



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO  
DOMAINES SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
MENTION PHYSIQUE ET APPLICATIONS

Laboratoire thermodynamique, thermique et combustion



Mémoire pour l'obtention du diplôme MASTER II

Parcours : ENERGETIQUE

Intitulé

**ÉTUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT  
THERMIQUE D'UNE CELLULE CUBIQUE À TOITURE  
VÉGÉTALISÉE DE CRESSON ARROSÉ D'EAUX USÉES**

Présenté le 5 septembre 2018 par :

ANDRIATSITOHAINA RABESAHALA Ives Abel Fetra

Devant la commission d'examen composée de :

<b>Président</b>	: Mme RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	Professeur Titulaire
<b>Rapporteur</b>	: M. RAKOTONDRAMIANANA Hery Tiana	Maître de conférences, HDR
<b>Examineur</b>	: M. RAMANANTSOA Ravo Parany	Maître de conférences







UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO  
DOMAINES SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
MENTION PHYSIQUE ET APPLICATIONS



Laboratoire thermodynamique, thermique et combustion



Mémoire pour l'obtention du diplôme MASTER II

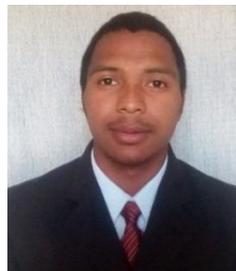
Parcours : ENERGETIQUE

Intitulé

**ÉTUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT  
THERMIQUE D'UNE CELLULE CUBIQUE À TOITURE  
VÉGÉTALISÉE DE CRESSON ARROSÉ D'EAUX USÉES**

Présenté le 5 septembre 2018 par :

ANDRIATSITOHAINA RABESAHALA Ives Abel Fetra



Devant la commission d'examen composée de :

<b>Président</b>	: Mme RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	Professeur Titulaire
<b>Rapporteur</b>	: M. RAKOTONDRAMIANANA Hery Tiana	Maître de conférences, HDR
<b>Examineur</b>	: M. RAMANANTSOA Ravo Parany	Maître de conférences



## REMERCIEMENTS

*Ce mémoire n'aurait pas été réalisé sans le soutien de certaines personnes.*

*Je tiens à remercier tout d'abord à Monsieur RAHERIMANDIMBY Marson, Professeur Titulaire à l'université d'Antananarivo et Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, qui nous a permis de présenter ce travail.*

*Je remercie Monsieur RAKOTOMAHEVITRA Andrianelison, Professeur à l'Université d'Antananarivo et Directeur de l'Institut pour la Maîtrise de l'Énergie d'avoir bien voulu m'intégrer dans son équipe.*

*Je remercie également Monsieur RAKOTOMALALA Minoson, Professeur Titulaire à l'université d'Antananarivo et responsable du parcours Énergétique. Il nous a donné beaucoup de conseil pour bien mener notre travail.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo, Professeur titulaire à l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.*

*Je tiens à présenter aussi mes sincères remerciements et ma reconnaissance à mon encadreur, Monsieur RAKOTONDRAMIARANA Hery Tiana, Maître de conférences HDR à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo et chef de la Mention Physique et Applications. Il m'a donné l'occasion d'étudier ce sujet de mémoire très intéressant avec beaucoup d'encouragement.*

*J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur RAMANANTSOA Ravo Parany, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, qui a bien accepté d'être l'examineur de ce travail.*

*Je remercie aussi à Monsieur RASAMOELINIRINA Heriniaina Huges Ange qui m'a donné un terrain pour que je puisse bâtir ma cellule cubique. Il m'a encore aidé à construire cette cellule. Ce n'est pas tout, il m'a donné l'occasion d'avoir accès de l'électricité afin d'alimenter tous les matériels utilisés. En fait, il était toujours avec moi durant expérimentation et sans lui la partie expérimentale de mon mémoire n'a été menée jusqu'au bout.*

*Enfin, j'exprime ma grande reconnaissance à toute ma famille et mes amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé pour ces longues années d'étude.*

## TABLE DES MATIERES

<b>NOMENCLATURE</b> .....	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>viii</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
I.1 Généralité .....	4
I.2 Etat de l'art sur l'étude expérimentale du comportement d'une toiture végétalisée.....	4
I.3 Avantages du toit vert .....	6
I.3.1 Rétention, réduction du ruissellement des eaux de pluies.....	6
I.3.2 Isolant phonique.....	6
I.3.3 Isolant thermique .....	6
I.3.4 Qualité de l'air urbain.....	7
I.3.5 Réduction des coûts de traitement des eaux usées.....	7
I.4 Choix de la végétation utilisée dans la présente étude .....	7
I.4.1 Caractéristiques scientifiques du cresson de fontaine.....	7
I.4.2 Avantages du cresson de fontaine .....	8
I.4.2.1 Vertu environnemental .....	8
I.4.2.2 Utilisation dans la médecine .....	8
I.5 Structure de la toiture végétalisée .....	9
I.5.1 Support .....	9
I.5.1.1 La structure.....	9
I.5.1.2 La couche d'étanchéité [27]: .....	10
I.5.1.3 La couche de filtration et de drainage.....	10
I.5.2 Sol de croissance de la plante (substrat) [18] .....	10
I.5.3 Couche de canopée ou couche végétale.....	10
I.6 Différents types du toit vert .....	11
I.6.1 Toiture végétalisée extensive.....	11
I.6.2 Toiture végétalisée semi-extensive .....	11
I.6.3 Toiture végétalisée intensive .....	12
I.7 Notion de transfert de chaleur par conduction [29] .....	13
II.1 Instrumentation.....	16
II.1.1 Mesure de l'éclairement .....	16
II.1.3 Mesure des températures .....	19
II.1.4 Stockage des données .....	22
II.2 Protocole expérimentale .....	22
II.3 Calibration de la sonde de température [32][33] .....	26

II.4 Traitement des données via de GPExp.....	28
II.4.1 Présentation de l'outil GPExp.....	28
II.4.2 Elimination des points singuliers.....	29
III.1 Cellule à toiture non végétalisée.....	31
III.2 Cellule à toiture végétalisée de cresson.....	33
III.3 Comparaison entre la cellule non végétalisée et la cellule végétalisée du cresson.....	36
III.4 Influence de l'effet des ouvertures appliquées à la porte .....	37
III.5 Calcul de la conductivité thermique de la couche de canopée constituée du cresson .....	43
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>46</b>
<b>WEBOGRAPHIES.....</b>	<b>49</b>

## NOMENCLATURE

### Alphabets latins

a	Ouverture 0,56% de la façade intérieure de la cellule	[%]
b	Ouverture 2,42% de la façade intérieure de la cellule	[%]
c	Ouverture 4,41% de la façade intérieure de la cellule	[%]
d	Ouverture 6,47% de la façade intérieure de la cellule	[%]
e	Épaisseur du milieu	[m]
$e_{canopée}$	Épaisseur moyenne de la canopée formée par le cresson	[m]
$E_{sol}$	Irradiation solaire arrivant sur la surface	[W.m <sup>-2</sup> ]
$h_r$	Humidité relative	[%]
$R_{th}$	Résistance thermique du milieu	[°C.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> ]
S	Sensibilité du Pyranomètre	[μV/W.m <sup>-2</sup> ]
$S_m$	Surface du milieu	[m <sup>2</sup> ]
$S_{canopée}$	Surface de la canopée constituée par le cresson	[m <sup>2</sup> ]
t	Temps	[h]
T	Température du milieu	[°C]
$T_{a\ ext}$	Température ambiante à l'extérieur de la cellule non végétalisée	[°C]
$T_{a\ ext\ max\ vo}$	Température ambiante extérieure maximale correspondant à des ouvertures appliquées à la porte	[°C]
$T_{a\ ext\ min\ vo}$	Température ambiante extérieure minimale correspondant à des ouvertures appliquées à la porte	[°C]
$T_{a\ ext\ v}$	Température ambiante à l'extérieur de la cellule végétalisée de cresson	[°C]
$T_{a\ ext\ vo}$	Température ambiante extérieure correspondant à des ouvertures appliquées à la porte	[°C]
$T_{a\ int}$	Température ambiante à l'intérieure de la cellule non végétalisée	[°C]
$T_{a\ int\ max}$	Température ambiante maximale à l'intérieure de la cellule non végétalisée	[°C]
$T_{a\ int\ min}$	Température ambiante minimale à l'intérieure de la cellule non végétalisée	[°C]
$T_{a\ int\ max\ vo}$	Température ambiante maximale intérieure correspondant à des ouvertures appliquées à la porte	[°C]

$T_{a \text{ int min vo}}$	Température ambiante minimale intérieure correspondant à des ouvertures appliquées à la porte	[°C]
$T_{a \text{ int v}}$	Température ambiante à l'intérieure de la cellule végétalisée de cresson	[°C]
$T_{a \text{ int v max}}$	Température ambiante maximale à l'intérieure de la cellule végétalisée de cresson	[°C]
$T_{a \text{ int v min}}$	Température ambiante minimale à l'intérieure de la cellule végétalisée de cresson	[°C]
$T_{\text{feuille}}$	Température sur les feuilles du cresson	[°C]
$T_{\text{plafond}}$	Température sur le plafond	[°C]
$T_r$	Température après calibration	[°C]
$T_{\text{sol}}$	Température du sol intérieur	[°C]
$T_{\text{sup sol}}$	Température sur le sol végétal	[°C]
$T_{\text{sup support}}$	Température supérieure du support de la végétation	[°C]
$T_{\text{toit}}$	Température sur la surface extérieure du toit habituel	[°C]
$\langle T_{\text{feuille}} - T_{\text{sup sol}} \rangle$	Température moyenne entre la température sur la feuille du cresson et la température sur le sol végétal.	[°C]
$T_0$	Température théorique correspondant à la glace fondante	[°C]
$T_{100}$	Température théorique correspondant à l'eau bouillante	[°C]
$U_{\text{sor}}$	Tension de sortie	[μV]
v.m	Valeur moyenne	[]

### Alphabets grecs

$\Delta T$	Différence de température entre deux points du milieu	[°C]
$\overrightarrow{\text{grad}}(T)$	Gradient de température	[]
$\lambda$	Conductivité thermique du milieu	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\langle \lambda_{\text{canopée}} \rangle$	Conductivité thermique apparente moyenne de la couche de canopée formée par le cresson	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\varphi$	Densité de flux de chaleur	[W.m <sup>-2</sup> ]
$\vec{\varphi}$	Vecteur densité de flux thermique	[]
$\phi$	Flux de chaleur par conduction correspondant à la cellule à toit habituel	[W]

$\langle \Phi_{calculé} \rangle$	Flux de chaleur par conduction moyenne traversant la couche de de canopée formée par le cresson	[W]
$\Phi_{cond}$	Flux de chaleur par conduction traversant la surface du milieu	[W]
$\phi_{max}$	Flux de chaleur par conduction maximal correspondant à la cellule à toiture habituelle	[W]
$\phi_{min}$	Flux de chaleur par conduction minimal correspondant à la cellule à toiture habituelle	[W]
$\phi_v$	Flux de chaleur par conduction correspondant à la cellule à toiture végétalisée	[W]
$\phi_{v max}$	Flux de chaleur par conduction maximal correspondant à la cellule à toiture végétalisée	[W]
$\phi_{v min}$	Flux de chaleur par conduction minimal correspondant à la cellule à toiture végétalisée	[W]
$\phi_{vo max}$	Flux de chaleur par conduction maximal correspondant aux ouvertures appliquées à la porte	[W]
$\phi_{vo min}$	Flux de chaleur par conduction minimal correspondant aux ouvertures appliquées à la porte	[W]
$\theta$	Température avant calibration	[°C]
$\theta_0$	Température expérimentale correspondant à la glace fondante	[°C]
$\theta_{100}$	Température expérimentale correspondant à l'eau bouillante	[°C]

## Liste des figures

<b>Figure I.1 : Cresson de fontaine [34]</b> .....	<b>8</b>
<b>Figure I.2 : Coupe descriptif du toit vert [25]</b> .....	<b>9</b>
<b>Figure I.3 : Photo d'une toiture verte extensive [28]</b> .....	<b>11</b>
<b>Figure I.4 : Photo d'une toiture verte semi-intensive [28]</b> .....	<b>12</b>
<b>Figure I.5 : Photo d'une toiture verte intensive [28]</b> .....	<b>12</b>
<b>Figure II.1 : Photo Pyranomètre SP-Lite</b> .....	<b>16</b>
<b>Figure II.2 : Photo de périphérique NI USB-6008</b> .....	<b>17</b>
<b>Figure II.3 : Brochage du périphérique NI USB-6008</b> .....	<b>18</b>
<b>Figure II.4 : Testo 410-2</b> .....	<b>19</b>
<b>Figure II.5 : Photo de sonde de température DS18B20 [35]</b> .....	<b>20</b>
<b>Figure II.6 : Photo de la carte arduino Uno [30]</b> .....	<b>20</b>
<b>Figure II.7 : Montage de la sonde de température DS18B20</b> .....	<b>21</b>
<b>Figure II.8 : Photo de la plaque d'essai</b> .....	<b>21</b>
<b>Figure II.9 : Fils mâle-mâle</b> .....	<b>21</b>
<b>Figure II.10 : Photo de la cellule cubique</b> .....	<b>22</b>
<b>Figure II.11 : Photo représentative de la cellule cubique avec tous les appareils de mesure</b> .....	<b>24</b>
<b>Figure II.12 : Photo de la cellule cubique de toiture végétalisée de cresson</b> .....	<b>25</b>
<b>Figure II.13 : Photos représentatives des différentes ouvertures appliquées à la porte</b> .....	<b>26</b>
<b>Figure II.14 : Equation de droite de la calibration de la sonde DS18B20</b> .....	<b>27</b>
<b>Figure II.15 : Interface de GPEXP</b> .....	<b>28</b>
<b>Figure III.1 : Schéma représentatif des variations des températures <math>T_{a\ ext}</math>, <math>T_{toit}</math>, <math>T_{plafond}</math>, <math>T_{a\ int}</math>, <math>T_{sol}</math> durant trois jours successifs du 21 février à 12h jusqu'à 24 février 2018 à 12h</b> .....	<b>31</b>
<b>Figure III.2 : Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation du flux de chaleur par conduction et de la variation de l'irradiation solaire avec le temps pour la cellule cubique normal</b> .....	<b>32</b>
<b>Figure III.3 : Variation de l'humidité relative pour la cellule non végétalisée</b> .....	<b>33</b>
<b>Figure III.4 : Schéma représentatif des variations des températures <math>T_{a\ ext\ v}</math>, <math>T_{feuille}</math>, <math>T_{supsol}</math>, <math>T_{supsupport}</math>, <math>T_{plafond}</math>, <math>T_{a\ int\ v}</math>, <math>T_{sol}</math> durant trois jours successifs du 27 février à 11h jusqu'à 2 mars 2018 à 12h</b> .....	<b>34</b>
<b>Figure III.5 : Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation du flux de chaleur par conduction et de la variation de l'irradiation solaire avec le temps pour la cellule cubique végétalisée.</b> .....	<b>35</b>
<b>Figure III.6 : Variation de l'humidité relative pour la cellule à toiture végétalisée</b> .....	<b>36</b>
<b>Figure III.7 : Schéma représentatif des variations des températures <math>T_{a\ ext\ v}</math>, <math>T_{feuille}</math>, <math>T_{supsol}</math>, <math>T_{supsupport}</math>, <math>T_{plafond}</math>, <math>T_{a\ int\ v}</math>, <math>T_{sol}</math> à la date du 28 février 2018 de 08h à 16h</b> .....	<b>37</b>
<b>Figure III.8 : Schéma représentatif des variations des températures <math>T_{a\ ext\ v}</math>, <math>T_{feuille}</math>, <math>T_{supsol}</math>, <math>T_{supsupport}</math>, <math>T_{plafond}</math>, <math>T_{a\ int\ v}</math>, <math>T_{sol}</math> à la date du 14 mars 2018 de 08h à 16h</b> .....	<b>38</b>

<b>Figure III.9 : Schéma représentatif des variations des températures <math>T_{a\ ext\ vo}</math>, <math>T_{feuille}</math>, <math>T_{supsol}</math>, <math>T_{supsupport}</math>, <math>T_{plafond}</math>, <math>T_{a\ int\ vo}</math>, <math>T_{sol}</math> à la date du 15 mars 2018 de 08h à 16h.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure III.10 : Schéma représentatif des variations des températures <math>T_{a\ ext\ vo}</math>, <math>T_{feuille}</math>, <math>T_{supsol}</math>, <math>T_{supsupport}</math>, <math>T_{plafond}</math>, <math>T_{a\ int\ vo}</math>, <math>T_{sol}</math> à la date du 16 mars 2018 de 08h à 16h.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III.11 : Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 0,56% de la façade intérieure.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III.12 : Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 2,42% de la façade intérieure.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III.13 : Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 4,41% de la façade intérieure.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure III.14 : Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 6,47% de la façade intérieure.....</b>	<b>41</b>

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau 1 : Caractéristiques de Pyranomère SP-Lite .....</b>	<b>17</b>
<b>Pour l'obtention des données expérimentales, seules les entrées analogiques du périphérique NI USB-6008 sont utilisées. ....</b>	<b>18</b>
<b>Tableau 2 : Raccordement du SP-Lite .....</b>	<b>18</b>
<b>Tableau 3 : Caractéristique du Testo 410-2 .....</b>	<b>19</b>
<b>Tableau 4 : Dimension de la cellule cubique .....</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 5 : Caractéristiques thermiques des matériaux utilisés [31].....</b>	<b>23</b>
<b>Tableau 6: Dimension des ouvertures .....</b>	<b>26</b>
<b>Tableau 7 : Valeurs extrêmes des températures ambiantes intérieures, de flux de chaleur par conduction de la cellule non végétalisée et de la cellule végétalisée du cresson .....</b>	<b>36</b>
<b>Tableau 8 : Valeurs extrêmes des températures ambiantes intérieures et extérieures, de l'irradiation solaire et du flux conductif selon les ouvertures appliquées à la porte de la cellule cubique .....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau 9 : Valeurs calculées pour les caractéristiques thermiques de la couche de canopée.....</b>	<b>43</b>

## **INTRODUCTION**

Le confort thermique permet la stabilisation de la chaleur dans une maison d'habitation et répond au besoin des corps humains vis-à-vis de son environnement thermique [1]. Il est donc très important de faire l'étude de ce confort pour mieux assurer la bonne ambiance intérieure ainsi que la qualité d'énergie qu'on doit fournir par les équipements d'ambiance [2]. De ce fait, les trois modes de transferts de chaleur (conduction, convection et rayonnement) sont les phénomènes mis en jeu en prenant en compte l'influence des paramètres température, humidité, irradiation solaire. L'ajustement de ces paramètres s'obtient par utilisation des systèmes de chauffages, par isolation thermique en se basant sur les matériaux composites, par amélioration des performances des systèmes d'aération (fenêtre, porte, ...) ainsi que l'orientation du bâtiment par rapport à la direction du vent.

