(\varphi_s) = \frac{\overline{\varphi_s} + C_1}{\overline{\varphi_s} + C_2} ; C_1 > C_2 \quad (47)$$

$$\text{et } \overline{\varphi_s} = \frac{\varphi_s}{2.LAI} \quad (48)$$

$$\tilde{r}_1(T_p) = C_3 \cdot (T_p + T_m)^2 \quad (49)$$

$$\tilde{r}_1(\text{CO}_2) = C_4 \cdot (\text{CO}_2 - 200)^2 \quad (50)$$

$$\tilde{r}_1(e_p - e_a) = C_5 \cdot (e_p - e_a)^2 \quad (51)$$

Pour une culture de tomate, on propose les valeurs suivantes dans [3] :

$$r_{\min} = 82 \text{ s. m}^{-1}$$

$$C_1 = 4.3; C_2 = 0.54; C_3 = 2.3 \cdot 10^{-2}; C_4 = 6.1 \cdot 10^{-7}; C_5 = 4.3;$$

$$CO_2: \text{concentration de } CO_2 \text{ dans l'air de la canopée. } CO_2 = 330 \text{ ppmv}$$

$$\text{La résistance interne d'une canopée est alors } r_i = f \cdot r_{i,\text{tomate}} \quad (52)$$

f étant le coefficient pour permettre de représenter qu'une canopée s'évapore plus ($f < 1$) ou moins ($f > 1$) par rapport à une culture de tomate.

I.2-4-b- Entre l'air de la canopée et la surface du sol :

La pression de vapeur étant choisie comme une fonction de contrainte appropriée, par analogie avec le phénomène de convection entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol, le flux de vapeur d'eau entre ces deux milieux est représenté par [4] :

$$\varphi_{\text{vapag}} = \frac{1}{\Lambda(T_a) \cdot \gamma} \cdot h_{\text{cvag}} \cdot (e_g - e_a) \quad (53)$$

$\Lambda(T_a)$: chaleur latente de vaporisation [J. kg^{-1}] à la température T_a [K]

γ : constante psychrométrique thermodynamique [Pa. K^{-1}]

h_{cvag} : coefficient d'échange convectif [$\text{W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] entre l'air de la canopée et la face supérieure du sol

e_g et e_a sont respectivement les pressions de vapeur d'eau à la face supérieure du sol et dans l'air de la canopée

I.2-4-c- Entre l'air de la canopée et l'air à l'extérieur de la canopée :

D'une manière analogue que précédemment :

$$\varphi_{\text{vapam}} = \frac{1}{\Lambda(T_a) \cdot \gamma} \cdot h_{\text{cvam}} \cdot (e_m - e_a) \quad (54)$$

où

$\Lambda(T_a)$: chaleur latente de vaporisation [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] à la température T_a [K]

γ : constante psychrométrique thermodynamique [$\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$]

h_{cvam} : coefficient d'échange convectif [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] entre l'air de la canopée et l'air ambiant

e_m et e_a : pressions de vapeur d'eau respectivement dans l'air ambiant et dans l'air de la canopée

Nous avons retenu l'équation d'Antoine pour le calcul des pressions de vapeur [13] :

$$\log_{10} e_i = 8.07131 - \frac{1730.63}{233.426 + T}$$

e_i : pression de vapeur [mmHg]

T : température du milieu à considérer [$^{\circ}\text{C}$]

(760 mmHg = 101.325 kPa = 1.000 atm = pression normale)

I.3 – METHODE DE RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS DE BILAN :

Par discrétisation des équations de bilan thermique (eq.1 à eq.5) et massique (eq.6) précédentes en un pas de temps Δt nous obtenons les équations ci-après. Pour la discrétisation, nous avons eu recours à la méthode de la différence finie vers l'arrière ou BFD (Backward Differentiation Formulas).

I.3-1 Equations de bilan thermique :

Au niveau des feuilles (nœud T_p) :

$$d.LAI.(\rho C)_p \cdot \frac{T_p - T_{p'}}{\Delta t} = \varphi_{rdsol} - \varphi_{trpa} + h_{rps} \cdot (T_{sky} - T_p) + h_{rpg} \cdot (T_{gt} - T_p) + h_{cvpa} \cdot (T_a - T_p) \quad (55)$$

Au niveau de l'air de la canopée (nœud T_a) :

$$L_c \cdot (\rho C)_a \cdot \frac{T_a - T_{a'}}{\Delta t} = h_{cvam} \cdot (T_m - T_a) + h_{cvap} \cdot (T_p - T_a) + h_{cvag} \cdot (T_{gt} - T_a) \quad (56)$$

Au niveau de la face supérieure du sol (nœud T_{gt}) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot L_g \cdot (\rho C)_g \cdot \frac{T_{gt} - T_{gt'}}{\Delta t} = & h_{cvga} \cdot (T_a - T_{gt}) + h_{rgp} \cdot (T_p - T_{gt}) + \tau_1 \cdot h_{rps} \cdot (T_{sky} - T_p) + \\ & (h_{cdg} + h_{difgs}) \cdot (T_{st} - T_{gt}) + (1 - \rho_g) \cdot \tau_s \cdot \varphi_s + \Lambda(T_{gt}) \cdot \varphi_{vapga} \end{aligned} \quad (57)$$

Au niveau de la face supérieure du support (nœud T_{st}) :

$$\frac{1}{2} \cdot (L_g \cdot (\rho C)_g + L_s \cdot (\rho C)_s) \cdot \frac{T_{st} - T_{st'}}{\Delta t} = (h_{cdg} + h_{difgi}) \cdot (T_{gt} - T_{st}) + h_{cds} \cdot (T_{sb} - T_{st}) \quad (58)$$

Au niveau de la face inférieure du support (nœud T_{sb}) :

$$\frac{1}{2} \cdot L_s \cdot (\rho C)_s \cdot \frac{T_{sb} - T_{sb'}}{\Delta t} = h_{cds} \cdot (T_{st} - T_{sb}) + h_{cvi} \cdot (T_{in} - T_{sb}) \quad (59)$$

I.3-2 Equation de bilan massique :

Au niveau de l'air de la canopée :

$$\rho_a \cdot L_c \cdot \frac{\Theta_a - \Theta_{a'}}{\Delta t} = \varphi_{vapap} + \varphi_{vapag} + \varphi_{vapam} \quad (60)$$

où $T_i' = T_i(t - \Delta t)$ et $\Theta_a' = \Theta_a(t - \Delta t)$

I.3-3 Méthode de calcul :

A partir des équations précédentes (eq.55à eq.59) nous pouvons obtenir un système d'équation de la forme

$$C_i \cdot \frac{(T_i(t) - T_i(t - \Delta t))}{\Delta t} = \sigma_i(t) + \sum_{j=1}^n [(C_{dji} + C_{vji} + R_{ji}) \cdot (T_j(t) - T_i(t))] \quad (61)$$

dans lequel

C_i : capacité calorifique

$T_i(t)$: température du nœud i à l'instant t

$\sigma_i(t)$: source de chaleur à l'instant t

C_{dji} : coefficient de couplage par conduction entre les nœuds i et j

C_{vji} : coefficient de couplage convectif entre les nœuds i et j

R_{ji} : coefficient de couplage radiatif entre les nœuds i et j

Les paramètres d'entrées pour calculer les températures sont eux-mêmes fonction de températures ; de plus, les pressions de vapeur pour calculer l'humidité spécifique de l'air de la canopée sont aussi fonction de températures du modèle et changent constamment avec celles-ci ; les équations restent non-linéaires et un calcul direct se montre très complexe.

L'organigramme de calcul (Figure I-4) est adopté pour résoudre ce problème.

Un code de calcul traduisant le modèle du toit vert a été mis au point sous MATLAB [10] à partir de l'organigramme considéré.

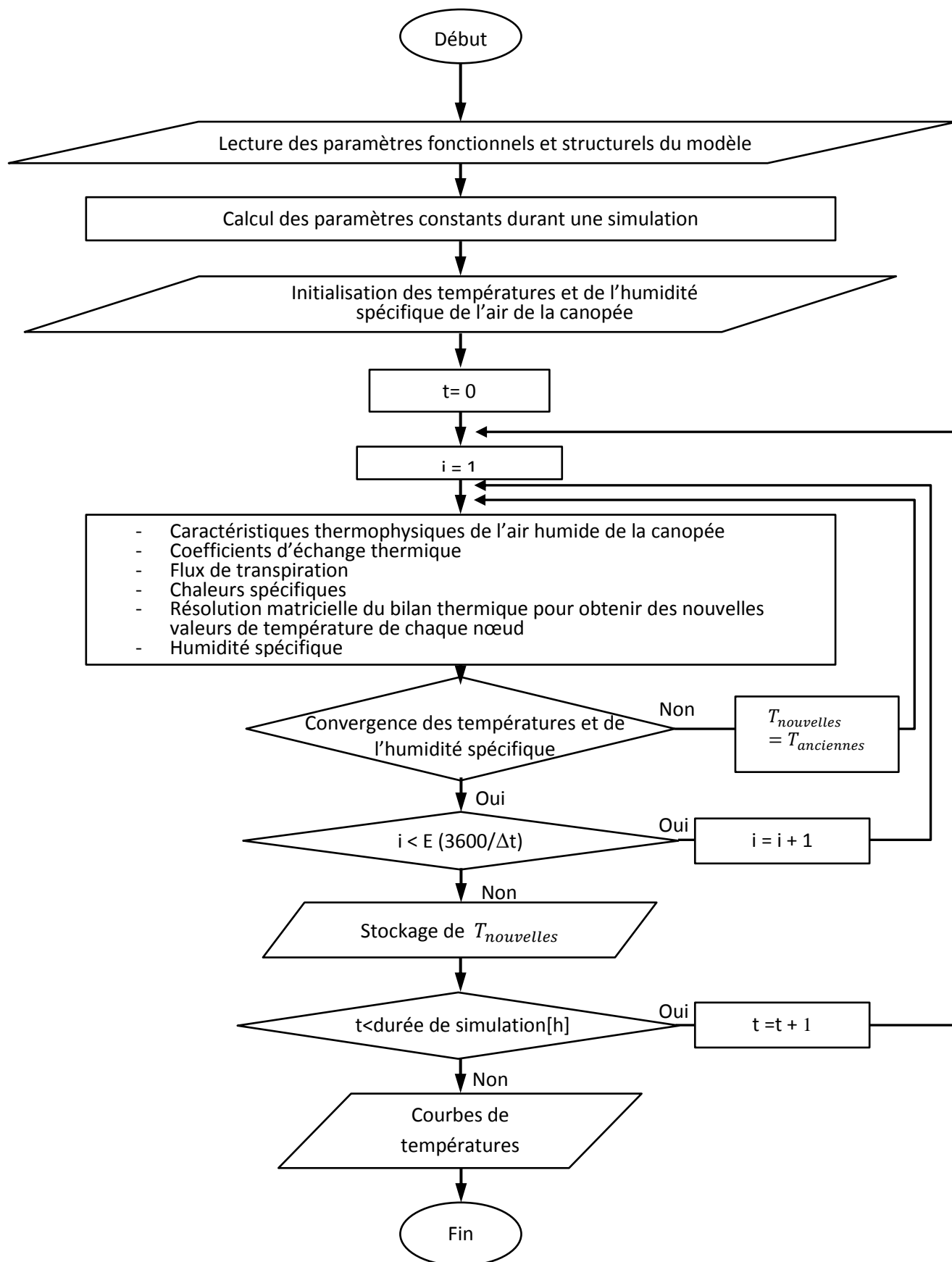


Figure I- 4: Organigramme du code de calcul associé à la toiture végétalisée

Chapitre II

<p>PRESENTATION DES RESULTATS DE SIMULATION ET DES COMMENTAIRES</p>
--

II.1 Evolution des températures des différents éléments de la toiture :

Nous avons choisi les données météorologiques d'Antananarivo pour montrer l'influence de la variation de quelques paramètres sur les différentes températures de la toiture végétalisée.

Une série de 10 jours du mois de Juin 2007 (c'est-à-dire de la 4008^e heure à la 4258^e heure des données météo considérées) a été utilisée. L'irradiation solaire et la vitesse du vent sont représentées respectivement sur la deuxième et la troisième ligne de la figure II-1.

La température moyenne des feuilles, la température de l'air de la canopée, la température du sol ainsi que celles du support sont représentées dans la première ligne de la figure II-1.

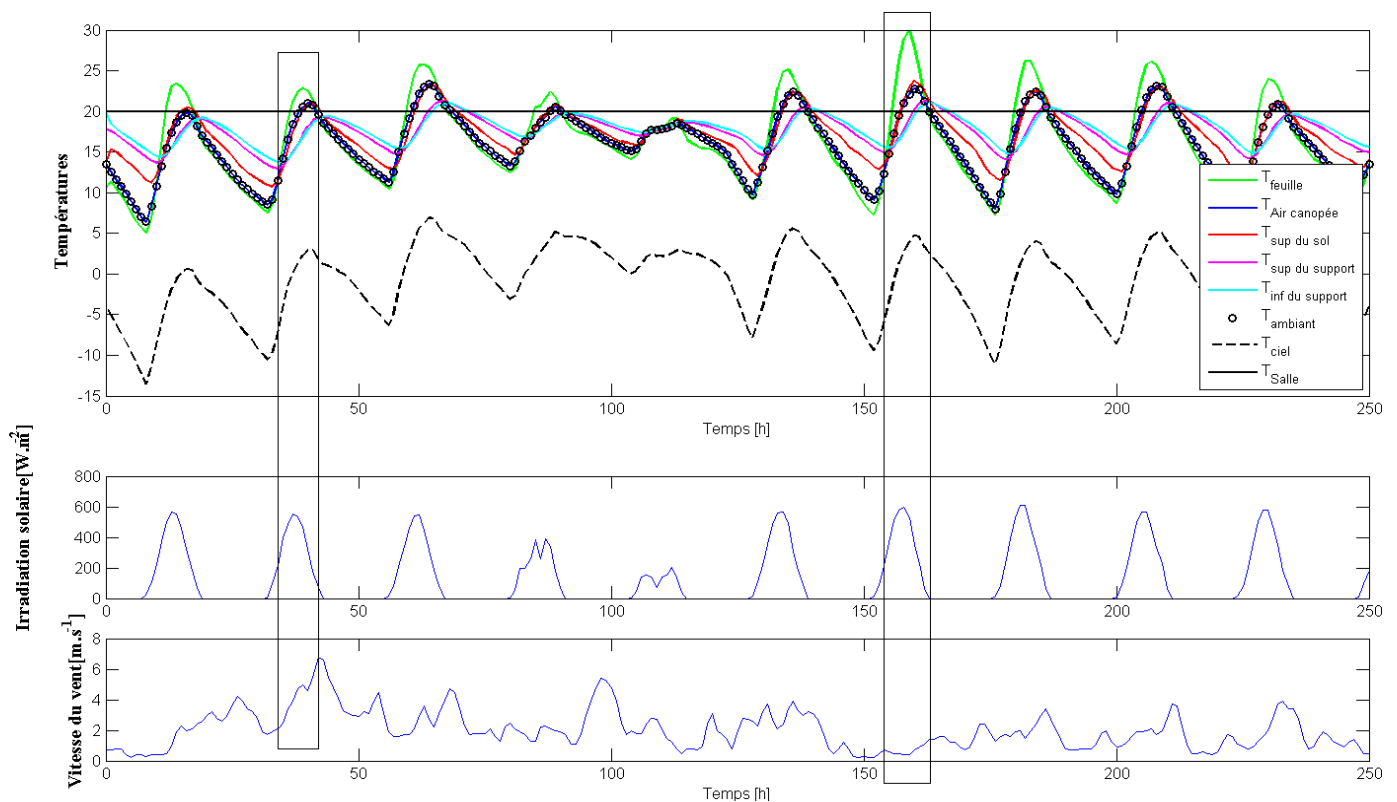


Figure II- 1: Données météorologiques et Températures de la toiture

Nous constatons que l'évolution des températures de la toiture épouse bien l'allure des températures de l'air ambiant ainsi que celle de la température de la voûte céleste. La courbe de température de l'air de la canopée (courbe bleue) est confondue avec celle de l'air ambiant. La courbe de température moyenne des feuilles (courbe verte), présente pourtant des différences importantes avec celle de la température de l'air ambiant dans les intervalles de temps où l'irradiation solaire est maximale. Ces différences de température varient et atteignent parfois une valeur maximale approximative de l'ordre de 10°C. La vitesse du vent en constitue une cause. En effet, une grande valeur de la vitesse du vent entraîne le rapprochement des températures de l'air et des feuilles de la canopée. La figure II-1 montre aussi que la température de la pièce sous toit n'influe pas sur les températures respectives des feuilles et de l'air de la canopée.

Les courbes des températures du sol (courbe rouge) et du support (courbes magenta et cyan) diffèrent de quelques degrés. Les températures du sol et du support qui s'avèrent comprises dans la gamme de variation des températures de l'air et des feuilles de la canopée sont influencées également par la température interne de la pièce. En effet, les températures de ces deux couches se présentent globalement comme étant les valeurs moyennes des températures des feuilles (ou de l'air) de la canopée et de l'air intérieur du bâtiment. Par ailleurs, la vitesse du vent et l'irradiation solaire n'ont pas d'influence directe sur les températures du sol ainsi que celle du support du fait que la couche de la canopée joue un rôle d'auvent pour la toiture.

Cette première présentation de l'évolution des températures du toit végétalisé étant faite, nous allons voir sur les paragraphes suivants les influences de la variation de quelques paramètres, considérés comme modifiables, sur les profils de température de chaque zone du toit. Pour cela, l'intervalle de temps est restreint en 2 jours (de la 4008^e à la 4058^e heure) pour que les figures puissent clairement montrer les influences de chaque paramètre sur le système.

