

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE CONSTANTINE 1, FRERES MENTOURI  
FACULTE DES SCIENCES EXACTES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre 19/DS/2024  
N° de série 04/phy/2024

## THESE

Présentée pour Obtenir le diplôme de  
DOCTORAT en SCIENCE en Physique  
Spécialité : Energies renouvelables

## THEME

# INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS LE BÂTIMENT

Par

Souad Saadi ep Boubekri

Soutenue le : 26 /05 /2024

Devant le jury :

<b>Président :</b>	Mahfoud DJEZZAR	<i>Pr</i>	Université Constantine 1, frères Mentouri
<b>Rapporteur :</b>	Abla CHAKER	<i>Pr</i>	Université Constantine 1, frères Mentouri
<b>Examineurs :</b>	Boudjemaa AGOUDJIL	<i>Pr</i>	Université Hadj Lakhdar Batna 1
	Belkacem DRAOUI	<i>Pr</i>	Université Tahri Mohamed Bechar
	Sofiane TOUAHRI	<i>MCA</i>	Université Constantine 1, frères Mentouri
	Zakaria HADDAD	<i>MCA</i>	Université Mohamed Boudiaf M'sila

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à*

*La mémoire de mon grand-père le grand El Hadj Ali*

*La mémoire de mon père*

*La meilleure des mamans ma mère qui a toujours été symbole  
de générosité et de sacrifice*

*Mon mari Dr Mahmoud Boubekri*

*Ma fille la plus belle des roses*

*Mes frères et sœurs*

*Mes neveux et nièces*

*Mes beaux frères et belles sœurs*

*Toute personne qui lit ce manuscrit*

## **Remerciements**

*Tout d'abord, Je remercie Dieu le tout puissant de m' avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme la présente thèse.*

*Ce travail a été mené au laboratoire de Physique Energétique à l'Université des frères Mentouri, Constantine I, sous la direction de*

***Madame Abla Chaker,***

*Professeur au département de Physique. Je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour son aide précieuse, ses conseils et sa patience. Je salue également son dévouement pour son travail.*

*Je remercie vivement Monsieur **Mahfoud Djeddar,** Professeur à l'Université des frères Mentouri, Constantine I, pour m' avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.*

*J' exprime mes sincères remerciements à Monsieur **Draoui Belkacem,** Professeur à l' université de Tahri Mohamed de Béchar pour avoir accepté de faire partie du jury et d' évaluer ce travail.*

*J' exprime toute ma gratitude à Monsieur **Boudjemaa Agoudgil,** Professeur à l' Université Batna I d' avoir accepté de participer au jury de soutenance.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Haddad Zakaria,** Maître de conférences à l' Université de M' sila, pour son intérêt à ce travail et pour m' avoir fait l' honneur d' accepter de faire partie de ce jury de thèse.*

*Mes remerciements particuliers à mon mari Monsieur **Mahmoud**  
**Boubekri**, Maître de conférences à l'Ecole Normale Supérieure Assia  
Djebbar de Constantine, pour ses conseils, ses directives et sa patience.*

**Symboles**

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
A	Section normale à la direction (OY) dans la cheminée solaire	m <sup>2</sup>
A <sub>etr</sub>	Surface de l'orifice d'entrée de la cheminée solaire	m <sup>2</sup>
A <sub>srt</sub>	Surface de l'orifice de sortie de la cheminée solaire	m <sup>2</sup>
a	Azimut du soleil	degré
C <sub>ent</sub> , C <sub>srt</sub>	Coefficients de perte aux orifices d'entrée et de sortie respectivement	-
cp	Chaleur spécifique	J/kg. K
D	Epaisseur de la cheminée solaire	m
d	Diamètre hydraulique de la cheminée solaire	m
D <sub>h</sub>	Diamètre hydraulique des canaux	m
dt	Pas de temps	s
E	Puissance électrique générée par les cellules PV	W/m <sup>2</sup>
e	Epaisseur	m
F <sub>ij</sub>	Facteur de forme entre deux surfaces i et j	-
G	Rayonnement solaire global	W/m <sup>2</sup>
g	Accélération de la pesanteur	m/s <sup>2</sup>
H	Hauteur d'une paroi	m
H <sub>1</sub>	Hauteur du canal	m
H <sub>2</sub>	Largeur du canal	m
H <sub>0</sub>	Distance verticale entre les deux orifices de la cheminée solaire	m
h <sub>c</sub>	Coefficient de transfert thermique par conduction	W/m <sup>2</sup> . K
h <sub>v</sub>	Coefficient de transfert thermique par convection	W/m <sup>2</sup> . K
h <sub>r</sub>	Coefficient de transfert thermique par rayonnement	W/m <sup>2</sup> . K
L	Hauteur de la cheminée solaire	m
L <sub>r</sub>	Profondeur de la chambre	m
m	Masse	kg
ṁ	Débit massique de l'air injecté à partir des canaux	kg/s
n	Nombre des parois internes	-
S	Surface	m <sup>2</sup>
STS	Surface de la tache solaire	m <sup>2</sup>

## Nomenclature

T	Température	K
T <sub>am</sub>	Températures ambiante	K
T <sub>ciel</sub>	Température du ciel	K
T <sub>sol</sub>	Température du sol	K
T <sub>ent</sub>	Température d'entrée de l'air dans la cheminée solaire	K
T <sub>sor</sub>	Température de sortie de l'air de la cheminée solaire	K
V	Vitesse d'écoulement du fluide	m/s
V <sub>vent</sub>	vitesse du vent	m/s
W <sub>1</sub>	Largeur de la première zone de la chambre	m
W <sub>2</sub>	Largeur de la deuxième zone de la chambre	m

### Symboles grecques

Symbole	Désignation	Unité
$\alpha$	Coefficient d'absorption	-
$\beta$	Inclinaison d'une surface	degré
$\bar{\beta}$	Coefficient d'expansion thermique	1/ K
$\tau_w$	Coefficient de transmission de la vitre	-
$\sigma$	Constante de Stephane-Boltzman	W/m <sup>2</sup> . K <sup>4</sup>
$\varepsilon$	Emissivité	-
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m. K
$\rho$	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\eta_o$	Rendement électrique sous les conditions standards (1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C) pris égal à 14%	-
$\Phi$	Flux thermique	W

### Indices

Symboles	désignation
ab	Absorbeur
ai	Air de la chambre
ai <sub>1</sub>	Air de la zone 1 de la chambre
ai <sub>2</sub>	Air de la zone 2 de la chambre

## Nomenclature

c	Canaux
e, i	Externe, interne
e	Est
f <sub>1</sub>	Air compris entre la vitre PV et l'absorbeur
f <sub>2</sub>	Air compris entre la vitre l'absorbeur et la face externe du mur sud
f <sub>3</sub>	Air dans les canaux
i	Interne
m	Mur
n	Nord
o	Ouest
pv	Cellules photovoltaïques
t	Toit
v	Vitre
vv	Vitre placée devant la vitre PV dans le cas 2

### Abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>désignation</b>
B-C	Barra-Costantini
CLO	Courte longueur d'onde
GLO	Grande longueur d'onde
TS	Tâche solaire

Introduction générale.....1

**Chapitre I - les systèmes de chauffage solaire intégrés au bâtiment**

I.1. Introduction..... 3

I.2. Contextes énergétique et environnemental mondiaux..... 3

    I.2.1. Consommation énergétique sur le plan mondial..... 4

    I.2.2. Consommation énergétique sur le plan national..... 9

    I.2.3. Energies renouvelables et transition énergétique..... 12

I.3. Les systèmes solaires thermiques de chauffage..... 14

    I.3.1. Le mur Trombe..... 15

        - Mur Trombe zigzag..... 16

        - Mur Trombe composite..... 17

        - Mur Trombe à eau..... 18

        - Mur Trombe transparent..... 19

        - Mur Trombe à matériaux de changement de phase..... 19

        - Mur Trombe fluidisé..... 20

    I.3.2. Les serres bioclimatiques..... 21

    I.3.3. Le système Barra-Costantini (B-C)..... 21

        - Description du système et principe de fonctionnement..... 22

    I.3.4. Les systèmes de chauffage par rayonnement..... 23

        I.3.4.1. Plancher chauffant hydraulique..... 24

        I.3.4.2. Plafond chauffant..... 26

        I.3.4.3. Mur chauffant..... 27

    I.3.5. Système solaire combiné..... 28

    I.3.6. Radiateurs basse température..... 29

I.4. Les systèmes solaires photovoltaïques et hybrides PV/T de chauffage..... 30

    I.4.1. Les systèmes PV/T semi-transparents et opaques intégrés aux façades..... 32

    I.4.2. Les systèmes PV/T semi-transparents et opaques intégrés aux toits..... 33

**Chapitre II – Etat de l’art des stratégies solaires passives**

II.1. Introduction.....	35
II.2. Analyse du confort thermique.....	35
II.2.1. Définition du confort thermique.....	35
II.2.2. Paramètres influençant le confort thermique.....	36
- La température de l’air.....	36
- La température radiante moyenne.....	37
- La vitesse de l’air.....	37
- L’humidité.....	37
- La vêtue.....	38
- Le taux métabolique.....	38
II.2.3. Modèles du confort thermique.....	39
II.2.3.1. Les modèles analytiques.....	39
- Le modèle de Fanger.....	39
- Le modèle à deux nœuds de Gagge.....	40
II.2.3.2. Approche adaptative.....	41
II. 3. La réglementation thermique algérienne.....	41
II.4. Les stratégies solaires passives.....	43
II.4.1. La fenêtre.....	43
II.4.1.1. La fenêtre idéale.....	44
II.4.1.2. Les différents types de vitrages.....	45
II.4.1.2.a. Vitrage à propriétés statiques.....	46
- Vitrage anti-rélecteur.....	47
- Vitrage autonettoyant.....	47
- Vitrage à faible émissivité.....	47
- Vitrage électrothermique.....	48
- Vitrage photothermique.....	49
II.4.1.2.b. Vitrage à propriétés dynamiques.....	49
- Vitrage à cristaux liquides.....	49
- Vitrage à particules suspendues.....	50
- Vitrage électrochrome.....	51
- Vitrage gazochrome.....	52

## Table des matières

---

- Vitrage photochrome.....	53
- Vitrage thermochrome.....	54
- Vitrage thermotrope.....	54
- Vitrage avec matériaux à changement de phase.....	55
- Vitrage à matériaux isolants transparents/translucides.....	56
- Vitrage à gaz isolant.....	56
- Vitrage sous vide.....	57
- Vitrage photovoltaïque.....	58
II.4.1.3. Tache solaire et comportement thermique du bâtiment.....	59
- En rapport avec la température et le confort thermique.....	59
- En rapport avec la consommation d'énergie et l'inertie thermique.....	60
II.4.2. Les matériaux de construction.....	60
II.4.2.1. Le toit.....	61
- Toits en maçonnerie.....	61
- Toits ventilés et micro-ventilés.....	61
- Toits voûtés et en dôme.....	62
- Toits verts.....	62
- Systèmes d'isolations des toits.....	63
- Toitures photovoltaïques.....	63
II.4.2.2. Les parois.....	64
- Mur en béton léger.....	64
- Mur avec stockage de chaleur latente.....	64
II.4.2.3. L'isolation.....	65
II.4.3. La géométrie du bâtiment.....	65

## **Chapitre III – Etude mathématique**

III.1. Introduction.....	70
III.2. Théorie de la modélisation.....	70
III.2.1. Définition.....	70

## Table des matières

---

III.2.2. Composante d'un modèle mathématique.....	70
III.2.3. Approches de la modélisation.....	71
- L'approche amont.....	71
- L'approche inverse.....	71
III.2.4. Etapes de la modélisation.....	71
- Etablissement du modèle.....	72
- Validation du modèle.....	72
III.3. Niveaux de discrétisation spatiale du bâtiment.....	72
- Le modèle des codes de champs.....	72
- Le modèle monozone.....	72
- Le modèle multizone.....	73
- Le modèle zonal.....	73
III.4. Modélisation de la tache solaire.....	74
- Modèle de Serre et Trombe.....	75
- Modèle de Bouia.....	76
- Modèle de Boukhris.....	78
- Modèle de Rodler.....	80
- Modèle de Tittlein.....	81
- Modèle de Domus.....	83
- Modèle de Trombe et Mavroulakis.....	84
III. 5. Modélisation de l'enveloppe.....	86
III.5.1. Echange thermique par conduction.....	86
III.5.2. Echange par convection.....	87
III.5.2.1. La convection intérieure.....	88
III.5.2.1.a. Coefficients de convection constants.....	88
III.5.2.1.b. Coefficients de convection variables.....	89
III.5.2. 2. La convection extérieure.....	92
- Expériences sur plaques plates.....	92
- Expériences à grande échelle.....	93
- Expériences en soufflerie.....	93
- Les méthodes numériques.....	93
III.5.3.Echange par rayonnement.....	94
III.5.3.1. Sollicitations thermiques de courtes longueurs d'ondes.....	94
- Echanges de courtes longueurs d'ondes avec l'extérieur.....	95

## Table des matières

---

- Echanges de courtes longueurs d'ondes avec l'intérieur.....	95
III.5.3.2. Sollicitations thermiques de grandes longueurs d'ondes.....	96
- Echanges de grandes longueurs d'ondes avec l'intérieur.....	96
- Echanges de grandes longueurs d'ondes avec l'extérieur.....	96
III.5.4. Bilan thermique de l'enveloppe.....	97
III.6. Modélisation du système Barra-Costantini.....	99
III.6.1. Description du système.....	99
III.6.2. Mise en équations du système Barra-Costantini.....	102
- Air de la cellule.....	102
- La vitre.....	103
- La cheminée solaire.....	104
- L'absorbeur.....	104
- L'air dans les canaux.....	105
- Les canaux.....	105
III.7. Computation numérique.....	106
- Discrétisation et résolution.....	106
- Paramètres d'entrée.....	107
- Exécution.....	111
- Validation expérimentale des résultats.....	111

## **Chapitre IV – Résultats et interprétations**

IV.1. Introduction.....	114
IV. 2. Etude de l'enveloppe du bâtiment.....	114
IV.2.1. Puissance solaire gagnée par la face externe de l'enveloppe du bâtiment.....	114
IV.2. 2. Températures de l'air.....	116
IV.2. 3. Orientation du bâtiment.....	118
IV.3. Etude de la tache solaire.....	121
IV.3.1. Etude paramétrique.....	122
- Evolution temporelle de la STS avec les dimensions de la fenêtre.....	122
- Localisation de la STS.....	126

## Table des matières

---

- Evolution de la surface de la tache solaire en fonction de l'orientation de la fenêtre.....	133
- Variation temporelle du pourcentage de distribution de la STS sur les parois et sur le plancher.....	138
- Temps de séjour de la TS sur les parois et sur le plancher.....	143
- Variation de la surface moyenne de la TS et son taux de croissance sur les parois et sur le plancher avec les dimensions de la fenêtre.....	144
- Effet des dimensions de la fenêtre sur la puissance solaire gagnée.....	145
- Variation de la puissance solaire moyenne gagnée par les parois et par le plancher et son taux de croissance avec les dimensions de la fenêtre.....	149
- Impact de la prise en compte de la tache solaire sur le comportement thermique d'une chambre .....	152
<b>IV.4. Etude du système Barra-Costantini.....</b>	<b>155</b>
IV.4.1. La vitre.....	155
IV.4.2. L'absorbeur.....	158
IV.4.3. Température de l'air dans la cheminée solaire.....	160
IV.4.4. Température de l'air à la sortie de la cheminée solaire.....	162
IV.4.5. Température de l'air dans la chambre.....	163
IV.4.6. Température de l'air dans les canaux.....	164
IV.4.7. Vitesse de l'air dans la cheminée solaire.....	165
IV.4.8. Vitesse de l'air à la sortie de la cheminée solaire.....	168
IV.4.9. Rendement électrique.....	169
IV.4.10. La puissance électrique.....	170
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>171</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>174</b>

## **Introduction générale**

## Introduction générale

---

Le développement industriel et agricole, associés à l'explosion démographique, ont conduit à l'exploitation massive des sources d'énergie conventionnelle non renouvelables et polluantes.

D'après les statistiques fournies par l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation mondiale en énergies fossiles a atteint 81.92% en 2018. En outre, il est connu que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, dont 66% est lié au CO<sub>2</sub> d'origine anthropique, est étroitement liée à la consommation des énergies fossiles [1].

Ainsi, les défis énergétique et environnemental mondiaux, à l'heure actuelle, sont des défis de taille. D'un côté, l'homme doit répondre à ses besoins énergétiques de plus en plus croissants pour maintenir voire même améliorer son niveau de vie actuel, et d'un autre côté, il doit préserver un environnement sain pour les générations futures.

La raréfaction des ressources d'énergie fossiles non renouvelables à l'échelle humaine et l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère obligent l'homme à transiter vers un système énergétique plus durable et plus écologique basé sur les énergies renouvelables spécialement l'énergie solaire qui apparait au premier rang.

Pour répondre à ces préoccupations énergétiques et environnementales, une attention particulière est portée au secteur résidentiel qui lui seul est responsable de 21% de la consommation en énergies fossiles et de 6% de la quantité de CO<sub>2</sub> émise à l'échelle mondiale en 2018 [1].