Dans cette quête, des toitures végétalisées ont été développées au niveau des bâtiments. Cette technique consiste à planter des végétations sur le toit. Par ailleurs, le toit vert comprend la conservation d'énergie à travers l'isolement des bâtiments ainsi amélioré et réduit la consommation abondante de l'énergie [3][4].

Dans ce mémoire, le principal objectif est d'étudier le comportement thermique d'une cellule cubique à toiture végétalisée en cresson de fontaine arrosé d'eau usée en faisant les mesures des paramètres températures des composants de cette cellule, humidité relative à l'intérieure de cette pièce et l'irradiation solaire. Cette expérimentation a été faite à Avaratra Ankatso, Antananarivo Madagascar.

Le premier chapitre sera consacré à la généralité sur la toiture végétalisée. Il est constitué de l'état de l'art sur l'étude expérimentale du comportement d'une toiture végétalisée, des avantages du toit vert, du choix de la végétation utilisée dans cette étude, de la structure de toiture végétalisée et des différents types du toit vert.

Les matériels et méthodes seront présentés dans le deuxième chapitre. Il y est abordé les instrumentations et les protocoles expérimentaux. En outre, la méthode de calibration des sondes de températures et traitement des données via le logiciel GPExp seront développés.

Le troisième chapitre sera consacré aux résultats obtenus suivis des discussions. Il représente successivement les comportements thermiques de la cellule non végétalisée pendant la période du 21 février à 12 heures jusqu'à 24 février à 12 heures, de la cellule végétalisée en cresson durant la période du 27 février à 11 heures jusqu'à 2 mars à 12 heures. Par ailleurs, la

comparaison entre la cellule non végétalisée et la cellule végétalisée en cresson sera analysée. En outre, nous discutons l'étude de l'effet des ouvertures appliquées à la porte de la cellule cubique à toiture végétalisée en cresson, réalisée dans trois journées successifs pendant la date du 14, 15, 16 mars 2018 de 8 heures à 16 heures. Enfin, nous énonçons le calcul de la conductivité thermique de la canopée par utilisation de la loi de Fourier sur le transfert de chaleur par conduction.

## *Chapitre I*

# **GENERALITE SUR LA TOITURE VEGETALISEE**

## **I.1 Généralité**

Dans les dernières décennies, les espaces occupés par des plantes vertes ont été diminués à cause des divers facteurs comme la construction des bâtiments, la réalisation des projets de construction de route. Cela produit directement des effets nocifs envers l'environnement humain. Le changement de la température atmosphérique devient instable, la qualité d'air demeure impure non seulement dans les villes mais dans les zones rurales par l'action des agents polluants [5]. Face à ces énormes problèmes, l'homme a cherché d'autre espace afin de pouvoir planter des plantes vertes. Ainsi, il a trouvé une solution qui consiste à planter des végétales sur le toit du bâtiment. La toiture végétalisée est une technologie durable pour l'amélioration de l'environnement thermique à l'intérieur du bâtiment, l'épuration de l'eau usée et de l'air ambiante. De plus, elle permet d'éviter le gaspillage de l'énergie, en d'autre terme, elle réduit la consommation abusive de l'énergie. Elle permet aussi d'assurer la bonne condition climatique de l'environnement extérieur d'une maison d'habitation. Par rapport aux autres toits, le toit vert fournit autant d'avantages aux êtres vivants qu'à l'environnement qui les entourent. Il améliore la gestion de l'eau et aussi réduit la pollution de l'air et le bruit. Il réduit encore l'expansion de dioxyde de carbone dans l'atmosphère [6][7].

## **I.2 Etat de l'art sur l'étude expérimentale du comportement d'une toiture végétalisée**

De nombreuses études expérimentales sur les comportements thermiques d'une toiture végétalisée ont été menées par plusieurs chercheurs.

Har'el et al. [8] ont mené la Comparaison entre l'eau grise et l'eau du robinet et les cendres de charbon par rapport à la perlite sur la croissance de deux espèces végétales sur les toits verts. Ils ont utilisé les végétations portant les noms scientifiques *convulvulus mauritanicus*, *phyla nodiflora*. Le développement de ces plantes, la qualité de l'eau de drainage, la conductivité électrique et la qualité du substrat ont été mesurés.

Une étude expérimentale et analytique de potentiel des toits verts pour la régulation du microclimat urbain Climats méditerranéen-continentale a été effectuée par Susana et al. [9]. Ils ont choisi les espèces de plantes herbes, arbres et luzernes. Cette étude a été divisée en deux phases : la première, étude théorique d'un modèle de toit vert ; la deuxième, étude d'un véritable bâtiment avec un grand toit vert. Les variables mesurées étaient les flux radiatifs d'ondes, les flux de chaleur latente et les températures de la surface, de la paroi et de la base du mur.

Une étude expérimentale des performances thermiques d'un toit vert extensif dans la région méditerranéenne ont été élaborée par Piero et al. [10]. Ils ont planté sur son toit les genres de plante dianthus grantianopolitanus, carpobrotus edulis et cerastium tomentosum. Ils ont utilisé une station météorologique pour mesurer la température de l'air ambiante, l'humidité relative, la vitesse et direction du vent, les précipitations, la pression atmosphérique, la radiation solaire et le rayonnement infrarouge thermique du ciel.

Pour les observations expérimentales et de surveillance de la quantité d'eau et la qualité de la réponse d'un toit vert aux tempêtes, Corey et al. [11] ont mis sur la couche supérieure du toit vert extensif six types de sedum natif (Sedum reflux, Sedum sexangulare, Sedum acre, Sedum kamschaticum, Sedum spurium "Fuldaglut", et Album de Sedum). La quantité de précipitations, le ruissellement des eaux pluviales, les concentrations de carbone organique dissous, les concentrations en azote total et en phosphore ont été déterminés.

Chagolla et al. [12] ont mené une étude sur l'effet de l'irrigation sur la performance thermique expérimentale d'un toit vert dans un climat semi-chaud au Mexique. Ils ont choisi cinq types de plantes de la famille Crassulaceae : Sedum Adol-phi, Echeveria Prolifica, Aeonium Subplanum, Crassula Ovata et Sedum Makinoi. Une station météorologique située sur le site d'expérimentation sert à mesurer la température, l'humidité, la vitesse du vent, la précipitation, le flux thermique et le volume d'eau.

D. Chemisana et Chr. Lamnatou [13] ont sélectionné deux espèces de plantes méditerranéennes : Gazania rigens Compositae (Astera-ceae) et Sedum clavatum Crassulaceae pour le développement de leurs systèmes expérimentaux, toitures photovoltaïques-vertes, à l'Université de Lleida, en Espagne. Les trois paramètres températures, irradiation effective, la vitesse du vent ont été mesurés pour effectuer cette étude.

Vila et al. ont fait [14] une étude expérimentale de deux toitures végétalisées en Mesem Pendulina (Lampranthus spectabilis) et en romarin (Rosmarinus officinalis). Les valeurs de la conductivité hydraulique, du taux d'infiltration et du cumulatif infiltration ont été déterminées. De plus, ils ont mesuré la température du plateau de toit vert sec, la température du bac de toiture vert humide (après irrigation), la rétention d'eau, la capacité du système et le développement des plantes.

Morau et al. [15] ont étudié l'évaluation pour la première fois la performance d'un vaste toit vert à La Réunion (océan Indien) influencé par un climat tropical humide. La performance du toit vert a été explorée en évaluant son effet sur les fluctuations de température et les flux de chaleur pendant la saison estivale. Ils ont utilisé la plante sedum pour sa toiture. Les résultats

ont montré que la présence de plantes entraînait une diminution de la température sous le toit vert. Les plantes ont également contribué à échange de flux de chaleur inférieur à travers le toit vert.

D'après nos connaissances, aucun travail n'a été fait sur la toiture végétalisée en cresson portant le nom scientifique « *Nasturtium Officinale* ». Ainsi, notre travail porte sur l'analyse du comportement thermique d'une cellule cubique à toiture végétalisée en cresson de fontaine arrosé d'eau usée.

### **I.3 Avantages du toit vert**

#### ***I.3.1 Rétention, réduction du ruissellement des eaux de pluies***

La rétention des eaux de pluie par un toit végétalisé varie énormément en fonction des conditions climatiques saisonnières locales, de la nature du substrat, de celle de la toiture, et du type de végétation plantée [16]. Une fois l'eau stockée, elle est pour une part utilisée par les plantes, pour une autre libérée par évapotranspiration. Le restant sera évacué graduellement par les canalisations, limitant ainsi les forts débits d'eaux pluviales tels que ceux engendrés par les pluies d'orage et le risque de saturation des réseaux d'assainissement. Le toit vert provoque ainsi un retard d'écoulement de 50 à 75% lors de pluies d'orages [17]. Il diminue la quantité totale d'eau pluviale rejetée et réduit en même temps le débit de pointe des averses. Cela se fait par l'action du substrat qui retient et filtre une certaine quantité d'eau. La capacité de rétention des eaux pluviales des toitures végétalisées fait de cette technique une méthode alternative de récupération des eaux de pluies pour un usage domestique.

#### ***I.3.2 Isolant phonique***

Il existe diverses solutions techniques pour permettre d'atténuer le bruit dans les habitations exposées, la végétalisation des toitures en est une. Elle permet en effet de diviser au moins par deux les nuisances sonores urbaines et aériennes. La barrière antibruit fonctionne tant grâce aux plantes qui absorbent les hautes fréquences qu'au sol qui absorbe les basses fréquences. Un substrat de 12 cm d'épaisseur peut réduire les bruits de 40 dB à 50 dB [17].

#### ***I.3.3 Isolant thermique***

La toiture végétalisée est aussi reconnue pour sa capacité d'isolant thermique, en particulier en cas de fortes chaleurs. En effet, alors qu'un toit en béton peut atteindre 60°C à 70°C, la toiture végétalisée ne dépasse pas 15°C à 20°C. Or, la température de la toiture influe

sur la température intérieure d'un logement et donc sur les éventuels besoins en climatisation [17].

En outre, la réduction des pics de température dans la membrane d'étanchéité est de l'ordre de 30°C par rapport à une toiture nue pouvant atteindre 70°C et de 20°C par rapport à une toiture couverte de gravier. La température moyenne des membranes d'étanchéité est ainsi réduite de 8°C par rapport à une toiture nue et de 4°C par rapport à une toiture en gravier. Il y aurait un décalage de 2h à 3h entre les pics de température extérieure et intérieure [16]. Le substrat aide à garder la chaleur en hiver et la fraîcheur en été. Alors, la toiture végétalisée diminue les besoins de climatisation des bâtiments et contribue ainsi aux économies d'énergie.

#### ***1.3.4 Qualité de l'air urbain***

Les effets positifs de la végétation sur la qualité de l'air en milieu urbain sont connus, à travers le processus de la photosynthèse, elle fixe le carbone et le CO<sub>2</sub> et produit de l'oxygène [17]. La toiture verte va aussi fixer les poussières et certains polluants urbains, donc elle améliore la qualité de l'air ambiant [18].

#### ***1.3.5 Réduction des coûts de traitement des eaux usées***

Le toit vert permet à l'épuration des eaux usées par l'action du substrat [19]. Ce dernier retient et filtre les produits polluants dans ceux-ci pendant l'écoulement. Les eaux ainsi filtrées et épurées sont donc réutilisables.

### **I.4 Choix de la végétation utilisée dans la présente étude**

Dans la présente étude, nous avons choisi le cresson de fontaine comme végétale de notre toiture. Il a ses caractéristiques et ses avantages spécifiques comme tous les autres plantes.

#### ***1.4.1 Caractéristiques scientifiques du cresson de fontaine***

*Nom commun* : cresson de fontaine ou cresson d'eau

*Nom scientifique* : Nasturtium officinal

*Famille* : Brassicacée (crucifère)

Les écrivains de la Rome antique faisaient déjà l'éloge du cresson de fontaine qui était considéré comme une précieuse plante condimentaire et médicinale efficace contre de nombreuses maladies. Son nom générique Nasturtium, du latin nasus tortus « nez tordu », fait allusion à la saveur piquante du cresson, comme on peut le lire dans des écrits anciens [20].

Il y en a plusieurs types de cresson mais nous parlerons ici le cresson de fontaine qui est une plante vivace cultivée dans le sol mouillé du courant d'eau [20]. Il est aussi une plante herbacée à croissance rapide, à saveur piquante, à souche rampante, à tige de 10-50 cm, radicante à la base, ascendante, épaisse, creuse, rameuse [21]. Selon ses propriétés, il a besoin d'eau courante à débit lent pour pousser vigoureusement et produire des rendements élevés de pousses tendres et douces. Lorsqu'il n'y a plus d'eau courante, les plantes deviennent amères et impropres à la consommation.



**Figure I.1** : Cresson de fontaine [34]

#### ***1.4.2 Avantages du cresson de fontaine***

##### *1.4.2.1 Vertu environnemental*

La culture du cresson de fontaine contribue à l'épuration des eaux usées par filtration. Il retient, avec la boue, les éléments organiques et chimiques portés par le courant d'eau [22]. L'eau ainsi épurée est réutilisable pour l'arrosage des autres plantes qui ne poussent qu'avec de l'eau claire [23].

##### *1.4.2.2 Utilisation dans la médecine*

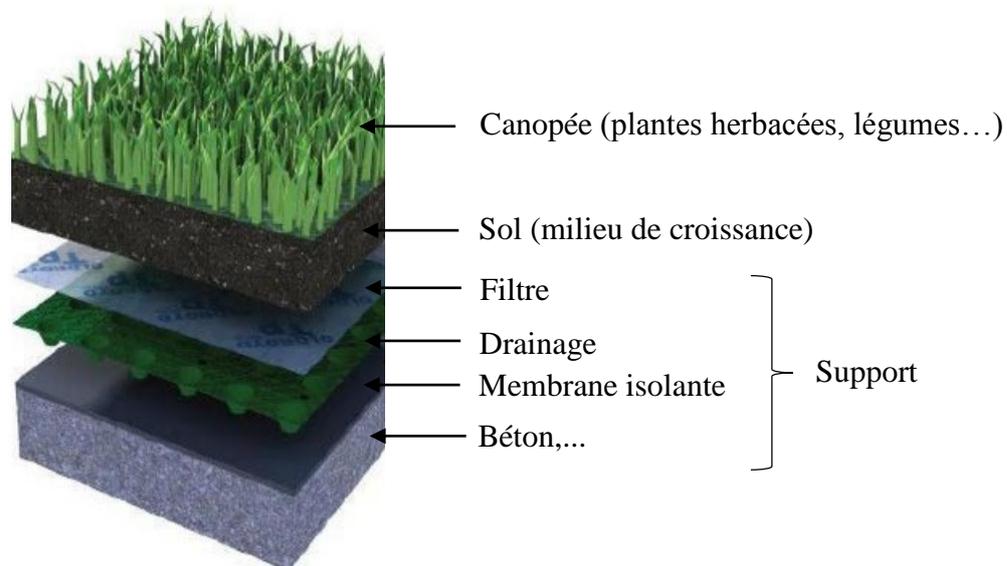
Le cresson de fontaine a une action désintoxicante, diurétique, mais aussi digestive et expectorante. Il a de ce fait un domaine d'applications relativement vaste : catarrhe, toux grasse, bronchite, mais aussi anémie, rhumatismes et troubles biliaires [20].

Les antioxydants du cresson préviendraient l'apparition de certains cancers et auraient des effets bénéfiques sur la santé de l'œil. Le cresson serait aussi efficace contre les maladies cardiovasculaires [24].