II.2 Influences des paramètres :

Les gammes de variation des paramètres utilisées pour l'étude de leurs effets sur le profil de températures du modèle sont représentées dans le tableau 2 ci-dessous.

Symbole	Description	Gamme de variation	Unité
Paramètres de la canopée			
l	Longueur caractéristique des feuilles	[0.05 : 0.3]	[m]
k_1	Coefficient d'extinction GLO	[0.436 : 1.1]	[]
ρ_t	Réflectivité moyenne des feuilles	[0.1 : 0.4]	[]
τ_t	Transmittivité moyenne des feuilles	[0.1 : 0.5]	[]
LAI	Indice de surface foliaire	[1 : 4]	[]
Paramètres du sol			
ρ	Densité apparente du sol	[1000 : 1400]	[kg. m ⁻³]
ω	Humidité volumétrique du sol	[0.1 : 0.4]	[]
ρ_g	Réflectivité de la face supérieure du sol	[0.1 : 0.4]	[]
L_g	Epaisseur du sol	[0.1 : 0.25]	[m]
Paramètres du support			
λ_s	Conductivité thermique du support	[0.06 : 3]	[W. m ⁻¹ . K ⁻¹]
L_s	Epaisseur du support	[0.05 : 0.2]	[m]
T _{Tin}	Température interne du bâtiment	[15 : 30]	[°C]
Position du toit			
a	Inclinaison du toit	[0 : 45]	[°]
az_t	Azimut du toit	[0 : 90 : 360]	[°]

Tableau 2: Gamme de variation des paramètres considérés

II.2-1 Influences des paramètres de la canopée :

II.2-1-1 Influence de la longueur caractéristique des feuilles l :

La figure II-2 résulte de la variation de la longueur caractéristique des feuilles.

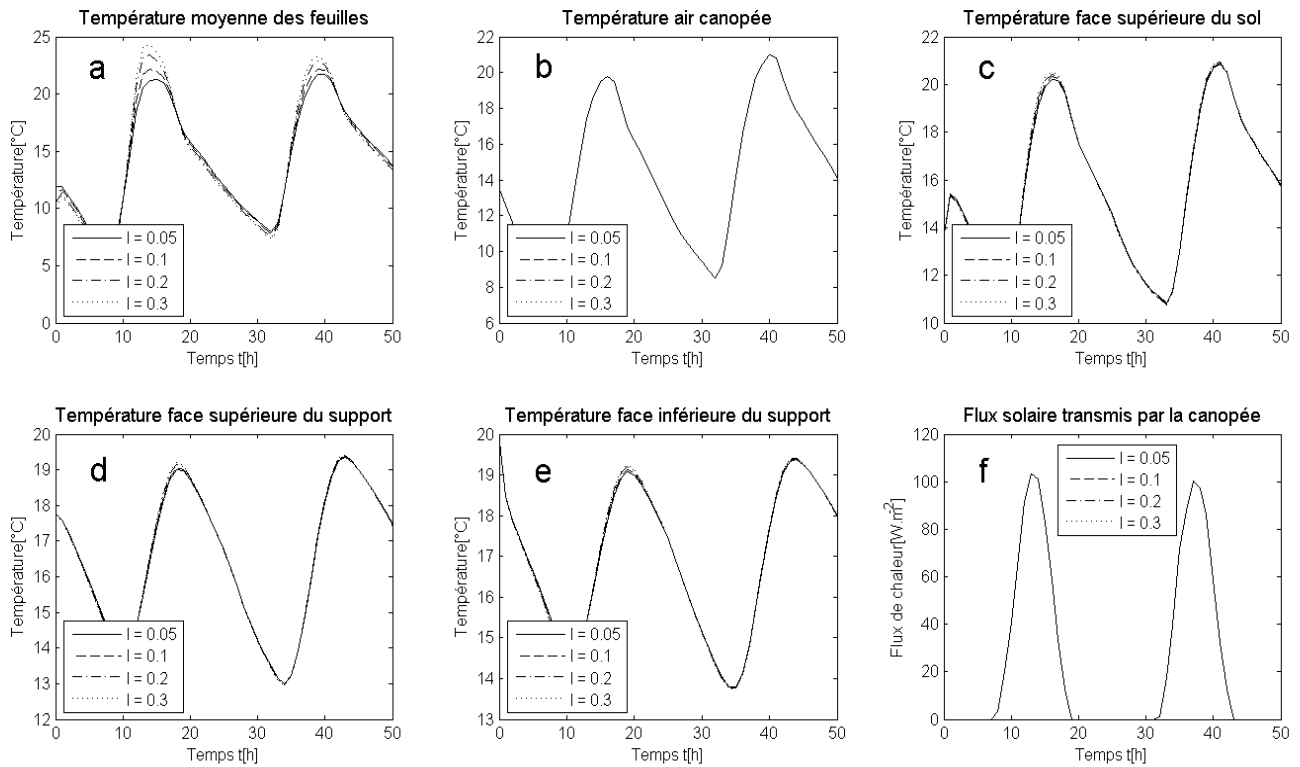


Figure II- 2: Influence de la longueur caractéristique des feuilles

Une longueur caractéristique des feuilles plus longue augmente la surface foliaire frappée par l'irradiation solaire. La figure II-2-a montre que la température moyenne des feuilles croît avec la longueur caractéristique des feuilles. Ces variations croissantes sont constatées notamment pendant la période diurne où l'irradiation solaire est intense. Ces variations sont, par contre, minimales voire inexistantes pendant la période nocturne.

En revanche, ce paramètre n'a pas de grande influence sur les températures du sol et du support (Fig. II-2-c, II-2-d, II-2-e). Nous pouvons toutefois apercevoir une très petite hausse de températures du sol et du support pour une longueur caractéristique des feuilles élevée.

Cette figure met aussi en évidence que la longueur caractéristique des feuilles n'a aucune influence sur la température de l'air de la canopée (Fig. II-2-b) du fait que l'épaisseur de la canopée est assez mince pour laisser l'air ambiant y circuler librement.

II.2-1-2 Influence du coefficient d'extinction des feuilles k_1 :

La figure II-3 montre l'influence du coefficient d'extinction des feuilles sur le profil de températures du toit.

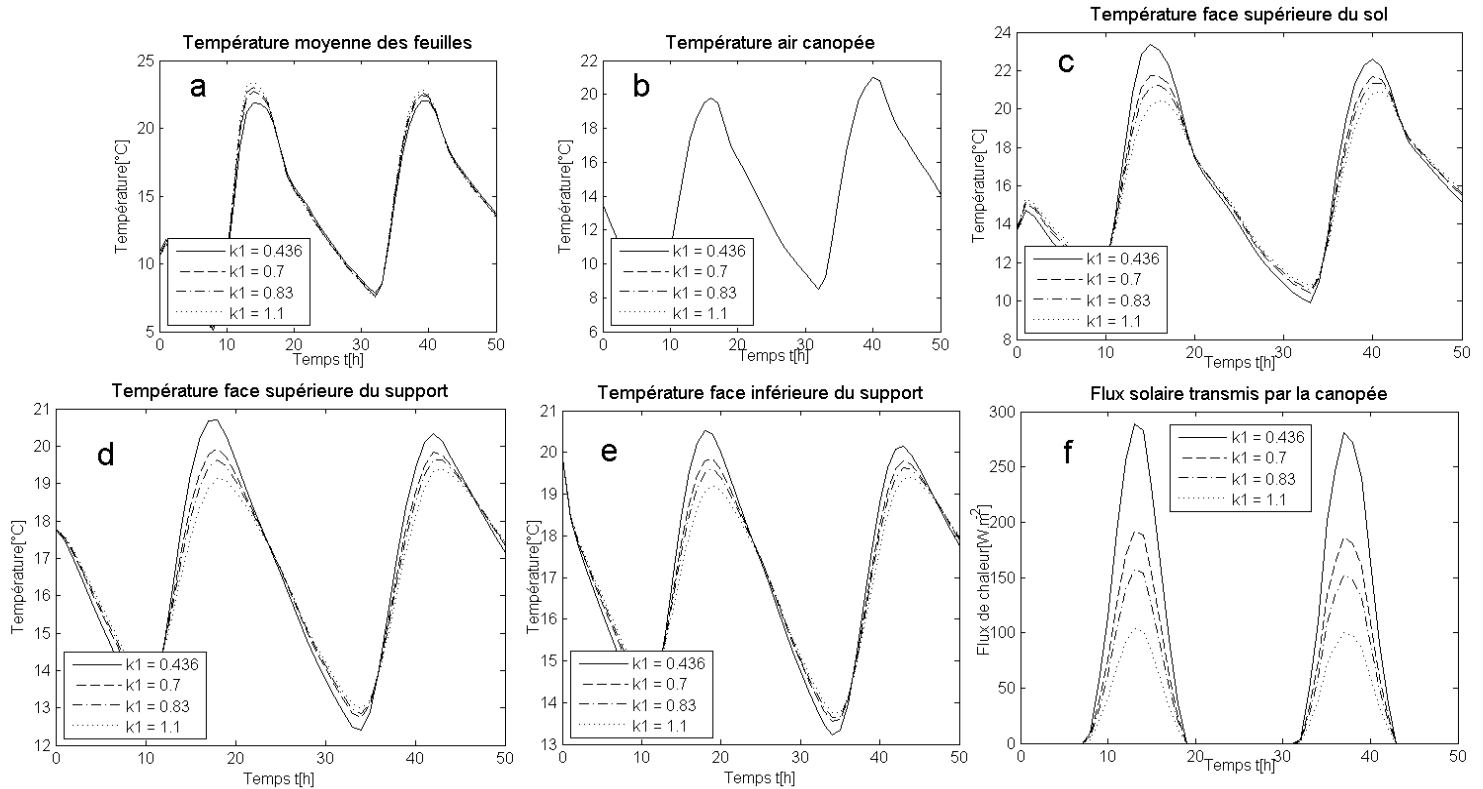


Figure II- 3: Influence du coefficient d'extinction

Ce paramètre affecte principalement la transmission de l'irradiation solaire à travers la couche de la canopée (Fig. II-3-f). Ainsi, les températures respectives de la face supérieure du sol, des faces supérieure et inférieure du support sont grandement influencées par la variation de ce coefficient. La figure II-3 (II-3-c, II-3-d, II-3-e) montre qu'une grande valeur de k_1 diminue considérablement les températures du sol et du support pendant les intervalles de temps où l'irradiation solaire est maximale tandis qu'il augmente faiblement la température pendant la nuit où les températures sont minimales. Un grand coefficient d'extinction des feuilles rend donc celles-ci à avoir une qualité isolante pendant la période nocturne tout en rafraîchissant l'intérieur de la pièce pendant la période diurne.

Contrairement au sol et au support, une augmentation de k_1 augmente sensiblement la température des feuilles dans les zones de grande irradiation solaire du fait que l'élévation quantitative de ce paramètre amplifie la quantité du flux absorbé tout en diminuant celle du flux transmis.

La figure II-3 montre que k_1 n'influe pas sur la température de l'air de la canopée.

II.2-1-3 Influence de la réflectivité moyenne des feuilles ρ_t :

La figure II-4 (II-4-c, II-4-d, II-4-e) montre une petite augmentation de températures du sol et du support pour une variation croissante du facteur de réflexion des feuilles (de 0.1 à 0.4). L'influence sur les températures se produit pendant la période diurne car la variation de la réflectivité modifie le facteur de transmission d'ondes courtes (Fig. II-4-f) qui abondent notamment pendant la période diurne. La réflectivité n'a pourtant aucun effet sur la température moyenne des feuilles du fait qu'elle n'agit guère sur le flux absorbé par la canopée.

En conséquence, il n'est pas intéressant d'avoir des feuilles à grande réflectivité moyenne pour atteindre un objectif de rafraîchissement par le système de la toiture.

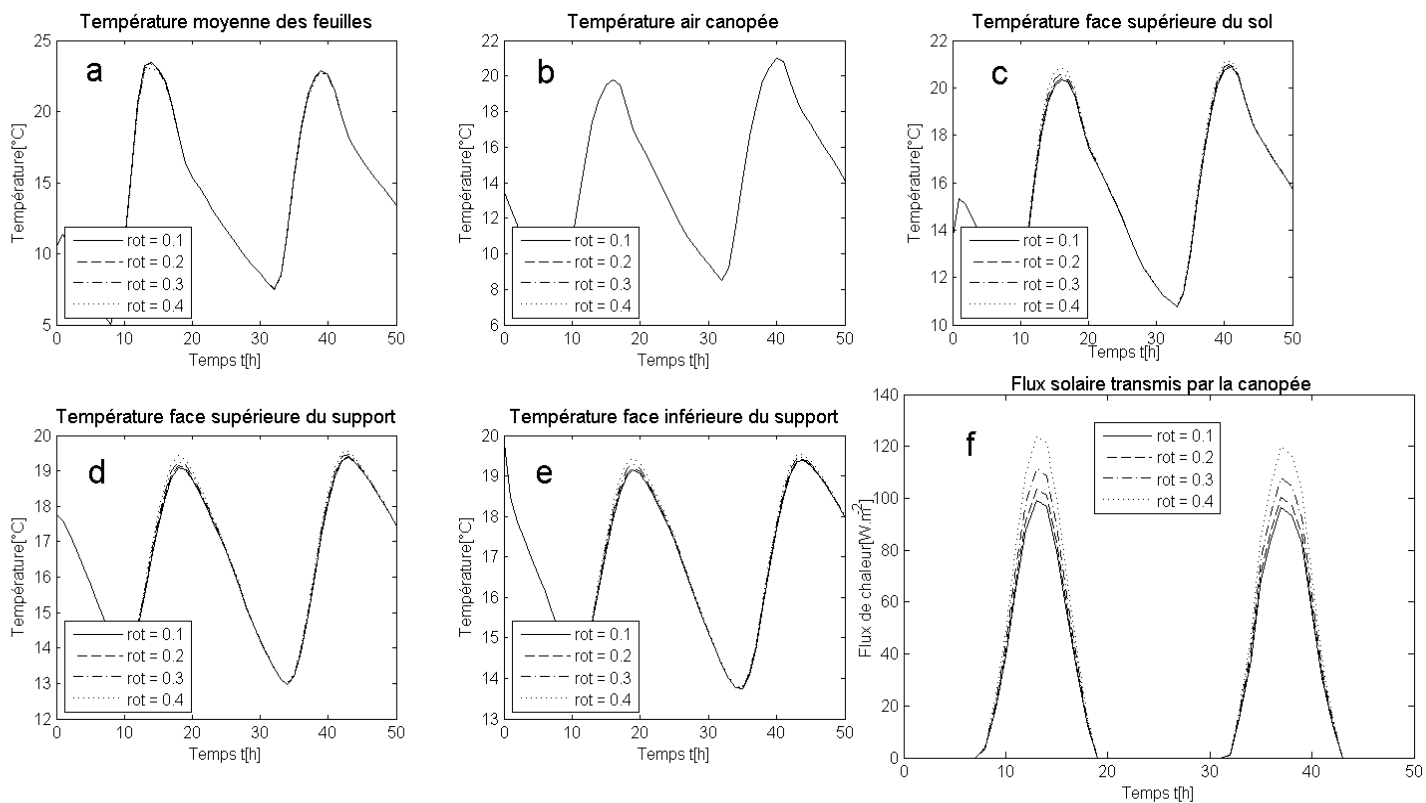


Figure II- 4: Influence de la réflectivité moyenne des feuilles

II.2-1-4 Influence de la transmittivité moyenne des feuilles τ_t :

La transmittivité des feuilles agit sur les températures respectives des différentes composantes de la toiture comme la montre la figure II-5.

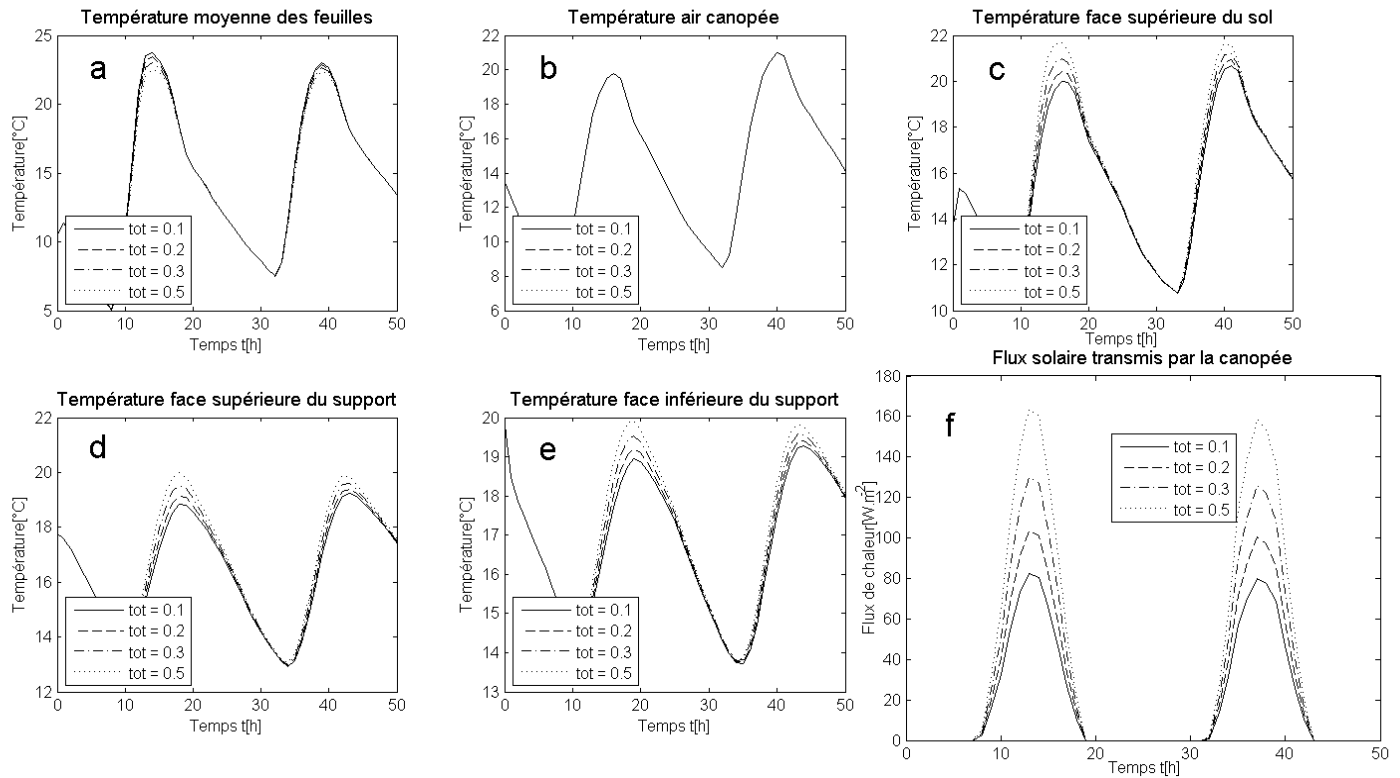


Figure II- 5: Influence de la transmittivité moyenne des feuilles

Un accroissement de la transmittivité des feuilles implique une plus grande quantité de flux transmis par la canopée (Fig. II-5-f). En effet, pour une variation de τ_t de 0.1 à 0.5, nous pouvons constater un doublement de la quantité du flux transmis ainsi qu'une augmentation des températures respectives de la face supérieure du sol, des faces supérieure et inférieure du support (Fig. II-5-c, II-5-d, II-5-e).