Dans ce contexte, le travail mené dans le cadre de cette thèse porte sur l'amélioration des performances énergétiques du système de chauffage solaire Barra-Costantini [2]. Bien que ce système soit thermiquement plus performant que le mur Trombe-Michel [3], il n'a pas été largement étudié et n'a connu aucune amélioration depuis sa proposition vers la fin des années 1970. Nous nous proposons d'intervenir sur ce point et ce par l'utilisation de la technologie des vitres PV semi transparentes, relativement nouvelle qui peut s'avérer être une solution fortement intéressante. La vitre simple responsable de la création de l'effet de serre d'une part et qui permet de limiter les pertes thermiques d'autre part, est remplacée dans la première configuration par une vitre PV vitrée semi-transparente (B-C avec vitre PV vitrée) et la seconde configuration par une vitre PV (PV/B-C).

Les modifications apportées au système B-C classique permettent de passer d'un système de chauffage thermique à un autre hybride photovoltaïque-thermique capable de produire de l'électricité et de chauffer les locaux simultanément.

Pour chaque système (B-C classique, B-C avec vitre PV vitrée et PV/B-C), un bilan est dressé, en se basant sur le premier principe de la thermodynamique, pour décrire le comportement énergétique de chacun des éléments les constituant. La méthode

## Introduction générale

---

itérative de Gauss-Seidel a été choisie pour la résolution des systèmes d'équations obtenus.

Par ailleurs, les apports internes, qui représentent l'énergie solaire transmise à travers les surfaces vitrées et gagnée par la face interne de l'enveloppe du bâtiment, et qui représentent un élément essentiel dans la modélisation thermique des bâtiments ont été estimés. Pour cela, le calcul de la surface de la tache solaire et la définition de sa localisation sur les faces internes des parois et sur le plancher a été entrepris.

La simulation du comportement de la tache solaire a été effectuée sur trois journées successives, du 19 au 23, des mois de Mars (printemps), Juin (été) et Décembre (hiver), de l'année 2017. Tandis que celles des systèmes B-C (B-C classique, B-C avec vitre PV vitrée et PV/B-C) sont entreprises seulement pour les journées du 19 au 23 du mois Décembre.

Les paramètres d'entrée des codes de calcul incluent les données climatiques du site de Ksar Challala (rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent) ainsi que les paramètres de configurations des systèmes étudiés. Les conditions initiales introduites dans le code calcul sont prises égales à la température ambiante tandis que les conditions aux limites sont de types mixtes.

Le manuscrit est structuré en quatre chapitres, une introduction et une conclusion, générales.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des états énergétique et environnemental actuels et nationaux. Le lecteur y trouvera également un état de l'art des différents systèmes de chauffage solaire disponibles à l'heure actuelle.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude des différentes stratégies solaires passives proposées pour réduire la consommation énergétique du bâtiment. Une étude détaillée du confort thermique a aussi été incluse.

La modélisation mathématique constitue le contenu du troisième chapitre. Les différents modèles mathématiques de la littérature proposés pour calculer la surface de la tache solaire et définir sa localisation ont été recensés. La modélisation de l'enveloppe du bâtiment et celle des systèmes Barra-Costantini étudiés font également partie de ce chapitre. Pour valider nos résultats de simulation, une confrontation avec ceux expérimentaux issus de la littérature a été faite.

Les différents résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

---

## **CHAPITRE I**

---

# **Les systèmes solaires de chauffage intégrés au bâtiment**

**I.1. Introduction**

L'énergie solaire, générée par le soleil, est convertie en énergie thermique ou électrique grâce à des technologies nouvelles [4]. Cette énergie, considérée comme étant la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, possède un potentiel énergétique gigantesque incomparable avec toute autre source d'énergie [4, 5]. C'est une énergie verte qui, contrairement aux combustibles fossiles, ne nuit pas à l'environnement par l'émission des gaz à effet de serre [4]. De plus, elle est peu chère et possède un faible coût de maintenance comparativement aux sources d'énergies conventionnelles. Néanmoins, son plus grand inconvénient réside dans son caractère intermittent qui nécessite un stockage de l'énergie dans des batteries, ce qui augmente le coût réel de cette technologie [6].

L'énergie solaire atteint la surface du bâtiment sous forme de [5] :

- Rayonnement direct en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire et parvenant en lignes droites et par temps clair.
- Rayonnement diffus qui résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques et de sa réfraction par le sol et parvenant de toute la voûte céleste.

L'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage des bâtiments est une application très ancienne. De nos jours, elle représente une solution intéressante pour contribuer à l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique des bâtiments réduisant ainsi la consommation des combustibles fossiles et les impacts environnementaux des systèmes conventionnels.

L'exploitation de l'énergie solaire dans le bâtiment se fait en utilisant trois techniques, le solaire thermique, le solaire photovoltaïque et le solaire hybride photovoltaïque/thermique.

Dans le premier chapitre, les contextes énergétique et environnemental actuels sur les plans mondial et national sont présentés. Le lecteur y trouvera également les différents systèmes solaires utilisés pour le chauffage de l'habitat.

**I.2. Contextes énergétique et environnemental mondiaux**

Le mot « énergie », « energia » en latin, est d'origine grec et signifie force en action. C'est en fait, une quantité parfaitement définie qui caractérise la capacité d'un système à produire du travail [7].

Avant d'arriver au consommateur, l'énergie passe par un long processus de transformation appelé chaîne énergétique, dont la première maille est l'énergie primaire, première forme d'énergie directement disponible dans la nature, telle que l'énergie solaire. L'énergie primaire subit des transformations pour produire une énergie secondaire, appelée vecteur d'énergie, plus facile à stocker, à transporter et à utiliser, à l'exemple de l'électricité. L'énergie secondaire est acheminée vers les foyers de consommation où l'énergie finale reçue est transformée en énergie utile [8].

De nos jours, les défis énergétique et environnemental à l'échelle mondiale sont de taille. En effet, l'homme doit répondre à ses besoins énergétiques de plus en plus croissants imposés par les exigences du niveau de vie actuelle, tout en préservant un environnement sain pour les futures générations. En outre, la raréfaction des ressources d'énergie fossiles non renouvelables et leur responsabilité dans l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, obligent l'homme à exploiter des sources d'énergies renouvelables.

**I.2.1. Consommation énergétique sur le plan mondial**

L'explosion démographique et l'amélioration du niveau de vie, ont conduit à une croissance significative de la production mondiale en énergie primaire qui est passée de 6098 Mtep en 1971 à 14282 Mtep en 2018. Cette production mondiale en énergie primaire est basée principalement sur les énergies fossiles, avec un pourcentage de 82.3 % en 2018. Le pétrole, avec près de 31.6% de la production en énergie primaire, se trouve en tête de liste des sources d'énergie les plus exploitées à l'échelle mondiale (figures I.1 et I.2) [1].

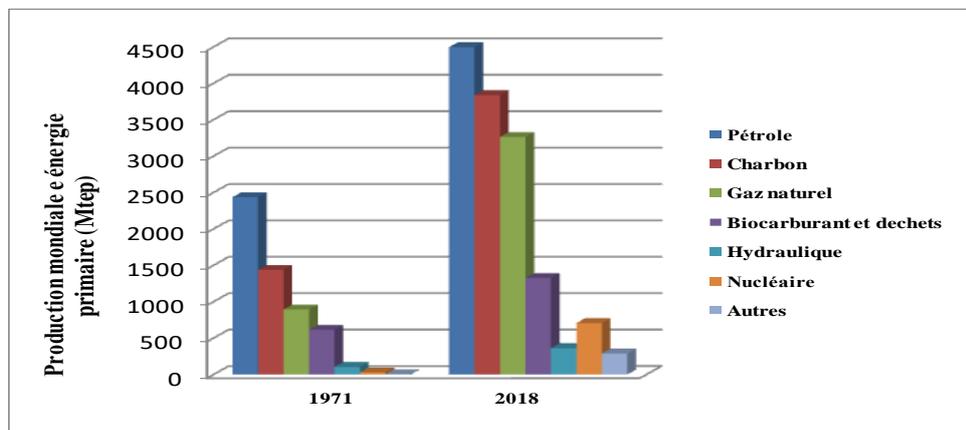
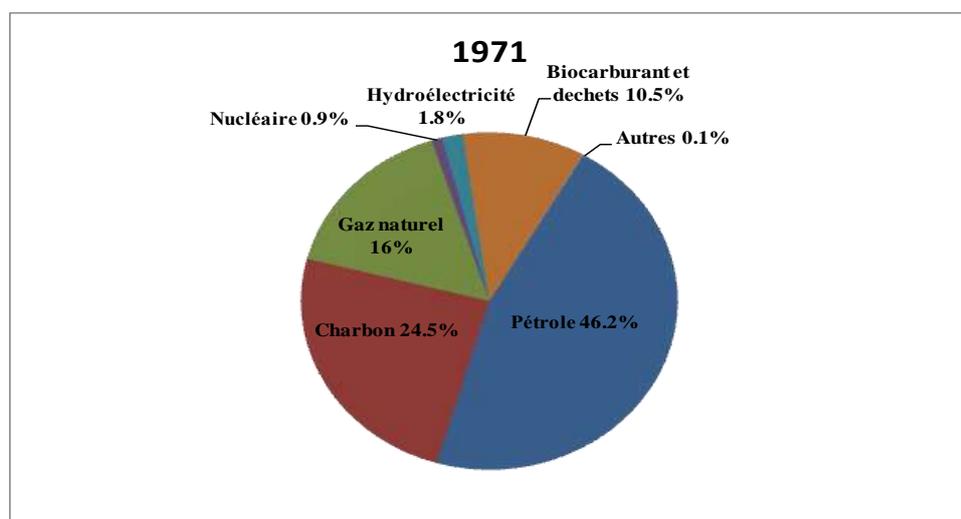


Figure I.1. Production mondiale en énergie primaire [1]



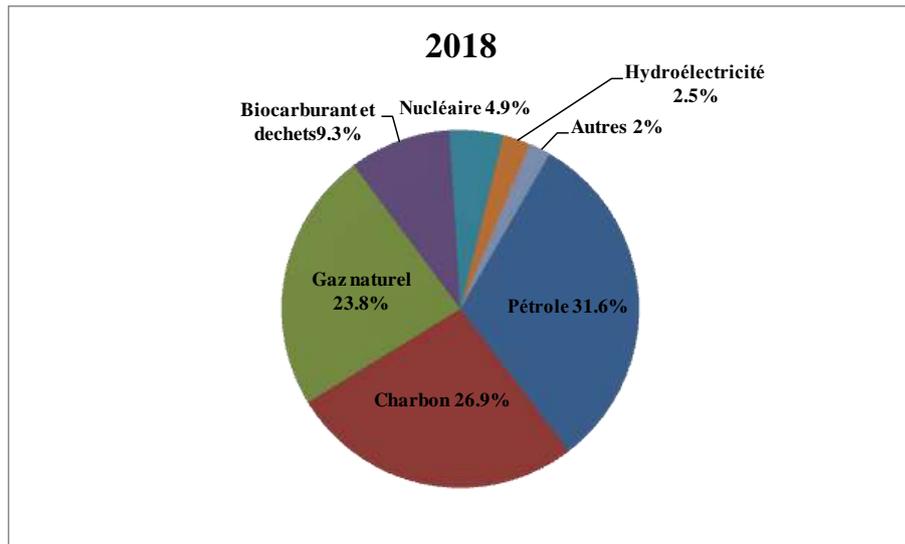


Figure I.2. Répartition de la production mondiale en énergie primaire [1]

L'analyse des statistiques relatives à la consommation mondiale finale d'énergie primaire, illustrées par les figures I.3 et I.4, révèle clairement la dépendance énergétique mondiale aux énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon). La part de cette dernière en 2018 a été de 81.92%. Même constat en 1990, avec près de 82.3% de la consommation d'énergie d'origine fossile.

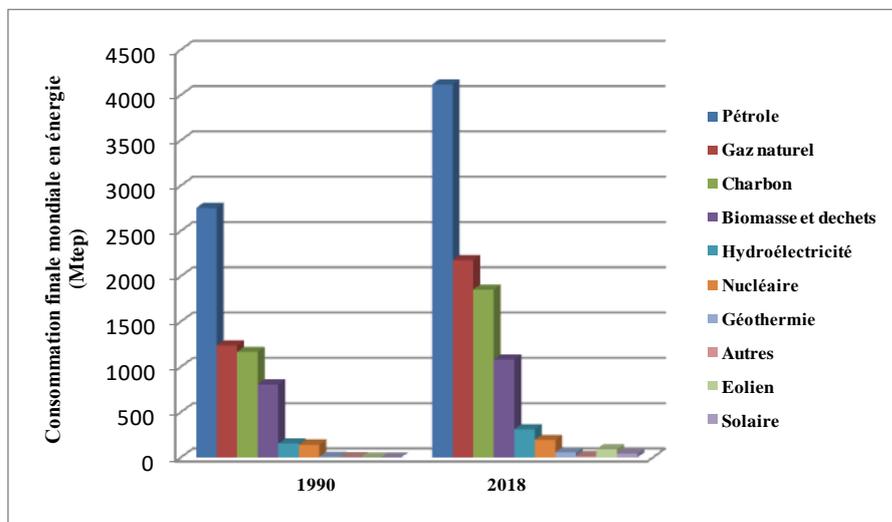


Figure I.3. Consommation finale mondiale en énergie [1]

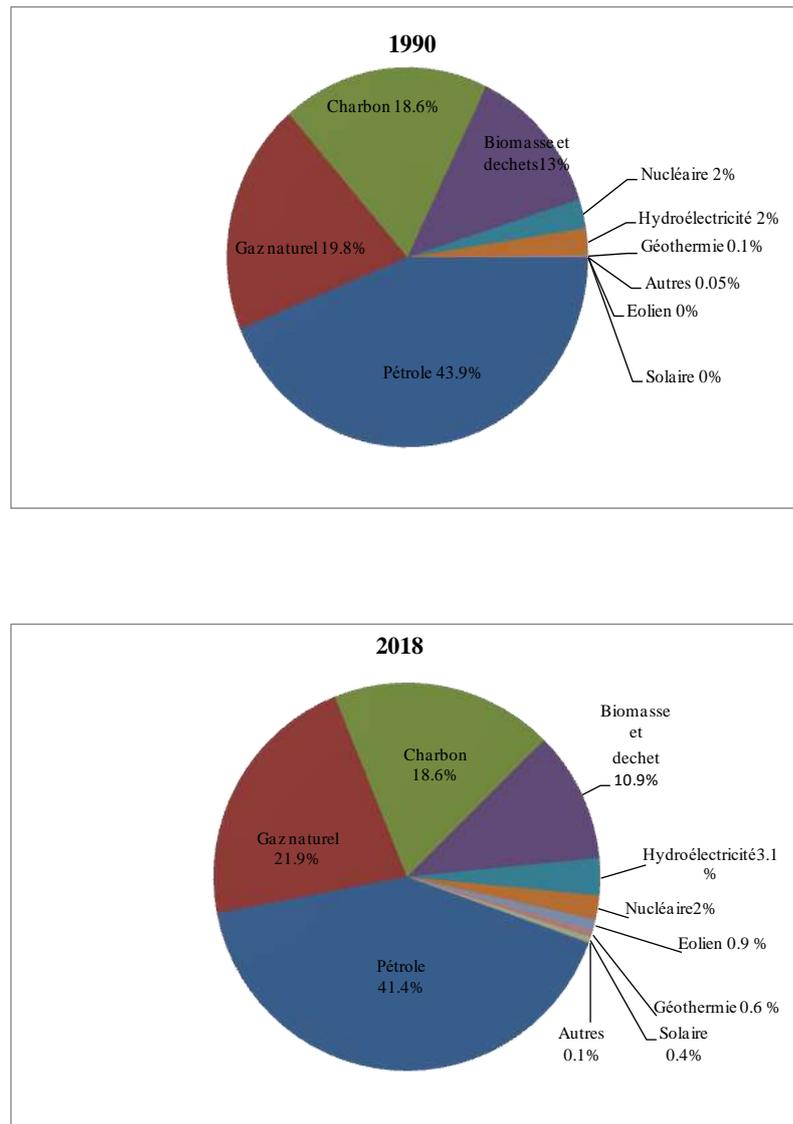


Figure I.4. Pourcentage de la consommation finale en énergie dans le monde

Selon l'Agence Internationale de l'énergie, la réduction de l'activité économique mondiale et de la mobilité au cours du premier trimestre de 2020, à cause de la pandémie du coronavirus, a conduit à une baisse de 3.8% de la demande mondiale d'énergie par rapport au premier trimestre de 2019. Une telle décroissance n'a pas été observée au cours des 70 dernières années [9]. Néanmoins, ce phénomène n'est pas le premier de son genre. En effet, il a été également observé en 1918, suite à la pandémie de la grippe espagnole, durant la deuxième guerre mondiale entre 1939-1945, à cause des deux chocs pétroliers en 1973 et 1979 et suite à la crise financière mondiale en 2008.