Le cresson contient une quantité élevée de vitamine K, nécessaire entre autres à la coagulation du sang. Les graines de cresson renferment également plusieurs minéraux comme le potassium, le calcium le phosphore et le fer [24].

## I.5 Structure de la toiture végétalisée

Les divers éléments constituant du toit vert sont généralement les suivants : une couche de canopée, du sol de croissance des plantes, et du support soutenant la totalité des plantes et du sol végétal. La structure du toit vert est toujours la même quel que soit le type mais la seule différence est l'épaisseur des couches. La *figure I.2* montre la description et la disposition des couches du toit vert.



*Figure I.2 : Coupe descriptif du toit vert [25]*

### I.5.1 Support

Il est constitué par la structure, la couche d'étanchéité, et éventuellement la couche de filtration et de drainage.

#### I.5.1.1 La structure

Elle peut être construite en béton armée, en acier, ou en bois selon le choix du constructeur à condition qu'elle doive supporter la totalité des poids de la canopée et du sol et les autres agents qui peuvent alourdir les charges comme la pluie, l'augmentation de pression extérieure par le soufflement du vent [26][27].

### *1.5.1.2 La couche d'étanchéité [27]:*

Il existe plusieurs types comme les bâches spéciales en plastique ou des éléments étanches non métalliques. Elle est très utile pour éviter la propagation énorme de l'humidité vers l'intérieur. De plus, le complexe isolant doit être résistant à la déformation apparue au niveau du sol végétal causée par exemple par l'écoulement d'eau dans le sol, par l'allongement des racines du végétal.

### *1.5.1.3 La couche de filtration et de drainage*

Cette couche dépend particulièrement de l'épaisseur et de la nature du substrat. Constituée d'agrégats 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 [25]. 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 cette étude, on a utilisé tout simplement un béton armé étanche comme support. D'ailleurs, ces différents constituants les différents constituants du support sont groupés en une couche, supposée compacte et homogène ayant des propriétés thermophysiques constantes.

### *1.5.2 Sol de croissance de la plante (substrat) [18]*

Le substrat est le support de culture qui doit permettre aux plantes de s'enraciner, de se nourrir, de s'abreuver et de respirer. Il abrite de nombreux micro-organismes et constitue un écosystème propre. Sa composition est généralement un mélange de terre et/ou de compost végétal de feuilles ou d'écorces mélangées à des agrégats de pierres légères et absorbantes.

### *1.5.3 Couche de canopée ou 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.6 Différents types du toit vert

Généralement, il y en a trois différents types du toit vert selon les variétés des plantes existantes. Il y a donc [18][19][28]:

- La toiture végétalisée extensive
- La toiture végétalisée semi-extensive
- La toiture végétalisée intensive

### I.6.1 Toiture végétalisée extensive

Il s'agit d'une toiture sur laquelle le substrat est de faible épaisseur (de 2cm à 15 cm environ) et ayant une végétation basse qui demande peu d'entretien. Grâce à son faible poids (de 40 kg/m<sup>2</sup> à 150 kg/m<sup>2</sup>), elle peut être installée sur un bâtiment existant [18].

Les genres de plantes admises peuvent être des :

- plantes succulentes (type sedum)
- plantes vivaces (type œillet)
- plantes bulbeuses (type iris)
- graminées vivaces (type fétuque)
- plantes ligneuses à petit développement peuvent être adjointes selon l'effet désiré et le programme d'entretien accepté par le maître d'ouvrage [28].



*Figure I.3 : Photo d'une toiture verte extensive [28]*

### I.6.2 Toiture végétalisée semi-extensive

Ce genre de toiture diffère de toit vert intensive par leur épaisseur de substrat inférieur à 30cm (et donc aussi par leurs charges) excluant la plantation d'arbustes au système racinaire important. On peut y installer des sedums, des bulbes, des graminées et des couvre-sols. Les végétaux utilisés sont moins volumineux et demandent moins d'entretien. Les végétaux sont du

gazon, des herbacées (Sedums, vivaces, graminées), arbrisseaux, des arbustes et plantes basses mais pas d'arbres ni de grands arbustes [18].



**Figure I.4 :** Photo d'une toiture verte semi-intensive [28]

### ***1.6.3 Toiture végétalisée intensive***

Une toiture verte intensive ou encore toiture jardin est en fait un jardin de toiture, ou une terrasse comparable à un jardin ordinaire des points de vue de son aspect et de son usage. La végétation y a un enracinement plutôt profond et est composée de plantes fleurissantes ou d'herbes, de buissons et même parfois d'arbustes. On peut s'y promener et y poser des tables. Cette toiture demande un entretien relativement intensif (d'où le nom « toiture verte intensive ») selon le type de végétation, il faudra tailler, tondre ou désherber. Elle comporte des épaisseurs de substrat de plus de 30 cm et l'installation possible de nombreuses espèces vivaces, voire de quelques arbustes bas. La structure porteuse doit être prévue pour supporter le surpoids du substrat et de la végétation, y compris lorsqu'ils sont gorgés d'eau [28].



**Figure I.5 :** Photo d'une toiture verte intensive [28]

## I.7 Notion de transfert de chaleur par conduction [29]

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie du transfert de chaleur par conduction repose sur la loi de Fourier qui dit que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T) \quad (1)$$

$\lambda$  : conductivité thermique du milieu

$\vec{\varphi}$  : vecteur densité de flux thermique

T : température du milieu

$\overrightarrow{grad}(T)$  : gradient de température T

Dans cette relation, le signe – permet de compter positivement la quantité de chaleur qui s'écoule des régions les plus chaudes vers les régions les plus froides. En effet, le gradient de température est dirigé vers les températures croissantes. Or, la chaleur se propage des régions les plus chaudes vers les régions les plus froides.

Le flux de chaleur s'écrit tout simplement :

$$\Phi_{cond} = \|\vec{\varphi}\| \cdot S_m \quad (2)$$

$S_m$  : surface du milieu

$\Phi_{cond}$  : flux de chaleur par conduction traversant la surface du milieu qui s'exprime en Watt (W)

$\varphi$  : densité de flux de chaleur s'exprimant en (W.m<sup>-2</sup>)

De manière plus explicite,

$$\Phi_{cond} = \frac{\lambda \cdot S_m}{e} \Delta T \quad (3)$$

$$\Phi_{cond} = \frac{\Delta T}{\frac{e}{\lambda \cdot S_m}} \quad (4)$$

Où,

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S_m} \quad (5)$$

$e$  : épaisseur du milieu en mètre (m)

$\Delta T$  : différence de température entre deux points du milieu en (°C)

$R_{th}$  : Résistance thermique du milieu en (°C.m<sup>2</sup>.W<sup>-1</sup>)

Dans ce présent mémoire, on utilise cette dernière expression de flux de chaleur. Elle permet de déterminer par calcul la conductivité thermique moyenne  $\langle \lambda_{canopé} \rangle$  de la couche de canopée de notre cellule cubique c'est-à-dire la couche constituée par le cresson.

*Chapitre II*  
**MATERIELS ET METHODES**

## II.1 Instrumentation

Tous les appareils de mesure et les autres outils utilisés durant l'expérimentation sont représentés distinctement dans cette paragraphe.

### II.1.1 Mesure de l'éclairement

L'irradiation solaire globale arrivée aux alentours de la cellule cubique a été mesurée par un pyromètre SP-Lite (Silicon Pyranometer) de Kypp & Zonen relié, par l'intermédiaire d'un câble USB 2.0 A vers B pour l'imprimante, à un périphérique USB-6008 de National Instrument. La *figure II.1* représente la photo du pyranomètre SP-Lite.



*Figure II.1 : Photo Pyranomètre SP-Lite*

Ce Pyranomètre ne donne pas directement l'irradiation solaire mais plutôt des valeurs de tensions électriques. Alors, pour le calcul de l'irradiation globale, il faut appliquer cette relation (6) :

$$E_{\text{sol}} = \frac{U_{\text{sor}}}{S} \quad (6)$$

$E_{\text{sol}}$  : Irradiation solaire arrivant sur la surface [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$U_{\text{sor}}$  : Tension de sortie [ $\mu\text{V}$ ]

$S$  : Sensibilité du Pyranomètre [ $\mu\text{V/W.m}^{-2}$ ]

Les principales caractéristiques du Pyranomètre SP-Lite tiré dans sa fiche technique sont résumées dans le **tableau 1**.

**Tableau 1 : Caractéristiques de Pyranomètre SP-Lite**

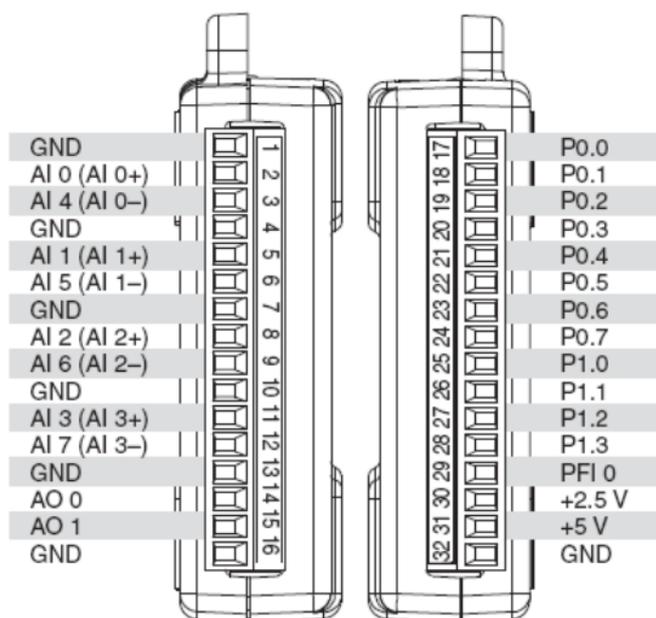
Temps de réponse (95%)	< 1 s
Non-stabilité (Changement/an)	< 2 %
Non-linéarité (0 à 1000 W/m <sup>2</sup> )	< 1 %
Erreur directionnelle (0° à 80°C)	< 5 %
Influence de la température (-30 °C à 70°C)	± 0,15 % /°C
Sensibilité	73 µV/W.m <sup>-2</sup>
Température de service	-40 à 80°C
Gamme spectrale	400 à 1100 nm
Signal de sortie typique pour une application atmosphérique	0 à 100 mV
Rayonnement maximum	2000 W.m <sup>-2</sup>
Détecteur	Photodiode silicium

Le périphérique NI USB-6008 est un bloc de raccordement qui possède huit voies d'entrée analogique (AI) asymétrique, deux voies de sortie analogique (AO), de douze voies d'entrée/sortie numérique, un compteur de 32 bits et une interface USB pleine vitesse.

Les deux **figure II.2** et **figure II.3** montrent successivement la photo du périphérique NI USB-6008 et ses brochages.



**Figure II.2 : Photo de périphérique NI USB-6008**



**Figure II.3 :** Brochage du périphérique NI USB-6008

Pour l'obtention des données expérimentales, seules les entrées analogiques du périphérique NI USB-6008 sont utilisées.

Pour le raccordement du Pyranomètre à l'instrument USB-6008 de National Instruments, il est recommandé de respecter précisément les codes de couleur des fils et ses bornes correspondantes énoncés dans le **tableau 2**.

**Tableau 2 :** Raccordement du SP-Lite

Fil	Fonction	Relié à
Blanc	+	+
Vert	-	-
Protection	Boîte	Terre

De plus, l'installation du logiciel NATIONAL INSTRUMENTS NI-DAQmx 8.7.1 dans un ordinateur de bureau avec un système d'exploitation Windows XP a été nécessaire pour l'acquisition des données. Si le logiciel a été prêt à employer, on lance le Labview Signal Express qui se trouve dans le menu démarrer.

### **II.1.2 Mesure de l'humidité intérieure de la cellule**

Le Testo 410-2 est un appareil permettant de mesurer l'humidité relative de l'air, sa température ambiante et la vitesse du vent. Il est alimenté par deux piles alcaline (Zn-Mn) de 1,5 Volts. Son utilisation se fait manuellement. Il est donc équipé à la fois d'un anémomètre,

d'un thermomètre et d'un hygromètre. Cet appareil sert à mesurer l'humidité intérieure de la cellule. Il est représenté sur la **figure II.4** et ses caractéristiques sont toutes indiquées dans le **tableau 3**.



**Figure II.4** : Testo 410-2

**Tableau 3** : Caractéristique du Testo 410-2

Capteurs	Anémomètre	Thermomètre	Hygromètre
Etendue	0,4 à 20 m/s	-10 à 50 °C	0 à 100 % (h <sub>r</sub> )
Précision	± (0,2 m/s + 2% v.m)	± 0,5 °C	± 2,5 %
Résolution	0,1 m/s	0,1 °C	± 0,1 %
Autonomie	60 h (moyenne sans rétro-éclairage)		
Dimension	133×46×25 mm (incluant le capot de protection)		
Température d'utilisation	-10 à 50 °C		
Température de Stockage	-20° à 70 °C		
Indice de protection	IP10		
Type de pile	2 piles mignon AAA		
Masse	110 g (incluant le capot et la pile)		
Cadence de mesure	0.5 sec		

h<sub>r</sub>: humidité relative [%]

v.m : Valeur moyenne

### **II.1.3 Mesure des températures**

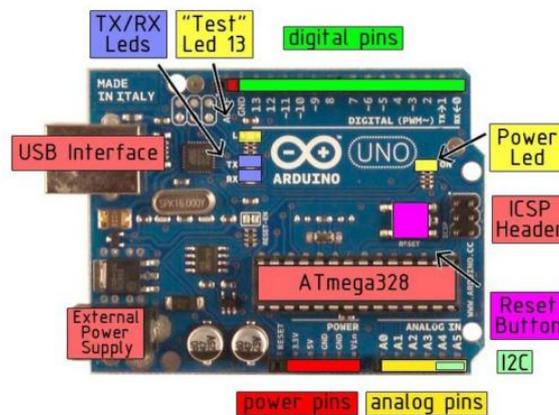
Pour la mesure des températures, nous avons utilisé des capteurs de température numérique sous forme de sonde. Ces capteurs ont été branchés sur une carte arduino Uno qui a été reliée à un ordinateur portable. De plus, deux bibliothèques nommés One-wire.h et

DallasTemperature.h ont été insérés dans l'arduino. Ils ne nécessitent qu'une seule ligne de données pour la communication avec un microcontrôleur et qui permettent de pouvoir brancher plusieurs capteurs sur la même broche de l'arduino. Ces bibliothèques assurent la communication entre les sondes et l'arduino [35].



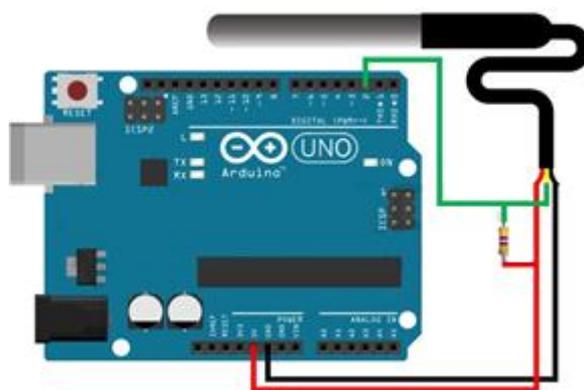
**Figure II.5 :** Photo de sonde de température DS18B20 [35]

Cette sonde a une plage de température de fonctionnement de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$  et est précis à  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  sur la plage de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $+85^{\circ}\text{C}$  [30].



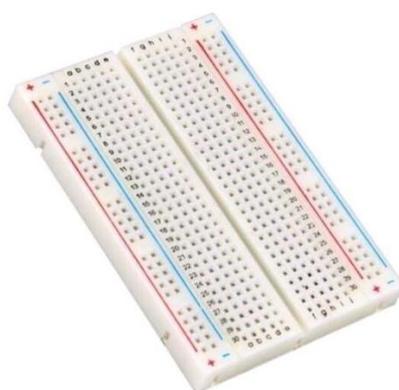
**Figure II.6 :** Photo de la carte arduino Uno [30]

Ces capteurs possèdent trois broches. Le fil de couleur jaune correspond à la donnée, le rouge à l'alimentation et le noir à la masse. Il est nécessaire de relier, lors du montage, la broche de donnée à l'alimentation avec une résistance de  $4,7\text{k}\Omega$ . La **figure II.7** montre le montage de la sonde DS18B20 à la carte arduino Uno [37].



**Figure II.7 :** Montage de la sonde de température DS18B20

En outre, puisqu'on a utilisé plusieurs capteurs de température, on a donc employé une plaque d'essai et des fils mâle-mâle montré sur la **figure II.8** et la **figure II.9**, pour la réalisation du montage du circuit.



**Figure II.8 :** Photo de la plaque d'essai



**Figure II.9 :** Fils mâle-mâle

### **II.1.4 Stockage des données**

Deux ordinateurs ont été utilisés, l'un sert à stocker dans l'Excel l'irradiation solaire venant du Pyranomètre ; l'autre est relié avec l'arduino, permettant d'acquérir les températures ressenties par les capteurs.