L'influence de ce paramètre est d'autant plus importante que celle de la réflectivité moyenne des feuilles, ce qui est justifiée par la formule utilisée (eq.41). La température des feuilles est faiblement influencée par la transmittivité, étant donné que cette dernière a très peu d'influence sur le phénomène d'absorption de l'irradiation solaire des feuilles.

Tout comme le cas de la réflectivité, une petite transmittivité moyenne des feuilles est ainsi plus intéressante pour donner à la toiture une qualité rafraîchissante.

La couche de la canopée étant mince, la température de l'air de la canopée n'est pas influencée par la variation de ce paramètre.

II.2-1-5 Influence de l'indice de surface foliaire LAI :

LAI (Leaf Area Index) est la surface totale des feuilles (une face seulement) contenue dans un volume à base unitaire (volume reposant sur 1m^2). La figure II-6 montre l'influence de ce paramètre au niveau des températures de la toiture.

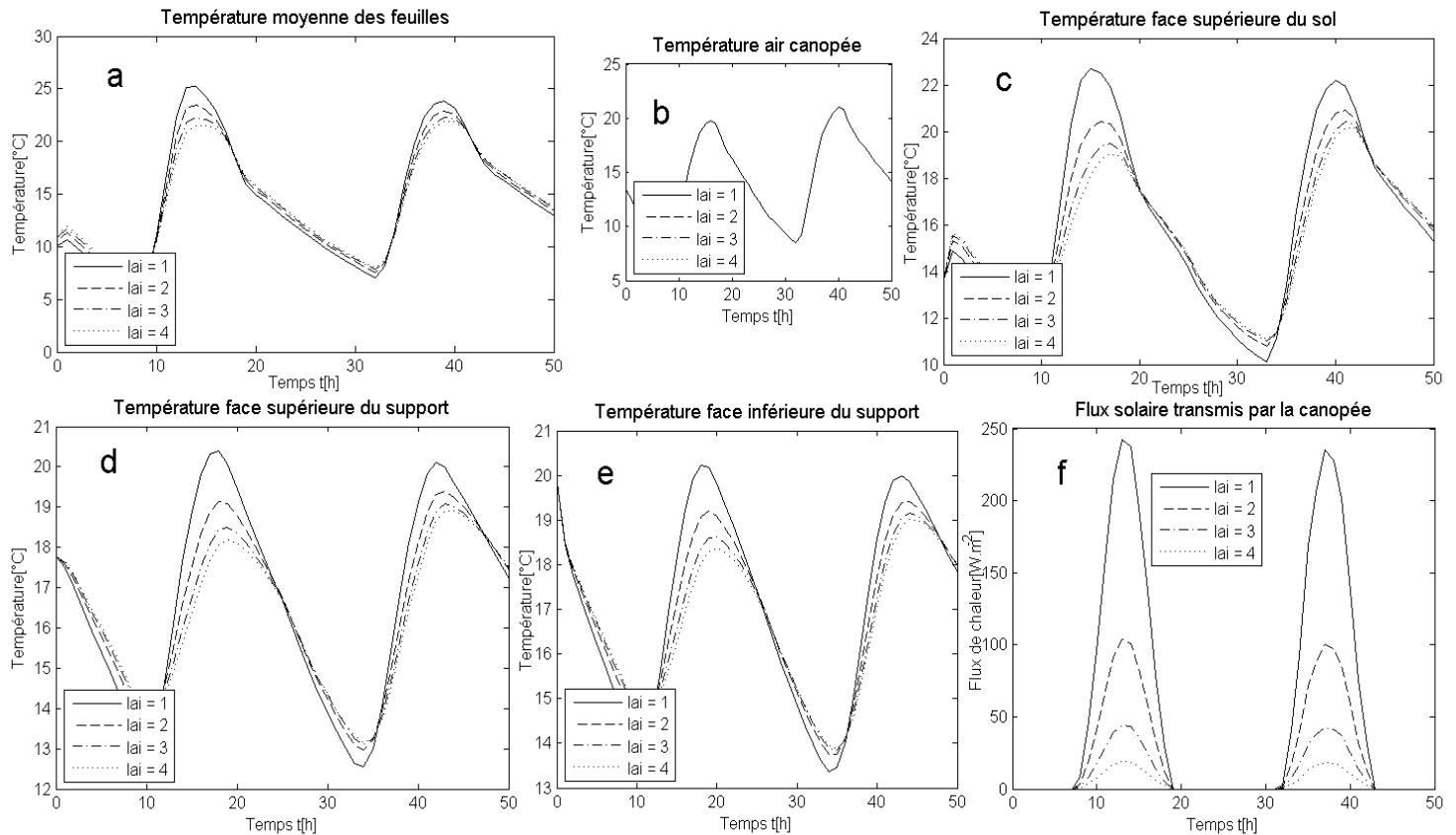


Figure II- 6: Influence de LAI

La figure II-6 montre qu'une augmentation de LAI résulte une diminution de toutes les températures, à l'exception de celle de l'air de la canopée, pendant la période diurne et une augmentation de celles-ci pendant la période nocturne. Cette figure II-6 montre également une similarité de l'influence de l'indice de surface foliaire LAI avec celle du coefficient d'extinction k_1 . LAI et k_1 jouent approximativement les mêmes rôles sur les propriétés radiatives de la canopée du fait que la transmittivité de la canopée (courte et grande longueurs d'onde) est une fonction exponentielle de ces deux paramètres.

On peut gagner 4°C de diminution de températures voire plus, pendant les périodes à grande irradiation solaire, pour LAI variant de 1 à 4. Une couche de canopée à grande valeur de LAI offrirait au système de la toiture végétalisée un intérêt rafraîchisseur pour l'intérieur du bâtiment.

LAI est ainsi un paramètre pouvant contribuer à l'amélioration de la température interne d'un bâtiment muni d'un système de toit vert.

II.2-2 Influences des paramètres du sol :

II.2-2-1 Influence de la densité apparente du sol ρ :

La figure II-7 présente les résultats de la variation de la densité apparente du sol.

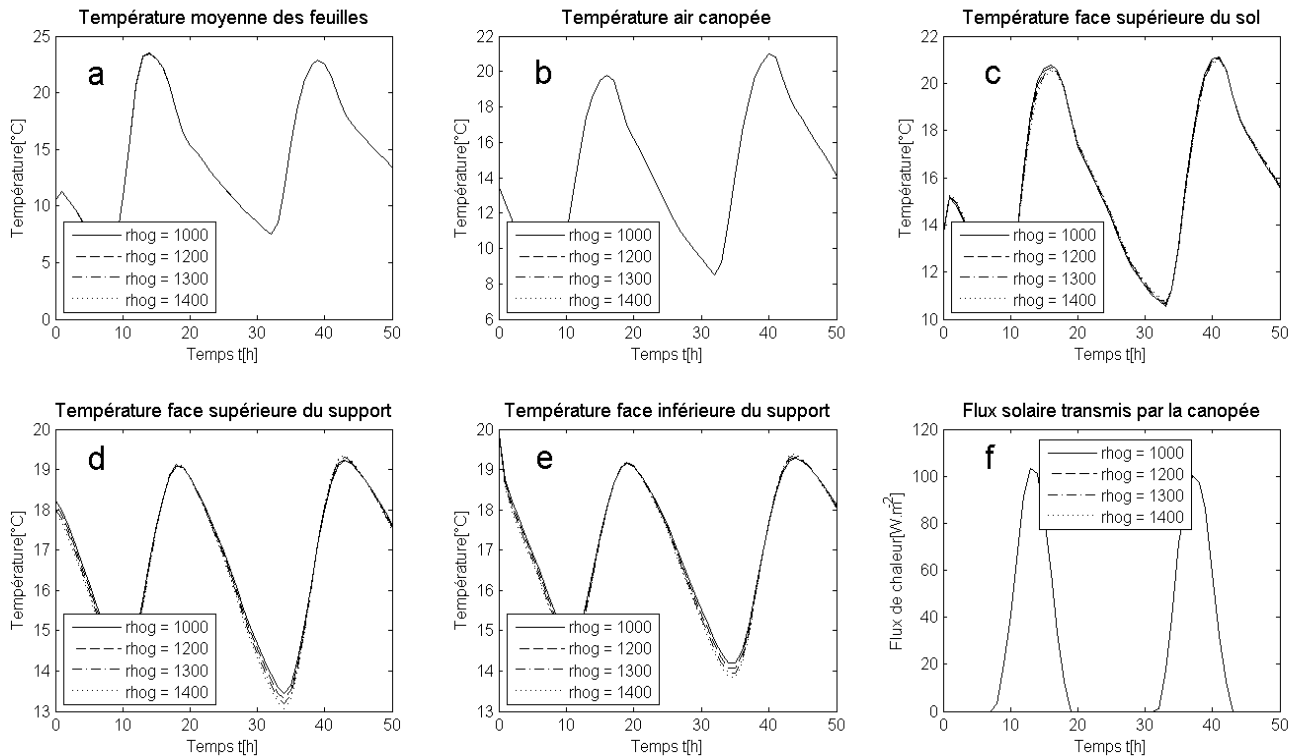


Figure II- 7: Influence de la densité apparente du sol

La densité apparente du sol ne présente qu'une très faible influence sur les températures respectives des composantes de la toiture végétalisée. Théoriquement, sa variation peut influencer sur le flux de chaleur à travers le sol, vu que la diffusivité des vapeurs dans le sol est linéairement fonction de ce paramètre. Pourtant, la figure II-7 montre que la variation de ce paramètre ne favorise ni l'augmentation ni la diminution des températures respectives des différentes composantes de la toiture végétalisée. Ainsi, en prenant en compte l'ensemble des composantes du toit, nous constatons que la densité apparente du sol n'est pas un paramètre dominant résultant une variation de leurs températures respectives. En effet, nous ne pouvons acquérir, approximativement, que 1°C de rafraîchissement pendant la période diurne pour une variation extrêmement exagérée de ce paramètre.

Toutefois, il est avantageusement recommandé d'opter pour un sol à faible densité apparente dans le but d'éviter au toit une surcharge inutile.

II.2-2-2 Influence de l'humidité du sol ω :

Par variation de l'humidité du sol on obtient la figure II-8.

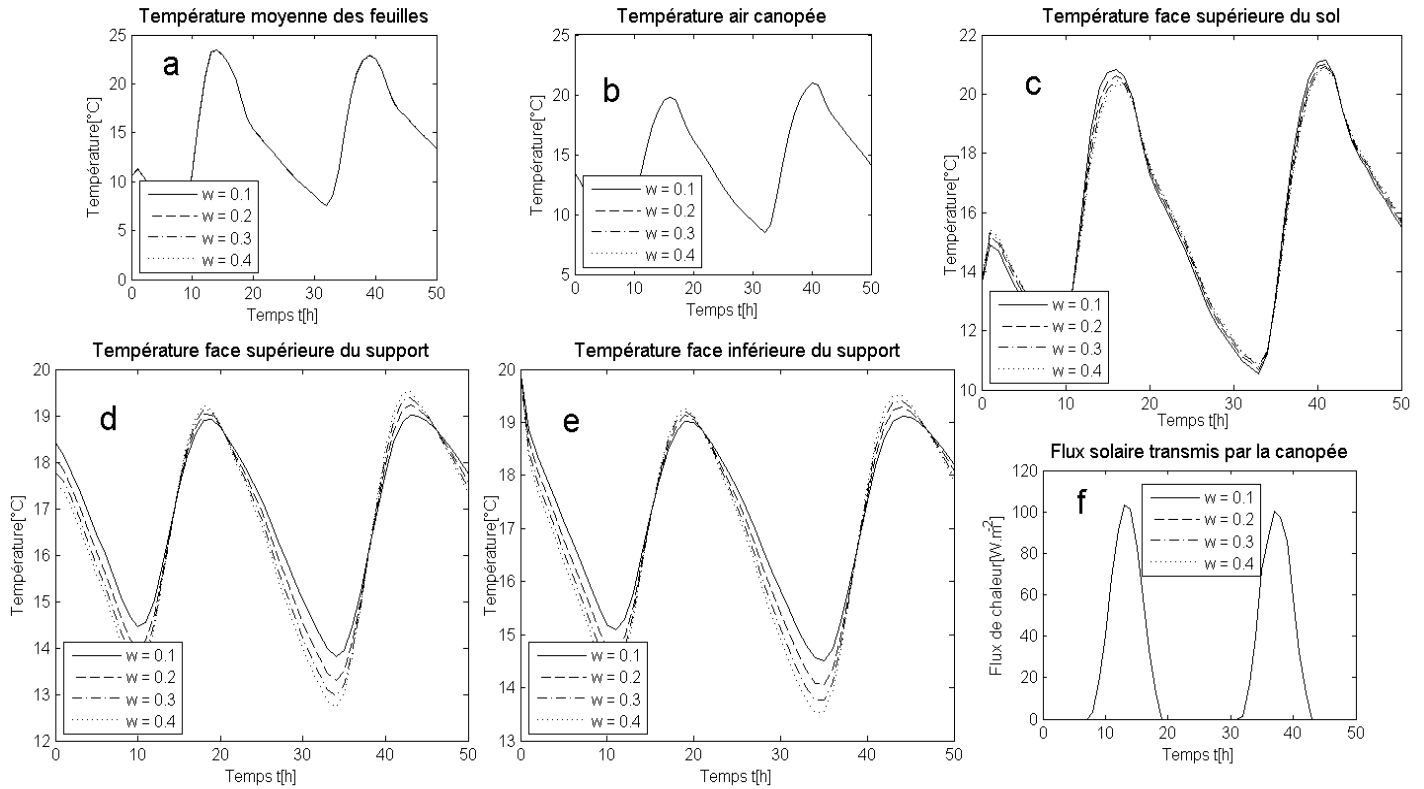


Figure II- 8: Influence de l'humidité du sol

La présence d'eau à l'intérieur d'un matériau influe sur la conductivité thermique (eq.8) de celui-ci. La porosité intrinsèque des matériaux, conjuguée à leur exposition à l'eau, peut faire varier sensiblement la conductivité thermique des matériaux comme la montre la figure II- 8 (II-8-c, II-8-d, II-8-e) concernant la variation de températures au niveau du support et du sol. Nous constatons sur cette même figure une diminution des minima des températures. Nous nous sommes bornés à une variation de ce paramètre entre le point de fanaison et la capacité du sol.

Nous pouvons ainsi tirer de cette figure que l'augmentation de l'humidité volumétrique du sol fait diminuer des températures des composantes du toit, et par suite, celle de la pièce, pendant la période nocturne.

II.2-2-3 Influence de la réflectivité du sol ρ_g :

La figure II-9 présente l'allure des courbes des températures des composantes du toit pour une variation de la réflectivité du sol.