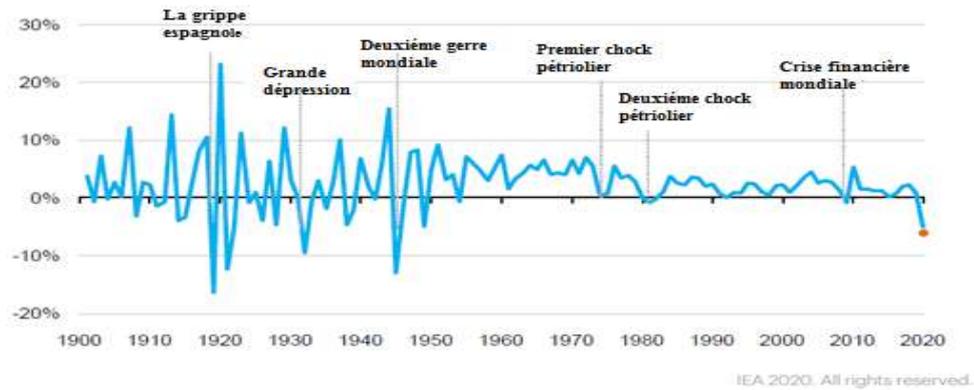


Figure I. 5. Taux de variation de la demande mondiale d'énergie primaire entre 1900 et 2020 [9]

Toujours, selon l'Agence Internationale de l'Energie, le secteur le plus consommateur en énergie finale est celui de l'industrie. De plus cette consommation est passée de 1803 Mtep en 1971 à 2839 Mtep en 2018, ce qui représente une part de 29 % de la production mondiale en énergie finale (figure I.7) [1]. Le secteur résidentiel a consommé 2109 Mtep en 2018, soit un pourcentage de 21%, ce qui représente une part importante de la consommation mondiale en énergie finale.

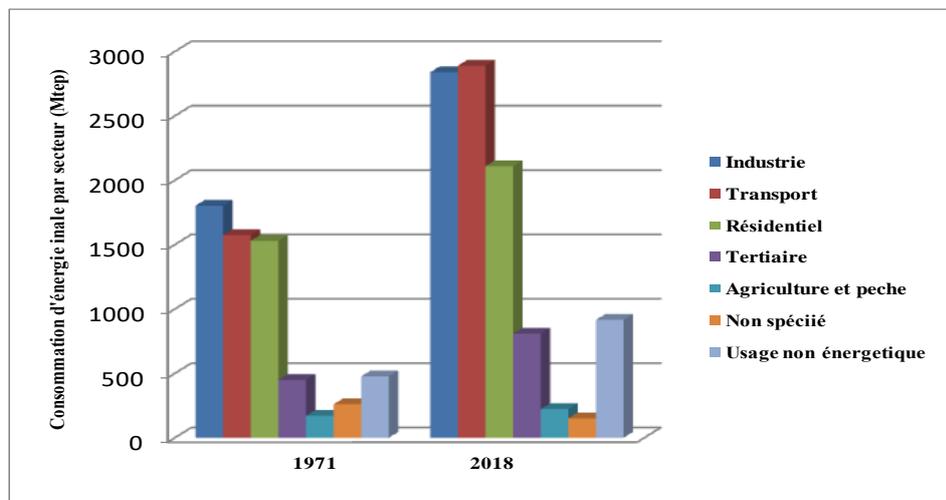
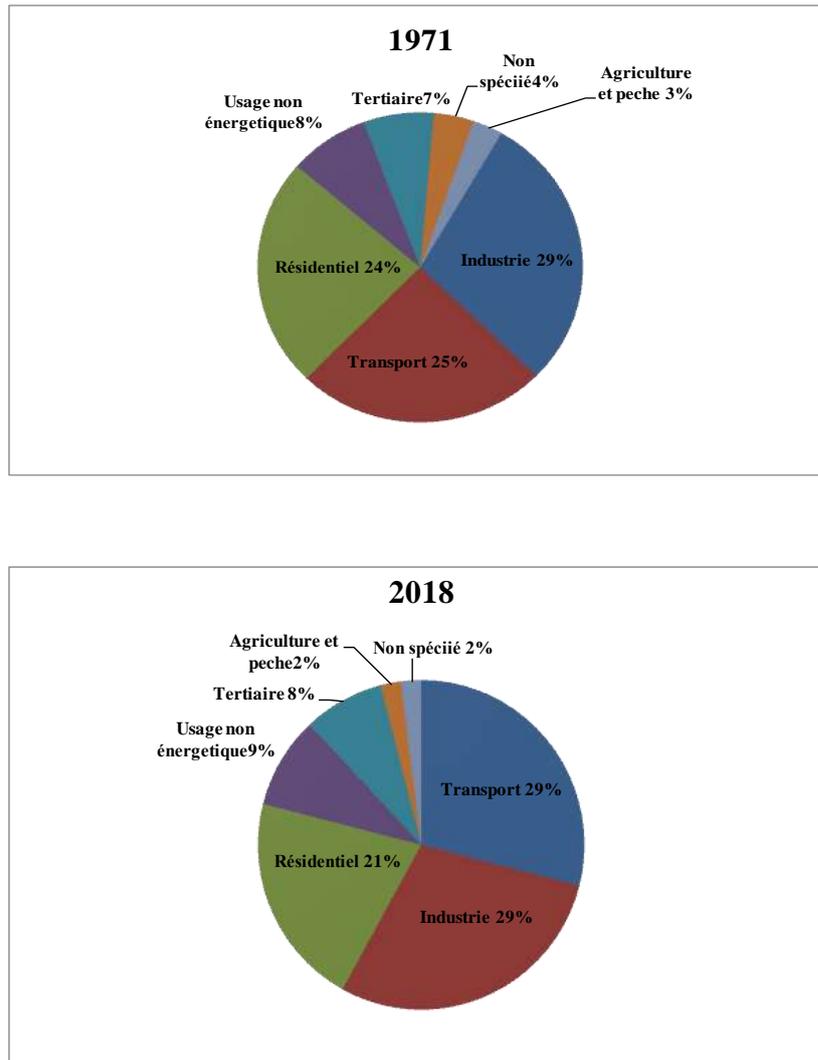


Figure I.6. Consommation d'énergie finale par secteur [1]



**Figure I.7. Répartition de la consommation finale par secteur dans le monde**

Il est universellement admis que l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre est étroitement liée à la consommation d'énergie fossile. Les quantités de CO<sub>2</sub> émises à l'échelle mondiale, par habitant sont passées de 3.9t CO<sub>2</sub>/habitant en 1990 à 4.4t CO<sub>2</sub>/habitant en 2018. Quant 'à l'Algérie, cette quantité de l'ordre de 2t CO<sub>2</sub>/habitant en 1990 a atteint 3.3 t CO<sub>2</sub>/habitant en 2018 [1].

Les statistiques fournies par l'Agence Internationale de l'énergie, révèlent que le charbon est la source d'énergie la plus émettrice de CO<sub>2</sub> avec une quantité de 14766 Mt en 2018, devançant largement le pétrole avec 11415 Mt et le gaz naturel [1] pour lequel 7104 Mt d'émission de CO<sub>2</sub> ont été enregistrées. Il apparait également que les quantités de CO<sub>2</sub> émises en 2018, ont nettement augmenté par rapport à l'année 1990.

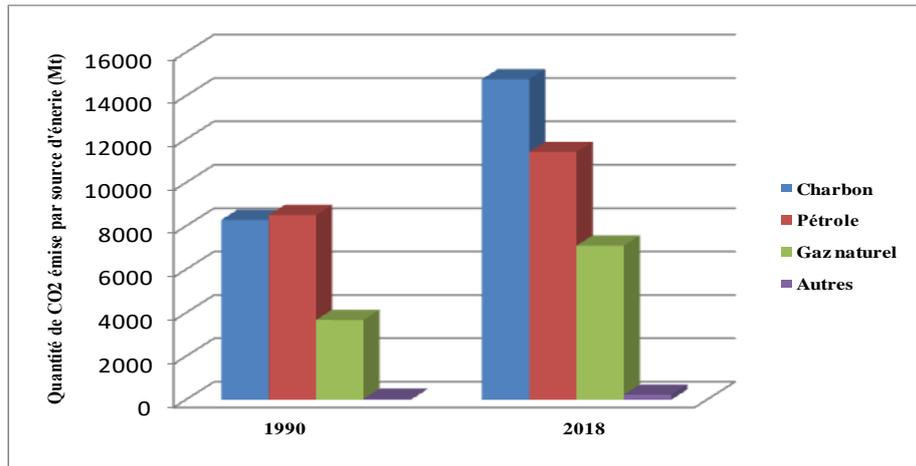


Figure I.8. Emissions de CO<sub>2</sub> par source d'énergie [1]

L'Agence Internationale de l'Energie a également fait le constat que le secteur de la production d'électricité et de chaleur est le plus grand émetteur de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale, avec 13978 Mt en 2018, soit 41.7% de l'émission totale (figure I.9). Quant' au secteur résidentiel, il est responsable de 6% de la quantité émise de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale, la quantité de CO<sub>2</sub> dégagée est passée de 1832 Mt en 1990 à 2033 Mt en 2018 [1].

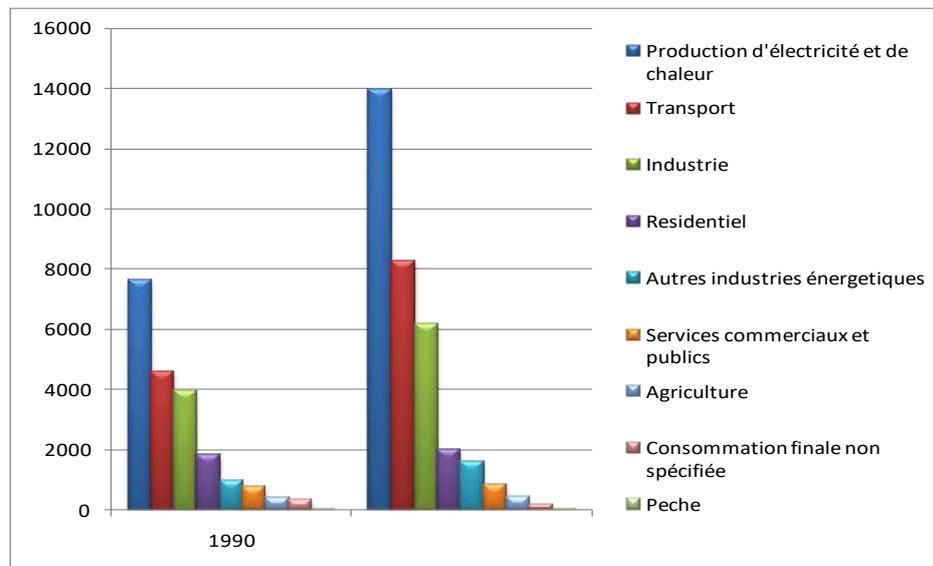


Figure I. 9. Emissions de CO<sub>2</sub> par secteur [1]

### I.2.2. Consommation énergétique sur le plan national

L'Algérie, pays très riche en matière d'énergie, a été classée en 2019, le 16<sup>ème</sup> producteur de pétrole, le 10<sup>ème</sup> producteur de gaz naturel et le 7<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel au monde. La consommation finale totale en Algérie est basée essentiellement sur les énergies fossiles (92%). Elle est passée de 12.7 Mtep en 1990 à 42.3 Mtep en 2018, soit 1 tep par habitant [1]. La consommation finale totale par source en Algérie, pour les années 1990 et 2018 est

illustrée par la figure I.10 [1]. Il peut être constaté que le gaz naturel est la source d'énergie la plus consommée en 2018, avec une quantité de 19135 Mt, soit 45.15% de la consommation finale totale.

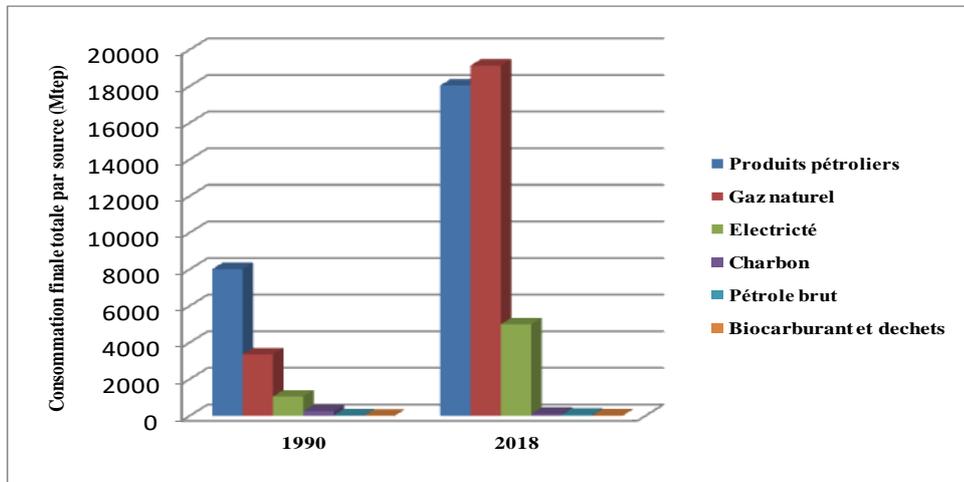


Figure I.10. Consommation finale totale par source en Algérie [1]

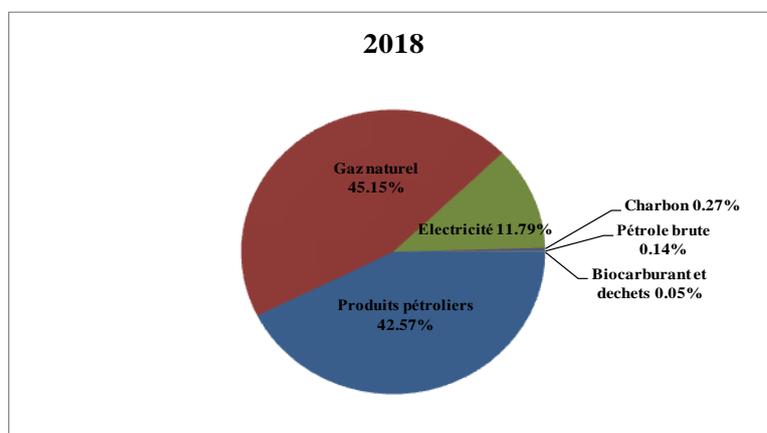
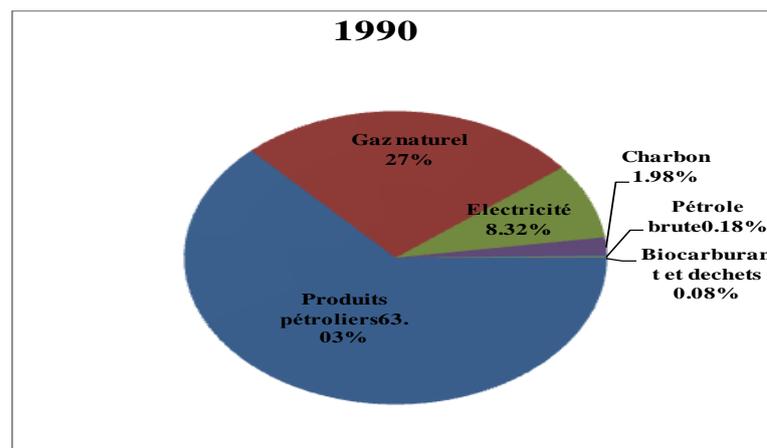


Figure I.11. Part de la consommation finale totale par source en Algérie [1]

La consommation finale énergétique en Algérie (figures I.12 et I.13), est dominée par les secteurs résidentiel et agricole, avec une consommation en 2019, de 23 529 ktep soit une part de 46,7%, suivi par le transport avec une consommation de 15405 ktep (30,6%) puis les secteurs de l'industrie et du BTP, avec près de 11424 ktep d'énergie consommée, soit une fraction de 22,7% du total.