## **II.2 Protocole expérimentale**

À l'aide de GoogleMap [38], nous avons pu localiser le site de la réalisation de cette partie expérimentale qui se situe à Avaratra Ankatso Antananarivo Madagascar avec une élévation de 1299m, de latitude  $-18.8^{\circ}$ , de longitude  $47.48^{\circ}$ , de fuseau horaire +3.

Nous avons construit, à Avaratra Ankatso Antananarivo Madagascar, la cellule cubique de volume intérieur un mètre cube. Elle est faite en brique et enduite de mortier. Sa toiture est en béton armé étanche. Elle possède seulement une porte. Deux ouvertures rectangulaires permettant la circulation d'air, se trouvent l'une appliquée à la porte et l'autre appliquée au mur. Elles représentent 0,56% de la surface totale de la façade intérieure. Au-dessus de la toiture, nous avons construit une bordure carrée de côté intérieur un mètre pour clôturer le sol avec le végétal. Nous avons mis un tuyau vers l'extérieur pour l'évacuation de l'eau. La **figure II.10** représente la photo de la cellule cubique.



**Figure II.10** : Photo de la cellule cubique

Les dimensions de la cellule cubique sont résumées dans le **tableau 4**.

**Tableau 4 : Dimension de la cellule cubique**

Matériaux	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Épaisseur (m)
Bord de la végétation			0,1	0,11
Cellule intérieure	1	1	1	
Dalle de la toiture	1,44	1,44		0,07
Mur	1,44	1,44	1,07	0,22
Ouverture appliquée à la porte	0,125		0,09	
Ouverture appliquée au mur	0,125		0,09	
Porte		0,55	0,96	0,01
Sol de la végétation	1	1		0,03
Couche végétale				0,05

Le **tableau 5** résume les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés pour la construction de la cellule cubique.

**Tableau 5 : Caractéristiques thermiques des matériaux utilisés [31]**

Matériaux	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/Kg.K)
Béton plein armé	2350	2,3	1000
Brique	1850	1,15	1634
Mortier	1900	1,3	1000
Sapin	435	0,11	1600

Après une semaine, nous avons procédé aux étapes suivants pour mesurer les températures, l'humidité intérieure, l'irradiation globale pendant la période du 21 février à 12h jusqu'à 24

février 2018 à 12h. Durant cette période, la cellule cubique était à toiture conventionnelle en béton.

- Mettre en place les appareils de mesures :
  - Pyranomètre : à l'extérieur de la cellule
  - Arduino : coller dans le mur extérieur
  - Cinq Capteurs de température : un à l'extérieur de la cellule pour la prise de la température ambiante extérieure, un sur le toit, un sur le plafond, un à l'intérieur de la cellule et le dernier sur le sol encore à l'intérieur.
  - Deux Ordinateurs : l'un portable lié à l'arduino et l'autre lié au Pyranomètre
- Débuter la mesure le 21 février 2018 à 12h en prenant les températures de chaque capteur toutes les cinq minutes et l'irradiation solaire et l'humidité intérieure toutes les unes heures.
- Arrêter la mesure le 24 février 2018 à 12h

La **figure II.11** montre la disposition des appareils de mesure utilisés lors de l'expérimentation.



**Figure II.11** : Photo représentative de la cellule cubique avec tous les appareils de mesure

**Remarque** : Pendant la prise des mesures, la porte reste toujours fermée

Pour la suite de l'expérimentation, planter le cresson, qui a été déjà fleuri sur le champ de cresson, sur le toit et arroser avec de l'eau usée (eau de la vaisselle).

Après trois jours, le cresson planté sur le toit pousse bien. Nous avons fait une nouvelle expérimentation durant la date du 27 février à 11h jusqu'à 2 mars 2018 à 12h en procédant l'étape suivant :

- Le 27 février à 11h, faire des mesures de la même manière que précédemment mais avec sept capteurs car la toiture a été déjà végétalisée. Les deux autres capteurs se placent donc sur les feuilles du cresson et sur le sol végétal. Les autres restent sur les mêmes places qu'auparavant.
- Arrêter la mesure le 2 mars 2018 à 12h

La **figure II.12** montre l'image de la cellule cubique ainsi végétalisée sur sa toiture.



**Figure II.12** : Photo de la cellule cubique de toiture végétalisée de cresson

Dans cette dernière expérimentation, nous avons fait varier chaque jour l'ouverture appliquée à la porte pendant trois jours (le 14,15 et 16 mars 2018 de 8h à 16h). Durant ces temps-là, nous avons réalisé encore la même procédure de mesure mais seulement pendant la journée (en excluant la nuit). Cette partie permet l'étude de l'effet de la variation des ouvertures sur l'ambiance thermique à l'intérieure de la cellule. Nous considérons comme première ouverture l'ouverture durant la date du 28 février à 8h jusqu'à 16h. Sur la **figure II.13**, on représente distinctement les quatre ouvertures **a**, **b**, **c** et **d** appliquées à la porte.

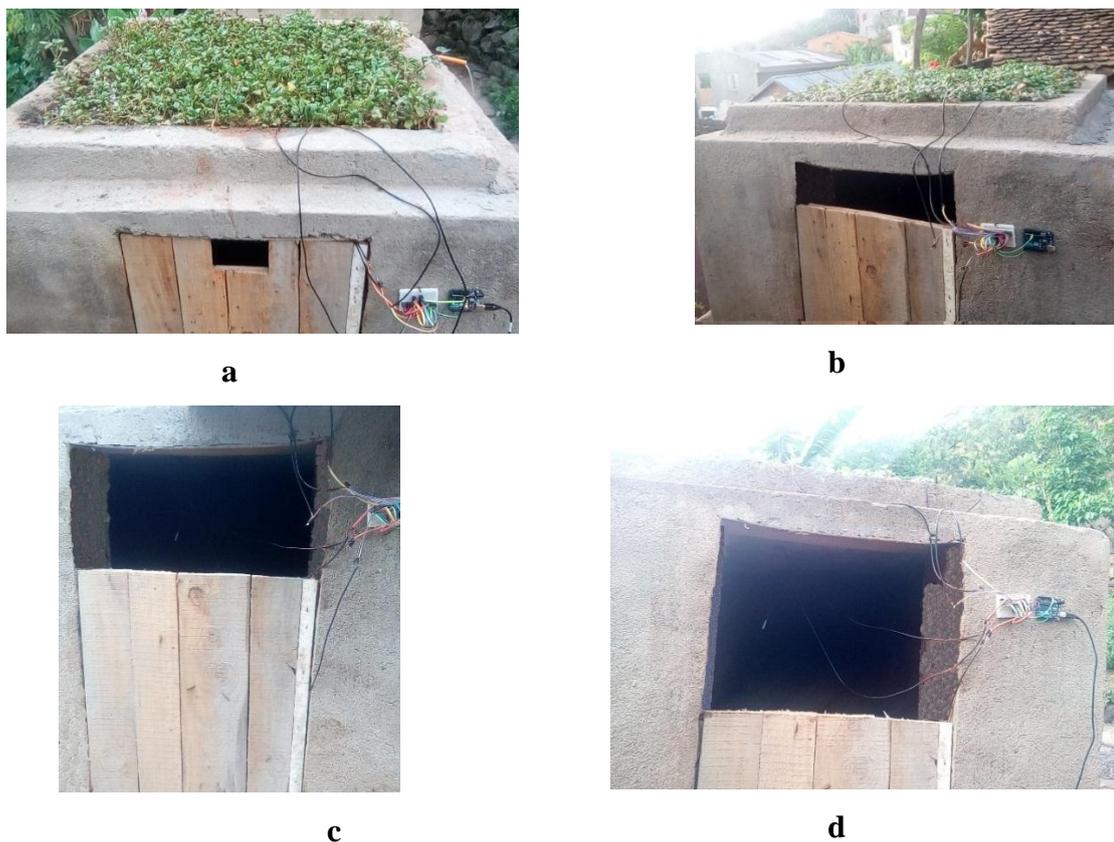


Figure II.13 : Photos représentatives des différentes ouvertures appliquées à la porte

Tableau 6: Dimension des ouvertures

Ouverture	Dates	Dimension de l'ouverture (Hauteur×largeur)
<b>a</b>	28 février 2018	0,09m×0,125m
<b>b</b>	14 mars 2018	0,15m×0,55m
<b>c</b>	15 mars 2018	0,30m×0,55m
<b>d</b>	16 mars 2018	0,45m×0,55m

### II.3 Calibration de la sonde de température [32][33]

Pour la calibration de la sonde DS18B20, nous avons fait la démarche suivante :

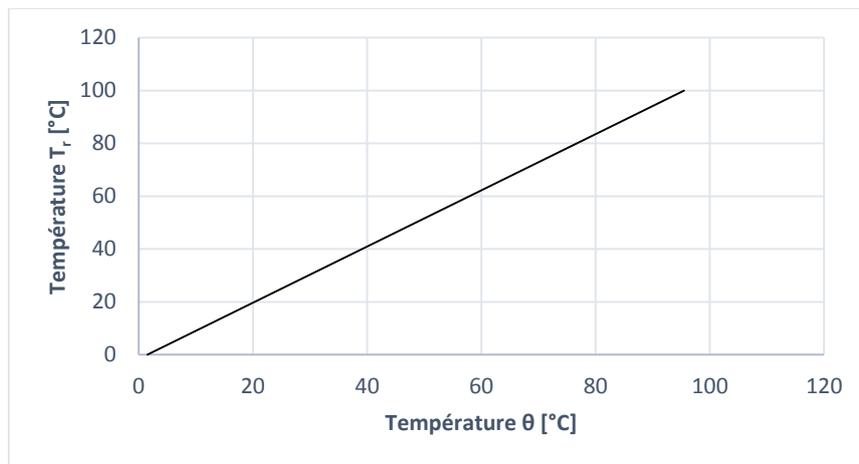
- Vérification au point  $T_0=0^{\circ}\text{C}$ , température théorique correspondant à la glace fondante
  - On a ajouté de la glace concassée et de l'eau de robinet dans une petite cuve
  - Après quatre à cinq minutes plus tard, lorsque le mélange est stable, on a inséré la sonde dans le mélange de manière à ce que la partie sensible soit toute immergée.
  - Après deux ou trois minutes, on a pris la valeur indiquée lorsque l'indicateur a cessé de varier.

- Vérification au point  $T_{100}=100^{\circ}\text{C}$ , température théorique correspondant à l'eau bouillante
  - On a ajouté de l'eau dans une marmite et on l'a fait bouillir sur le feu
  - Après, on a plongé la sonde dans l'eau bouillante de façon à ce que la partie sensible soit totalement immergée.
  - Après deux ou trois minutes, on a relevé la valeur affichée lorsqu'elle reste inchangée.

Cette procédure a été faite sous la pression atmosphérique c'est-à-dire à la pression 1 atm.

Après avoir relevé ces deux valeurs, la fenêtre de l'arduino indique que pour la vérification au point  $0^{\circ}\text{C}$ , la valeur de température expérimentale  $\theta_0=1,5^{\circ}\text{C}$  correspond à la glace fondante tandis qu'au point  $100^{\circ}\text{C}$ , la valeur température expérimentale  $\theta_{100}=95,5^{\circ}\text{C}$  correspond à l'eau bouillante.

D'après ces valeurs, la courbe faisant correspondre la température  $T_r$  à la température  $\theta$  est représentée sur la **figure II.14**.



**Figure II.14 :** Equation de droite de la calibration de la sonde DS18B20

Cette courbe linéaire a pour équation :

$$T_r = 1,0638. \theta - 1,5957 \quad (7)$$

$\theta$  : Température avant calibration [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_r$  : Température après calibration [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Alors, toutes les températures obtenues durant l'expérimentation notées  $\theta$  doivent être converties en  $T_r$  en passant à cette équation.

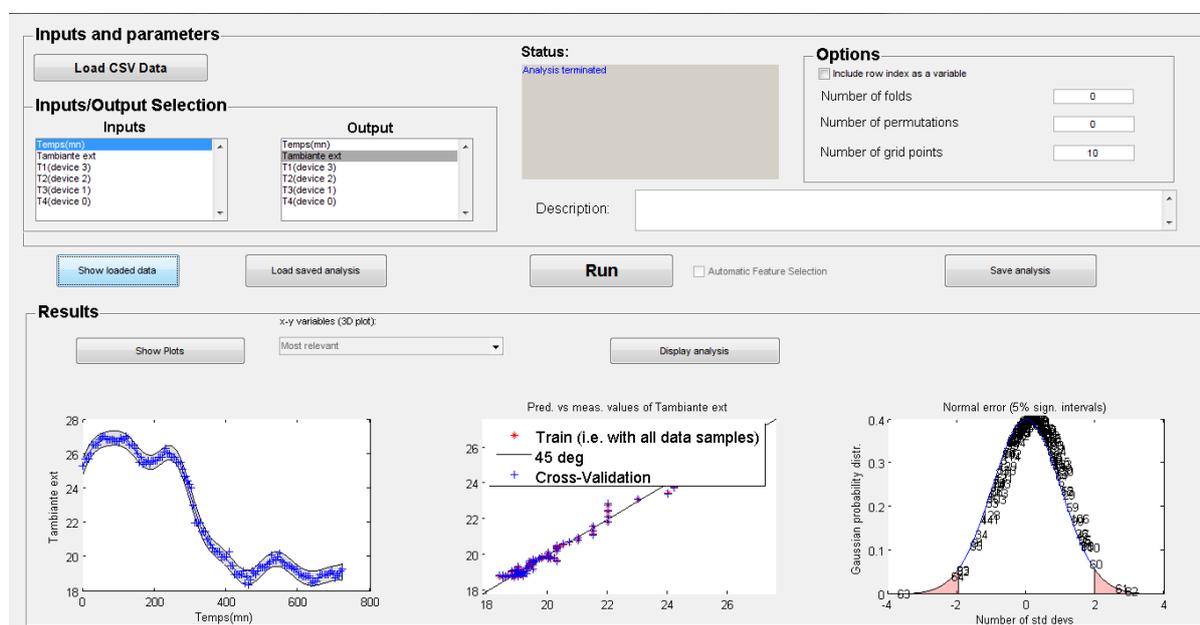
## II.4 Traitement des données via de GPExp

### II.4.1 Présentation de l'outil GPExp

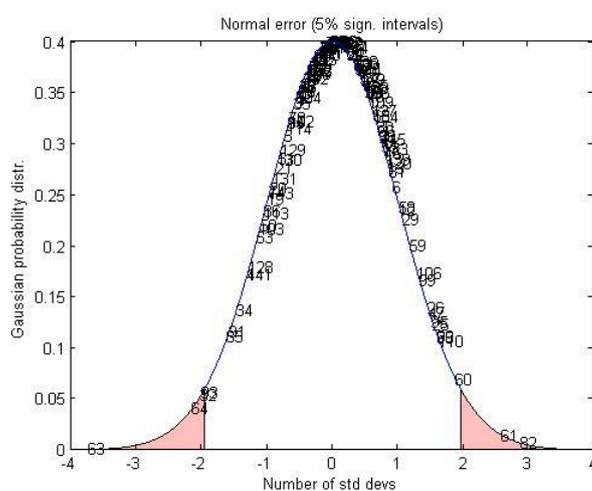
Le GPExp est un programme sous Matlab utile pour évaluer la qualité des résultats expérimentaux en régime permanent en ce qui concerne les intrants fournis. Cela peut aider à comprendre quelles variables d'entrée sont les plus pertinentes. Quelle est la répétabilité des expériences ? Quels points de données sont susceptibles d'être aberrants [39].

GPExp est basé sur la version 3.5 de la bibliothèque Matlab GPML développée par Carl Edward Rasmussen et Christopher K. I. Williams.

La *figure II.15-(a')-(b')* montre l'interface de l'outil GPExp après le traitement des données.



(a')



(b')

**Figure II.15 : Interface de GPExp**

#### ***II.4.2 Elimination des points singuliers***

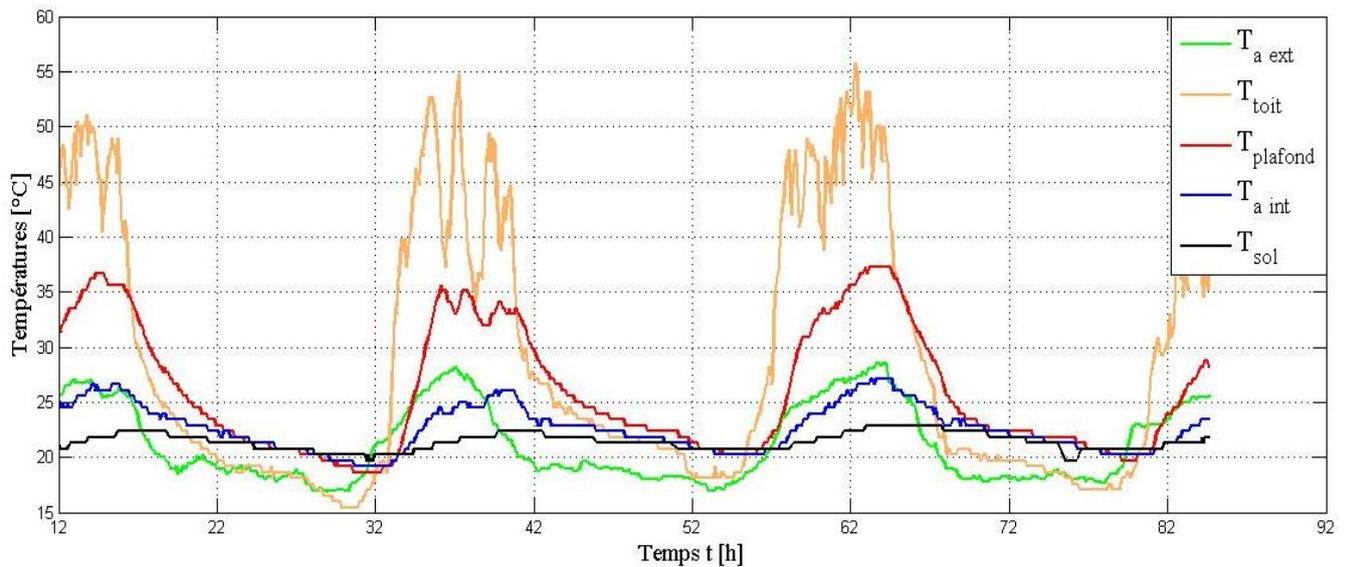
L'utilisation de l'outil GPExp sous Matlab nous a aidé d'éliminer tous les points qui ne sont pas compatibles à l'ensemble des données de l'expérimentation. Ainsi, après avoir traité les valeurs d'entrées, il a indiqué sur la courbe de Gauss tous les points aberrants situés à l'extérieur de -2 et 2 de l'axe des abscisses comme on a montré sur la ***figure II.15-(b')***.