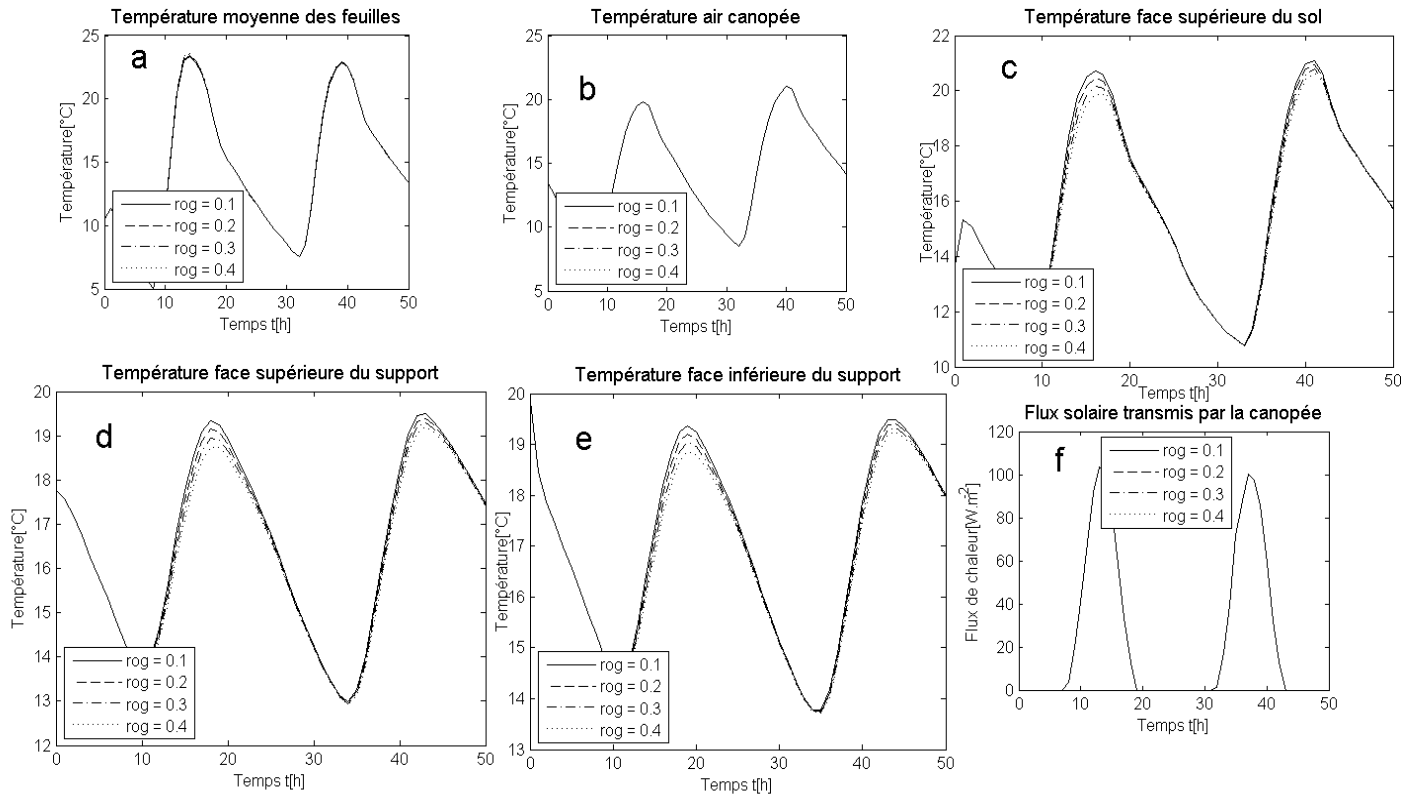


Figure II- 9: Influence de la réflectivité du sol

Une grande réflectivité du sol entraîne une diminution des températures des composantes du toit du fait de la baisse d'absorption de rayonnement. Une grande valeur de ce paramètre réduit ainsi les températures respectives du sol (Fig. II-9-c) et des faces supérieure et inférieure du support (Fig. II-9-d et II-9-e), pendant la période où ensoleillement est intense. Aucune variation de ces températures n'est constatée en période nocturne.

II.2-2-4 Influence de l'épaisseur du sol L_g :

La figure II-10 découle de la variation de l'épaisseur du sol.

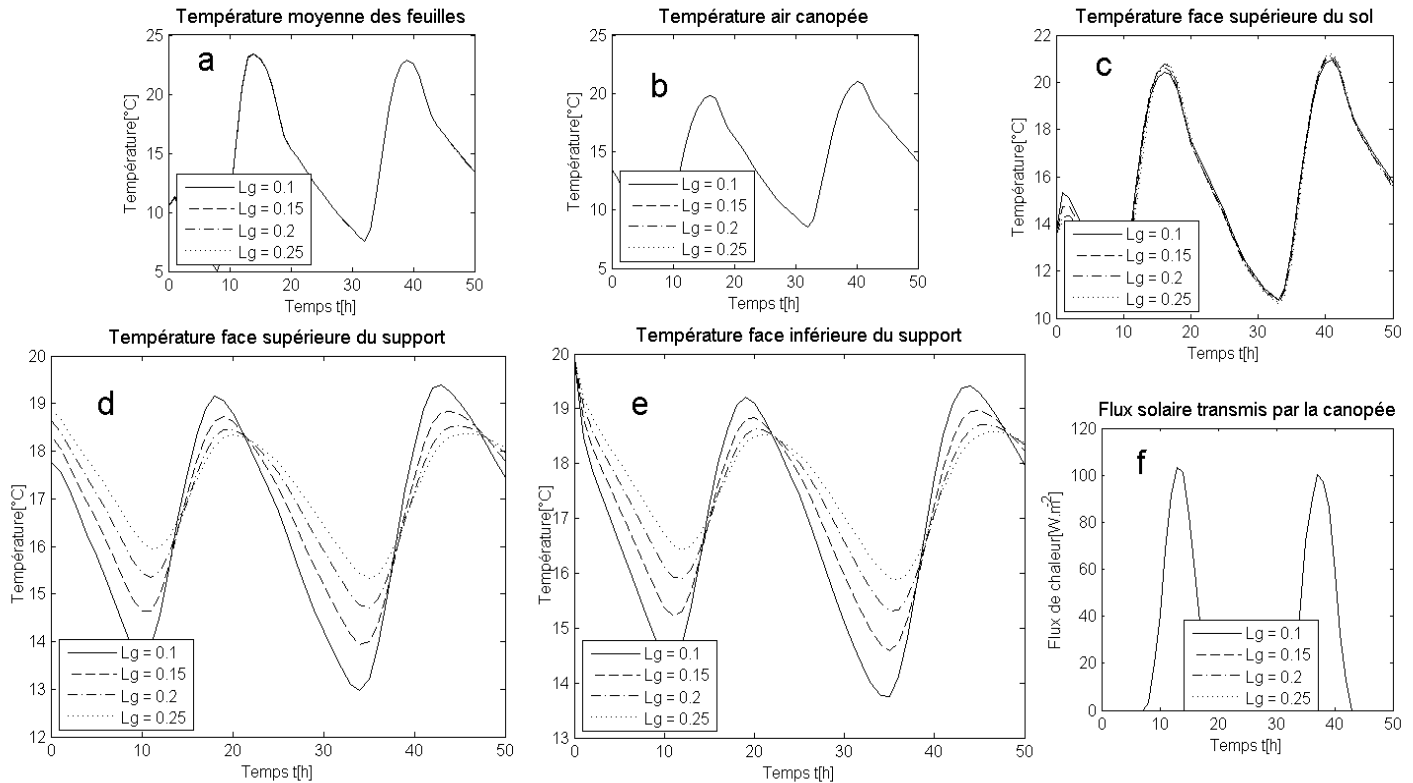


Figure II- 10: Influence de l'épaisseur de la couche du sol

La résistance thermique dépend de l'épaisseur et de la conductivité thermique du matériau. A conductivité thermique constante, plus grande est l'épaisseur du matériau, plus forte est sa résistance thermique. Ainsi, la figure II-10 montre qu'une couche épaisse du sol diminue l'amplitude de variation des températures moyennes du sol et du support. Par conséquent, l'augmentation de ce paramètre résulte une hausse de la résistance thermique, et par suite, une baisse du flux de chaleur entrant la pièce sous le toit.

Toutefois, on ne peut pas abuser de cet avantage avec une couche trop épaisse car une grande valeur de ce paramètre accroît la masse du sol et engendre une lourde charge pondérale pour le support de la toiture. Il importe alors d'optimiser l'épaisseur du sol de telle sorte qu'elle permette d'obtenir une bonne résistance thermique tout en évitant une charge pondérale exagérée du toit.

L'épaisseur du sol n'a aucune influence sur les températures des feuilles et de l'air de la canopée.

II.2-3 Influences des paramètres du support :

II.2-3-1 Influence de la conductivité thermique du support λ_s :

Les résultats de la variation de la conductivité thermique du support sont illustrés sur les figures II-11 et II-12.

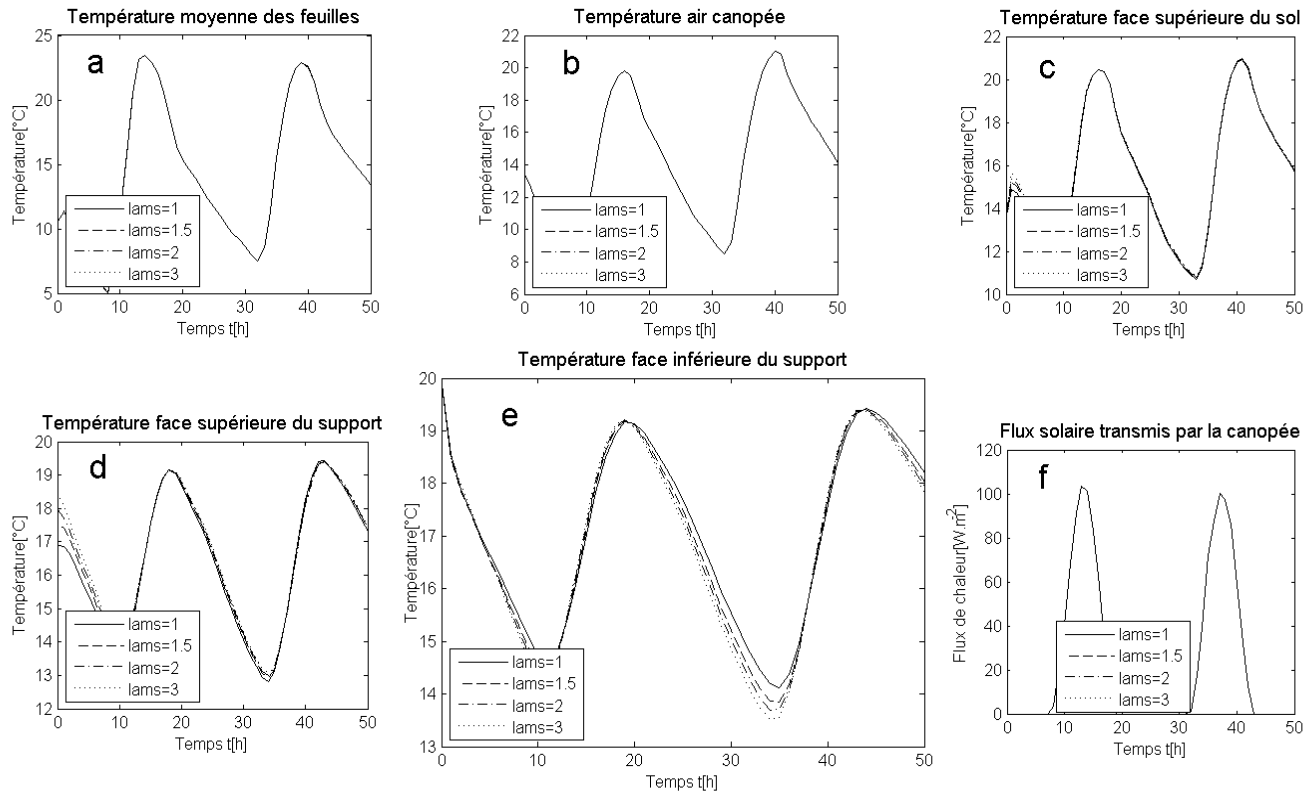


Figure II- 11: Influence de la conductivité thermique du support

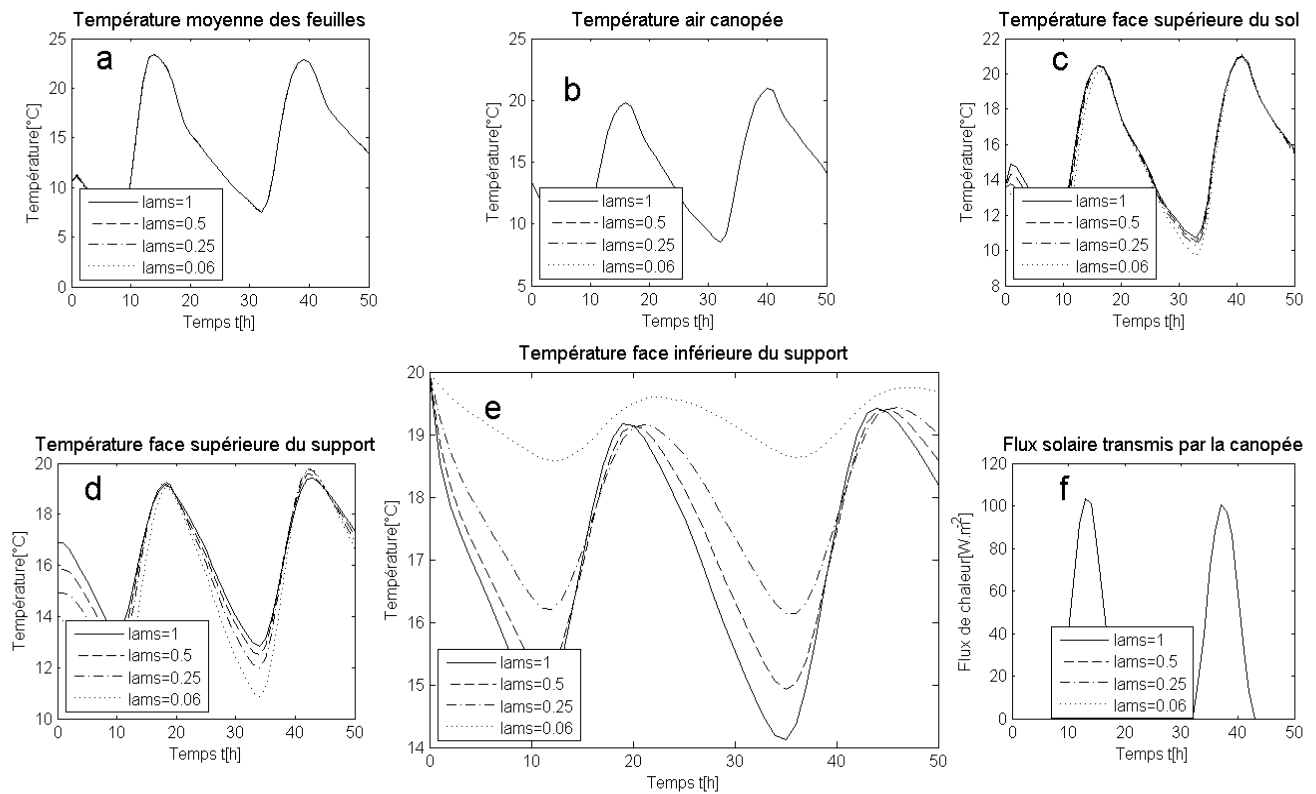


Figure II- 12: Influence de la conductivité thermique du support

Les températures du support, notamment celle de sa face inférieure, sont influencées par la conductivité thermique de cette composante du toit. En effet, une augmentation de ce paramètre fait diminuer les températures minimales de la face inférieure du support. La figure II-11 montre qu'il n'est pas très intéressant d'avoir un support à grande conductivité thermique du fait que cela diminue les températures minimales du support alors que les températures maximales de celui-ci demeurent quasiment inchangées.

Bien que les températures de la face supérieure du sol (Fig. II-12-c) et de la face supérieure du support (Fig. II-12-d) s'amplifient pour une petite valeur de ce paramètre, la figure II-12-e montre l'importance fondamentale d'avoir un support à faible valeur de conductivité thermique. En effet, pour une petite valeur de ce paramètre, la température de la face inférieure du support (Fig. II-12-e) tend à ne plus être influencée par les sollicitations externes dont le flux de rayonnement solaire.

En tout, il y a lieu d'opter pour un support ayant une bonne qualité d'isolation thermique tout en étant suffisamment étanche et solide pour supporter les charges pondérales reposant sur lui.

Par ailleurs, la conductivité thermique du support n'influe pas sur les températures des feuilles et de l'air de la canopée.

II.2-3-2 Influence de l'épaisseur du support L_s :

La figure II-13 met en évidence l'influence de l'épaisseur du support sur les températures du toit.

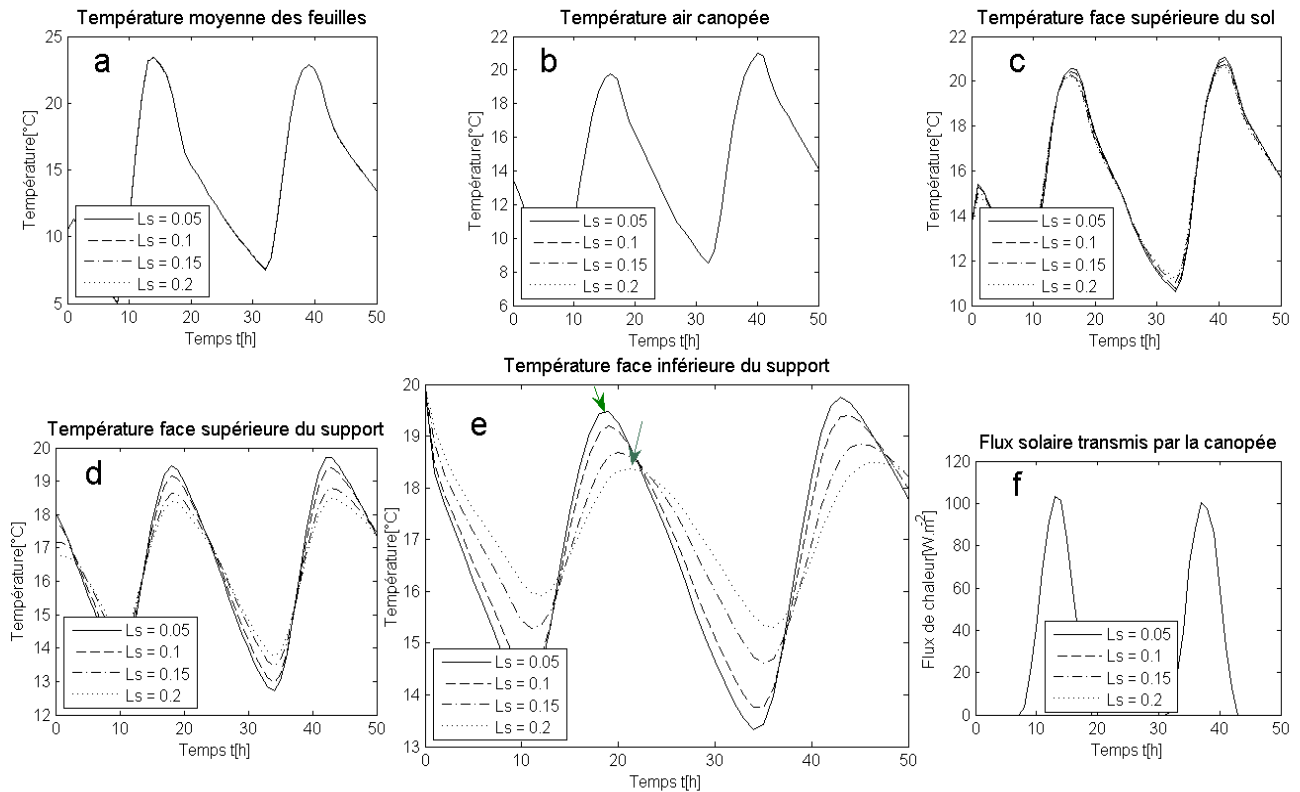


Figure II- 13: Influence de l'épaisseur du support de la toiture

De manière analogue qu'avec le cas de l'épaisseur du sol, la variation de l'épaisseur du support influe beaucoup sur les températures du sol et du support. La figure II-13 montre une décroissance de la largeur de la gamme de variation des températures (figures II-13-c, II-13-d, II-13-e) pour un accroissement de la valeur de ce paramètre.