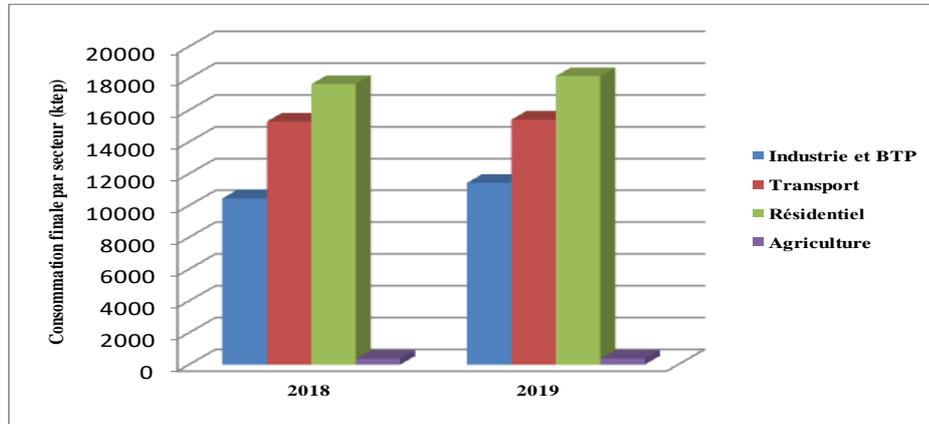
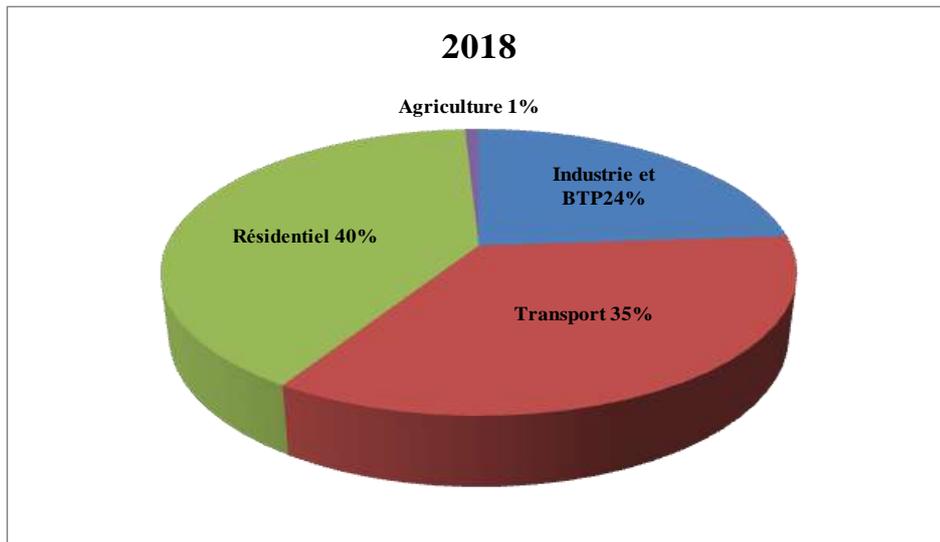


Figure I.12. Consommation finale par secteur en Algérie [10]



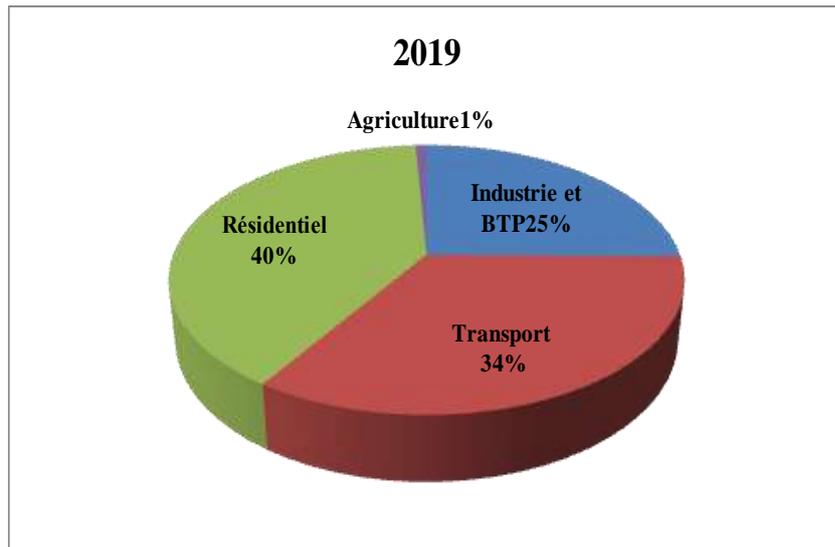


Figure I.13. Part de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité [10]

### I.2.3. Energies renouvelables et transition énergétique

Le modèle énergétique mondial actuel est basé sur l'exploitation massive des hydrocarbures. Il repose sur un système énergétique carboné et énergivore construit à l'avènement des révolutions industrielles successives. Ce modèle se trouve confronté à deux contraintes principales :

- L'épuisement des hydrocarbures considérés comme non renouvelables à l'échelle humaine (figures I.1 et I.3).

- Le réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre d'origine anthropique (le CO<sub>2</sub> d'origine anthropique est responsable à lui seul de 66% de l'effet de serre) (figure I.8) [11].

Les caractéristiques contraignantes de ce système nous obligent à transiter vers un système énergétique plus durable et plus écologique où les énergies renouvelables prennent une place dominante [11].

La « *transition énergétique* » terme utilisé pour la première fois, au début des années 1980, représente le passage du modèle énergétique conventionnel qui repose principalement sur les énergies fossiles, vers un nouveau modèle énergétique basé majoritairement sur les énergies non carbonées, telles que les énergies renouvelables.

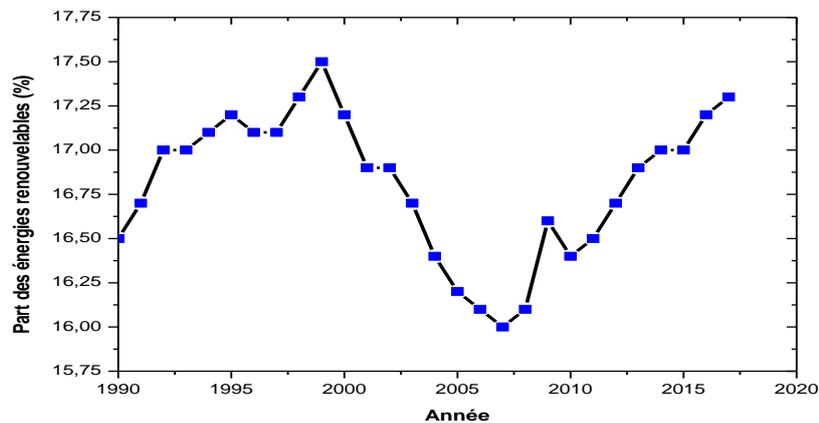
L'interaction complexe entre les marchés, les technologies, les institutions, les politiques publiques ainsi que les comportements individuels, techniques et socioculturelles a attribué à la transition énergétique un caractère multidimensionnel et multiforme [11].

Parmi les objectifs de la transition énergétique on trouve :

- La réduction des émissions des gaz à effet de serre. L'accord de Paris de 2015, vise la limitation de la hausse moyenne de la température mondiale à un niveau situé bien en-dessous de 2°C pour ce siècle, par rapport à celui de l'époque préindustrielle. Pour atteindre cet objectif d'ici 2050, une réduction d'au moins 471 Gt de CO<sub>2</sub> doit être faite [12].

- L'augmentation de la part des énergies renouvelables projetée serait, de 15% en 2015 à deux tiers d'ici 2050, dans la production totale d'énergie primaire. Elle pourrait, selon l'Agence Internationale des Energies Renouvelables (IRENA), atteindre jusqu'à 60% et même plus dans la consommation totale d'énergie finale de nombreux pays (67%, en Chine, 70 % pour l'Union européenne, les deux tiers ou plus, pour l'Inde et les Etats-Unis) [12].

Cependant les données fournies par l'Agence Internationale de l'Energie [1], révèlent que la part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale, entre 1990 et 2017 n'est passée que de 16.5 % à 17.3 % (figure I.14), ce qui reste loin des objectifs fixés dans l'accord de Paris de 2015



**Figure I.14. Part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale entre 1990 et 2017 [1]**

L'Algérie, qui possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, a lancé son premier programme pour le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, le 3 février 2011. La stratégie adoptée repose sur la mise en valeur des énergies renouvelables pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain [13, 14].

Ce programme consiste à atteindre entre 2011 et 2030, près de 40% de la capacité de production d'électricité d'origine renouvelable, (37% issus du solaire et 3% de l'éolien), soit 22000 MW dont 12000 MW seront dédiés pour satisfaire la demande nationale en électricité et 10000 MW seront dédiés à l'exportation (figure I.15) [13, 14].

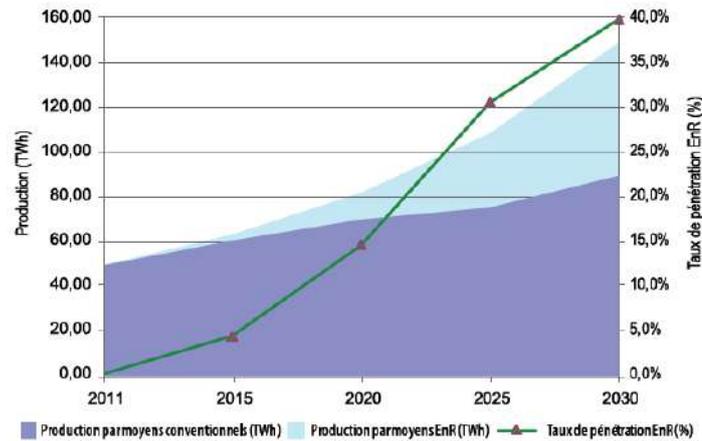


Figure I.15. Pénétration des énergies renouvelables dans la production énergétique nationale [13]

Le programme de l'efficacité énergétique consiste quant' à lui, à produire les mêmes services, en utilisant le moins d'énergie possible. Dans le secteur du bâtiment, il est envisagé d'économiser plus de 30 Mtep entre 2011 et 2030. Ce programme est basé sur les points suivants [13, 14] :

- L'isolation thermique des bâtiments qui permettra de réduire jusqu'à 40% de l'énergie consommée par le chauffage et la climatisation, ce qui correspond à 7 Mtep.
- Le développement du chauffe-eau solaire qui doit se substituer progressivement au chauffe-eau traditionnel, d'où une économie d'énergie de 2 Mtep.
- La généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie (LBC) avec lesquelles on pourra économiser jusqu'à 20 Mtep.
- L'introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public considéré comme fortement énergivore. Dans ce sens, les lampes à mercure doivent être remplacées par des lampes à sodium et 1 Mtep pourra ainsi être économisée.
- L'introduction de la climatisation solaire, spécialement dans le sud du pays où la demande de climatisation coïncide avec la disponibilité du rayonnement solaire.

### I.3. Les systèmes solaires thermiques de chauffage

Les systèmes de chauffage solaire intégrés aux bâtiments permettent de réduire considérablement la consommation des énergies fossiles et leur impact environnemental. Il existe divers types de systèmes de chauffage solaire dont l'élément de base est l'appareil de captation. Ce dernier peut être, soit un capteur thermique à air ou à eau, soit un capteur PV ou encore un capteur hybride PV/T. Les capteurs PV et PV/T peuvent être classés en capteurs totalement opaques, semi transparents ou bien transparents, vis-à-vis du rayonnement solaire.

Une fois captée, l'énergie solaire peut être directement utilisée pour le chauffage des locaux et pour produire l'eau chaude sanitaire, ou encore, être stockée dans un ballon, un mur en maçonnerie lourde, en matériaux à changement de phase, en batterie...etc. pour être exploitée ultérieurement.

Les systèmes solaires de chauffage, reposent essentiellement sur les techniques du solaire thermique et photovoltaïque/thermique (figure I.16).

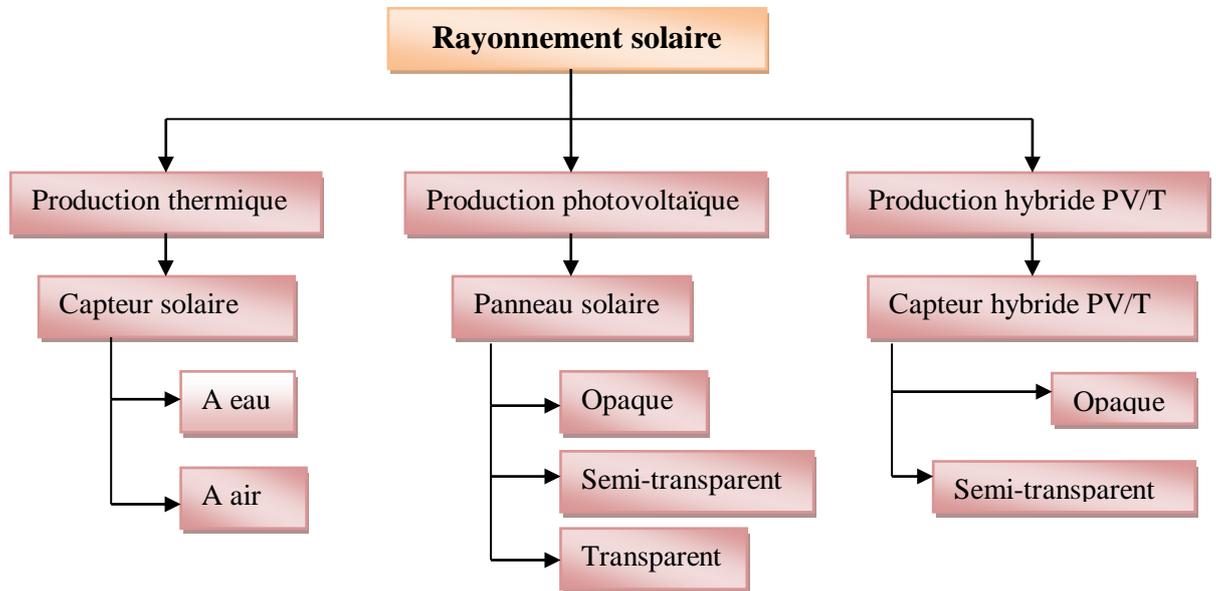


Figure I. 16. Les différentes techniques solaires utilisées pour le chauffage de l'habitat

Sans être exhaustif, les différents systèmes solaires de chauffage, recensés dans la littérature sont :

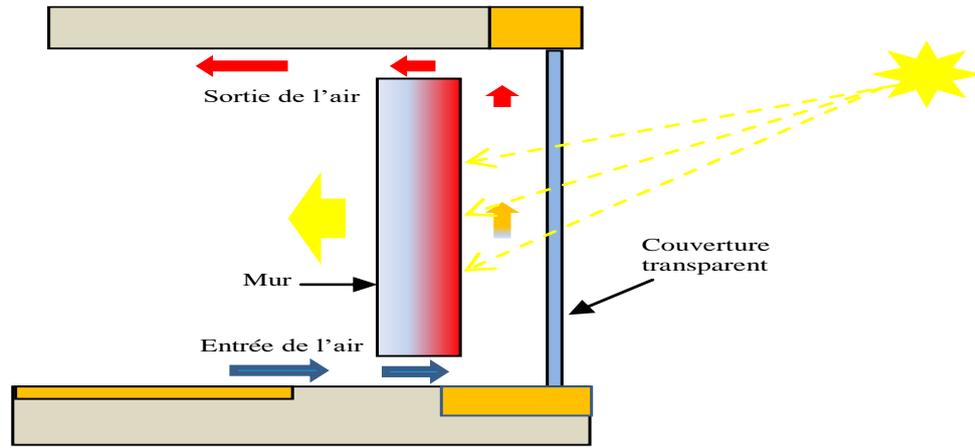
### I.3.1. Le mur Trombe

Le mur Trombe classique, appelé aussi standard, a été inventé en 1881 par l'ingénieur américain Edward Morse, puis popularisé par la suite, par l'ingénieur français Félix Trombe et l'architecte français Jacques Michel [15].

C'est un mur massif fabriqué avec un matériau à haute capacité de stockage thermique (brique, béton, pierre, adobe [15] etc.) et muni de deux orifices, bas et haut, tel qu'illustré par la figure I.17. Une vitre (simple ou double vitrages) est placée devant le mur à une distance variant entre 3 cm et 6 cm [15], formant ainsi un canal pour la circulation de l'air, tout en créant un effet de serre. La face externe du mur est peinte en noir, afin d'augmenter la fraction d'énergie solaire absorbée par le mur et transmise par la vitre.

L'air de la chambre à basse température sort de l'orifice bas et entre dans le canal pour être chauffé par le mur, il entre ensuite en mode de circulation par thermosiphon pour atteindre l'orifice haut avant de retourner dans le bâtiment. Une autre fraction d'énergie est transmise à travers le mur Trombe vers le bâtiment par conduction.

Le mur Trombe ou mur capteur est une technologie verte qui permet le chauffage, le rafraîchissement et la ventilation des locaux tout en apportant une économie d'énergie de 30% [15].



(a)



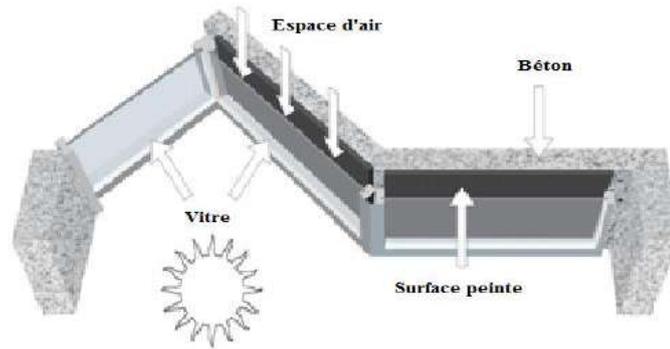
(b)

Figure I.17. Le mur Trombe (a) Principe de fonctionnement [16] (b) Maison Trombe à Odeillo.

Depuis son invention, le mur Trombe a connu sur plusieurs années, de nombreuses améliorations que nous exposerons dans la partie qui suit.

- **Mur Trombe zigzag**

Ce type de mur (figure I.18) comprend trois parois formant un zigzag, la première paroi fenêtrée est orientée vers le sud, tandis que les deux autres forment entre elles un angle en forme de V. Le mur Trombe zigzag permet de réduire l'excès des gains thermiques et réduit l'éblouissement durant les journées chaudes [15].



(a)



(b)

Figure I. 18. (a) Schéma d'un mur Trombe zigzag (b) Un projet en Caroline du Nord avec un mur solaire en zigzag [15]

- **Mur Trombe composite**

Les pertes thermiques durant les périodes froides [17] et les apports de chaleur indésirables par temps chaud sont les principaux inconvénients du mur Trombe classique [15]. Pour contourner ces problèmes, le mur Trombe composite, dont la configuration diffère du premier par l'intégration d'un mur stockeur devant le mur isolé (figure I. 19) est proposé. La couverture transparente transmet une fraction importante de l'énergie solaire incidente au mur stockeur qui, d'une part va chauffer, par convection, l'air qui circule par thermosiphon entre les deux murs et d'autre part va stocker la chaleur pour la restituer ultérieurement. Durant l'hiver ou lors des périodes mal ensoleillées, les ouvertures du mur Trombe composite sont fermées, d'où la diminution des pertes thermiques. Il est à noter que le mur stockeur possède une haute résistance thermique [17].