*Chapitre III*

**RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### III.1 Cellule à toiture non végétalisée

Après avoir collecté et traité toutes les données de l'expérimentation, la **figure III.1** représente les variations de la température ambiante extérieure  $T_{a\ ext}$ , de la température sur la surface extérieure du toit  $T_{toit}$ , de la température sur le plafond  $T_{plafond}$ , de la température ambiante à l'intérieure de la cellule  $T_{a\ int}$ , et de la température du sol intérieur  $T_{sol}$  durant la période du 21 février à 12h jusqu'à 24 février 2018 à 12h.

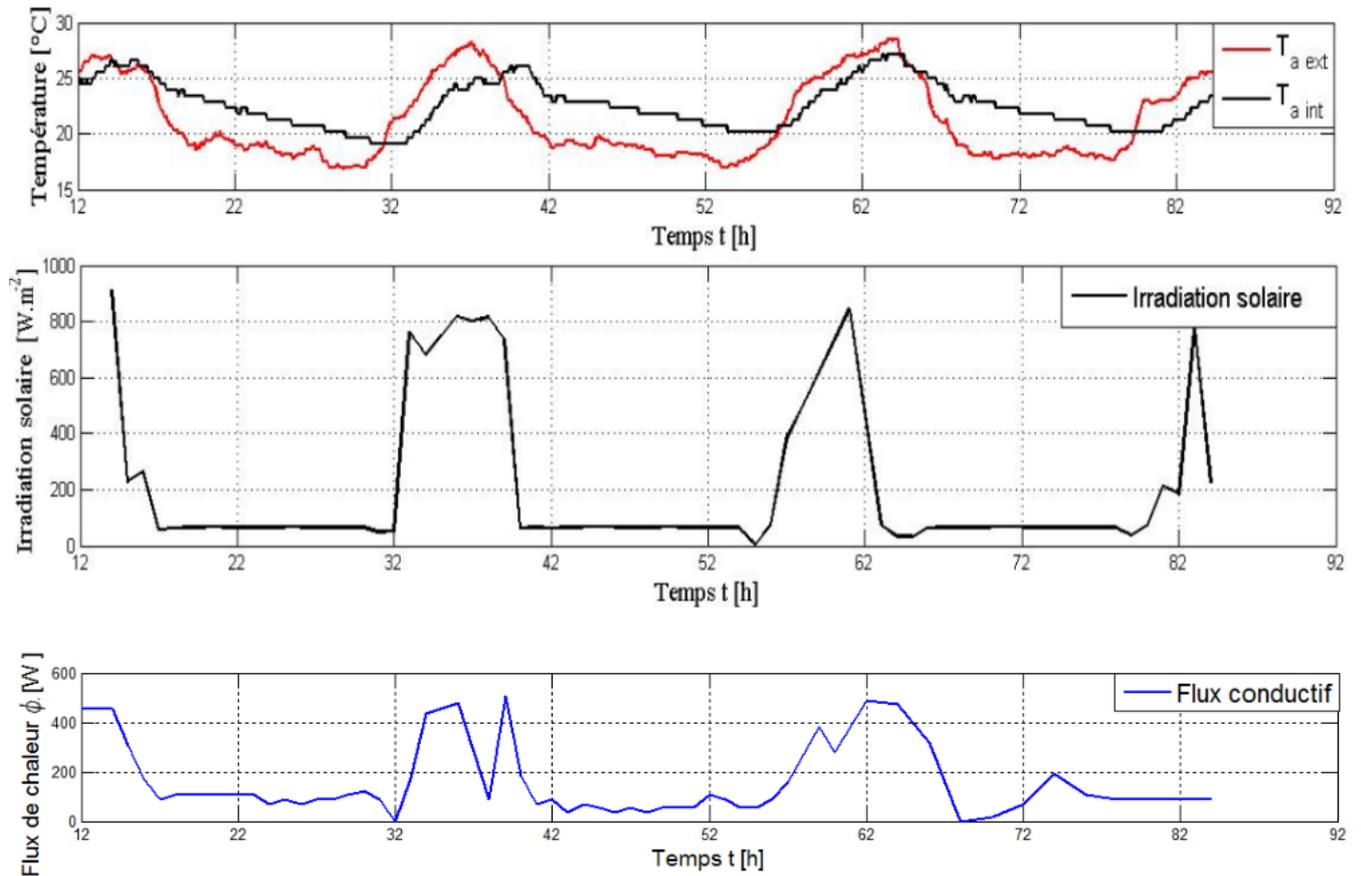


**Figure III.1 :** Schéma représentatif des variations des températures  $T_{a\ ext}$ ,  $T_{toit}$ ,  $T_{plafond}$ ,  $T_{a\ int}$ ,  $T_{sol}$  durant trois jours successifs du 21 février à 12h jusqu'à 24 février 2018 à 12h

Sur cette **figure III.1**, l'évolution de l'amplitude de température  $T_{toit}$  sur la surface extérieure du toit en béton est vraiment très remarquable. Elle varie approximativement entre 15,43 °C et 55,85 °C. Ce fait est très normal du fait que le béton a une conductivité thermique beaucoup plus grande comme nous avons déjà indiqué dans le **tableau 5**. Cette énorme changement progressif est donc l'une des causes qui entraînent l'élévation ou la diminution de la chaleur à l'intérieure de la cellule cubique. Dans le cas de l'amplitude de la température du plafond  $T_{plafond}$ , elle atteint jusqu'à une valeur maximale de 37,23°C environ et une valeur minimale de 18,62°C environ. Dans la réalité, c'est si naturel puisque le changement thermique sur le toit influence directement à celui du plafond.

Par contre, la variation de la température du sol intérieur  $T_{sol}$  de la cellule est quasiment constante par rapport à celles des autres. Elle varie entre 19,68°C et 22,87°C. Généralement, la sollicitation sinusoïdale de chaque température s'avère bien pendant les périodes indiquées.

Dans la suite, nous analysons la variation des températures ambiantes intérieure et extérieure avec celle de l'irradiation solaire et de flux de chaleur par conduction. L'allure de l'évolution de ces paramètres est représentée sur la **figure III.2**.



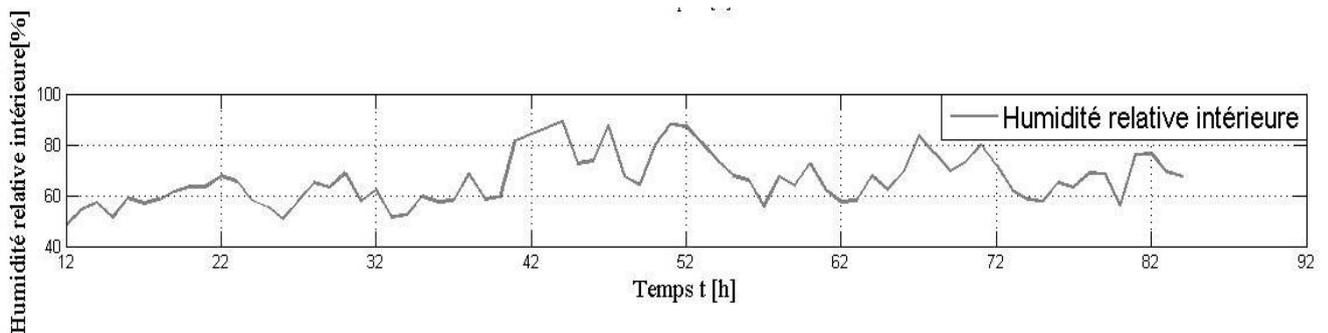
**Figure III.2 :** Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation du flux de chaleur par conduction et de la variation de l'irradiation solaire avec le temps pour la cellule cubique normal.

D'après ce que nous constatons sur cette **figure III.2**, les variations des températures, du flux de chaleur et de l'irradiation solaire avec le temps s'épousent bien. En effet, globalement, lorsque l'irradiation solaire augmente, le flux de chaleur par conduction et les températures ambiantes augmentent. Par ailleurs, toute la nuit, l'irradiation solaire et le flux de chaleur sont voisins du zéro. En d'autre terme, la fluctuation de l'irradiation solaire commande la variation du flux conductif. Cela explique que le flux de chaleur par conduction  $\phi$  traversant la toiture en béton armé est une partie de l'irradiation solaire globale. C'est donc la puissance absorbée par le béton.

L'irradiation solaire varie ici entre  $1,59\text{Wm}^{-2}$  et  $913,1\text{Wm}^{-2}$  tandis que le flux de chaleur varie entre  $0\text{W}$  et  $506,8\text{W}$ .

En ce qui concerne les deux températures ambiantes, toutes les journées il n'y a pas trop de différence entre ses variations alors que toutes les nuits il y en a. En effet, pendant la journée cette différence n'est que de l'ordre de  $3^\circ\text{C}$  alors que toute la nuit elle devient un peu plus grande avec une valeur de  $5^\circ\text{C}$  environ. La valeur maximale de la température ambiante extérieure  $T_{a\text{ ext}}$  est très élevée et varie jusqu'à  $28,5^\circ\text{C}$ . L'écart entre la température ambiante extérieure et intérieure est très petit. Contrairement, pendant la période nocturne, l'écart entre la température ambiante extérieure et intérieure s'avère beaucoup plus remarquable selon cette **figure III.2**. En fait, c'est le flux de chaleur par conduction qui a beaucoup d'influence sur le changement thermique dans la cellule cubique.

La variation de l'humidité relative mesurée à l'intérieure correspondant à la cellule à toiture non végétalisée est représentée par la **figure III.3**.

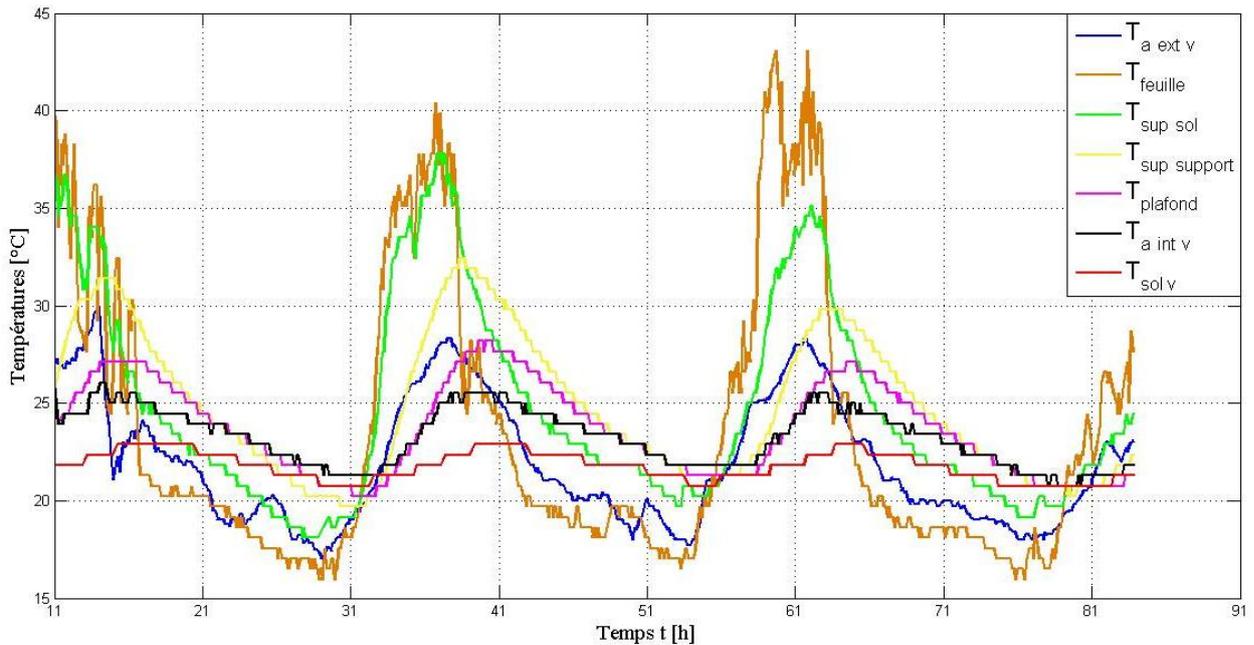


**Figure III.3 :** Variation de l'humidité relative pour la cellule non végétalisée

Durant la prise des mesures, l'humidité relative correspondant à la cellule à toiture normale (sans végétale) varie entre  $48\%$  et  $89,1\%$ .

### III.2 Cellule à toiture végétalisée de cresson

La **figure III.4** montre les variations de la température ambiante extérieure  $T_{a\text{ ext }v}$ , de la température sur les feuilles du cresson  $T_{\text{feuille}}$ , de la température supérieure du sol végétal  $T_{\text{sup sol}}$ , de la température supérieure du support de la végétation  $T_{\text{sup support}}$ , de la température sur le plafond  $T_{\text{plafond}}$ , de la température ambiante à l'intérieure de la cellule à toiture végétalisée  $T_{a\text{ int }v}$ , et de la température du sol intérieur  $T_{\text{sol}}$  durant la date du 27 février à 11h jusqu'à 2 mars 2018 à 12h.

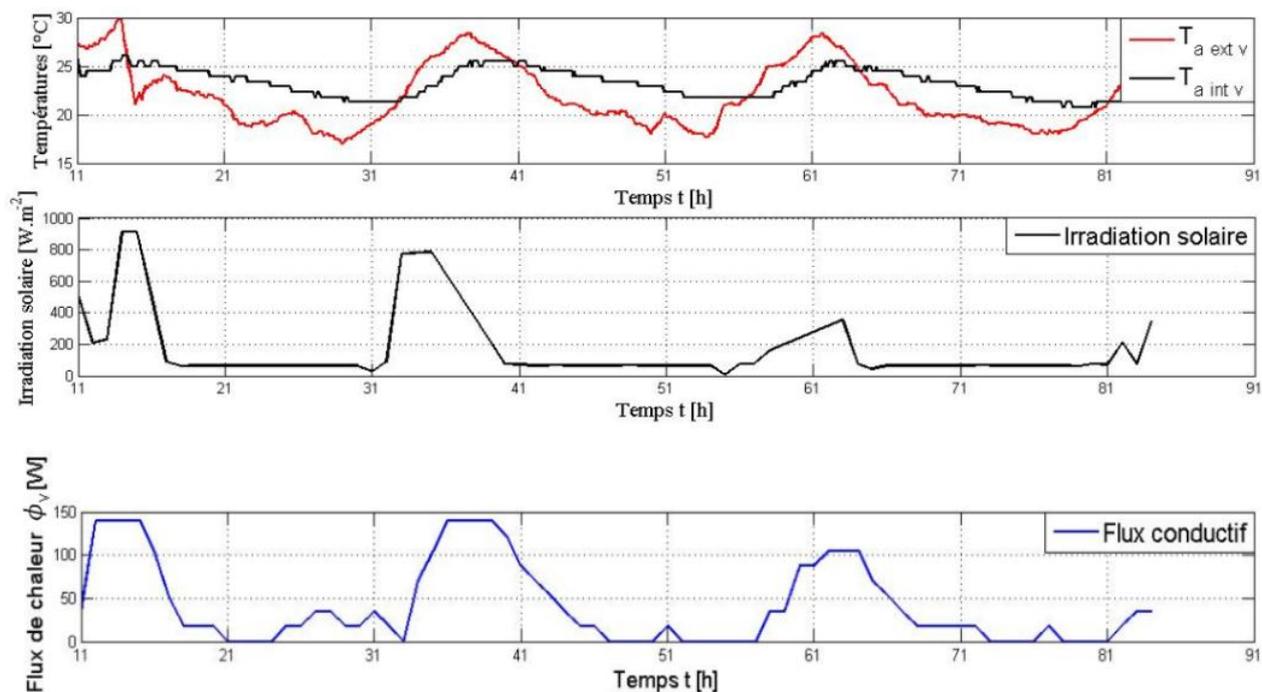


**Figure III.4 :** Schéma représentatif des variations des températures  $T_{a\ ext\ v}$ ,  $T_{feuille}$ ,  $T_{sup\ sol}$ ,  $T_{sup\ support}$ ,  $T_{plafond}$ ,  $T_{a\ int\ v}$ ,  $T_{sol}$  durant trois jours successifs du 27 février à 11h jusqu'à 2 mars 2018 à 12h

Sur cette **figure III.4**, l'amplitude de la température au niveau de la surface des feuilles du cresson est très grande. Elle varie dans une large gamme de température de 15,96°C à 43,08°C environ. Pour la température sur la surface supérieure du sol végétal (substrat), elle est un peu atténuée à cause de l'ombrage donné par la surface totale des feuilles de cresson et aussi par le renouvellement d'eau par arrosage. Cet apport d'eau usée se fait manuellement à l'aide d'un seau plastique. Cette opération d'irrigation se répète chaque fois que l'eau circulant sur le toit est en train d'épuiser.