Il découle de la figure II-13-e que plus l'épaisseur du support est grande plus l'influence des sollicitations extérieures du système sur la température de cette couche se décale dans le temps. En effet, l'évolution de la température de la face inférieure du support n'est plus en phase avec les températures des autres composantes du toit ; un décalage de plus de 2h est constaté entre les cas où $L_s = 0.05\text{m}$ et $L_s = 0.2\text{m}$ pour la température de la surface inférieure du support.

En outre, l'épaisseur du support n'a aucun effet sur les températures des feuilles et de l'air de la canopée.

II.2-3-3 Influence de la température interne du bâtiment T_{Tin} :

Varier la température de la pièce sous le toit vert n'est pas évident étant donné que ce paramètre devrait être lui-même influencé par la température de la face interne du toit. Néanmoins, nous avons opté à procéder à la variation de ce paramètre pour savoir son influence sur les profils respectifs des températures des différentes composantes du toit. La figure II-14 montre les résultats ainsi obtenus.

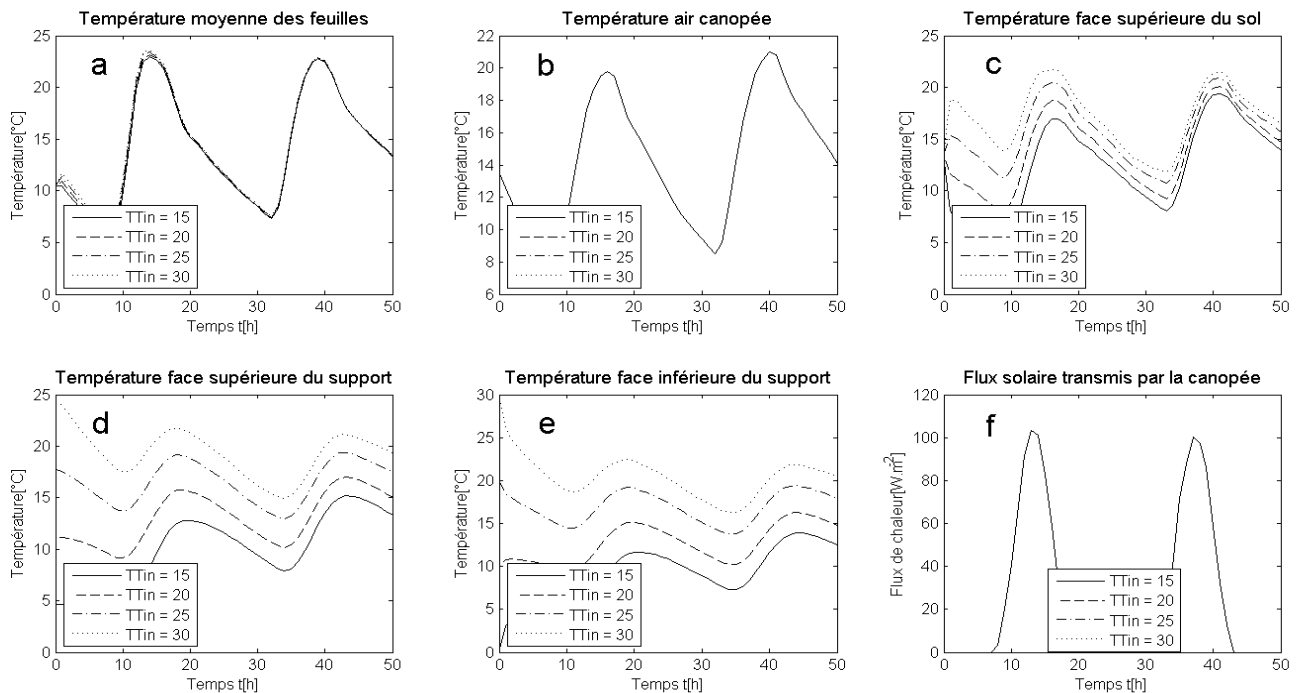


Figure II- 14: Influence de la température interne du bâtiment

La variation de la température interne de la pièce sous le toit vert influe indéniablement sur les températures du support et du sol.

Ainsi, une variation de ce paramètre affecte linéairement les températures du sol (Fig. II-14-c) et du support (Fig.II-14-d, II-14-e). Les températures du sol et du support augmentent avec la température interne de la pièce. La variation de la température de la face intérieure du support est principalement due au phénomène de convection.

Dans le modèle que nous avons proposé, la température interne de la pièce a été supposée connue. Les résultats précédemment cités nous amènent à penser qu'à l'inverse nous pouvons nous attendre à ce que les températures du sol et du support influent directement aussi sur la température interne de la pièce. Il serait donc intéressant, pour la suite de ce travail, de ne pas imposer la valeur de cette température de la pièce afin de voir l'impact de la toiture végétalisée sur l'atteinte du confort thermique au sein de cette pièce.

Quant aux températures des feuilles et de l'air de la canopée, elles ne sont pas influencées par la température interne de la pièce.

II.2-4 Influences de la position du toit :

II.2-4-1 Influence de l'inclinaison α et de l'azimut α_z du toit :

On peut constater sur les figures II-15 II-16 II-17 II-18 les résultats de simulation par variation de l'inclinaison et de l'azimut du toit.

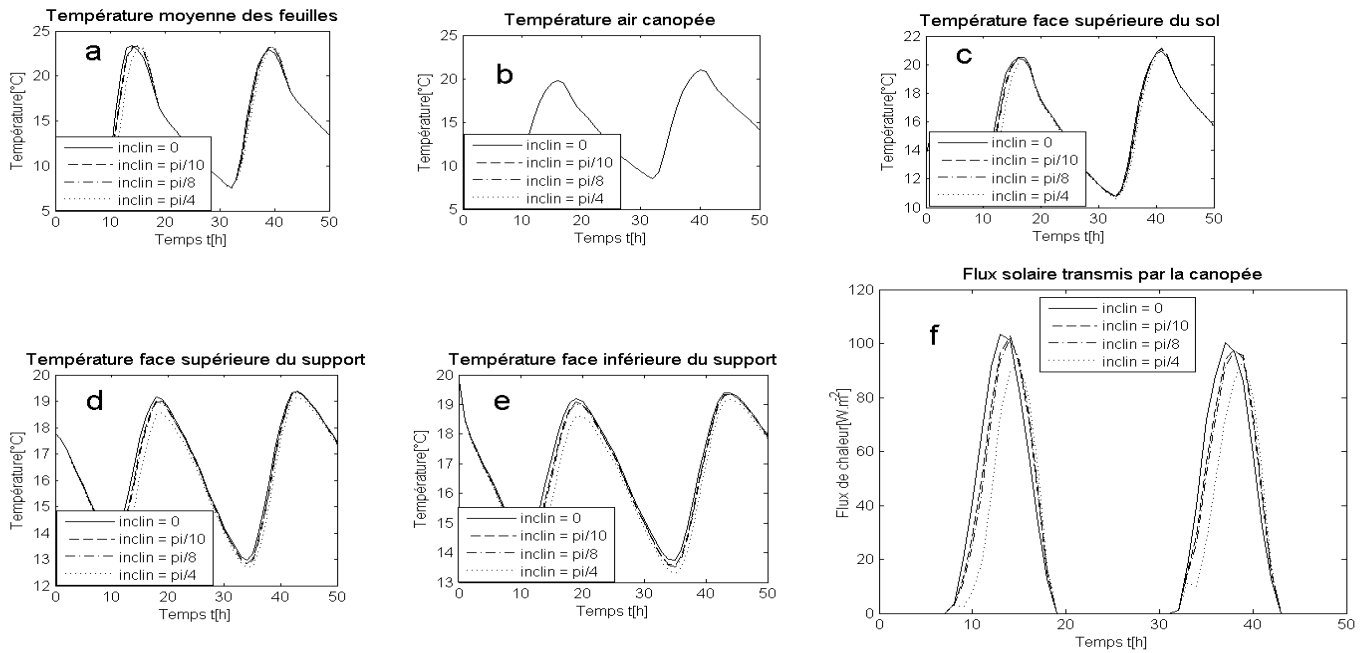


Figure II- 15: Toit orienté vers l'Ouest

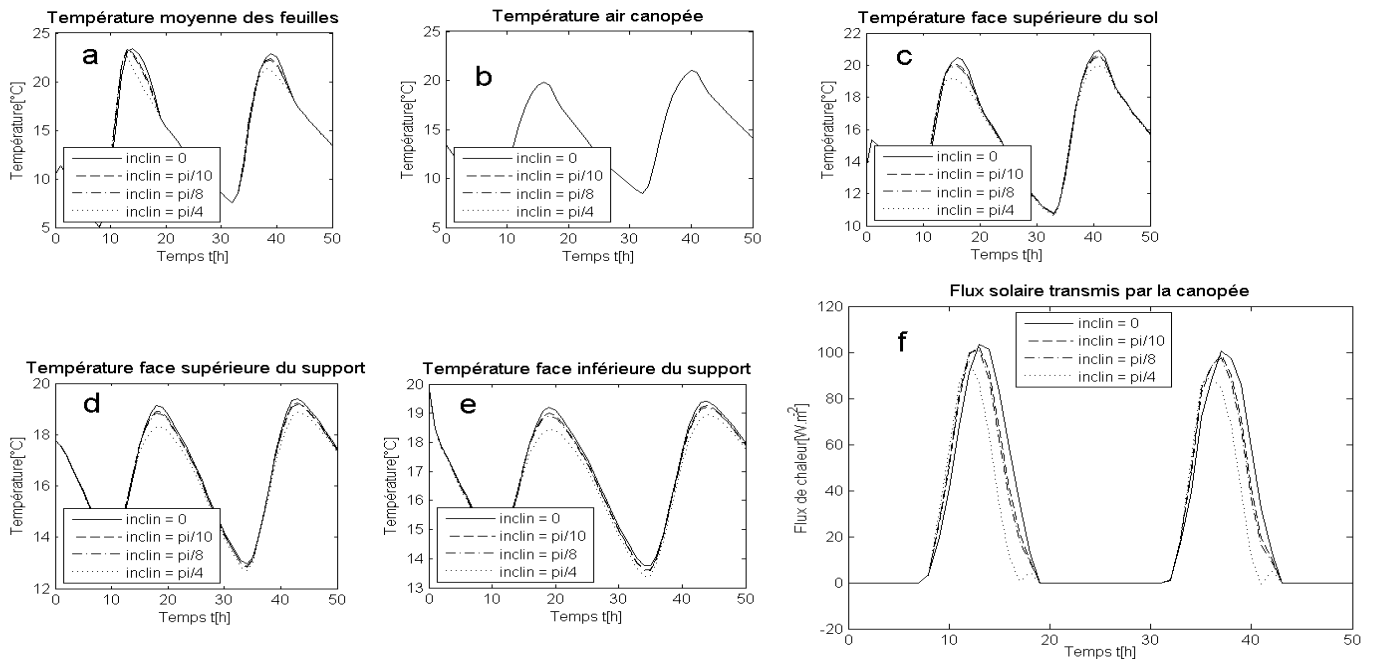


Figure II- 16: Toit orienté vers l'Est

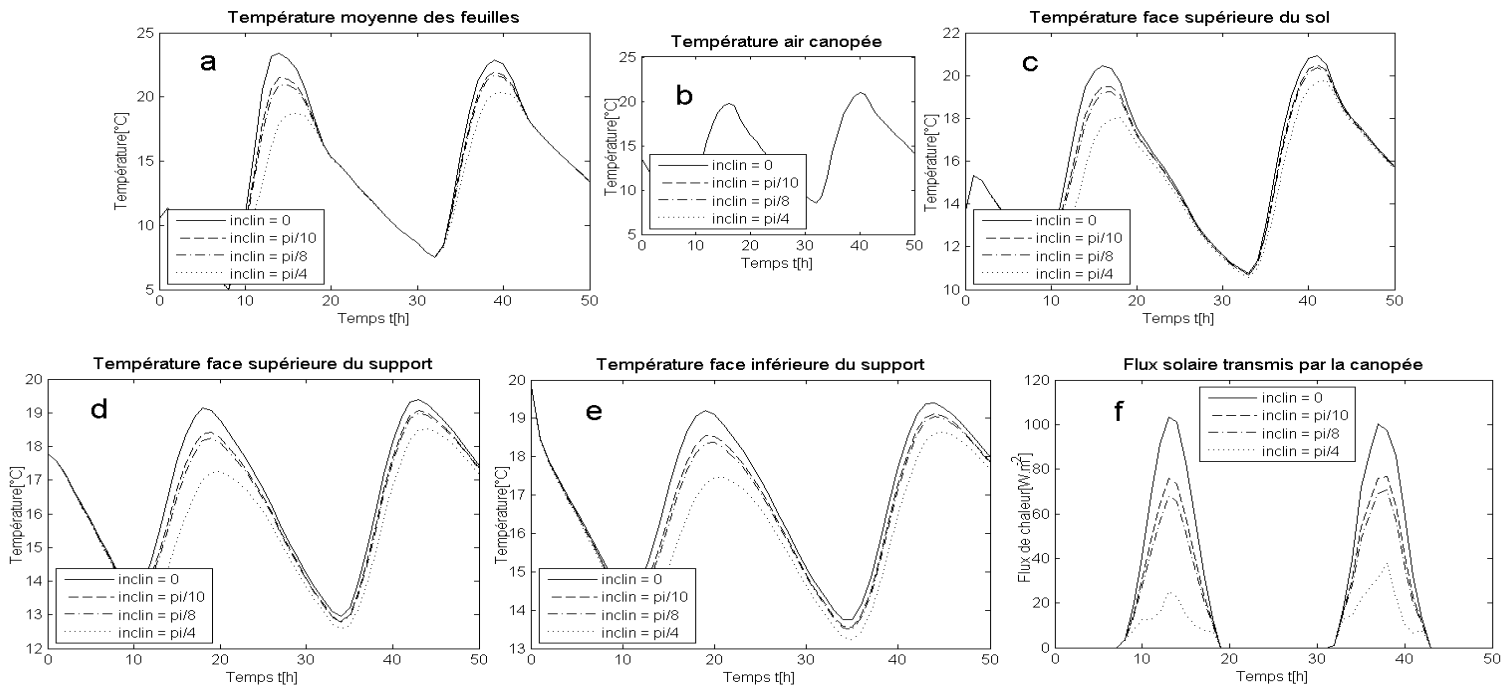


Figure II- 17: Toit orienté vers le Sud

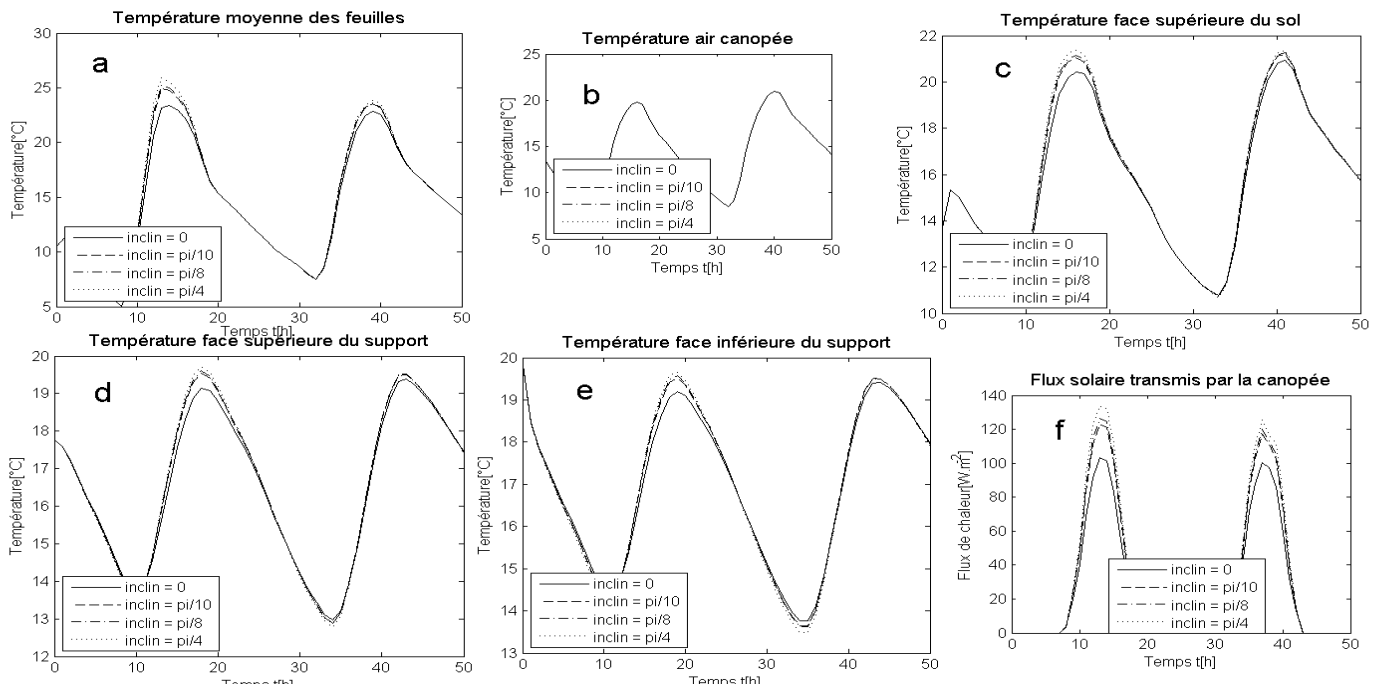


Figure II- 18: Toit orienté vers le Nord

L'inclinaison du toit par rapport à l'horizontale influe sur les températures de ses différentes composantes mais cette influence varie selon son orientation. Nous avons choisi d'orienter la toiture vers les 4 points cardinaux. La figure II-15-f montre que pour un toit orienté vers l'Ouest, nous pouvons noter, en comparant les cas d'une toiture horizontale et celle inclinée de 45° , une diminution de flux solaire transmis par la canopée et un décalage en retard de l'évolution de ces flux transmis.