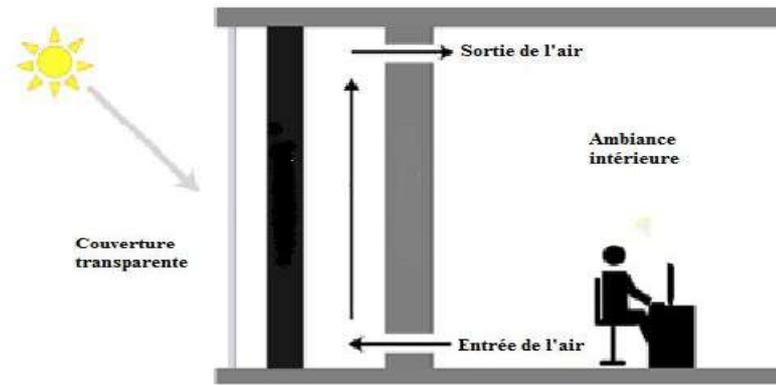


Figure I. 19. Mur Trombe composite [17]

- **Mur Trombe à eau**

Ce mur qui fonctionne selon le même principe que le mur Trombe classique, diffère néanmoins de celui-ci, par l'utilisation de récipients métalliques remplis d'eau de telle façon à former un mur qui remplace le mur en maçonnerie lourde (figure I. 20). Dans ce système la surface du mur composée de récipients est noircie et vitrée tandis que l'autre surface peut être soit en contact direct avec l'espace de vie, soit séparée de celle-ci par une fine couche de béton qui joue le rôle d'isolant (la capacité calorifique de l'eau étant plus élevée, que celles des autres matériaux de construction (brique, béton, adobe, pierre lui donne la capacité de stocker plus de chaleur) [15, 18].

L'eau, dont la température n'augmente pas aussi haut que celle de la maçonnerie lourde, permet de réduire les pertes thermiques par réflexion à travers le vitrage [15]. L'eau distribue la chaleur par convection et le mur Trombe à eau transfère la chaleur dans la chambre par rayonnement. Ainsi, le transfert thermique vers l'espace intérieur à chauffer se fait plus rapidement avec le mur Trombe à eau comparativement au mur Trombe classique [15]. Dans les climats rigoureux et froids, la couche de verre doit être isolée pour réduire les pertes thermiques de la paroi chaude vers l'extérieur [15].

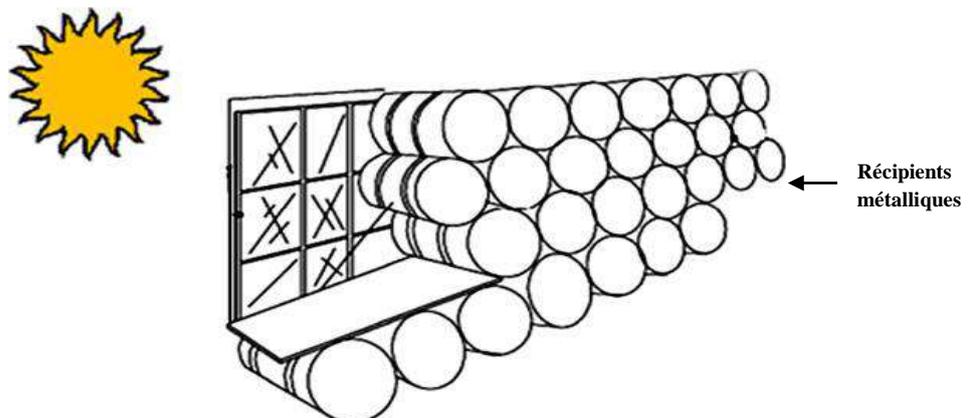


Figure I. 20. Mur Trombe à eau [15]

- **Mur Trombe transparent**

Le mur Trombe transparent ou “transwall”, est un mur modulaire à eau. Il est construit sur un cadre métallique qui contient un réservoir d’eau construit à partir de parois en verre et d’une plaque semi transparente positionnée entre elles (figure I. 21). Cette plaque absorbe les 4/5 de l’énergie solaire et transmet le 1/5 restant à l’intérieur [15].

Ce type de système passif fonctionne simultanément comme un système à gains direct et indirect. De plus il est caractérisé par son aspect esthétique qui permet d’offrir un accès visuel à l’intérieur du bâtiment [15]. Selon J. K. Nayak [20], le transwall est utile lorsqu’un transfert de chaleur immédiat est requis à l’exemple des écoles, des bureaux et des établissements commerciaux où la charge de chauffage diurne est importante. Pour augmenter la viscosité de l’eau et empêcher la croissance de micro-organismes, des agents gélifiants et bi-inhibiteurs doivent être ajoutés à l’eau [15].

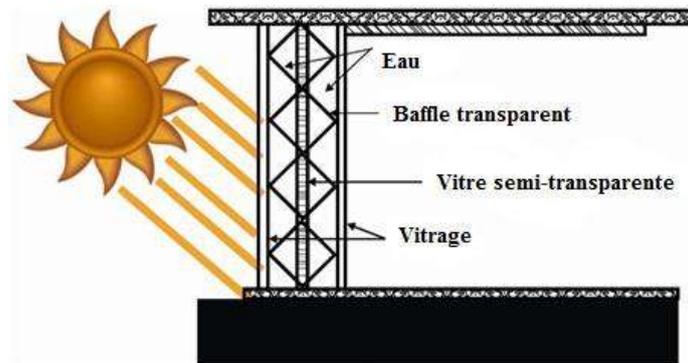


Figure I. 21. Mur Trombe transparent [15]

- **Mur Trombe à matériaux de changement de phase**

Le poids d’un mur Trombe classique qui augmente la charge du bâtiment, a toujours été considérée comme un problème par les ingénieurs de structure [15]. Afin de pallier à cet inconvénient, l’idée a été d’utiliser des matériaux à changement de phase dans le mur, ce qui permettra de stocker plus d’énergie dans un volume plus réduit. Selon une étude numérique menée par Bourdeau [15], il est possible de remplacer 15 cm de béton par 3.5 cm de MCP, tout en assurant les mêmes performances.

Rappelons que les matériaux à changement de phase (MCP), peuvent stocker la chaleur latente lors du processus de fusion/solidification, tout en conservant une température constante. Ces matériaux fondent en absorbant de la chaleur, qu’ils vont restituer lors du processus de solidification, quand la température environnante est plus basse [21].

L’histoire de l’utilisation des MCP est très ancienne. En effet, la glace a été utilisée au moyen âge, vers les années 1200, en Iran, comme moyen de stockage d’énergie thermique pour

refroidir les aliments. En 1949, l'ingénieur hongroise Maria Telkes a conçu une maison solaire à Boston, avec un système de chauffage qui fonctionne avec les MCP [22].

Dans le tableau I.1, une comparaison entre les caractéristiques du béton, des sels hydratés et de la cire de paraffine est présentée.

Caractéristiques du mur solaire	Béton	Les sels hydratés	La cire de paraffine
Température de la chambre (°C)	15-25	18-22	15-23
Variation de la température dans la masse de la paroi pendant les heures de nuit (°C)	1-3	4-6	3-7
Variation de la température dans la masse de la paroi pendant les heures de jour (°C)	7-15	10-18	10-22
Épaisseur du mur stockeur (cm)	20	8	5

Tableau I. 1. Caractéristiques du béton, des sels hydratés et de la cire de paraffine [15]

- **Mur Trombe fluidisé**

L'espace entre le mur en béton et la vitre est, à la différence un mur Trombe classique, rempli par un fluide à haute absorptivité et à faible densité. Pour empêcher les particules fluidisées de pénétrer dans la chambre, deux filtres sont placés en bas et en haut du canal d'air. Un ventilateur est mis en bas du canal pour déplacer l'air chaud dans la chambre (figure I. 22).

Une étude basée sur la théorie et l'expérience a été menée par des chercheurs turcs pour comparer les performances des deux murs. Les résultats ont indiqué que le mur Trombe fluidisé est beaucoup plus efficace que le mur Trombe classique du fait que le fluide caloporteur est en contact direct avec les particules fluidisées [15].

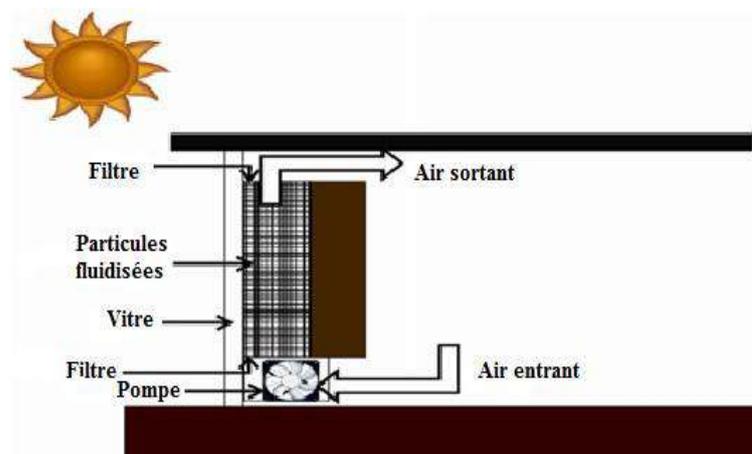


Figure I. 22. Mur Trombe fluidisé [15]

### 1.3.2. Les serres bioclimatiques

Une serre bioclimatique ou solarium est une technologie passive utilisée pour le contrôle des conditions thermiques et hygrothermiques à l'intérieur du bâtiment, afin d'améliorer le confort et de réduire la consommation d'énergie [21].

Un solarium est fabriqué soit en matière vitrée ou opaque, selon la latitude et les exigences de température. Le mur nord de la serre qui la sépare du bâtiment, doit être sombre, épais et fabriqué en matériau lourd pour avoir une forte inertie thermique. Une serre est une combinaison entre le mur Trombe et les systèmes à gains directs. C'est un espace capteur externe, thermiquement en contact avec le bâtiment par des ouvertures pour transférer la chaleur vers l'espace habitable [23, 24] (figure I. 23).

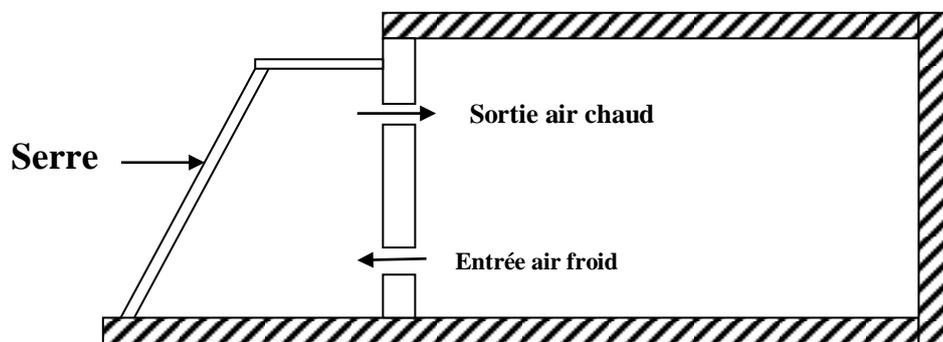


Figure I. 23. Chauffage par serre bioclimatique [24]

P. Dringola et al. [23] ont étudié numériquement par le logiciel comsol, le comportement dynamique thermo-fluide d'une serre bioclimatique dans le complexe Solaria à Perouse (Italie). Les résultats de la simulation, réalisée le 21 Mars et compte tenu de l'utilisation de l'isolation thermique renforcée et des verres de contrôle solaire, ont montré que la température au point central du volume de la serre est de  $23,6^{\circ}\text{C}$  à 13h00. En outre les auteurs ont noté que l'énergie gagnée par l'intégration de la serre solaire au bâtiment est de 310 kWh, pendant toute la saison de chauffage, soit environ 20% de la demande d'énergie thermique utile pour le chauffage (1527 kWh / an) de l'appartement considéré.

### I.3.3. Le système Barra-Costantini (B-C)

Développé par O. Barra et T. Costantini en Italie, vers la fin des années 1970, après une série de tests effectués pendant de nombreuses années sur divers sites [2], ce système de chauffage passif, est une variante du système Trombe-Michel, mais thermiquement plus performant, selon l'étude menée par L. Buzzoni *et al.* [3].

En outre, les avantages d'un tel système selon G. Cammarata *et al.* [25], sont la possibilité de chauffage des zones orientées vers le nord sans pompe à cause de l'air chaud injecté vers cette zone, la séparation de l'absorbeur du mur sud qui permet d'éviter les surchauffes, la maximisation des échanges thermiques entre l'air et l'absorbeur ainsi que l'induction de la turbulence dans la cheminée solaire.

Imessad *et al.* [26] ont simulé le comportement thermique d'un local situé à Alger équipé d'un système B-C, durant plusieurs jours d'hiver. Les auteurs ont montré que l'intégration de ce système permet d'élever la température du local d'environ 1.5 °C à 3 °C, tout en respectant les conditions de confort thermique. Par ailleurs, ils ont démontré que la mise en place de ce système dans les différentes zones climatiques de l'Algérie (Alger, Constantine et Djelfa) réduit les besoins annuels de chauffage de 60 % à 70 %.

- **Description du système et principe de fonctionnement**

Le système B-C est intégré sur la face externe du mur sud et au toit du local. Il est composé d'une vitre, d'un absorbeur et de canaux intégrés au toit. La vitre responsable de la création de l'effet de serre est intégrée verticalement à une distance de 6.5 cm du mur sud. Un absorbeur sombre est placé au milieu de l'espace entre le mur sud et la vitre, ce qui permet de doubler la surface d'échange entre l'absorbeur et l'air qui circule dans la cheminée solaire en bénéficiant d'une double circulation naturelle [3, 26].

L'air de la chambre qui sort de l'orifice (A) circule par thermosiphon dans la cheminée d'air en captant la chaleur des deux côtés de l'absorbeur. Une fois arrivé à l'orifice (B), il pénètre dans les canaux intégrés au toit. Tout au long de son déplacement dans les canaux par convection libre, l'air chaud cède une partie de la chaleur au plafond. A son arrivé à l'orifice (C), l'air chaud est injecté dans la chambre pour chauffer l'espace intérieur [3, 26]. Le principe de fonctionnement du système B-C est illustré par la figure I. 24. Les orifices (B) et (A) sont fermés dès que la température de l'air dans la chambre est supérieure à celle de l'air dans la cheminée solaire.

Bien que plus performant que le mur Trombe, le système Barra-Costantini est resté tel qu'il a été proposé par O. Barra et T. Costantini à la fin des années 1970 et n'a connu aucune amélioration depuis. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail dans lequel nous proposons deux nouvelles configurations du système Barra-Costantini en utilisant la technologie des systèmes PV-semi transparents. L'amélioration apportée au système Barra-Costantini lui permettra d'être un système de production simultanée de chaleur et d'électricité.

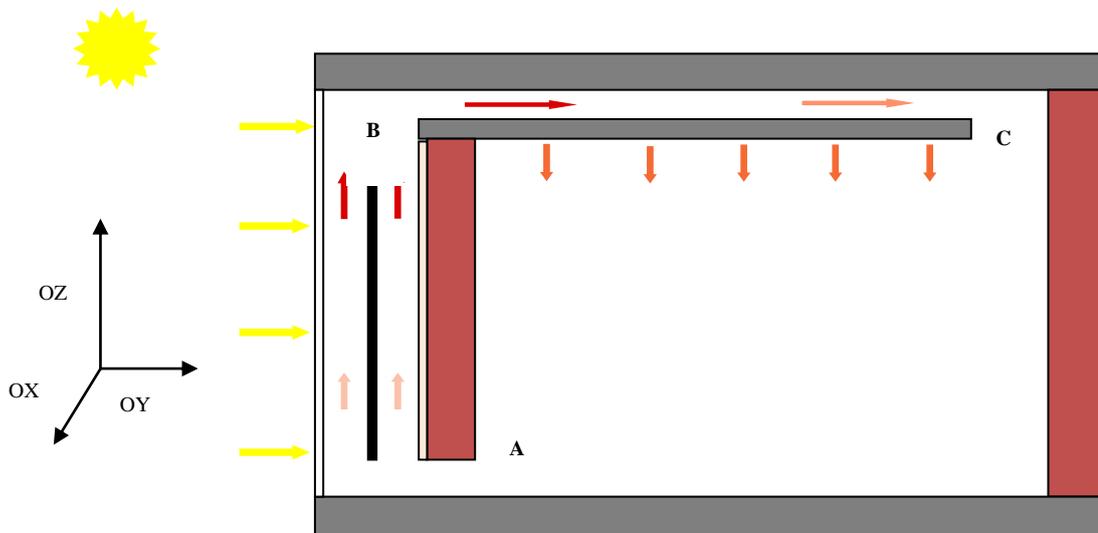


Figure I.24. Principe de fonctionnement du système B-C [27]

### I.3.4. Les systèmes de chauffage par rayonnement

Des études archéologiques ont montré que les systèmes de chauffage par rayonnement ou systèmes radiants, remontent à l'Asie ancienne (Kang chinois et Ondol koréen) et à l'Europe (Hypocauste romain) [28] où des gaz de combustion chauds traversaient l'espace sous le plancher pour le chauffage des habitations [28]. L'utilisation de ces systèmes s'est répandue [28], depuis l'adoption du polyéthylène pour fabriquer les tuyaux, au début du 20<sup>ème</sup> siècle,

Les systèmes de chauffage par rayonnement sont des éléments de construction utilisés pour le transfert et le stockage de chaleur. Des conduites d'eau ou de gaz sont intégrées dans les murs, le plancher ou le toit du bâtiment et fonctionnent comme des échangeurs de chaleur transférant cette dernière vers l'espace habitable et la stockant dans l'enveloppe du bâtiment [29].