La **figure III.4** montre aussi que l'existence de la plante cresson sur la toiture entraîne l'atténuation de l'amplitude de température de la partie supérieure du support  $T_{sup\ support}$  vers la température du sol  $T_{sol}$  à l'intérieure de la cellule.

La **figure III.5** fait apparaître l'allure des températures ambiantes intérieure  $T_{a\ int\ v}$  et extérieure  $T_{a\ ext\ v}$ , l'allure de l'irradiation solaire et l'allure de flux de chaleur par conduction  $\phi_v$ . Elle correspond toujours le cas de la cellule cubique végétalisée de cresson.



**Figure III.5 :** Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation du flux de chaleur par conduction et de la variation de l'irradiation solaire avec le temps pour la cellule cubique végétalisée.

Comme dans le paragraphe précédent, cette **figure III.5** fait constater que la variation des températures épouse bien la variation de l'irradiation solaire et du flux de chaleur.

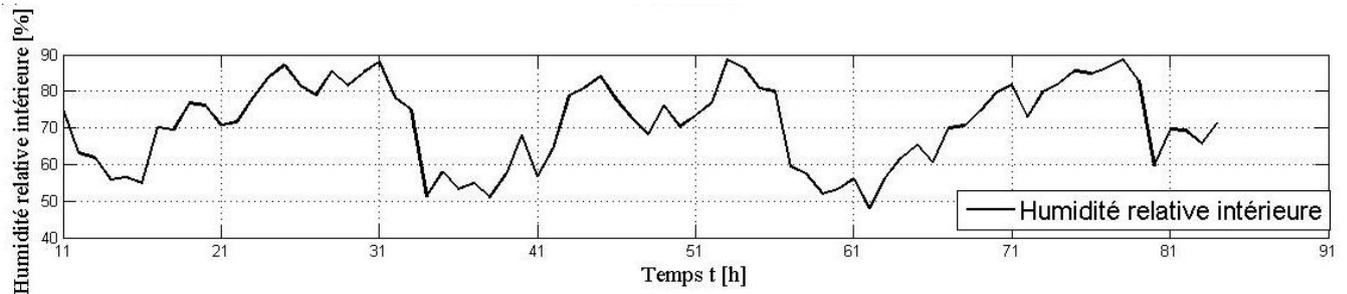
La température ambiante extérieure  $T_{a\ ext\ v}$  évolue dans l'intervalle de température compris entre 17°C et 29,7°C environ et celui de la température ambiante intérieure  $T_{a\ int\ v}$  est compris entre 20,74°C et 26,06°C environ. Durant la période diurne et nocturne, on observe toujours une différence entre ces deux températures. Cela fait preuve que l'existence de la couche végétale et la couche de substrat est capable de diminuer la chaleur intérieure de la cellule pendant le jour et d'en augmenter toute la nuit. En effet, toute la nuit,  $T_{a\ ext\ v}$  est constamment inférieure à  $T_{a\ int\ v}$ . Contrairement, toute la journée  $T_{a\ ext\ v}$  est constamment supérieure à  $T_{a\ int\ v}$ .

La **figure III.5** montre bien que c'est la variation du flux conductif ou flux de chaleur par conduction qui cause directement l'évolution de l'ambiance à l'intérieure de la cellule à toiture végétalisée du cresson.

Cette fois, le flux de chaleur varie entre 0W et 139,8W alors que l'irradiation solaire varie entre 5,22Wm<sup>-2</sup> et 913,1W m<sup>-2</sup>.

Quelque fois, la valeur de flux de chaleur est nulle durant la période nocturne. Ceci s'explique qu'à quelques intervalles du temps, la température au niveau du support est égale à la température du plafond.

La **figure III.6** représente la variation de l'humidité relative à l'intérieure de la cellule cubique à toiture végétalisée.



**Figure III.6 :** Variation de l'humidité relative pour la cellule à toiture végétalisée

### III.3 Comparaison entre la cellule non végétalisée et la cellule végétalisée du cresson

Les différences de l'ambiance thermique intérieure entre la cellule non végétalisée et la cellule végétalisée du cresson s'avèrent bien à partir de l'analyse du **tableau 7**.

**Tableau 7 :** Valeurs extrêmes des températures ambiantes intérieures, de flux de chaleur par conduction de la cellule non végétalisée et de la cellule végétalisée du cresson

<b>Cellule non végétalisée</b>	$T_{a \text{ int min}} [^{\circ}\text{C}]$	19,15
	$T_{a \text{ int max}} [^{\circ}\text{C}]$	27,13
	$\phi_{\text{min}} [\text{W}]$	0
	$\phi_{\text{max}} [\text{W}]$	506,8
<b>Cellule végétalisée du cresson</b>	$T_{a \text{ int v min}} [^{\circ}\text{C}]$	20,74
	$T_{a \text{ int v max}} [^{\circ}\text{C}]$	26,06
	$\phi_{\text{v min}} [\text{W}]$	0
	$\phi_{\text{v max}} [\text{W}]$	139,8

En se référant à ce **tableau 7**, la fluctuation de la température ambiante intérieure de la cellule à toiture végétalisée de cresson est plus atténuée que celle de la cellule à toiture non végétalisée. Cependant, la valeur maximale de l'irradiation solaire pour ces deux vaut  $913,1 \text{Wm}^{-2}$ .

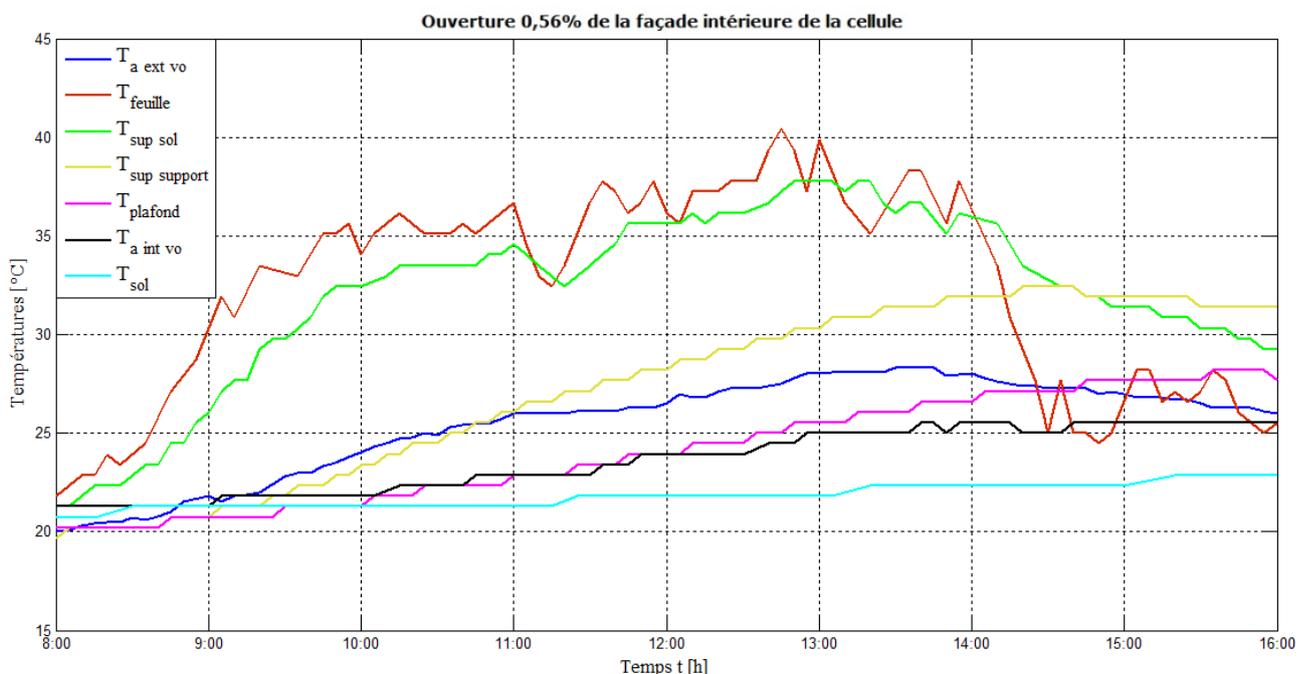
En effet, l'existence de la couche végétale sur le toit fait stabiliser l'environnement thermique intérieure de la cellule cubique. Elle ralentit la diminution et l'augmentation

progressive de la chaleur intérieure. De plus, le renouvellement de l'irrigation par eau usée de la plante permet de changer la conductivité thermique du support végétal. Cette modification provoque la faible valeur maximale du flux conductif 139,8W qui est le premier responsable au changement de la température ambiante intérieure.

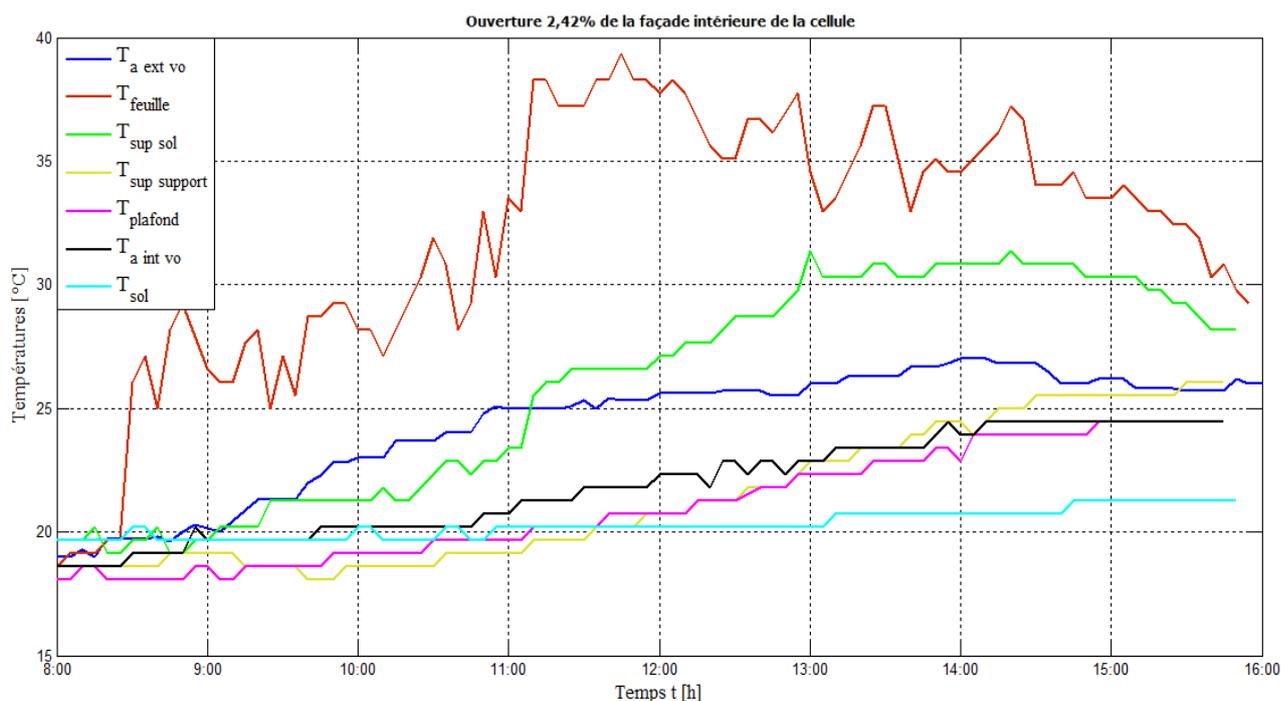
La cellule à toiture non végétalisée a une ambiance thermique intérieure très variée. En effet, le toit en béton armé conduit beaucoup plus de flux de chaleur à cause de sa conductivité thermique élevée. De plus, l'irradiation solaire lui frappe directement ce qui implique l'énorme valeur maximale du flux conductif qui vaut 506.8W. Alors la climatisation intérieure de la cellule à toiture végétalisée de cresson est plus vivable que celle de la cellule à toiture conventionnelle.

### III.4 Influence de l'effet des ouvertures appliquées à la porte

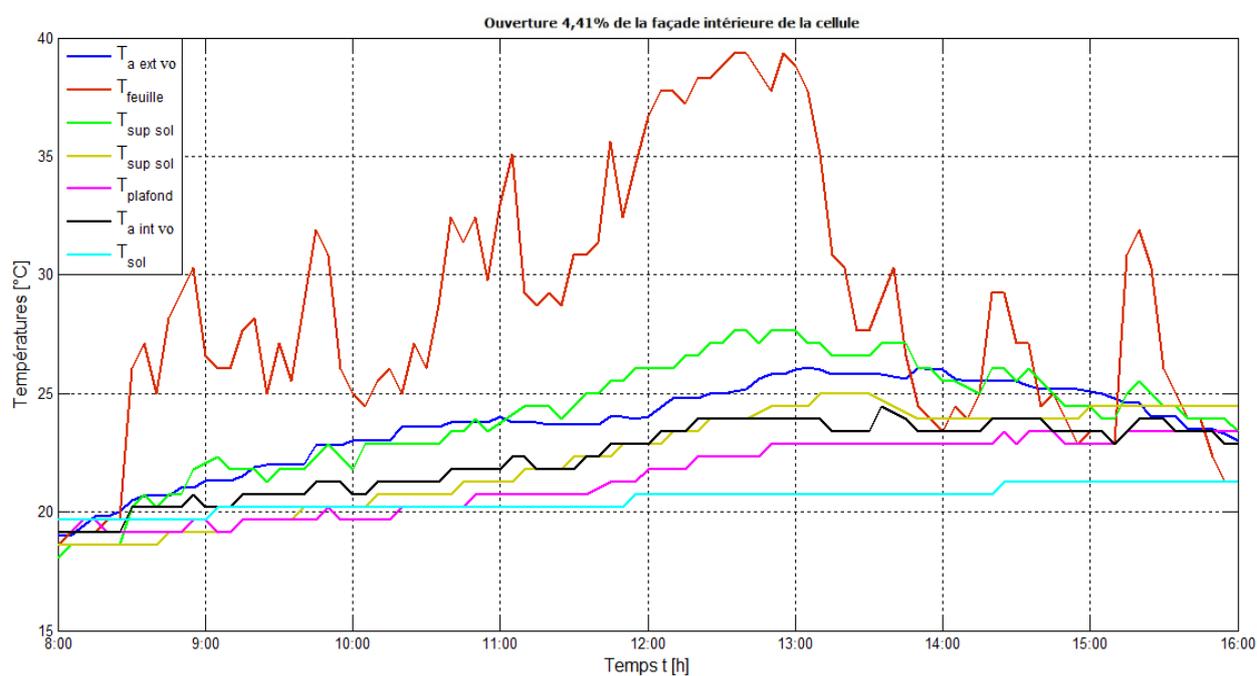
Pour plus d'approfondissement de l'étude de la climatisation intérieure de la cellule, nous étudions l'influence des ouvertures appliquées successivement à la porte de la cellule à toiture végétalisée autre que l'irradiation solaire et le flux de chaleur par conduction. Les **figure III.7**, **figure III.8**, **figure III.9**, **figure III.10** montrent l'évolution des amplitudes des températures selon les ouvertures appliquées à la porte de la cellule. Elles permettent de connaître l'impact des ouvertures sur le comportement thermique intérieur.