Pour un toit orienté vers l'Est (figure II-16), l'influence de l'inclinaison sur les températures est pratiquement similaire à celle relative au cas précédemment cité. Toutefois, il est à noter que le décalage des évolutions des flux solaires transmis par la canopée s'effectue cette fois vers la gauche (figure II-16-f). Autrement dit, la toiture inclinée de 45° présente une avance de phase en terme d'évolution des flux solaires transmis par la canopée, par rapport à celle liée à la toiture horizontale.

Pour une toiture orientée vers le Sud (figure II-17), l'influence de l'inclinaison est très remarquable. En effet, une diminution des températures de l'ordre de 3°C , voire plus, au niveau de la toiture (figures II-17-a, II-17-c, II-17-d, II-17-e) peut être notée pour une pente de la toiture variant de 0 à 45° . Une diminution importante du flux solaire transmis par la canopée est aussi remarquée (figure II-17-f).

L'inclinaison du toit pour une orientation vers le Nord augmente les températures du système (figure II-18).

Ces deux derniers résultats sont prévisibles dans la mesure où nous avons utilisé des données météorologiques d'Antananarivo lequel, rappelons-le, se situe dans l'hémisphère Sud où il est recommandé par la littérature d'orienter généralement les panneaux solaires vers le Nord pour pouvoir bénéficier le maximum d'ensoleillement.

Une orientation vers le Sud est donc recommandée pour réduire les températures maximales des différentes composantes du toit vert.

CONCLUSION :

Une étude théorique d'un système de toiture végétalisée a été menée dans le cadre de ce travail. En effet, ayant une visée de confort thermique au sein d'un bâtiment construit en zone tropicale humide, il a été question d'étudier, vis-à-vis des sollicitations externes, le comportement thermique d'un toit vert composé principalement d'une couche de support sur laquelle repose une couche de sol permettant la pousse d'une plantation constituant une couche de canopée.

Bien que simplifié dans le sens où nous avons adopté comme hypothèse que la canopée est en couche mince, un modèle a été proposé comme outil d'aide à la conception optimale d'un toit vert. Après avoir décrit les divers sous-modèles mathématiques composant le modèle, nous avons mis au point un code de calcul sous environnement MATLAB en vue d'accomplir l'étude susmentionnée.

Des simulations ont été effectuées à l'aide du code de calcul précédemment cité afin de voir non seulement les influences des sollicitations externes du système étudié mais aussi celles d'un certain nombre de paramètres du modèle proposé.

Parmi les résultats obtenus, il découle les points ci-après :

- une plantation à grand coefficient d'extinction et à grand indice de surface foliaire diminue considérablement le rayonnement transmis par la canopée et renforce une qualité de rafraîchissement à la toiture ;
- la transmittivité et la réflectivité des feuilles de la plantation devraient être aussi faible que possible ;
- l'humidité volumétrique du sol devrait être faible, autant que faire se peut, pour éviter une diminution importante des températures pendant la période nocturne ;
- une optimisation de l'épaisseur du sol est important ;
- le choix des matériaux constituant le support devrait être dicté par une faible conductivité thermique pour assurer une bonne isolation thermique du bâtiment ;
- le maximum d'inclinaison d'un toit orienté vers le Sud est recommandé pour parvenir à un rafraîchissement maximum.

La suite de ce travail est très vaste. Nous pouvons citer à titre d'exemple, l'étude théorique du cas de la canopée considérée comme étant en couche épaisse. Il y a également l'étude de sensibilité paramétrique du modèle proposé pour déterminer les paramètres les plus influents parmi ceux qui ont été cités précédemment comme influents. Il est évident que des mesures expérimentales seront nécessaires pour valider les calculs et/ou apporter des corrections au code de calcul associé au modèle proposé.

ANNEXE :

Code de calcul sous Matlab.7.10

1^{er} module : pour la représentation graphique

```
function drawing(nsim,graph)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% nsim = 1:variation de LAI%indice de surface foliaire(Leaf Area Index)
% nsim = 2:variation de k1%coefficient d'extinction
% nsim = 3:variation de rhog%densité apparente du sol
% nsim = 4:variation de Ls'épaisseur du support
% nsim = 5:variation de Lg'épaisseur du sol
% nsim = 6:variation de lams%conductivité thermique du support
% nsim = 7:variation de cs%chaleur spécifique du support
% nsim = 8:variation de rhos%densité du support
% nsim = 9:variation de hg%coefficient de convection globale du sol
% nsim = 10:variation de wfc%humidité volumique à la capacité du sol
% nsim = 11:variation de wwp%humidité volumique du sol au point de
fanaison
% nsim = 12:variation de w%humidité volumétrique du sol
% nsim = 13:variation de cg%chaleur spécifique du sol
% nsim = 14:variation de rog%reflectance du sol
% nsim = 15:variation de rhosp%gravité spécifique des particules du sol
% nsim = 16:variation de f%coefficient d'évaporation par rapport à la
% culture de tomate
% nsim = 17:variation de rhoinf%reflectivité d'une canopée dense
% nsim = 18:variation de l%longueur caractéristique des feuilles
% nsim = 19:variation de tot%transmittance moyenne des feuilles
% nsim = 20:variation de rot%réflectance moyenne des feuilles
% nsim = 21:variation de R%quantité d'air échangé
% nsim = 22:variation de df'épaisseur moyenne des feuilles
% nsim = 23:variation de inclin%inclinaison du toit
% nsim = 24:variation de expoz%azimut du toit
% nsim = 25:variation de TTin%température interne de la maison
% nsim = 26:variation de la densité moyenne des feuilles
% nsim = 27:variation de la chaleur spécifique des feuilles
% nsim = 28:aucune variation
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% graph = 1:influence sur les températures et le flux transmis
% graph = 2:influence sur le flux absorbé par la canopée
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
var1 = {'lai = 1','k1 = 0.436','rhog = 1000','Ls = 0.05',...
        'Lg = 0.1','lams=1','cs = 750',...
        'rhos = 2250','hg=1','wfc = 0.2','wwp = 0.1',...
        'w = 0.1','cg = 750','rog = 0.1','rhosp = 2500',...
        'f=0.5','roinf = 0.15','l = 0.05','tot = 0.1',...
        'rot = 0.1','R = 125','df= 0.001','inclin = 0',...
        'expoz = 0','TTin = 15','rhop = 750','cp = 600',...
        'No change'};
var2 = {'lai = 2','k1 = 0.7','rhog = 1200','Ls = 0.1',...
        'Lg = 0.15','lams=0.5','cs = 800',...
        'rhos = 2300','hg=1.5','wfc = 0.25','wwp = 0.12',...
        'w = 0.2','cg = 800','rog = 0.2','rhosp = 2600',...
        'f=1','roinf = 0.2','l = 0.1','tot = 0.2','rot = 0.2',...
        'R = 250','df= 0.002','inclin = pi/10','expoz = pi/6',...
        'TTin = 20','rhop = 790','cp = 750','No change'};
var3 = {'lai = 3','k1 = 0.83','rhog = 1300','Ls = 0.15',...
        'Lg = 0.2','lams=0.25','cs = 850',...
        'rhos = 2500','hg=2','wfc = 0.3','wwp = 0.17','w = 0.3',...
        'cg = 900','rog = 0.3','rhosp = 2800','f=1.5',...
        'roinf = 0.25','l = 0.2','tot = 0.3','rot = 0.3',...
        'R = 5000','df= 0.003','inclin = pi/8','expoz = pi/2',...
        'TTin = 20','rhop = 790','cp = 750','No change'}
```

```

'TTin = 25','rhop = 820','cp = 850','No change'};
var4 = {'lai = 4','k1 = 1.1','rhog = 1400','Ls = 0.2',...
'Lg = 0.25','lams=0.06','cs = 1000',...
'rhos = 2750','hg=3','wfc = 0.4','wwp = 0.2','w = 0.4',...
'cg = 1000','rog = 0.4','rhaps = 3000','f=2',...
'roinf = 0.3','l = 0.3','tot = 0.5','rot = 0.4',...
'R = 1000','df= 0.004','inclin = pi/4','expoz = 5*pi/6',...
'TTin = 30','rhop = 850','cp = 1000','No change'};

[tour,deltat,Tfin,solrad,~,phitrans,radsol,ws,Tamb,...
Tciel,Troom] = lancesim(nsim);
%Tfin:températures{feuilles,air canopée,surface supérieure
%du sol,surface supérieure du support,
%surface inférieure du support}
%solrad: flux absorbé par la canopée
%solrad1:flux de chaleur à travers le toit
%phitrans:flux de chaleur transmis par la canopée
%phiabsorb:flux de chaleur absorbé par la canopée
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cnt = 1:3600/deltat:tour;
man = floor(cnt*deltat/3600);

switch graph
case 0
subplot('position',[0.1 0.5 0.8 0.45]),plot(...
man,Tfin(1,cnt,1),'g',man,Tfin(2,cnt,1),'b',...
man,Tfin(3,cnt,1),'r',man,Tfin(4,cnt,1),'m',...
man,Tfin(5,cnt,1),'c',man,Tamb(1,cnt),'ko',...
man,Tciel(1,cnt),'k--',man,Troom(1,cnt),'k-',...
'LineWidth',1.5)
xlabel('Temps [h]')
ylabel('Températures')
legend('T_{feuille}','T_{Air canopée}',...
'T_{sup du sol}','T_{sup du support}',...
'T_{inf du support}','T_{ambient}',...
'T_{ciel}','T_{Salle}','Location','SouthEast')
subplot('position',[0.1 0.25 0.8 0.15]),plot(...
man,radsol(1,cnt))
ylabel('Irradiation solaire[W.m^{-2}]')
subplot('position',[0.1 0.05 0.8 0.15]),plot(...
man,ws(1,cnt))
xlabel('Temps [h]')
ylabel('Vitesse du vent[m.s^{-1}]')
case 1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%TEMPERATURE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
subplot(2,3,1),plot(man,Tfin(1,cnt,1),'g',man,Tfin(1,cnt,2),...
'g--',man,Tfin(1,cnt,3),'g-.',man,Tfin(1,cnt,4),'g:',...
'LineWidth',1)
xlabel('Temps t[h]')
ylabel('Température[°C]')
title('Température moyenne des feuilles','FontSize',12)
legend(var1{nsim},var2{nsim},var3{nsim},var4{nsim},...
'Location','SouthWest')
subplot(2,3,2),plot(man,Tfin(2,cnt,1),'b',man,Tfin(2,cnt,2),...
'b--',man,Tfin(2,cnt,3),'b-.',man,Tfin(2,cnt,4),'b:',...
'LineWidth',1)
xlabel('Temps t[h]')
ylabel('Température[°C]')

```

```

        title('Température air canopée','FontSize',12)
        legend(var1{nsim},var2{nsim},var3{nsim},var4{nsim},...
            'Location','SouthWest')
    subplot(2,3,3),plot(man,Tfin(3,cnt,1),'r',man,Tfin(3,cnt,2),...
        'r--',man,Tfin(3,cnt,3),'r-.',man,Tfin(3,cnt,4),'r:',...
        'LineWidth',1)
    xlabel('Temps t[h]')
    ylabel('Température[°C]')
    title('Température face supérieure du sol',...
        'FontSize',12)
    legend(var1{nsim},var2{nsim},var3{nsim},var4{nsim},...
        'Location','SouthWest')
    subplot(2,3,4),plot(man,Tfin(4,cnt,1),'k',man,Tfin(4,cnt,2),...
        'k--',man,Tfin(4,cnt,3),'k-.',man,Tfin(4,cnt,4),'k:',...
        'LineWidth',1)
    xlabel('Temps t[h]')
    ylabel('Température[°C]')
    title('Température face supérieure du support',...
        'FontSize',12)
    legend(var1{nsim},var2{nsim},var3{nsim},var4{nsim},...
        'Location','SouthWest')
    subplot(2,3,5),plot(man,Tfin(5,cnt,1),'c',man,Tfin(5,cnt,2),...
        'c--',man,Tfin(5,cnt,3),'c-.',man,Tfin(5,cnt,4),'c:',...
        'LineWidth',1)
    xlabel('Temps t[h]')
    ylabel('Température[°C]')
    title('Température face inférieure du support',...
        'FontSize',12)
    legend(var1{nsim},var2{nsim},var3{nsim},var4{nsim},...
        'Location','SouthWest')
    subplot(2,3,6),plot(...
        man,phitrans(cnt,1),'k',man,phitrans(cnt,2),'k--',...
        man,phitrans(cnt,3),'k-.',man,phitrans(cnt,4),'k:',...
        'LineWidth',.5)
    xlabel('Temps t[h]')
    ylabel('Flux de chaleur[W.m^{-2}]')
    title('Flux solaire transmis par la canopée',...
        'FontSize',12)
    legend(var1{nsim},var2{nsim},var3{nsim},var4{nsim},...
        'Location','SouthWest')
%-----
        case 2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%FLUX ABSORBÉ PAR LA CANOPÉE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----
    subplot('position',[0.1 0.1 0.8 0.8]),plot(...
        man,solrad(cnt,1),'r',man,solrad(cnt,2),'r--',...
        man,solrad(cnt,3),'r-.',man,solrad(cnt,4),'r:',...
        'LineWidth',1.5)
    xlabel('Temps t[h]')
    ylabel('Flux de chaleur[W.m^{-2}]')
    title('Flux solaire absorbé par la canopée','FontSize',12)
    legend(var1{nsim},var2{nsim},var3{nsim},var4{nsim},...
        'Location','Best')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    otherwise
        error(['vous avez fait un mauvais choix',...
            ' pour le second nomdre\n Voir "help"'])
end