Un système de chauffage est qualifié de système radiant lorsque les échanges thermiques par rayonnement dominent avec un pourcentage de 50% dans un espace conditionné [28].

En fonction de la position de la tuyauterie dans l'enveloppe du bâtiment, il existe trois types de systèmes de chauffage par rayonnement :

- Systèmes de chauffage intégrés, dans lesquels les tuyaux sont placés dans l'enveloppe du bâtiment (mur, toit, sol) et isolés de la structure principale du bâtiment (figure I. 25.a).
- Systèmes de conduction thermiquement activés où les tuyaux sont intégrés dans la structure principale du bâtiment (plafond, mur, sol), tel qu'illustré par la figure I. 25.b.
- Systèmes de panneaux radiants où les tuyaux sont intégrés dans des panneaux radiants légers (figure I. 25.c).

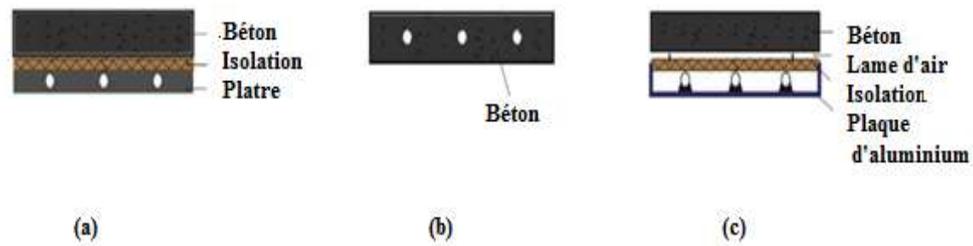


Figure I. 25. Classification des systèmes de chauffage radiants [30]

De nos jours, les systèmes de chauffage radiants sont largement utilisés dans les bâtiments résidentiels et même non résidentiels (immeubles de bureaux, les magasins, écoles, aéroports et les gares ferroviaires) du fait des avantages suivants [28, 29] :

- Un niveau de confort élevé
- Une inertie thermique élevée
- Un fonctionnement silencieux
- Une économie d'énergie
- Une installation adaptée à la conception du bâtiment
- Un gain de l'espace habitable
- L'utilisation des grandes surfaces permet un échange de chaleur significatif avec un petit gradient de température.

Parmi les systèmes de chauffage par rayonnement, nous pouvons citer :

#### I.3.4.1. Plancher chauffant hydraulique

Introduit aux États-Unis dans les années 1930 et en Europe centrale dans les années 50 et 60 [29], le plancher solaire chauffant est le système de chauffage des locaux résidentiels (ou autres), le plus répandu de nos jours. Entre 30% et 50% des nouveaux bâtiments résidentiels en Allemagne, en Autriche et au Danemark, sont équipés de plancher chauffant par rayonnement [28].

Ce système est constitué d'un ou plusieurs insolateurs qui captent l'énergie solaire et la transforment en chaleur, le fluide caloporteur réchauffé par le capteur peut être soit, emmagasiné dans un ballon de stockage pour être distribué dans les canaux du plancher ultérieurement, soit directement véhiculé et distribué dans les canaux encastrés dans la dalle en béton ce qui constitue le plancher solaire direct.

Les planchers radiants sont des systèmes légers placés au-dessus de la structure du plancher fait en béton. Les tuyaux sont noyés dans une fine couche de béton et recouverts d'une chape. Une couche isolante sépare la structure des tuyaux de celle du plancher (figure I. 26). Le flux de chaleur est principalement transféré entre les tuyaux et la surface du sol. Il est communément admis que la surface entre le plancher rayonnant et la structure est adiabatique [29].

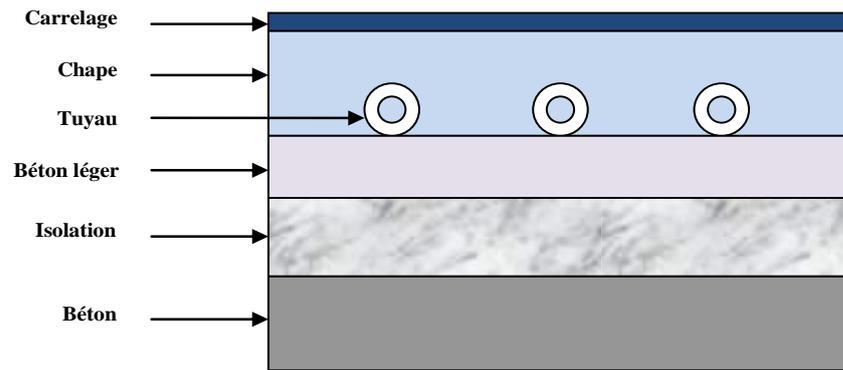


Figure I. 26. Structure du plancher chauffant [29]

La structure d'une installation d'un plancher chauffant est illustrée par la figure I.27 :

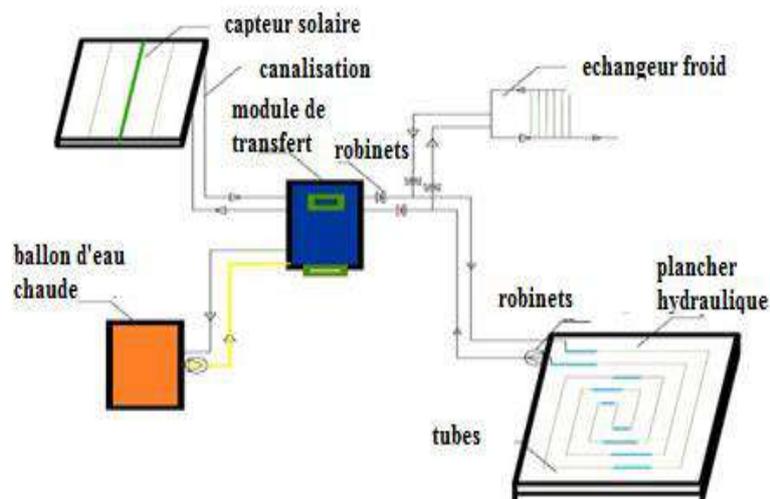


Figure I. 27. Installation d'un plancher solaire chauffant hydraulique [19]

*S. Menhoudj et al.* [19] ont étudié le comportement d'un plancher solaire direct, dans les conditions climatiques de la ville d'Oran, durant la période du 12 Novembre 2007 au 31 Mars 2008. Les résultats obtenus ont mis en valeur l'adéquation de ce système au climat algérien. Ce système a pu assurer une couverture solaire de 67%, pour un ratio de captation de 0.2. Le système d'appoint n'a été ainsi nécessaire que pour couvrir 27% des besoins de chauffage.

*Gao et al.* [31] ont comparé cinq possibilités de distribution des tuyaux de chauffage, posés à des intervalles d'espacement variant de 300 mm à 500 mm, avec une température d'alimentation de 50 °C. Ils ont trouvé que le système fournit un champ de température de l'air homogène au-dessus de 0.1 m du sol et que la plus grande différence de température ne

dépasse pas 1°C. Les auteurs ont conclu que la position des tuyaux posés avec un espacement central de 400 mm est la meilleure.

#### I.3.4.2. Plafond chauffant

Le plafond chauffant qui a suscité l'intérêt des scientifiques depuis les années 1980, a ses origines dans les pays scandinaves. Ce système a le même principe de fonctionnement que celui du plancher chauffant. Un fluide caloporteur chauffé dans un capteur solaire à basse température (aux environs de 30 °C) est envoyé vers un réseau de tuyaux installés dans un faux plafond pour chauffer, principalement par rayonnement, l'ambiance intérieure [32].

La température du fluide caloporteur relativement basse dans le système de chauffage par plafond radiant, permet de le qualifier comme étant écoénergétique [33]. Ce système de chauffage est caractérisé par les particularités suivantes [34] :

- Réduction significative de la consommation énergétique des bâtiments
- Assurance d'une bonne qualité de l'air où ils sont mêmes utilisés dans les hôpitaux
- Meilleure exploitation des espaces intérieurs
- Réduction du bruit
- Réduction des coûts d'entretien
- Possibilité d'atteindre un niveau de confort exceptionnel

Les photos de la figure I.28 prises en IR visualisent ce qui se passe réellement lorsqu'une chambre est équipée d'un système de chauffage par plafond radiant.

La photo (a) de cette figure montre le réseau de tuyaux en serpentin à l'intérieur du plafond (parcouru par de l'eau à une température d'environ 35°C). Les couleurs noire et bleue correspondent aux températures les plus basses, tandis que les couleurs rouge et jaune indiquent les températures les plus élevées. Il est parfaitement clair que les vitres de la grande porte-fenêtre sont froides alors que les rideaux indiquent des zones froides et d'autres réchauffées par rayonnement grâce au plafond. L'image (b) de la figure I. 28, indique que le sol d'une couleur roue-jaune, situé sous le plafond rayonnant, reçoit parfaitement la chaleur et se réchauffe à son tour [34].

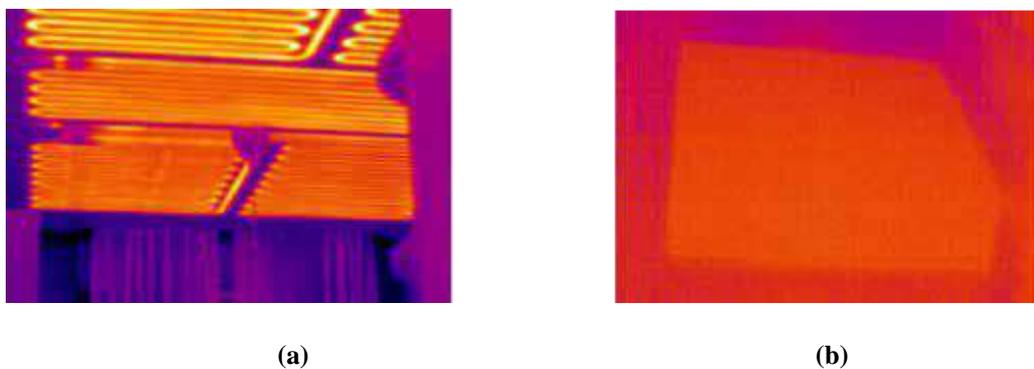


Figure I. 28. Thermovision d'un plafond rayonnant en mode chauffage [34]

M. Reza Safizadeh et al. [33] ont mené une étude numérique pour évaluer les comportements énergétiques des bâtiments ayant des enveloppes à haute et à faible performance énergétique et munis d'un système de chauffage par plafond radiant à basse température. Les résultats obtenus ont montré que des températures de l'eau d'alimentation comprises entre 28 °C et 45 °C sont idéales pour un bâtiment avec une enveloppe à haute performance. En outre, il a été observé que des températures de plafond sont basses de l'ordre de 20 °C à 25 °C dans les bâtiments rénovés et de 25 °C à 28 °C dans un bâtiment aux façades à faible performance énergétique peuvent fournir des sensations thermiques optimales au niveau de la plupart des parties du corps. Ainsi, les auteurs ont démontré que l'utilisation d'un système de chauffage par plafond radiant à basse température n'entraîne pas d'asymétrie thermique contrairement aux résultats d'autres recherches antérieures [33].

#### I.3.4.3. Mur chauffant

Le principe de fonctionnement du mur chauffant est similaire à celui du plancher chauffant. Une eau chauffée par des capteurs solaires, circule dans un serpentin intégré à l'intérieur des parois verticales du bâtiment (figure I.29). Un tel système peut être intégré aux constructions neuves ou en rénovation. Les serpentins sont intégrés aux murs de plusieurs manières [35] :

- Sur des rails de fixation ou installés directement sur des panneaux en matière isolante écologique telles que, la paille, la chaux, la terre ou des copeaux de bois. Un enduit de finition à base de chaux ou d'argile est utilisé pour couvrir les tuyaux.
- Dans des briques de terre crue. Ce cas est recommandé pour les constructions neuves et ne nécessite aucun enduit de finition.
- Dans des briques de terre cuite avec l'utilisation d'un enduit de chaux, de plâtre ou de terre d'environ 10 mm, choisi usuellement pour les constructions en rénovation.

Le mur chauffant procure un confort thermique optimal (tous les murs sont tièdes). Pour une pièce chauffée à 20°C et une température d'eau à 40 °C, la température du mur sera de 30.6°C [35].

J. Romani et al. [36] ont mené une étude expérimentale sur une cellule (285x185x195) mm dans les conditions climatiques de Puiverd de Lleida en Espagne. Cette cellule est équipée d'un système de chauffage par un mur radiant, dans lequel des tuyaux en polyéthylène de 16 mm de diamètre, sont noyés à 36 mm de profondeur de la surface intérieure dans des rainures espacées de 150 mm. Les résultats obtenus ont montré qu'un espacement entre 125 mm et 150 mm et une profondeur entre 45 mm et 65 mm maximalisaient le flux thermique et minimisaient la différence de température sur la surface intérieure, dans les conditions testées.

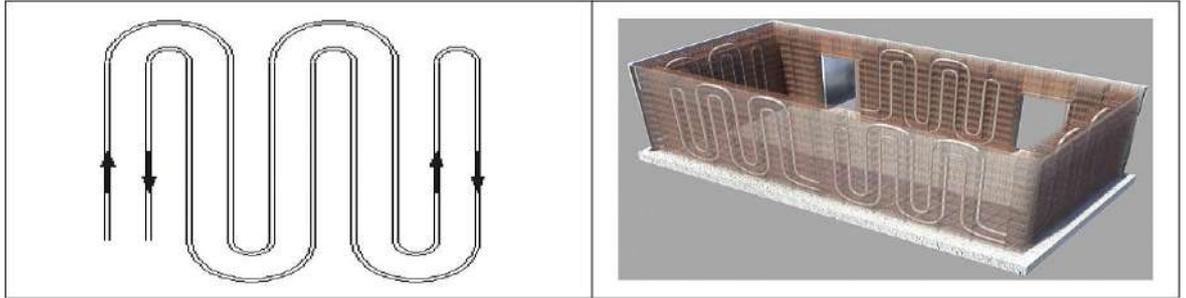


Figure I.29. Mur chauffant radiant [36]

### I.3.5. Système solaire combiné

Un système solaire combiné ou “combi-système”, (figure I.30), est une installation basée sur l'énergie solaire qui permet simultanément, le chauffage des locaux et la production de l'eau chaude sanitaire. Ce système peut être intégré à une habitation individuelle neuve ou ancienne pour contribuer à ses besoins énergétiques. Il doit généralement être associé à une autre source d'énergie, renouvelable ou non [37].

*K. Imessad et al.* [38] ont mené une étude expérimentale sur une maison F3 individuelle de type rural d'une surface habitable de 65 m<sup>2</sup> construite à Alger, selon une démarche de développement durable et d'efficacité énergétique et munie d'un système solaire combiné de type plancher chauffant direct (figure I.30). L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'impact de l'intégration d'un système solaire combiné sur l'ambiance intérieure d'une telle construction.

Les résultats expérimentaux obtenus entre le 07/03/2014 et le 17/03/2014 ont montré que les températures dans les 3 pièces varient entre 18° C et 20° C, pour une température extérieure moyenne de 11° C et un écart diurne moyen de 10.5° C. Les températures enregistrées sont légèrement inférieures à la température de confort recommandée par la réglementation thermique algérienne estimée à 21° C [38].

Il est à noter que durant l'expérimentation, les volets des fenêtres étaient constamment fermés, ce qui a permis de déduire que le système solaire combiné permet à lui seul, de répondre aux besoins de chauffage de l'habitation, durant les journées ensoleillées [38].

*K. Imessad et al.* [38] ont démontré que grâce à la forte inertie des parois de l'enveloppe et à l'isolation thermique, l'habitation a gardé une ambiance confortable pendant quelques jours sans avoir recours à un chauffage d'appoint. Cependant, ce dernier devient indispensable, en cas d'absence de soleil pendant plusieurs journées.

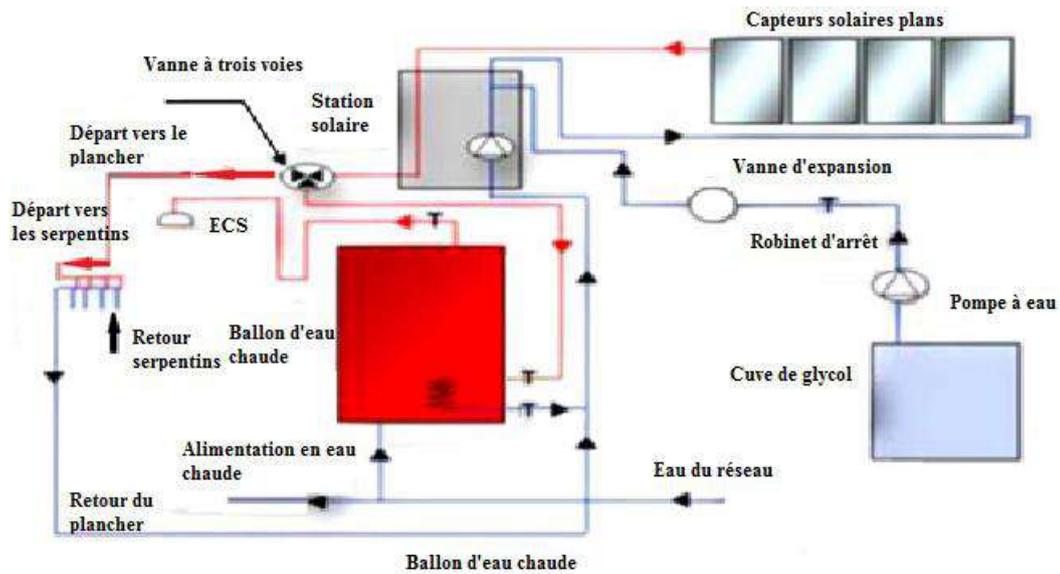


Figure I. 30. Schéma du système solaire combiné [38]

### I.3.6. Radiateurs basse température

Un système de chauffage solaire par des radiateurs à basse température (figure I.31), est constitué d'un ou plusieurs capteurs solaires plans qui servent à chauffer l'eau qui sera stockée dans un ballon de stockage. Deux pompes sont intégrées au système pour faire circuler le fluide caloporteur dans le circuit primaire (entre le capteur et le ballon de stockage) et dans le circuit secondaire (entre le ballon de stockage et le système de distribution composé de radiateurs à basse température (45°C-50°C)). Pour répondre aux besoins de chauffage lorsque le rayonnement solaire est absent ou insuffisant, un système auxiliaire de gaz, totalement indépendant du ballon de stockage, est utilisé comme chauffage d'appoint [39].