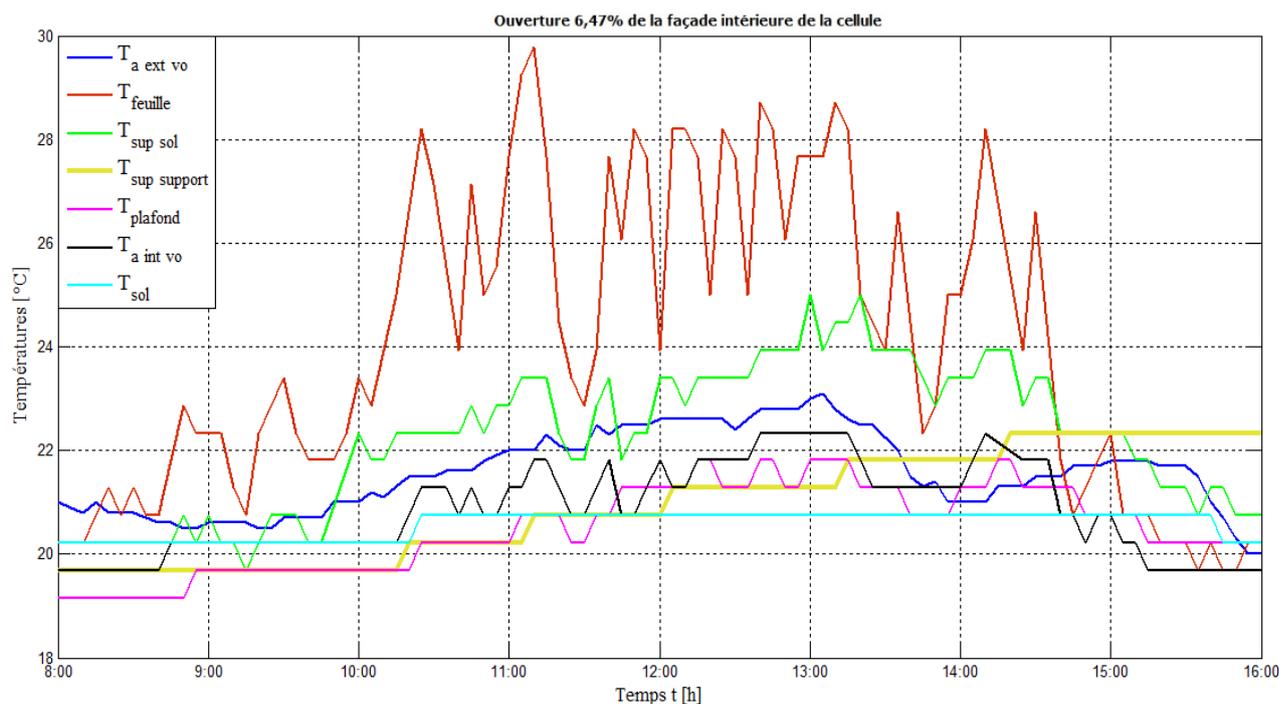
**Figure III.7 :** Schéma représentatif des variations des températures  $T_{a \text{ ext vo}}$ ,  $T_{\text{feuille}}$ ,  $T_{\text{sup sol}}$ ,  $T_{\text{sup support}}$ ,  $T_{\text{plafond}}$ ,  $T_{a \text{ int v}}$ ,  $T_{\text{sol}}$  à la date du 28 février 2018 de 08h à 16h14 mars 2018



**Figure III.8 :** Schéma représentatif des variations des températures  $T_{a \text{ ext vo}}$ ,  $T_{\text{feuille}}$ ,  $T_{\text{sup sol}}$ ,  $T_{\text{sup support}}$ ,  $T_{\text{plafond}}$ ,  $T_{a \text{ int vo}}$ ,  $T_{\text{sol}}$  à la date du 14 mars 2018 de 08h à 16h



**Figure III.9 :** Schéma représentatif des variations des températures  $T_{a \text{ ext vo}}$ ,  $T_{\text{feuille}}$ ,  $T_{\text{sup sol}}$ ,  $T_{\text{sup support}}$ ,  $T_{\text{plafond}}$ ,  $T_{a \text{ int vo}}$ ,  $T_{\text{sol}}$  à la date du 15 mars 2018 de 08h à 16h



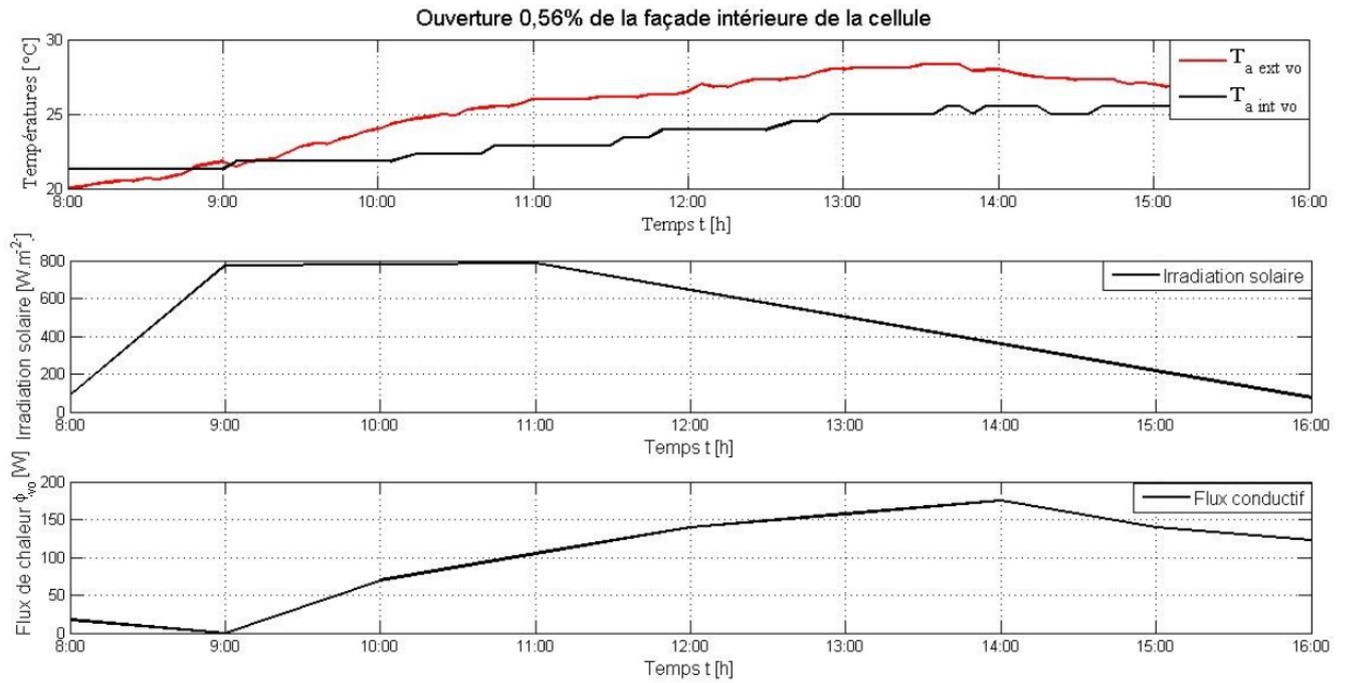
**Figure III.10 :** Schéma représentatif des variations des températures  $T_{a \text{ ext vo}}$ ,  $T_{\text{feuille}}$ ,  $T_{\text{sup sol}}$ ,  $T_{\text{sup support}}$ ,  $T_{\text{plafond}}$ ,  $T_{a \text{ int vo}}$ ,  $T_{\text{sol}}$  à la date du 16 mars 2018 de 08h à 16h

Sur ces quatre figures, la température du sol intérieur  $T_{\text{sol}}$  est quasiment constante. Au début de la prise de mesure, sur la **figure III.9**,  $T_{\text{sol}}$  est supérieure par rapport aux température.

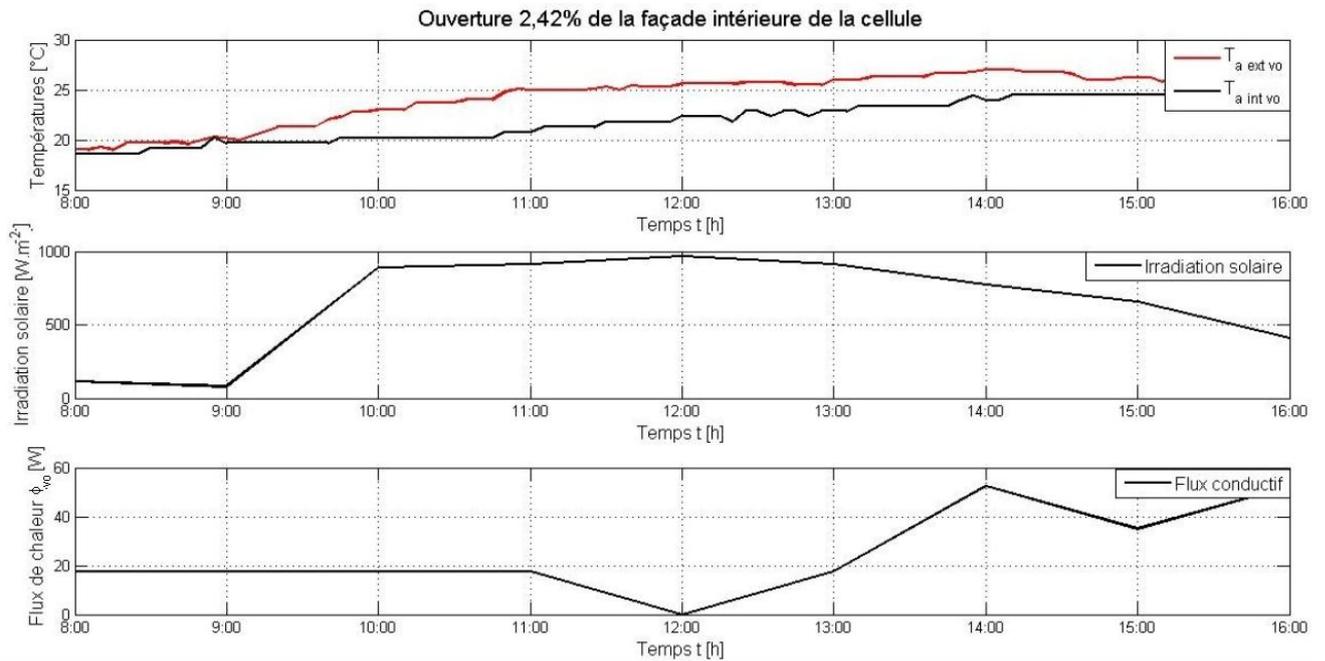
Sur les trois premières figures de température **figure III.7**, **figure III.8**, **figure III.9**, il s'avère que la température du plafond  $T_{\text{plafond}}$ , la température ambiante intérieure  $T_{a \text{ int vo}}$  et la température du sol  $T_{\text{sol}}$  augmentent suivant le temps. Par contre, les autres températures varient selon le climat de l'environnement extérieur.

Sur la **figure III.10**, seule la température supérieure du support végétal  $T_{\text{sup support}}$  qui augmente avec le temps. L'ambiance intérieure est très influencée par l'aération appliquée à la porte.

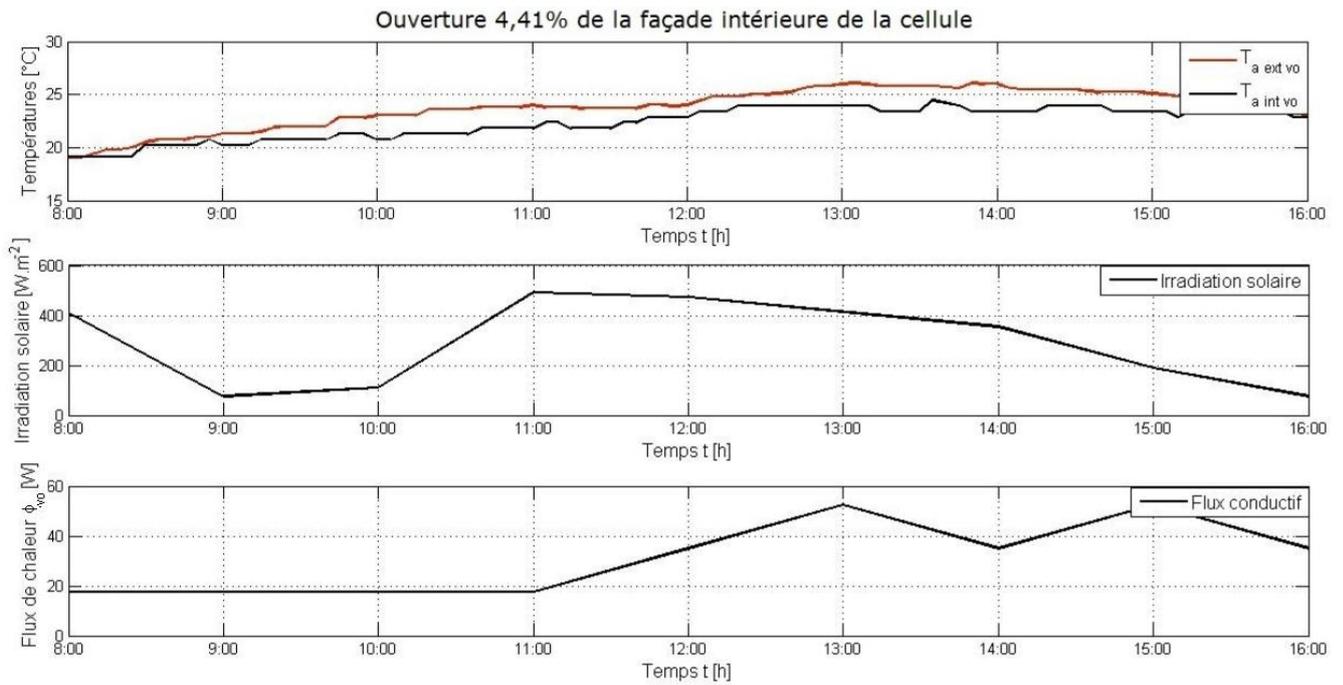
Les évolutions des températures ambiantes intérieure et extérieure, de l'irradiation solaire et du flux de transfert de chaleur par conduction avec le temps sont représentées successivement sur les **figure III.11**, **figure III.12**, **figure III.13** et **figure III.14** selon les ouvertures appliquées à la porte de la cellule.



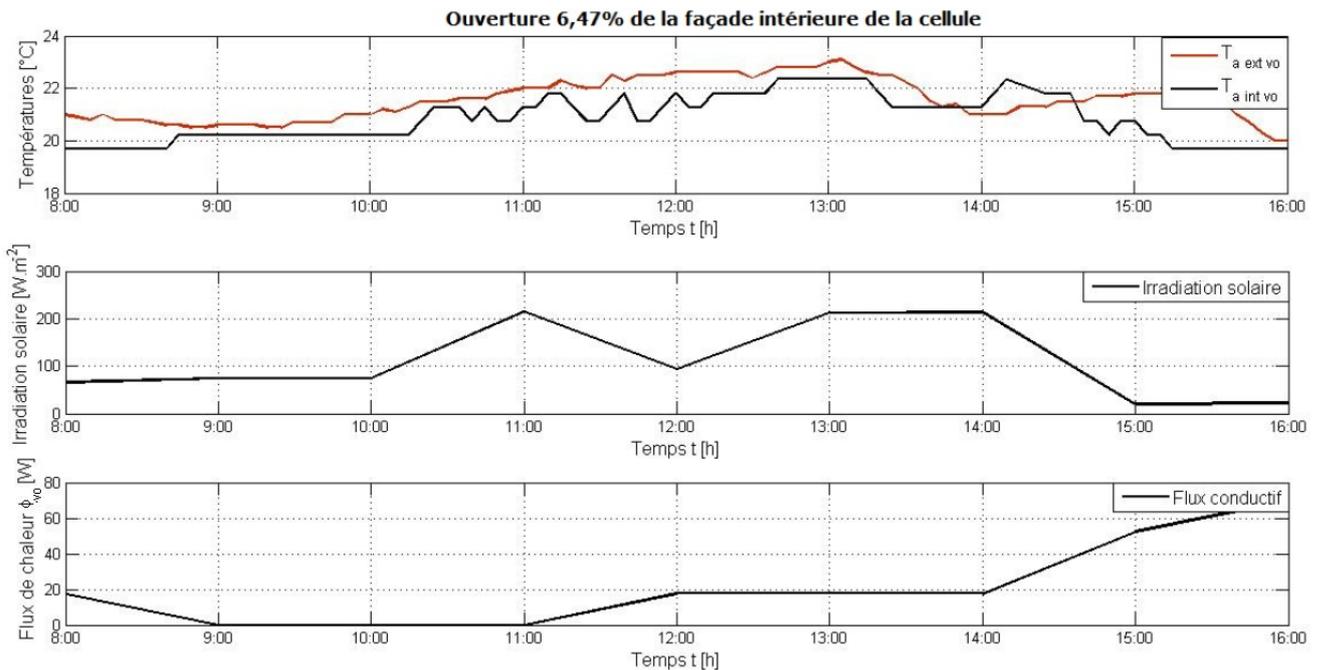
**Figure III.11 :** Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 0,56% de la façade intérieure.



**Figure III.12 :** Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 2,42% de la façade intérieure.



**Figure III.13 :** Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 4,41% de la façade intérieure.



**Figure III.14 :** Allures de la variation des températures ambiantes extérieure et intérieure, de la variation de l'irradiation solaire et de la variation du flux de chaleur par conduction avec le temps pour la cellule avec ouverture 6,47% de la façade intérieure.

Le **tableau 8** résume les valeurs extrêmes des températures ambiantes intérieures et extérieures, de l'irradiation solaire et du flux conductif selon les ouvertures appliquées à la porte

afin de bien analyser et comparer l'influence des ouvertures de la cellule cubique à toiture végétalisée du cresson.