```


2e module : pour le calcul des différentes températures du système de toiture

```
function [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,...
    ws,Tamb,Tciel,Troom] = lancesim(nsim)
global deltt
deltt = 50;%pas de temps
lai = 2;%1-5%indice de surface foliaire(Leaf Area Index)
k1 = 1.1;%0.5-1.1%coefficient d'extinction de la canopée
rhog = 1200;%1000-1400%densité apparente du sol
Ls = 0.1;%0.05-0.2%épaisseur du support
Lg = 0.1;%0.1-0.3%épaisseur du sol
Lc = 0.1;%0.02-0.1%épaisseur de la canopée
lams=1.75;%1-3%conductivité thermique du support
cs = 820;%750-1000%chaleur spécifique du support
rhos = 2500;%2250-2750%densité du support
hg = 2;%1-3%coefficient de convection globale ,valeur adoptée
wfc = .30;%0.2-0.4%humidité volumique à la capacité du sol
wwp = .15;%0.1-0.2%humidité volumique du sol au point de fanaison
w = 0.3;%0.2-0.4%humidité volumétrique du sol
cg = 850;%750-1000%chaleur spécifique du sol
rog = .2;%0.1-0.3ground réflectance
rhosp = 2700;%2500-3000gravité spécifique des particules du sol
f = 1;% 0.5-2 coefficient d'évaporation par rapport à la culture de tomate
roinf = 0.23;%0.15:0.03:0.3 réflectivité d'une canopée dense
l = .20;%0.05-0.3 %longueur caractéristique des feuilles
tot = 0.2; %0.1-0.4%tot:transmittance moyenne des feuilles
rot = 0.2;%0.1-0.4rot:reflectance moyenne des feuilles
R = 1000;%125-1000;%quantité d'air échangé
df= 0.001;%0.001-0.004%épaisseur moyenne des feuilles
inclin = pi/9;%inclinaison du toit
expoz = pi;%azimut du toit
TTin = 20 ; %15-20-25-30%température interne de la salle
deltat = deltt;
rhop = 850;%densité moyenne des feuilles
cp = 800;%600-1000%chaleur spécifique des feuilles
%meteodata = xlsread([pwd, '\Iarivo.xlsx'], 'A03:I50');
meteodata = xlsread([pwd, '\Antananarivo.xlsx'], 'A8004:I8054');
varia = insert(lai,k1,rhog,Ls,Lg,lams,cs,rhos,hg,wfc,wwp,...
    w,cg,rog,rhosp,f,roinf,l,tot,rot,R,df,inclin,expoz,TTin,...
    rhop,cp);
switch nsim
case 1
    lai = [1 2 3 4];%2-5%[m2.m-2]indice de surface foliaire
        %(Leaf Area Index)
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
        Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,lai,nsim,...
        meteodata,deltat);
case 2
    k1 = [0.436 0.7 0.83 1.1];%coefficient d'extinction
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
        Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,k1,nsim,...
        meteodata,deltat);
case 3
    rhog = [1000 1200 1300 1400];%[Kg.m-3]densité apparente du sol
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
        Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,rhog,nsim,...
        meteodata,deltat);
case 4
    Ls = [0.08 0.1 0.15 0.2];%épaisseur du support
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
        Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,Ls,nsim,...
        meteodata,deltat);
```

```
case 5
    Lg = [0.1 0.15 0.2 0.25];%épaisseur du sol
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,Lg,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 6
    lams=[1 0.5 0.25 0.06];%conductivité thermique du support
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,lams,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 7
    cs = [750 800 850 1000];%chaleur spécifique du support
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,cs,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 8
    rhos = [2250 2300 2500 2750];%densité du support
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,rhos,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 9
    hg=[1 1.5 2 3];%coefficient de convection globale du sol
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,hg,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 10
    wfc = [0.2 0.25 0.3 0.4];%humidité volumique à la capacité du sol
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,wfc,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 11
    wwp = [0.1 0.15 0.15 0.2];
    %humidité volumique du sol au point de fanaison
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,wwp,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 12
    w = [0.1 0.2 0.3 0.4];%humidité volumétrique du sol
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,w,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 13
    cg = [750 800 900 1000];%chaleur spécifique du sol
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,cg,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 14
    rog = [0.1 0.2 0.3 0.4];%ground reflectance
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,rog,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 15
    rhosp = [2500 2600 2800 3000];
    %gravité spécifique des particules du sol
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,rhosp,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 16
    f=[0.5 1 1.5 2];%coefficient d'évaporation par rapport
    %à la culture de tomate
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,f,nsim,meteodata,deltat);
```

```
case 17
    roinf = [0.15 0.2 0.25 0.35];%reflectivité d'une canopée dense
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,roinf,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 18
    l = [0.05 0.1 0.2 0.3];%longueur caracteristique des feuilles
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,l,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 19
    tot = [0.1 0.2 0.3 0.4];%tot:transmittance moyenne des feuilles
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,tot,nsim,meteodata,deltat);
case 20
    rot = [0.1 0.2 0.3 0.4];%rot:reflectance moyenne des feuilles
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,rot,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 21
    R = [125 250 500 1000];%quantité d'air échangé[
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,R,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 22
    df= [0.001 0.002 0.003 0.004];%épaisseur moyenne des feuilles
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,df,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 23
    inclin = [0 pi/10 pi/8 pi/4];%inclinaison du toit[rad]
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,inclin,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 24
    expoz = [0 pi/2 pi 3*pi/2 2*pi];%azimut du oit
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,expoz,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 25
    TTin = [0 10 20 30] ; %température interne de la maison
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,TTin,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 26
    rhop = [750 790 820 850];%densité moyenne des feuilles
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,rhop,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 27
    cp = [600 750 800 1000];%chaleur specifique des feuilles
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,cp,nsim,...
     meteodata,deltat);
case 28
    lai = [3 3 3 3];
    [tour,deltat,Tfin,solrad,solradl,phitrans,radsol,ws,...
     Tamb,Tciel,Troom] = workout(varia,lai,nsim,...
     meteodata,deltat);
otherwise
    error('choisir un nombre appartenant à [1:27]')
end
```

```

function [atour,adeltat,aTfin,asolrad,asolradl,aphitrans,...
        raso,aaws,tamb,tcieI,troom] = workout(var,ovain,n,...
        donmeteo,delt)
numh = donmeteo(:,1);%colonne A
nbh = length(numh);
mm = length(ovain);
nn = floor(nbh*3600/delt);
aTfin= ones(5,nn,mm);
asolrad= ones(nn,mm);
asolradl= ones(nn,mm);
aphitrans= ones(nn,mm);

for i = 1:length(ovain)
    var(n) = ovain(i);
    [atour,adeltat,aaTfin,aasolrad,aasolradl,aaphitrans,...
        raso,aaws,tamb,tcieI,troom] = comput(var,donmeteo);
    aTfin(:, :, i) = aaTfin;
    asolrad(:, i) = aasolrad;
    asolradl(:, i) = aasolradl;
    aphitrans(:, i) = aaphitrans;
end
end
function p = insert(varargin)
p =ones(1,length(varargin));
for i = 1 : nargin
    p(i) = varargin{i} ;
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% n°1
function [atour,adeltat,aTfin,asolrad,asolradl,aphitrans,...
        raso,aws,atamb,atcieI,aTroom] = comput(var,toetrandr)
deltat = deltt;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[lai,k1,rhog,Ls,Lg,lams,cs,rhos,hg,wfc,wwp,w,cg,rog,...
    rhosp,f,roinf,l,tot,rot,R,df,inclin,expoz,TTin,rhop,cp] = ...
    extract(var);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
constants%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
g = 9.81;%accélération de la pesanteur
sigma = 5.67*10^-8;%constante de Stefan-Boltzmann
Ptot = 101325 ; %pression totale
alttoit = 10;%altitude du toit
P = Ptot*((288 - .0065*alttoit)/288)^5.256;%pression sur le toit
cpa = 1004.17;%chaleur spécifique de l'air sec
cpv = 1850;%chaleur spécifique de la vapeur d'eau
Rd = 287.058;%constante spécifique de gaz pour l'air sec
Rv = 461.495;%constante spécifique de gaz pour la vapeur d'eau
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
adeltat =deltat;
%MODELE DE LA CANOPEE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
a=1174;b=207;m=.5;n=.25;%pour culture tomate
rmin=82;
C1=4.3 ;C2=.54 ;C3=2.3e-2 ;C4=6.1e-7 ;C5=4.3;conCO2= 330;
                                %parts per million by volume [ppmv],
                                %peut être considérée comme constante
tetaa = 0.00726;%kg(vapeur d'eau).kg-1(air sec)%initialisation
epsp = 0.6;%emittance moyenne des feuilles
%MODELE DU SOL%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Do = .611e-4;%valeur constante
alfa = .62;%valeur constante
psiwp = -10^(-6.15);%potentiel d'eau au point de fanaison
psifc = -10^(-4.71);%potentiel d'eau à la capacité du sol

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%from XLREAD%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
meteodata = toetrandr;
numh = meteodata(:,1);%colonne A
    nbh = length(numh);
Tm = 273.15 + meteodata(:,2);%colonne B:air temperature
dirh = meteodata(:,3);%colonne C:direct radiation
difh = meteodata(:,4);%colonne D:diffuse radiation
hr = 0.01*meteodata(:,5);%humidité relative de l'air ambiant
azim = -pi - (pi/180)*meteodata(:,6);%azimut solaire
hs = (pi/180)*meteodata(:,7);%hauteur solaire
Tsky = 273.15 + meteodata(:,8);%colonne H:température du ciel
u=meteodata(:,9);%vitesse du vent
Tin=(TTin+273.1500)*ones(1,nbh);%température dans le bâtiment
clear meteodata
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%pour initialisation T omaly
Tpp2 = Tm(1)-2;
Tpp1 = Tm(1)-2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
aTfin = ones(5,nbh*3600/deltat);
atamb = ones(1,nbh*3600/deltat);
atciel = ones(1,nbh*3600/deltat);
aTroom = ones(1,nbh*3600/deltat);
asolrad = ones(1,nbh*3600/deltat);
aphitrans = ones(1,nbh*3600/deltat);
aws = ones(1,nbh*3600/deltat);
raso = ones(1,nbh*3600/deltat);
%-----
[TT,tetaa] = temperf(inclin,k1,Tin(1),epsp,lai,sigma,...
    Tm(1),Tsky(1),a,b,m,n,l,u(1),R,lams,rhog,rog,rhosp,...
    rhop,cp,Do,alfa,psiw,psifc,wwp,wfc,w,g,Rv,Rd,P,hg,...
    cpa,cpv,tetaa,tot,rot,roinf,rmin,C1,C2,C3,C4,C5,conCO2,...
    deltat,df,cg,rhos,cs,Tpp1,Tpp2,hr(1),azim(1),expoz,...
    hs(1),dirh(1),difh(1),f,Lc,Lg,Ls);
tfin = TT;
k = 0;
for j = 1:nbh
    % progression de température dans 1h
    for ii = 1:floor(3600/deltat)
        k = k+1;
        Tpp = tfin(1);
        Tap = tfin(2);
        Tgtp = tfin(3);
        Tstp = tfin(4);
        Tsbp = tfin(5);
        tetaap = tetaa;
        [phisoltrans,phitoit,phiradsol,tetaa,tfin,rs] = ...
            tempsim(Tap,Tpp,Tgtp,Tstp,Tsbp,inclin,k1,Tin(j),...
                lai,sigma,Tm(j),Tsky(j),a,b,m,n,l,u(j),hr(j),R,lams,...
                rhog,rog,rhosp,rhop,cp,Do,alfa,psiw,psifc,wwp,wfc,...
                w,g,Rv,Rd,P,hg,cpa,cpv,tetaap,tot,rot,roinf,rmin,...
                C1,C2,C3,C4,C5,conCO2,deltat,df,cg,rhos,cs,...
                azim(j),expoz,hs(j),dirh(j),difh(j),f,Lc,Lg,Ls);
        aTfin(:,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = tfin - 273.15;
        atamb(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = Tm(j)- 273.15;
        atciel(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = Tsky(j) - 273.15;
        aTroom(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = Tin(j) - 273.15;
        asolrad(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = phiradsol;
        asolrad1(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat))= phitoit;
    end
end

```

```

aphitrans(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = phisoltrans;
aws(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = u(j);
raso(1,ii+(j-1)*floor(3600/deltat)) = rs;
end%end for i
end%end for j
atour = k;
function [varargout] = extract(p)
for i = 1:nargout
    varargout{i} = p(i);
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%SOUS FONCTIONS%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% n°2
function [TT,tetaa] = temperf(inclin,k1,Tin,epsplai,sigma,...
    Tm,Tsky,a,b,m,n,l,u,R,lams,rhog,rog,rhosp,...
    rhop,cp,Do,alfa,psiw,psifc,wwp,wfc,w,g,Rv,Rd,P,~,...
    cpa,cpv,tetaa,tot,rot,roinf,rmin,C1,C2,C3,C4,C5,conCO2,...
    deltat,df,cg,rhos,cs,Tpp1,Tpp2,hr,azim,expoz,...
    hs,dirh,difh,f,Lc,Lg,Ls)
%initialisation avec Tm( température de l'air exterieur ) et
%Tin(température du bâtiment)
Tp=(Tm+Tin)/2;
Ta=(Tm+Tin)/2;
Tgt=(Tm+Tin)/2;
Tst=(Tm+Tin)/2;
Tsb=(Tm+Tin)/2;
%radiation solaire
rdsol = radsolf(hs,azim,expoz,inclin,dirh,difh);
[Tap,Tpp,Tgtp,Tstp,Tsbp] = boottmprf(k1,rog,Tm,rhog,w,Lg,...
    Ls,lams,Tin,tot,rot,roinf,lai,a,b,l,m,n,u,Tpp1,Tpp2,...
    cpa,cpv,P,Rd,Rv,epsplai,sigma,rdsol,hr);
%-----
error1 = ones(1,5) ;
o = 1e-2 ;
%-----
while any(error1>o)
    % caractéristique de l'air (fonction de Ta et de son humidité)
    psatt = exp(23.3235 - 3802.7/Ta - (472.68/Ta)^2);
    tetaa = .622*psatt*hr/(101325 - psatt*hr);
    ppav = tetaa*P/(tetaa + 0.622);%vapor partial pressure
    ca = captherm(cpa,cpv,ppav,P);%specific heat of moist air
    %cpa:specific heat of dry air
    %cpv:specific heat of water vapour
    %tetaa: specific humidity
    gam = 66;%thermodynamic psychrometric constant
    vpa = vaporpres(Ta);%vapor pressure

    rhoa = (P-ppav)/(Rd*Ta) + ppav/(Rv*Ta);%rhoa:canopy air density
    %P:total pressure
    %Rd:Specific gas constant for dry air
    %Rv:Specific gas constant for water vapor
    [tol,tos,rosw] = coefradf(k1,tot,rot,roinf,lai);
    %thermal coefficient
    [hcvga,hrgp,hrps,hrpg,hcvpa,hcvainf,hcdg,hdifgs,...
    hdifgi,hcds,hcvi] = coefthermf(lai,sigma,Tp,Ta,...
    Tsb,Tgt,Tst,Tin,Tsky,a,b,m,n,l,u,R,Lc,lams,Ls,...
    inclin,rhog,rhosp,Do,alfa,psiw,psifc,wwp,wfc,w,...
    g,Rv,P,Lg,rhoa,ca,tol);

```

```

%transpiration flux
phitranspa = fludtranspirationf(lai,Tp,Ta,Tm,rdsol,a,...
    b,l,m,n,u,rmin,rhoa,ca,gam,C1,C2,C3,C4,C5,conCO2,f);
%terme A B C D (capacités calorifiques / deltat)
[A,B,C,D] =term1f(deltat,df,lai,Lc,Lg,Ls,rhop,cp,...
    rhoa,ca,rhog,cg,rhos,cs);
%vapeur pressure
vpg = vaporpres(Tgt);

%matrix
Amat =[A+(1-tol)*hrps+hrpg+hcvpa,-hcvpa,-hrpg,0,0;...
-hcvpa,B+hcvainf+hcvpa+hcvga,-hcvga,0,0;...
(-hrpg+tol*hrps),-hcvga,.5*C+hcvga+hrpg+hcdg+hdifgs,-(hcdg+hdifgs),0;...
0,0,-(hcdg+hdifgi),.5*(C+D)+hcdg+hdifgi+hcds,-hcds;...
0,0,0,-hcds,.5*D+hcds+hcvi];
Bmat =[A*Tpp+(1-tos-ros)*(1+tos*rog)*rdsol+phitranspa+(1-tol)*hrps*Tsky;...
B*Tap+hcvainf*Tm;...
.5*C*Tgtp+tol*hrps*Tsky+(1-rog)*tos*rdsol+hcvga*(vpa-vpg)/gam;...
.5*(C+D)*Tstp;...
.5*D*Tsbp+hcvi*Tin];

%TEMPERATURE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tmat = Amat\Bmat;
%-----
error1(5) = abs(Tmat(1)-Tp);
Tp = (Tmat(1));
%-----
%-----
error1(4) = abs(Tmat(2)-Ta);
Ta = (Tmat(2));
%-----
%-----
error1(3) = abs((Tmat(3))-Tgt);
Tgt = (Tmat(3));
%-----
%-----
error1(2) = abs((Tmat(4))-Tst);
Tst = (Tmat(4));
%-----
%-----
error1(1) = abs((Tmat(5))-Tsb);
Tsb = (Tmat(5));
%-----
end
if isnan(Tmat)
    TT = [Tap,Tpp,Tgtp,Tstp,Tsbp];
else
    TT =Tmat;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

end
%% n°3
function [phisoltrans,phiroof,phisolrad,tetaa,Tfin,rdsol] = ...
    tempsim(Tap,Tpp,Tgtp,Tstp,Tsbp,inclin,k1,Tin,lai,...
    sigma,Tm,Tsky,a,b,m,n,l,u,rh,R,lams,rhog,rog,rhosp,...
    rhop,cp,Do,alfa,psiwp,psifc,wwp,wfc,w,g,Rv,Rd,P,hg,...
    cpa,cpv,tetaap,tot,rot,roinf,rmin,C1,C2,C3,C4,C5,...
    conCO2,deltat,df,cg,rhos,cs,azim,expoz,hs,dirh,...
    difh,f,Lc,Lg,Ls)