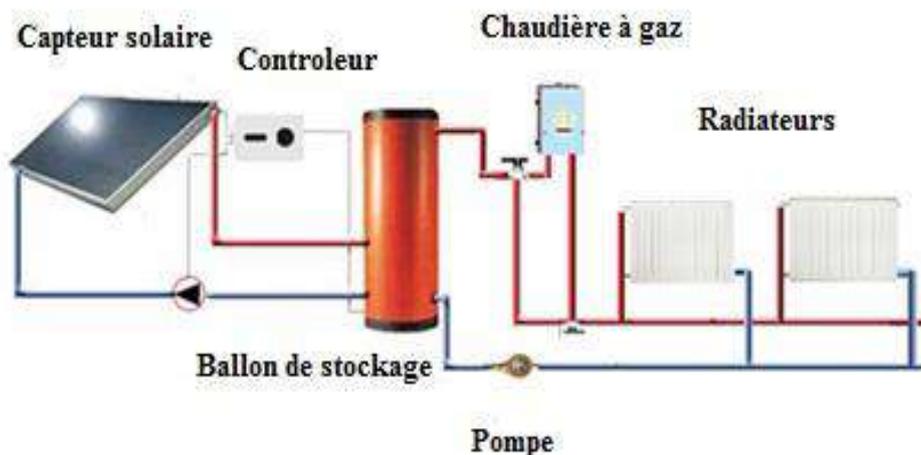


Figure I. 31. Chauffage solaire par radiateur à basse température [39]

Une étude numérique a été entreprise par *Zeghib et al.* [39] pour évaluer les performances thermique, économique et environnementale d'un système solaire de chauffage par radiateurs à basse température intégré à un habitat ancien individuel, situé à Adrar, durant le mois de Janvier [39]. Les auteurs ont trouvé que ce système assure le confort thermique nécessaire à l'habitant (une température de 23°C le jour et 17°C la nuit). D'autre part, l'utilisation de ce système permet d'augmenter l'efficacité du système de 15% par rapport à l'installation conventionnelle. Quant 'à l'économie d'énergie, les auteurs ont démontré que ce système permet d'économiser 20.8% de l'énergie primaire, ce qui correspond à 3000 DA/an. En outre, cette installation permet de réduire 40.6 tonnes de CO<sub>2</sub> sur la durée de vie de l'installation évaluée à 25 ans.

#### I.4. Les systèmes solaires photovoltaïques et hybrides PV/T de chauffage

Les cellules PV sont des dispositifs qui convertissent l'énergie solaire en électricité, par l'effet photovoltaïque. Les panneaux PV sont classés en trois catégories, opaques, transparents ou semi- transparents (figure I.32). Ils peuvent être intégrés au bâtiment comme une partie architectonique, sans remplacer une des composantes de l'enveloppe, ou être utilisés comme une partie de l'enveloppe du bâtiment (toits plans ou inclinés, fenêtres, éléments de façade ou systèmes d'ombrage...etc.) [40].

Les panneaux PV semi-transparents produisent de l'énergie électrique et laissent passer le rayonnement solaire vers l'espace intérieur. Ils peuvent être, des cellules PV opaques intégrées à une surface transparente de plusieurs façons de telle sorte que le rayonnement solaire puisse être transmis à travers les parties transparentes, ou bien des films minces en a-Si/ $\mu$ c-Si ou encore des cellules organiques [30].

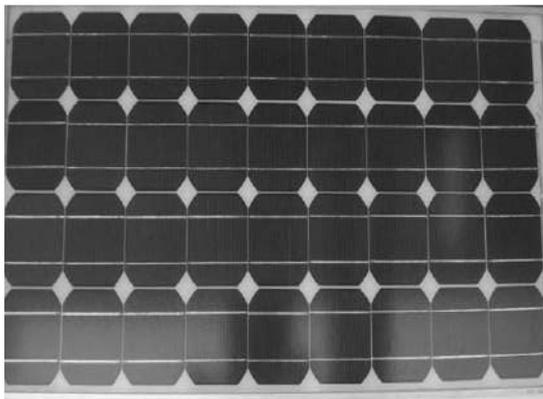


Figure. I. 32. a. Module PV opaque



Figure. I. 32. b. Module PV semi-transparent

Figure I. 32. Capteurs PV opaques et semi-transparentes [41]

L'utilisation de l'électricité solaire pour produire de l'eau chaude sanitaire et pour le chauffage et le refroidissement des locaux est une technologie prometteuse surtout avec la baisse drastique des prix du PV [13].

Pour le chauffage de l'habitat, l'électricité solaire générée par les capteurs photovoltaïques peut être utilisée, soit pour le chauffage électrique direct, soit pour actionner une pompe à chaleur.

L'utilisation des capteurs PV pour le chauffage électrique d'une habitation n'est justifiée que dans les deux cas suivants [42] :

- Être associé au chauffage électrique utilisant une source d'énergie non renouvelable déjà existant.
- Pour chauffer une habitation passive caractérisée par une très basse énergie où les besoins de chauffage de l'ordre de 2 et 3000 kWh, sont assurés par quelques petits radiateurs.

Le capteur hybride PV/T, élément de base des systèmes hybrides de chauffage a été proposé et étudié par Martin Wolf en 1975 en Amérique, pour le chauffage d'une maison individuelle [27].

Il est connu que seulement 20% de l'énergie solaire incidente sur les cellules PV sont convertis en électricité, les 80% restant sont transformés en chaleur, ce qui conduit à une augmentation de la température des PV. Or, il a été démontré que la puissance électrique générée par les PV diminue lorsque la température des PV croît. Pour bénéficier de l'énergie thermique générée par les cellules PV, on peut faire circuler un fluide à l'arrière des PV pour le réchauffer, ce qui permettra le refroidissement des PV et par conséquent l'amélioration du rendement électrique [43]. Ce phénomène physique est la base du principe de fonctionnement des capteurs hybrides PV/T.

Les différents types de systèmes PV/T sont illustrés par la figure I. 33.

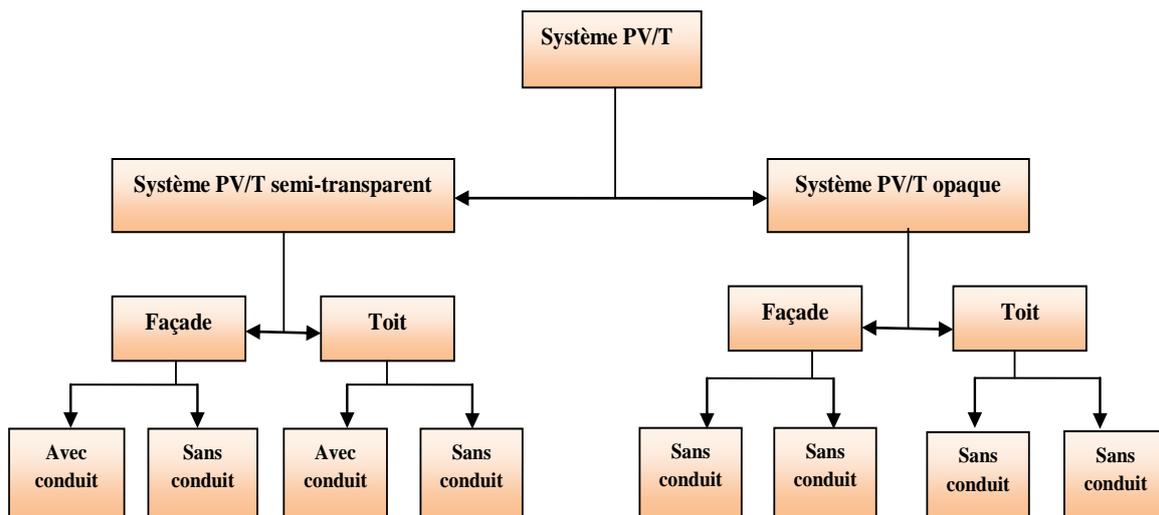


Figure I. 33. Les différents types de capteurs hybrides PV/T

### I.4.1. Les systèmes PV/T semi-transparentes et opaques intégrés aux façades

Trois conceptions différentes des systèmes PV/T, intégrés aux façades du bâtiment (figure 34) sont recensées dans la littérature. Chacune des configurations est succinctement décrite dans ce qui suit.

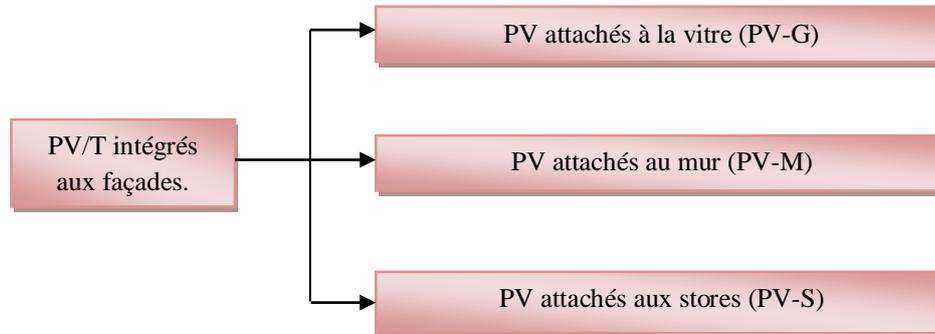


Figure I. 34. Systèmes PV/T intégrés aux façades du bâtiment

- Configuration PV-G. Dans celle-ci la couche PV est fixée sur la surface intérieure de la couverture transparente (figure 35. a). Dans ce cas, l'air intérieur de la chambre entre dans l'espace qui sépare le mur de la couverture qui supporte les cellules PV, absorbe la chaleur dégagée par les PV puis pénètre dans la pièce par la partie supérieure. Cette conception est généralement appelée PV-mur Trombe [43].

Selon une étude menée par *J. Jie et al.* [44], la température d'un local muni d'un mur Trombe PV est inférieure à celle d'un local avec un mur Trombe classique, à cause des cellules PV qui absorbent une fraction de l'énergie solaire incidente. Cependant, le mur Trombe PV permet de produire l'électricité et d'améliorer l'esthétique du bâtiment, ce qui est un facteur important. En outre, les résultats obtenus ont montré que le rendement électrique des PV augmente de 5%, grâce au refroidissement des cellules par l'air qui s'écoule dans le canal.

Dans d'autres travaux, *J. Jie et al.* [45], ont démontré qu'un système PV mur Trombe avec un ventilateur, permet d'accroître la température du local de 14.42 °C par rapport à la température d'un local de référence (sans système de chauffage). Les auteurs ont également trouvé que l'utilisation du ventilateur permet d'augmenter la température du local de 14.92°C et de diminuer celle des PV de 1.28°C.

- Configuration PV-M. Dans cette conception [43], appelée aussi PV-mur Trombe (figure 35.b), la couche PV est attachée à la face externe du mur devant lequel une couverture en verre est placée.

- Configuration PV-S [43]. Dans cette dernière, les cellules PV sont attachées à des stores placés entre le mur devant lequel une couverture transparente est placée. Ce système offre une grande flexibilité de fonctionnement car les stores peuvent être abaissés ou suspendus en plus du réglage de l'inclinaison des lames persiennes (figure 35.c)

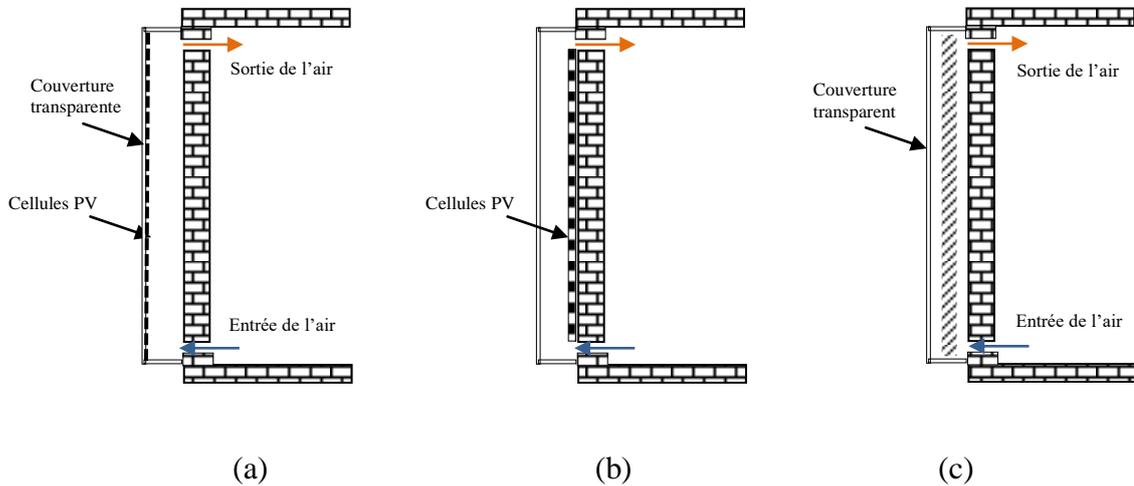


Figure I. 35. Configurations du système PV/T pour le chauffage de l'habitat [43]

#### I.4.2. Les systèmes PV/T semi-transparentes et opaques intégrés aux toits

*K. Vats et al.* [46] ont étudié le comportement thermique d'une chambre à laquelle un système PV/T a été intégré (figure I. 36). Des modules PV semi-transparentes installés à l'extérieur de la pièce, sont inclinés de  $34^\circ$  par rapport à l'horizontale, ce qui correspond à la latitude du lieu (Sirinagar, Inde). Les ouvertures d'entrée et de sortie de l'air sont pratiquées sur le toit pour faire circuler l'air ambiant de la chambre, qui entre dans le canal où il récupère l'énergie thermique dégagée par les cellules PV qui se sont échauffées, en absorbant le rayonnement solaire. L'air pénètre par la suite dans la chambre, par l'ouverture de sortie pour réchauffer l'espace intérieur. Les auteurs ont utilisé dans leur étude un système PV/T comprenant 9 modules PV dont chacun a pour dimensions  $1\text{m} \times 0,61\text{m}$ . La chambre de  $3\text{m} \times 1,81\text{m} \times 4\text{m}$  a un toit couvert d'un système PV/T d'une surface de  $5,44\text{ m}^2$ . Un débit d'air de  $0,85$  à  $1\text{ kg/s}$ , circule à travers le canal.

En variant le facteur d'emballage des modules PV, les auteurs ont trouvé que :

- La diminution du facteur d'emballage de  $0,83$  à  $0,42$ , abaisse la température du module de  $10,0^\circ\text{C}$ , ce qui augmente son efficacité de  $0,2$  à  $0,6\%$ .
- La diminution du facteur d'emballage augmente la zone de non-emballage et entraîne un accroissement de la température intérieure de  $3,0^\circ\text{C}$ .
- Un module PV avec un facteur d'emballage de  $0,62$  est meilleur que celui avec un facteur d'emballage de  $0,83$ , en termes de performances électriques et thermiques.

- La production maximale d'énergie électrique annuelle est de 813 kWh et l'énergie thermique annuelle est de 79 kWh avec un module PV en a-Si, ayant un facteur d'emballage de 0,62.
- L'énergie thermique et l'exergie annuelles globales pour un facteur d'emballage de 0,62 sont respectivement de 83 kWh et de 32 kWh de plus que pour un facteur d'emballage du module PV, de 0,83

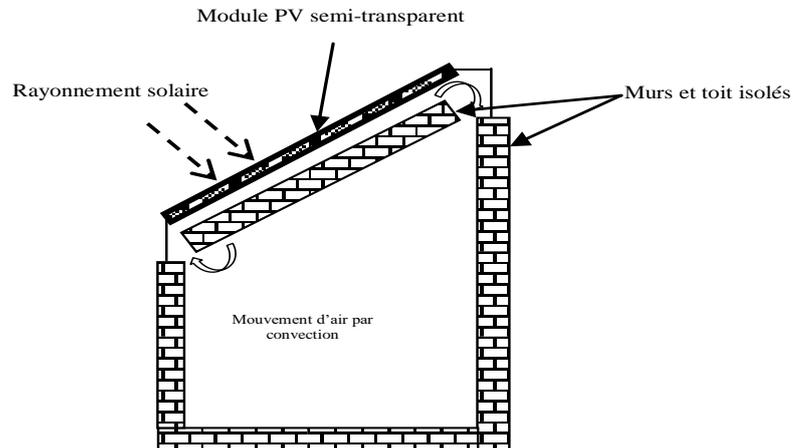


Figure I. 36. Système PV/T intégré au toit [46]

---

## **CHAPITRE II**

---

### **Etat de l'art des stratégies solaires passives**

## II.1. Introduction

Le secteur résidentiel, avec près de 21 % de la consommation énergétique mondiale est l'un des plus énergivores. De plus il est fortement pollueur, puisque responsable de 6% de la quantité de CO<sub>2</sub> totale émise dans l'atmosphère [1].