**Tableau 8 :** Valeurs extrêmes des températures ambiantes intérieures et extérieures, de l'irradiation solaire et du flux conductif selon les ouvertures appliquées à la porte de la cellule cubique

Ouverture par rapport à la façade intérieure de la cellule cubique [%]	0,56	2,42	4,41	6,47
Température ambiante extérieure minimale $T_{a \text{ ext min vo}}$ [°C]	20	19	19,15	20
Température ambiante extérieure maximale $T_{a \text{ ext max vo}}$ [°C]	28,3	27	26,1	23,1
Température ambiante intérieure minimale $T_{a \text{ int min vo}}$ [°C]	21,28	18,62	19,15	19,68
Température ambiante intérieure maximale $T_{a \text{ int max vo}}$ [°C]	25,53	24,47	24,47	22,34
Irradiation solaire minimale [W.m <sup>-2</sup> ]	75,53	79,99	74,55	19,65
Irradiation solaire maximale [W.m <sup>-2</sup> ]	786,3	966,7	492,9	215,4
Flux de chaleur minimale $\phi_{vo \text{ min}}$ [W]	0	0	17,48	0
Flux de chaleur maximale $\phi_{vo \text{ max}}$ [W]	174,8	52,43	52,43	69,91

Dans ce **tableau 11**, il désigne que pour la première ouverture 0,56%, le flux de chaleur maximale est très grand ce qui engendre à une valeur de la température ambiante intérieure maximale supérieure à celle des autres ouvertures. Cette température ambiante intérieure varie entre 21,28°C et 25,53°C. C'est une large gamme de température avec un écart de 4,25°C. Dans ce cas, l'influence de l'ouverture n'est pas encore remarquable.

Pour la deuxième et troisième ouverture 2,42% et 4,41%, les valeurs maximales de flux de chaleur et de la température ambiante intérieure sont égales. Le flux de chaleur par conduction est très petit et presque le tiers de la valeur de celle de la première ouverture. Par contre, l'irradiation solaire est vraiment très grande. Cela explique qu'à partir de ce moment, ce n'est pas seulement le flux qui influence l'ambiance intérieure mais surtout l'ouverture appliquée à la porte. Cependant, l'intervalle de température est trop large avec un écart de l'ordre de 5°C.

Pour la dernière ouverture 6,47%, la valeur du flux de chaleur par rapport aux deux ouvertures précédentes est la même. A l'inverse, la variation de la température ambiante à l'intérieure de la cellule est plus rétrécie par rapport à des trois premières ouvertures. Ici, l'effet de la ventilation naturelle a un impact direct au changement de l'environnement thermique à l'intérieure de la cellule. La gamme de température ambiante intérieure varie entre 19,68°C et 22,34 avec un écart de 2,66°C. Nous constatons alors que pour cette ouverture, le confort thermique est meilleur.

Nous pouvons dire que si nous continuons à agrandir l'ouverture, l'ambiance thermique à l'intérieur de la cellule deviendra plus fiable.

### III.5 Calcul de la conductivité thermique de la couche de canopée constituée du cresson

Par l'application de la Loi de Fourier énoncée dans le paragraphe (I.6), nous pouvons calculer la valeur expérimentale de la conductivité thermique apparente moyenne  $\langle \lambda_{canopée} \rangle$  de notre couche de canopée constituée par le cresson en utilisant la relation (3) :

$$\langle \lambda_{canopée} \rangle = \frac{\langle \Phi_{calculé} \rangle \cdot e_{canopée}}{S_{canopée} \cdot \langle T_{feuille} - T_{sup\ sol} \rangle} \quad (8)$$

$\langle \lambda_{canopée} \rangle$  : conductivité thermique apparente moyenne de la couche de canopée formée par le cresson

$\langle \Phi_{calculé} \rangle$  : flux de chaleur par conduction moyenne traversant la couche de de canopée formée par le cresson

$e_{canopée}$  : épaisseur moyenne de la canopée formée par le cresson

$S_{canopée}$  : surface de la canopée constituée par le cresson

$T_{feuille}$  : température sur la feuille du cresson

$T_{sup\ sol}$  : température sur le sol végétal

$\langle T_{feuille} - T_{sup\ sol} \rangle$  : température moyenne entre la température sur la feuille du cresson et la température sur le sol végétal.

Dans notre cas, la surface de canopée  $S_{canopée}$  vaut un mètre carré.

Après calcul, les résultats obtenus sont représentés dans le **tableau 9**.

**Tableau 9** : Valeurs calculées pour les caractéristiques thermiques de la couche de canopée

$\langle \Phi_{calculé} \rangle$ (W)	$\langle T_{feuille} - T_{sup\ sol} \rangle$ (°C)	$e_{canopée}$ (m)	$\langle \lambda_{canopée} \rangle$ (W/m.K)
42,36	3,07	0,05	0,69

Cette valeur de conductivité thermique apparente  $\langle \lambda_{canopée} \rangle = 0,69 \text{ W/m.K}$  montre que la couche végétale constituée par le cresson est un isolant thermique. Si on compare cette

valeur avec celle du béton armé, elle est très faible [29]. Cette couche joue donc un rôle très important sur l'amélioration de la stabilisation de la chaleur à l'intérieure de la cellule cubique car elle est une facteur de freinage de la propagation thermique.

## **CONCLUSION**

Une étude expérimentale sur une cellule cubique à toiture végétalisée en cresson a été faite dans ce travail. C'est une estimation d'étude expérimentale. Pour cela, des comparaisons de comportement thermique entre la cellule à toiture habituelle et la cellule à toit vert ont été menées. Nous avons élargi l'étude en faisant l'analyse de l'influence des ouvertures appliquées à la porte de la cellule. La canopée de cette toiture végétalisée a été constituée de la plante cresson de fontaine. Des diverses vertus de cette plante ont été spécifiées.

Eu égard à nos dispositifs expérimentaux limités disponible dans notre laboratoire, seuls les paramètres tels que les températures, l'irradiation solaire et l'humidité relative de l'aire intérieure ont été mesurés lors de l'expérimentation. Le flux de chaleur de transfert par conduction et la conductivité thermique de la couche de canopée ont été obtenus à partir des données requises en appliquant la loi de Fourier régissant le mode de transfert de chaleur.

Il découle des résultats obtenus que la performance de la cellule à toiture végétalisée du cresson est meilleure par rapport à la cellule à toiture conventionnelle. La canopée avec le substrat peut réduire l'absorption de flux de chaleur par conduction. Elle permet de diminuer l'amplitude de la gamme de température ambiante intérieure. Pour la toiture végétalisée la gamme de température ambiante varie entre 20,74°C et 26,06°C tandis que celle de la toiture ordinaire varie entre 19,15°C et 27,13°C. L'environnement thermique intérieur de la toiture végétalisée est alors plus stable.

Concernant l'influence des ouvertures appliquées à la porte de cellule, il a été constaté que seule la quatrième ouverture 6,47% de la façade intérieure de la cellule cubique a eu un impact direct à l'ambiance thermique intérieure. C'est dans ce cas que nous avons eu l'ambiance thermique intérieure neutre.

Ce travail a montré aussi que du fait de la faible conductivité thermique de la canopée constituée par le cresson, elle joue le rôle d'isolant thermique.

La perspective de ce travail est très large. A titre d'exemple, nous pouvons étudier un système de pompage solaire d'eau usée pour arroser la toiture végétalisée.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] J.Y. Charbonneau, "Confort thermique à l'intérieur d'un établissement". 2004.
- [2] E. Kant, "Ambiance et confort thermique," pp. 34–66.
- [3] C. Farrell, R. E. Mitchell, C. Szota, J. P. Rayner, and N. S. G. Williams, "Green roofs for hot and dry climates: Interacting effects of plant water use, succulence and substrate", *Ecol. Eng.*, vol. 49, pp. 270–276, 2012.
- [4] Seth S. Moody, David J. Sailor, "Development and application of a building energy performance metric for green roof systems", *Energy Build.*, vol. 60, pp. 262–269, 2013.
- [5] Renato M. Lazzarin, Francesco Castellotti, Filippo Busato, "Experimental measurements and numerical modelling of a green roof," vol. 37, pp. 1260–1267, 2005.
- [6] I. Jaffal and S. Ouldboukhitine, "A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance," vol. 43, 2012.
- [7] MORAU Dominiquea, RAKOTONDRAMIMARANA Hery Tiana, RANAIVOARISOA Tojo Fanomezana, ANDRIAMAMONJY Ando Ludovic, "2013 ISES Solar World Congress Thermal behavior of green roof in reunion island: contribution towards a net zero building," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1908–1921, 2014.
- [8] Har'el Agra, Ariel Solodar, Omar Bawab, Shay Levy, Gyongyver J. Kadas, Leon Blaustein, Noam Greenbaum "Comparing grey water versus tap water and coal ash versus perlite on growth of two plant species on green roofs," *Sci. Total Environ.*, vol. 633, pp. 1272–1279, 2018.
- [9] Susana Saiz Alcazar, Francesca Olivieri, Javier Neila "Green roofs: Experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean–continental climates," *UCLIM-00223*, vol. 14, pp. 1–14, 2016.
- [10] Piero Bevilacqua, Domenico Mazzeo, Roberto Bruno, Natale Arcuri "Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area," *Energy Build.*, vol. 122, pp. 63–79, 2016.
- [11] Corey M.G. Carpenter, Dimitar Todorov, Charles T. Driscoll, Mario Montesdeoca, "Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and

- monitoring observations,” *Environ. Pollut.*, vol. 9, pp. 1–9, 2016.
- [12] M.A. Chagolla-Aranda, E. Simáa, J. Xamána, G. Álvarez, I. Hernández-Pérez, E. Téllez-Velázquez, “Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico,” *Energy Build.*, vol. 154, pp. 232–243, 2017.
- [13] D. Chemisana, Chr. Lamnatou, “Photovoltaic-green roofs : An experimental evaluation of system performance,” *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 246–256, 2014.
- [14] A. Vila, G. Pérez, C. Solé, A. I. Fernández, and L. F. Cabeza, “Use of rubber crumbs as drainage layer in experimental green roofs,” *Build. Environ.*, vol. 48, pp. 101–106, 2012.
- [15] Dominique MORAU, Teddy LIBELLE, François GARDE, “Performance Evaluation of Green Roof for Thermal Protection of Buildings In Reunion Island,” *Energy Procedia*, vol. 14, no. 262, pp. 1008–1016, 2012.
- [16] "Impacts avérés de la végétalisation des toitures", RHONALPENERGIE, vol. 18
- [17] E. & Young, "ETUDE POUR LA DEFINITION D'UNE DEMARCHE DE DEVELOPPEMENT DES TOITURES VEGETALISEES", Direction de l'Environnement et de l'Energie Nice Côte d'Azur. 2009.
- [18] ERANTHIS, Atelier V.MOINEAU, BUISSON "Aménagement et eaux pluviales Préconisations relatives aux toitures végétalisées", GRAND LYON. 2011.
- [19] M. Hardy, "LES TOITS VERTS AU QUÉBEC : POUR UNE URBANISATION ÉQUILIBRÉE", MAÎTRISE E. 2014.
- [20] Brigitte Speck, Ursula & Christian Fotsch, "Cresson de fontaine", EGK Sainement assuré
- [21] P. Julve, "Nasturtium officinale R.Br.", Tela Botanica. 2017.
- [22] H. HICHEM, "ETUDE CRITIQUE DES DIFFERENTS MOYENS DE DEPOLLUTION ET DE PREVENTION CONTRE LA POLLUTION DES EAUX ET DES SOLS," vol. 265. 2012.
- [23] L. Matern, C. Millot, V. Moriniaux, M. Tabeaud, L. Matern, C. Millot, V. Moriniaux, and M. Tabeaud, "La culture du cresson en Essonne : valorisation d ' un produit , reconnaissance d'un terroir", HAL Id: ha. 2017.
- [24] Coumadin, Warfilone et Sintrom, "CRESSON VERTUS". Charmi GAC. 2010.

- [25] ANDRIAMAMONJY Ando Ludovic, "Algorithme d'automatisation de la methode d'analyse de sensibilite globale des modeles des systemes complexes application sur un modele simulant une toiture vegetalisee". 2012.
- [26] R. M. Rockson, "Modelisation et analyse de sensibilite globale d'un toit vert". 2014.
- [27] RAFIEFERANTSOA Mika Harisetry, "Mise au point d'un code de calcul por l'étude du comportement thermique des différentes composantes d'une toiture végétalisée", vol. 71. 2011.
- [28] N. TAHIROU, "Batiment bioclimatique: etude de l'impact thermique d'une toiture verte et reduction des ponts thermiques". 2011.
- [29] J. Brau, "Conduction." pp. 53–92, 2006.
- [30] "Arduino test de la sonde DS18B20". 2014.
- [31] "RT 2012 - Règles Th-U (fascicule 2/5) (septembre 2015): Matériaux, CSTB.," septembre 2015. 2017.
- [32] "Étalonnage d'un thermomètre," Canadian Food Inspection agency. 2007 .
- [33] P.Kohl, "Étude d'un thermocouple, ENCPB. 2006".

## **WEBOGRAPHIES**

[34] [https://www.google.com/search?q=photo+de+cresson+de+fontaine&client=firefox-b&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwje3sGOwozdAhUOyx0KHS17ARgQ\\_AUICigB&biw=1173&bih=820#imgrc=OPBmvNwqzDVPUM](https://www.google.com/search?q=photo+de+cresson+de+fontaine&client=firefox-b&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwje3sGOwozdAhUOyx0KHS17ARgQ_AUICigB&biw=1173&bih=820#imgrc=OPBmvNwqzDVPUM) visité le 27/08/2018

[35] <http://automacile.fr/ds18b20-capteur-de-temperature-one-wire-arduino/> visité le 27/08/2018

[36] <https://letmeknow.fr/blog/2016/08/10/le-capteur-de-temperature-ds18b20/> visité le 27/08/2018

[37] <https://www.carnetdumaker.net/articles/mesurer-une-temperature-avec-un-capteur-1-wire-ds18b20-et-une-carte-arduino-genuino/> visité le 27/08/2018

[38] <https://www.google.com/maps/place/Universit%C3%A9+d'Antananarivo/@18.9169144,47.5614194,925m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x21f07d88e75a7eb7:0xbc08a3c2b44c43c!8m2!3d-18.914032!4d47.5518117> visité le 27/08/2018

[39] <https://github.com/squoilin/GPExp> visité le 22/08/2018

**Titre : ÉTUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE CELLULE CUBIQUE À TOITURE VÉGÉTALISÉE DE CRESSON ARROSÉ D'EAUX USÉES**

*Résumé*

*La toiture végétalisée est une des options pour l'atteinte du confort thermique au niveau de l'habitat. Le choix des espèces végétales à planter sur la toiture est alors cruciale. Ce travail a pour objectif de mener une étude expérimentale du comportement thermique d'une cellule cubique à toiture végétalisée en cresson de fontaine dont la vertu épuratoire d'eau usée servant à l'arrosage de la canopée n'est plus à démontrer. Pour ce faire, les paramètres physiques tels que les températures des divers composants de la cellule, l'humidité relative de l'air intérieur de la pièce étudiée et l'irradiation solaire reçue par cette cellule ont été mesurés afin de comparer les performances respectives de la toiture conventionnelle en béton et de la toiture végétalisée. Ensuite, l'influence de l'aire de l'ouverture appliquée à la porte de la cellule cubique a également été analysée. Il découle des résultats obtenus que l'amplitude de fluctuation de la température de l'air intérieur de la cellule à toit ordinaire est plus large que celle de la cellule à toiture végétalisée. En outre, il existe une valeur optimale de l'ouverture appliquée sur les façades de la cellule pour assurer une meilleure ambiance intérieure. La faible valeur de la conductivité thermique globale de la canopée déterminée indirectement avec les résultats des mesures de températures a permis de dégager que cette couche joue un rôle d'isolant thermique. Une extension de ce travail pourra être l'étude de la performance énergétique d'un système de pompage d'eaux usées domestiques produites au sein ou aux alentours mêmes de l'habitat considéré.*

**Mots clés :** Toiture végétalisée, confort thermique, cresson de fontaine, conduction thermique

*Abstract*

*The green roof is one of the options for achieving thermal comfort at the habitat level. The choice of plant species to plant on the roof is crucial. This work aims to carry out an experimental study of the thermal behavior of a cubic cell with green roof in watercress whose purifying water used for watering the canopy is well established. To do this, the physical parameters such as the temperatures of the various components of the cell, the relative humidity of the indoor air of the studied room and the solar irradiation received by this cell were measured in order to compare the respective performances of the cell, the conventional concrete roof and green roof. Then, the influence of the area of the aperture applied to the door of the cubic cell was also analyzed. It follows from the results obtained that the fluctuation amplitude of the indoor air temperature of the ordinary roof cell is wider than that of the green roof cell. In addition, there is an optimum value of the aperture applied to the facades of the cell to ensure a better indoor atmosphere. The low value of the overall thermal conductivity of the canopy determined indirectly with the results of the temperature measurements revealed that this layer plays a role of thermal insulation. An extension of this work could be the study of the energy performance of a pumping system for domestic wastewater produced in or around the actual habitat.*

**Keywords:** Green roof, thermal comfort, watercress, Thermal conduction

**Encadreur :**

RAKOTONDAMIARANA Hery Tiana  
Maître de Conférences, HDR

**Impétrant :**

ANDRIATSITOHAINA RABESAHALA Ives Abel  
Fetra  
Adresse: Lot IIO 4 Anjanahary  
101 Antananarivo  
Téléphone : +26134 72 197 59  
E-mail: andriatsitohainaabel@gmail.com