```

```
%initialisation avec les anciennes valeurs
Tp=Tpp;
Ta=Tap;
Tgt=Tgtp;
Tst=Tstp;
Tsb=Tsbp;
tetaa = tetaap;
%solar radiation
rdsol = radsolf(hs,azim,expoz,inclin,dirh,difh);
%-----
eror = 1;
erro = 1;
teta2 = 0;
%-----
while (any(eror>1e-2) & erro>1e-3)
    % caractéristique de l'air (fonction de Ta et de son humidité)
    vpa = vaporpres(Ta);%vapor pressure [Pa]
    ppav = tetaa*P/(tetaa+.622);%partial pressure
    ca = captherm(cpa,cpv,ppav,P);%specific heat of humid air
    %cpa:specific heat of dry air
    %cpv:specific heat of water vapour
    %tetaa: specific humidity
    gam = 66;%thermodynamic psychrometric constant
    rhoa = (P-ppav)/(Rd*Ta) + ppav/(Rv*Ta);%rhoa:canopy air density
    [tol,tos,rosw] = coefradf(kl,tot,rot,roinf,lai);
    %thermal coefficient
    [hcvga,hrgp,hrps,hrpg,hcvpa,hcvainf,hcdg,hdifgs,...
        hdifgi,hcds,hcvi] = coefthermf(lai,sigma,Tp,Ta,...
        Tsb,Tgt,Tst,Tin,Tsky,a,b,m,n,l,u,R,Lc,lams,Ls,...
        inclin,rhog,rhosp,Do,alfa,psiwp,psifc,wwp,wfc,w,...
        g,Rv,P,Lg,rhoa,ca,tol);
    %coefficient for radiation
    %tol:canopy longwave transmittance
    %tos:canopy shortwave transmittance
    %rosw:canopy shortwave reflectance
    %kl:extinction coefficient for longwave radiation
    %ks:extinction coefficient for shortwave radiation
    %tot:transmittance of the leaf tissue
    %rot:reflectance of the leaf tissue
    %transpiration flux
    phitranspa = fludtranspirationf(lai,Tp,Ta,Tm,rdsol,...
        a,b,l,m,n,u,rmin,rhoa,ca,gam,C1,C2,C3,C4,C5,...
        conCO2,f);
    %terme A B C D (capacités calorifiques / deltat)
    [A,B,C,D] =term1f(deltat,df,lai,Lc,Lg,Ls,rhop,cp,...
        rhoa,ca,rhog,cg,rhos,cs);
    %vapour pressure
    vpg = vaporpres(Tgt);
    %matrix
    Amat =[A+(1-tol)*hrps+hrpg+hcvpa,-hcvpa,-hrpg,0,0;...%
        -hcvpa,B+hcvainf+hcvpa+hcvga,-hcvga,0,0;...
        (-hrgp+tol*hrps),-hcvga,.5*C+hcvga+hrgp+hcdg+hdifgs,-(hcdg+hdifgs),0;...
        0,0,-(hcdg+hdifgi),.5*(C+D)+hcdg+hdifgi+hcds,-hcds;...
        0,0,0,-hcds,.5*D+hcds+hcvi];
    Bmat =[A*Tpp+(1-tos-rosw)*(1+tos*rog)*rdsol+phitranspa+(1-tol)*hrps*Tsky;...
        B*Tap+hcvainf*Tm;...
        .5*C*Tgtp+tol*hrps*Tsky+(1-rog)*tos*rdsol+hcvga*(vpa-vpg)/gam;...
        .5*(C+D)*Tstp;...
        .5*D*Tsbp+hcvi*Tin];
```



```

%TEMPERATURE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Tmat = Amat\Bmat;
%-----
error(5) = abs(Tmat(1)-Tp);
Tp = (Tmat(1));
%-----
%-----
error(4) = abs(Tmat(2)-Ta);
Ta = (Tmat(2));
%-----
%-----
error(3) = abs((Tmat(3))-Tgt);
Tgt = (Tmat(3));
%-----
%-----
error(2) = abs((Tmat(4))-Tst);
Tst = (Tmat(4));
%-----
%-----
error(1) = abs((Tmat(5))-Tsb);
Tsb = (Tmat(5));
%-----
[fvapap,fvapag,fvapainf] = fludevaporizf(lai,Tp,Ta,Tm,Tgt,...
    rdsol,R,a,b,l,m,n,u,rmin,C1,C2,C3,C4,C5,conCO2,gam,...
    Lc,rhoa,hg,ca,f);
psatt = exp(23.3235 - 3802.7/Ta - (472.68/Ta)^2);
tetaas = .622*psatt/(101325 - psatt);
psatt = exp(23.3235 - 3802.7/Tm - (472.68/Tm)^2);
sh1 = .622*psatt*rh/(101325 - psatt*rh);
teta1 = deltat*(fvapap+fvapag+fvapainf)/(Lc*rhoa) +tetaap;
erro = abs(teta1 - teta2);
teta2 = teta1;
teta = teta2;
teta = sum([tetaas*(teta>tetaas),sh1*(teta<sh1),...
    teta*((sh1<teta)&(teta<tetaas))]);
%-----
tetaa = teta;
%-----
end
%températures:
%feuilles,air canopée,sol supérieur,support supérieur,support inférieur
Tfin =Tmat;
%irradiation solaire absorbée par la canopée
phisolrad = (1-tos-rosw)*(1+tos*rog)*rdsol;%flux entrant sur le toit
phiroof = (Tin-Tgt)*((hdifgs+hcdg)^-1+(hdifgi+hcdg)^-1+hcds^-1+...
    hcvi^-1)^-1;
phisoltrans = tos*rdsol;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%*****SOUS SOUS FONCTIONS*****
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [aTp,pTp,gtTp,stTp,sbTp] = boottmprf(kl1,gro,mT,...
    grho,W,gL,sL,slam,inT,tto,tro,infro,la,A,B,L,M,N,U,...
    ppT1,ppT2,acp,vcp,p,dR,vR,peps,sgm,radsool,rh)

error2 = 1;
while error2>.01
apT1=mT;
[~,tos,rosw] = coefradf(kl1,tto,tro,infro,la);
clv = qlatent(mT);
re=meanres(A,B,L,M,N,U,ppT2,apT1);%mean canopy external resistant

```

```

%A,B,M,N:canopy empirical coefficients
%L:leaves characteristic lenght
%U:mean wind speed
avpp = (exp(23.3235 - 3802.7/apT1 - (472.68/apT1)^2))*rh;
fracmas = .622*avpp/(p -.378*avpp);
ca = acp/(1 + fracmas) + fracmas*vcp/(1 + fracmas);
rhoa = (p-avpp)/(dR*apT1) + avpp/(vR*apT1);
cvcpa = 2*la*rhoa*ca/re;
delt = 4098*vaporpres(mT)/(mT - 35.85)^2;
ppT1=apT1 + ((1-tos-ros)*(1+tos*gro)*radsool - ...
    clv*(.2)*850/p - peps*sigm*apT1^4)/(cvcpa + ...
    clv*(.2)*delt/p + 4*peps*sigm*apT1^3);
    %slope of saturation vapor pressure curve
error2 = abs(ppT2 - ppT1);
ppT2 = ppT1;
end
aTp = apT1;
pTp = ppT1;
gtTp=mT;
glam = thermcond(grho,W);
stTp=gtTp - (gtTp - inT)/(1 + glam*sL/(slam*gL));
sbTp=inT;
end

function [cvcga,rcgp,rcps,rcpg,cvcpa,cvcainf,cdeg,...
    difcgs,difcgi,cdeg,cvci] = coefthermf(laI,sigma,...
    pT,aT,sbT,gtT,stT,inT,skyT,A,B,M,N,L,U,r,cL,...
    lamS,sL,incliN,grho,sprho,DO,alfA,wpsi,fcpsi,...
    wpw,fcw,W,G,RV,p,gL,arho,ac,toll)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%foliage
global LAI
LAI=laI;
%-----

rcgp = (1 - toll)*sigma*(gtT.^2+skyT.^2)*(gtT+skyT);
%thermal radiative coefficient ~plant-sky~
rcps = sigma*(pT.^2+skyT.^2)*(pT+skyT);

%radiative thermal coefficient ~plant-ground~
rcpg = (1-toll)*sigma*(pT^2+gtT^2)*(pT+gtT);
    %geps:ground emissivity
    %gtT:ground top temperature
%convective thermal coefficient ~plant-air~
re=meanres(A,B,L,M,N,U,pT,aT);%mean canopy external resistant
    %A,B,M,N:canopy empirical coefficients
    %L:leaves characteristic lenght
    %U:mean wind speed
cvcpa = 2*LAI*arho*ac/re;
    %arho:density of the air
    %ac:specific heat of the air
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%air%
%convective thermal coefficient ~air-sky~
cvcainf = r*cL*arho*ac;
    %r:air exchange rate
    %cL:canopy height
    %arho:air density
    %ac:specific heat of the air
%convective thermal coefficient ~air-ground~

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%face supérieure du sol%%
%conductive thermal coefficient ~ground~
lamg = thermcond(grho,W);
cdcg = 2*lamg/gL;
    %lamg:thermal conductivity
    %gL:ground thickness
    %grho:apparent density of the soil
%diffusivity coefficient ~ground-support~
T=gtT;
clv = qlatent(T);%latent heat of vaporisation
Dvts = diffvsol(grho,sprho,DO,alfA,wppsi,fcpsi,wpw,fcw,...
    W,T,G,RV,p);
%non-isothermal soil vapour diffusivity
    %sprho:gravite spécifique des particules
    %DO:diffusion coefficient of water vapour in free air
    %alfA:constant
    %wppsi:total water potential in equilibrium with vapour at the
        %wilting point
    %fcpsi:total water potential in equilibrium with vapour at
        %capacity field
    %wpw:volumetric moisture content at the wilting point
    %fcw:volumetric moisture content at field capacity
    %W:volumetric moisture
    %RV:gas constant of water vapour
    %p:total pressure
difcgs = 2*clv*Dvts/gL;
%convective
cvcga = (arho*ac/1045)*(1.14*abs(gtT - aT)^0.5 + 6.79*U^1.6)^0.5;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%face supérieure du support%%
%conductive thermal coefficient ~support~
cdcs = 2*lamS/sL;
    %lams:thermal conductivity
    %Ls:support thickness
%diffusivity coefficient ~ground-support~
T=stT;
clv = qlatent(T);
Dvti = diffvsol(grho,sprho,DO,alfA,wppsi,fcpsi,wpw,fcw,W,T,...
    G,RV,p);
    %Tst:support top temperature
difcgi = 2*clv*Dvti/gL;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%face inférieure du support%%
%convective thermal coefficient ~interior~
calc = inT-sbT;
dift = sum([calc*(calc~=0),0.001*(calc==0)]);
cvci = (1.162*(5.05-1.39*incliN+0.277*incliN^2)/...
    ((abs(dift))^0.25));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%-----sous fonction-----
function [apfvap,agfvap,amfvap] = fludevaporizf(la,pT,aT,...
    mT,gtT,solr,r,A,B,L,M,N,U,Rmin,c1,c2,c3,c4,c5,conco2,...
    ga,cL,arho,gh,ac,af)

re=meanres(A,B,L,M,N,U,pT,aT);
ri=resint(Rmin,solr,pT,aT,mT,la,c1,c2,c3,c4,c5,conco2);
vpp = vaporpres(pT);%pression de vapeur à la surface foliaire
vpg = vaporpres(gtT);%pression de vapeur à la surface du sol
vpa = vaporpres(aT);%pression de vapeur dans l'air de la canopée
vpm = vaporpres(mT);%pression de vapeur dans l'air ambiant

```

```

apfvap = 2*la*arho*(ac)*(vpp-vpa)/(qlatent(pT)*ga*(re+af*ri));
agfvap = (ga*qlatent(gtT))\gh*(vpg-vpa);
    %rmin:possible minimum value of ri
    %Ci:parameters depending on the canopy itself
    %conCO2:CO2 concentration
amfvap = (r*cL*arho*ac*(vpm-vpa))/(ga*qlatent(mT));
end
function lam = thermcond(y,x)
lam = (10^-7*((2.1*(y/1000)^(1.2-2*x))*exp(-.7*(x-.2)^2)+...
    (y/1000)^(.8+2*x)))*(4180*(.2+x)*y);
end
function Dvts = diffvsol(Rhog,Rhosp,DDo,Alfa,Psiwp,Psifc,...
    Wwp,Wfc,W,TT,G,RRv,PP)
eps = (1-(Rhog/Rhosp));%rhog:apparent density of the soil,
    %rhosp:gravité spécifique des particules
D = DDo*Alfa*eps;
clvs = qlatent(TT);
psi = Psiwp + (Psifc-Psiwp)*(W-Wwp)/(Wfc-Wwp);%volumetric moisture
Ps = bertrand(TT) ;
Pv = Ps*exp(G*psi/(RRv*TT));%partial pressure
Dvts = (clvs*D/(RRv^2*TT^3))*PP*Pv/(PP-Pv);
end
function PVS = bertrand(T)
PVS = 101325 * 10.^(17.443 - 2795./T - 3.868.*log10(T)) ;%[Pa]
end
function clvs = qlatent(T)%latent heat of vaporisation
clvs = 4186.9*(597 - 0.56*(T - 273.15)) ;
end

```

%-----

```

function [x,y,z] = coefradf(a,b,c,d,e)
ks = a*sqrt((1-b)^2 - c^2);
x = exp(-a*e);
y = exp(-ks*e);
z = (1-x)*d;
end

```

```

function paphitrans = fludtranspirationf(la,tp,ta,tm,solrad,...
    a,b,l,m,n,u,rmin,rhoa,ca,gam,c1,c2,c3,c4,c5,conco2,af)
vpp = vaporpres(tp);
avp = vaporpres(ta);
re=meanres(a,b,l,m,n,u,tp,ta);
ri=resint(rmin,solrad,tp,ta,tm,la,c1,c2,c3,c4,c5,conco2);
paphitrans = 2*la*rhoa*ca*(avp-vpp)/(gam*(re+af*ri));
end

```

%-----sous fonction-----

```

function RE=meanres(aa,ab,al,am,an,au,tp,ta)
RE=(aa*al^am)/((al*abs(tp-ta)+ab*au^2)^an);
end
function RI=resint(armin,ardsol,tp,avp,tm,la,c1,c2,c3,...
    c4,c5,conco2)
vpp = vaporpres(tp);
RI = armin*(c1 + ardsol/(2*la))/(c2 + ardsol/(2*la))*(c3*...
    (tp-tm)^2)*(c4*(conco2-200)^2)*(c5*(vpp-avp)^2);
end
function VP = vaporpres(z)%vapor pressure:antoine equation[Pa]
VP = (10^(8.07131-1730/(z-39.7540)))*4000/30;
end

```

```
function [x,y,z,w] =term1f(adeltat,adf,la,aLc,aLg,aLs,...
    arhop,acp,arhoa,aca,arhog,acg,arhos,acs)
%canopy
dt = adeltat;
x = adf*la*arhop*acp/dt;
    %df:average leaves thickness
%air
y = aLc*arhoa*aca/dt;
%ground
z = aLg*arhog*acg/dt;
%support
w = aLs*arhos*acs/dt;
end
function solr = radsolf(hss,azimss,azimtt,beta,dirh,difh)
tet = (cos(hss)*sin(beta)*cos(azimtt - azimss) + ...
    cos(beta)*sin(hss));
dir = dirh*(tet);
dif = ((1 + cos(beta))/2)*difh + 0.23*((1 - cos(beta))/2)*...
    (dirh*sin(hss) + difh);
solr = dir + dif;
end

function CA = captherm(CPA,CPV,avp,p)
fracmas = .622*avp/(p-.378*avp);
CA = CPA/(1 + fracmas) + fracmas*CPV/(1 + fracmas);
    %cpa:specific heat of dry air
    %cpv:specific heat of water vapour
    %tetaa: specific humidity
end
end
```

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. Stahghellini, Radiation absorbed by a tomato crop in a greenhouse, Institute of Agricultural Engineering(IMAG), Wageningen, Research Report 83-5, 1983
- [2] C. Stahghellini, Radiation absorbed by a tomato crop in a greenhouse, Institute of Agricultural Engineering (IMAG), Wageningen, Research Report 83-5, 1983
- [3] C. Stahghellini, Transpiration of greenhouse, Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, 1987
- [4] E.P. Del Barrio, Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, *Energy and Buildings* Vol.27(1998), pp.179-193
- [5] E.P. Del Barrio, Roof components models simplification via statistical linearization and model reduction techniques, *Energy and Buildings* Vol.29(1999), pp.259-281
- [6] H. Kasanga, M. Monsi, Jap. J. Bot. 14 (1954)
- [7] H.T. Rakotondramiarana, Etude théorique du séchage thermique et de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration – Mise au point des dispositifs pilotes de laboratoire pour la caractérisation expérimentale liée au séchage et à la méthanisation des boues, Ph.D., Université d'Antananarivo, 2004
- [8] J. Goudriaan, Crop micrometeorology : a simulation study, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 1977
- [9] M.W. Tschapek, El agua en el suelo, C.S.I.C. (1966), Manuales de ciencia actual, (Vol.2)
- [10] MATLAB, High-performance numeric computation and visualisation software, The Mathworks, inc.
- [11] P.V. Vershinin et al., Fundamentals of agrophysics, in : A.F. Ioffe, I.B. Revut (Eds.), Israel Program for Scientific Translations, 1966
- [12] <http://courseware.e-education.psu.edu/simsphere/workbook/index.html>, Juillet 2011
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Antoine_equation, 2011
- [14] <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.html>, Juillet 2011

Titre	:	MISE AU POINT D'UN CODE DE CALCUL POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES DIFFERENTES COMPOSANTES D'UNE TOITURE VEGETALISEE
Nombre de pages	:	67
Nombre de figures	:	22
Nombre de tableaux	:	2

Résumé

Une toiture végétalisée est une option pour l'amélioration du confort thermique d'un bâtiment. De ce type de système de toiture dérive des problèmes de choix pour les espèces de plante plus favorables au renforcement de ce confort. L'objectif de ce travail est la mise au point d'un code de calcul permettant l'étude théorique du comportement thermique de ce système vis-à-vis des sollicitations externes en zones tropicales humides et des influences d'un certain nombre de paramètres physiques liés à ce système. La canopée étant considérée comme couche mince, l'auteur s'est servi de la méthode d'analogie électrique pour établir un modèle mathématique associé au système étudié. Basé sur ce modèle, un code de calcul a été mis au point sous environnement Matlab. En observant les profils de températures des différentes composantes du toit, il découle des simulations numériques menées avec ce code que les paramètres caractéristiques de la plante influe sur le pouvoir rafraîchissant du système de toiture en période diurne et que les paramètres caractéristiques du support sur lequel repose le sol de la plantation affecte l'isolation thermique du bâtiment. Une grande inclinaison du toit vert s'avère également susceptible de refroidir la pièce sous la toiture. Ce code constitue, entre autres, un outil d'aide au choix des plantes à expérimenter sur le toit vert.

Mots-clés : Toiture végétalisée, confort thermique, thermique de l'habitat, modélisation, code de calcul, zone tropicale humide, énergie solaire.

Abstract

A green roof is an option for improving a building thermal comfort. This type of roof system involves choice difficulties for plant species that are more promising to establish that comfort. The objective of this work is to develop a computing code enabling to perform a theoretical survey of this system thermal behavior towards external pleas in wet tropical zones and vis-à-vis influences of certain number of physical parameters related to this system. Assuming that the canopy is a thin layer, the author used the electrical analogy method to form a mathematical model associated to the system under consideration. Based on this model, the author completed a Matlab computing code. By observing temperature profiles of various components of the green roof, it ensues from numerical simulations done with this code that the characteristic parameters of the plant influence the green roof cooling power in diurnal period while those of the support on which the plantation ground bases affect the building thermal insulation. A big slope of the green roof is having a noticeable propensity for cooling the room under the green roof. Among other uses, this code is tantamount to a tool for helping to choose the plants to be experimented on the green roof.

Keywords : Green roof, thermal comfort, building, modelling, computing code, wet tropical zone, solar energy.

Rapporteur :

RAKOTONDRAMARANA Hery Tiana
Maître de Conférences

Impétrant:

RAFIEFERANTSOA Mika Harisetry
Adresse : Lot IPJ 10 Ambonisoa Itaoso Antananarivo 102
Tél : +261341031705
e-mail : laskalam@yahoo.fr