Ainsi, dans l'optique de réduire sa consommation irrationnelle des énergies (carbonées) conventionnelles et de préserver l'environnement, il est nécessaire, voire indispensable d'augmenter la part des énergies renouvelables pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment tout en assurant le confort thermique adéquat aux occupants.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs concepts (bâtiment à énergie zéro ou à énergie positive) et labels suisse (Minergie), allemand (Passivhaus) français (BBC- Effinergie) et bien d'autres (HPE et THPE, etc.) ont été proposés et commencés à être mis en place dans plusieurs pays, à travers le monde.

De nombreuses stratégies passives, des systèmes économes en énergie ou à énergie renouvelables [47], sont également adoptés, notamment pour le cas les bâtiments à énergie zéro.

Pour permettre au lecteur d'avoir une vision globale sur le sujet en question, un état de l'art des stratégies solaires passives est envisagé (matériaux de construction performants, géométrie, orientation, facteur de compacité, vitrage intelligent, etc.), pour améliorer les performances énergétiques du bâtiment constitue le contenu de ce chapitre. La qualité de vie de l'occupant étant fortement dépendante, du confort thermique, il nous a paru utile d'accorder une attention à ce dernier avant d'aborder le point susmentionné.

## II.2. Analyse du confort thermique

A l'heure actuelle, 90% du temps de la population mondiale sont passés à l'intérieur de milieux bâtis [48]. Aussi, la fonction usuelle d'un bâtiment est d'offrir un abri à ses occupants, de les protéger des aléas climatiques et de leur assurer (espace environnemental) un environnement de vie des plus adéquats en créant un microclimat intérieur propice à leurs différentes activités. Il s'agit du confort, notion en fait très vaste et interdisciplinaire, puisqu'il peut être sensoriel (bien-être visuel, acoustique, thermique, hygrothermique, olfactif, etc.), existentiel, matériel, esthétique, social ou bien de conformité [48].

Dans le cadre de notre travail, notre attention portera essentiellement sur le confort thermique dont dépend l'estimation des besoins de chauffage et de climatisation.

### II.2.1. Définition du confort thermique

La notion du confort est apparue les années 60. La définition la plus courante est celle de l'ASHRAE qui avance, que le confort thermique est une condition d'esprit qui exprime sa satisfaction à l'égard de l'environnement thermique [49]. Cependant, elle reconnaît qu'il est difficile de satisfaire tous les individus qui occupent le même espace, car les conditions de

confort ne sont pas similaires pour tous, à cause des variations physiologique et psychologique de chacun [49].

Une autre définition proposée par Hensen [50] met en évidence le lien entre le confort thermique et la dimension comportementale. L'auteur suppose que le confort thermique est un état dans lequel il n'y a pas d'impulsion motrice pour modifier l'environnement par le comportement.

### II.2.2. Paramètres influençant le confort thermique

Selon le standard 55-2004 de l'ASHRAE, il existe six principaux paramètres qui doivent être pris en compte avant de définir les conditions de confort thermique.

Ces six paramètres, que nous allons détailler ultérieurement, varient avec le temps et ne concernent que le confort thermique en régime permanent [49].

Ils caractérisent d'une part l'environnement thermique et d'autre part l'activité et la vêtue de l'occupant. Il s'agit de :

#### - La température de l'air

Paramètre fondamental du confort thermique, il caractérise l'environnement qui entoure l'être humain [49]. La température de l'air doit être au minimum égale aux températures moyennes de la cheville, de la taille et de la tête, soit respectivement aux distances de 0.1 m, 0.6 m et 1.1 m pour une personne assise et à 0.1 m, 1.1 m et 1.7 m pour une personne debout [49].

La température environnante influence directement le bilan thermique de l'occupant, au niveau des échanges thermiques, conductif, convectif et respiratoire [51]. Les valeurs de référence des températures de l'air imposées par la réglementation générale pour la protection du travail [51] sont regroupées dans le tableau II.1.

Type du local	Température de l'air
Bureaux, salles de cours, salles d'attente, salles de réunion ou de conférence, etc. Espaces dans lesquels des gens habillés sont au repos ou exercent une activité physique très légère	<b>21 °C</b>
Salles d'examen, ou soins médicaux, vestiaire, etc. Espaces dans lesquels les personnes sont peu ou pas habillés au repos ou exercent une activité physique très légère.	<b>23 à 25 °C</b>
Ateliers, laboratoires, cuisines, etc. Espaces dans lesquels les personnes sont gens habillés et exercent une activité physique très légère.	<b>17 °C</b>
Salles de gymnastique, salle de sport, etc. Espaces dans lesquels les occupants sont peu habillés et exercent une activité physique intense	<b>17 °C</b>
Corridors, cages d'escalier, vestiaires, Sanitaire etc. Espace servant pour passage, ou pour un temps limité pour des personnes habillées	<b>17 °C</b>

Garage, entrepôt, archives...etc. Espaces servant uniquement d'abris, aux intempéries (pluie, vent, gel...).	5 °C
--	------

Tableau II.1. Valeurs référentielles de la température de l'air [51]

### - La température radiante moyenne

Elle représente la température d'une enceinte noire uniforme qui échangerait la même quantité de rayonnement thermique avec l'occupant que l'enceinte réelle. Elle peut être considérée comme une moyenne spatiale de la température des surfaces de l'enceinte pondérée par leurs facteurs de forme. La valeur de cette température, considérée la même pour tout le corps de l'être humain [49], est donnée par l'expression suivante [52] :

$$T_r = [(T_g + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times V_a^{0.6}}{\varepsilon \times D^{0.4}} \times (T_g - T_a)]^{(1/4)} - 273 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$T_r$  : température radiante moyenne

$T_g$  : température de la sphère noire

$V_a$  : vitesse moyenne de l'air

$\varepsilon$  : émissivité d'un corps noir

$D$  : diamètre de la sphère noire

### - La vitesse de l'air

Ce paramètre très important dans les échanges thermiques, représente la vitesse moyenne de l'air dans le temps et dans l'espace du bâtiment. La vitesse de l'air est calculée sur un intervalle de temps de chaque, trois minutes, seulement. Les valeurs pouvant être différentes pour des durées, plus importantes [49].

Il a été noté que pour un climat froid, des vitesses d'air élevées créent des courants d'air qui conduisent à une augmentation des pertes de chaleur par convection et par évaporation. Il en résulte alors une sensation d'inconfort thermique. Si la vitesse moyenne de l'air est inférieure à 0.15 m/s et pour une température opératoire de 22.5°C, les courants d'air sont considérés acceptables [52].

### - L'humidité

Selon la norme ASHRAE [49], le taux d'humidité doit être fixé en dessous de 0.012 kg H<sub>2</sub>O/kg d'air sec qui correspond à une pression de vapeur d'eau de 1.910 kPa, à une température de rosée de 16.8°C. Selon la même norme, il n'y a pas de valeur inférieure d'humidité. Cependant, un air sec relatif à une température de rosée inférieure à 2 °C et une

humidité relative de moins de 20%, peut provoquer une sécheresse des yeux et de la peau ainsi qu'une irritation des voies respiratoires, d'où la création d'une sensation d'inconfort [52].

D'un autre côté, un taux d'humidité élevé freine l'évaporation à la surface de la peau en augmentant la transpiration et en dérégulant la thermorégulation de l'organisme, et conduisant de ce fait à une sensation d'inconfort thermique) [51].

Les travaux de Liebard [51] ont révélé qu'une humidité relative comprise entre 30% et 70% avait une faible influence sur le confort thermique.

### - La vêtue

Les vêtements, considérés comme une deuxième peau de l'être humain, permettent de le protéger contre les conditions climatiques extérieures en créant un microclimat adéquat entre la peau et les vêtements [48]. La vêtue permet de modifier les échanges thermiques entre la peau et le milieu extérieur pour maintenir l'organisme dans ses meilleures conditions [51]. La prise en compte de l'isolation thermique due aux vêtements est effectuée en introduisant un indice clo (clothes) défini comme étant l'unité d'isolement vestimentaire [51], ( $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}$ ).

Les échanges entre le corps humain et les vêtements sont de deux types, thermiques conductifs et évaporatoires par diffusion de la vapeur d'eau émise par le corps. Ils sont complexes car ils dépendent du tissu de la vêtue et de sa forme ainsi que de l'activité du sujet [48, 51].

Les valeurs d'isolement vestimentaire usuelles sont indiquées sur la figure II.1.

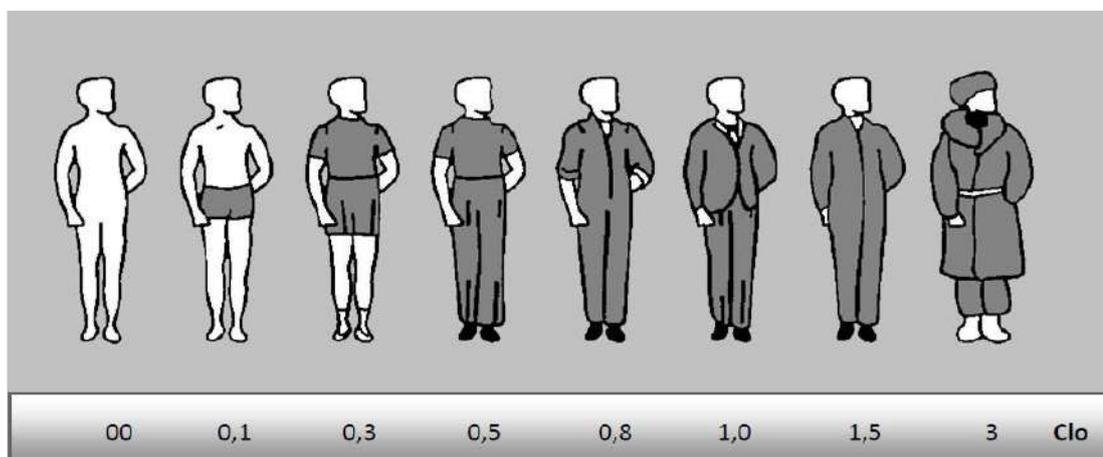


Figure II.1. Valeurs d'isolement vestimentaire [51]

### - Le taux métabolique

Le taux métabolique ou activité, représente l'énergie dissipée par unité de surface de la peau d'un individu. Son unité de mesure, "le met" (metabolic equivalent task), est égal à  $58.2 \text{ W/m}^2$ . C'est un paramètre essentiel dans l'évaluation du confort thermique d'une personne en état de réveil, car on ne peut pas estimer le confort thermique d'une personne qui dort. De

nombreux auteurs [48, 51, 52], ont montré qu'une activité intense pouvait induire une situation d'inconfort thermique à l'individu, même si les conditions environnantes sont favorables (température, humidité etc.).

Les taux métaboliques pour diverses activités [52], sont consignés dans le tableau II.2.

Activité	Taux métabolique (met)
Assis (silencieux)	1
Assis (lire)	1
Ecrire	1
Dactylographier	1.1
Debout (détendu)	1.2
Marcher	1.7

Tableau II.2. Taux métaboliques de quelques activités [52]

### II.2.3. Modèles du confort thermique

Plusieurs modèles pour évaluer le confort thermique sont disponibles dans la littérature. Des travaux ont été effectués sur des mannequins ou sur des êtres humains, placés dans des chambres climatiques ou in situ, pour identifier les conditions de confort thermique [53]. Nous avons recensé :

#### II.2.3.1. Les modèles analytiques

Parmi les modèles analytiques proposés, nous pouvons citer :

- **Le modèle de Fanger**

Durant les années 70, Fanger a développé analytiquement une approche statique qui permet de déterminer les échanges de chaleur entre l'individu et son environnement. Cette méthode, considérée comme la plus populaire pour l'évaluation du confort thermique a été la base du développement de la norme française et internationale NF EN ISO 7730 [53, 54].

Deux indices, PMV (Predicted Mean Vote ou vote moyen prévisible) et PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied ou pourcentage prévisible d'insatisfaits) ont été proposés par l'auteur et calculés par les expressions suivantes [53] :

$$PMV = [0.303 \cdot \exp(-0.036 M) + 0.028]L \quad (II. 2)$$

$$PPD = 100 - 95 \exp [ -(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2) ] \quad (II. 3)$$

$$L = M - W - E_{dif} - E_{rs,req} - E_{res} - C_{res} - R - C \quad (II. 4)$$

Avec :

M : production de chaleur métabolique

L : écart entre la chaleur générée et perdue dans le bilan thermique

$W$  : partie du métabolisme utilisée par les muscles pour le travail externe

$E_{\text{dif}}$  : flux de chaleur latente échangé par diffusion à travers la peau

$E_{\text{rsw, req}}$  : débit sudoral nécessaire pour le confort thermique à partir du métabolisme, donné par la relation :

$$E_{\text{rsw, req}} = 0.42 (M - W - 58.15) \quad (\text{II. 5})$$

$E_{\text{res}}$  : flux de chaleur par évaporation respiratoire

$C_{\text{res}}$  : flux de chaleur produit par convection respiratoire

La somme des flux  $E_{\text{res}}$  et  $C_{\text{res}}$  a pour expression :

$$C_{\text{res}} + E_{\text{res}} = 0.0014M (T_{\text{exp}} - T_a) + 0.0173 M (P_{\text{exp}} - P_a) \quad (\text{II. 6})$$

Avec :

$t_{\text{exp}}$  : température de l'air expiré (~34 °C)

$t_a$  : température de l'air ambiant

$P_a$  : pression de vapeur d'eau dans l'air

$P_{\text{exp}}$  : pression de vapeur d'eau dans l'air expiré (de l'ordre de 5,87 kPa à 34°C)

Quelques inconvénients du modèle de Fanger, ont été néanmoins recensés [54], dont les principaux sont :

-L'équation de confort de Fanger ayant été développée dans des chambres climatiques parfaitement contrôlées par un système HVAC, n'est pas par conséquent valable pour les bâtiments naturellement ventilés.

- La prise en compte des effets hygrothermiques causés par la vêtue est représentée comme une couche uniforme d'isolation entre le corps et l'environnement. Or, les vêtements ne sont pas uniformes et certains phénomènes ne sont donc pas pris en compte.

- Les intervalles de validité des variables du PMV donnés par la norme ISO 7730 ont été largement discutés où il a été conclu qu'ils sont beaucoup plus étroits.

- Les résultats relatifs à la relation entre les PMV et PPD, obtenus dans différentes chambres climatiques diffèrent de ceux de Fanger.

- **Le modèle à deux nœuds de Gagge**

Pour modéliser le confort thermique, Gagge a présenté un modèle dynamique simple. L'auteur représente le corps humain par deux nœuds concentriques isothermes, un nœud

externe imageant la peau et un autre interne, le noyau, reflétant les organes internes (os, muscles et autres tissus). Les échanges thermiques entre les deux nœuds se font par conduction tissulaire et par convection sanguine [53].

Le modèle de Gagge, contrairement à celui de Fanger, permet de calculer les variables physiologiques telles que les températures cutanées internes ainsi que la mouillure cutanée dans le mode transitoire [53].

Gagge a également proposé l'indice SET (Température Effective Standard) du confort thermique. Ce dernier regroupe l'effet de six paramètres de base et peut être appliqué dans toutes les conditions (tableau II.3).

SET (°C)	Sensation	L'état physiologique d'une personne sédentaire
> 37.5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de la régulation
34.5-37.5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30.3-34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25.6- 30.3	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22.2- 25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
17.5-22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5-17.5	Froid et acceptable	Refroidissement ralenti du corps
10.0- 14.5	Très froid, très inacceptable	Frissons

Tableau II.3. Relation entre la sensation thermique et la température standard effective SET [53]

### II.2.3.2. Approche adaptative

Cette approche, mise en place vers la fin du 20<sup>ème</sup> siècle et le début du 21<sup>ème</sup> siècle stipule que l'individu n'est pas passif vis-à-vis du milieu environnant mais qu'il réagit systématiquement pour rétablir le confort thermique afin de répondre à ses besoins [51, 54].

Les actions d'adaptation avec les changements du milieu environnant sont classées en trois catégories, comportementales, d'ajustement physiologiques d'acclimatation et psychologiques d'adaptation [51, 54].

## II. 3. La réglementation thermique algérienne

L'Algérie, à l'instar de nombreux pays, vise à réduire sa consommation énergétique dont 40% revient au secteur résidentiel. Ainsi, les autorités algériennes ont établi la loi N° 99-09 du 28 Juillet 1999 qui vise à définir les conditions, les moyens d'encadrement et la mise en œuvre de la politique nationale de maîtrise de l'énergie [55].

Afin d'appliquer les dispositions de la loi susvisée, le décret exécutif N° 2000-90 a été édicté le 24 Avril 2000 dont l'objectif est de fixer la réglementation thermique des bâtiments neufs en Algérie [56].

Par la suite, trois documents techniques réglementaires DTR, qui sont à la base de la réglementation thermique algérienne, ont été élaborés :

- Les premier et second DTR (C3.2 et C3.4) « Chauffage-Règles de calcul des déperditions calorifiques » et « Climatisation-Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments » regroupent les lois à appliquer pour réduire la consommation énergétique durant les saisons hivernale et estivale respectivement [57, 58].

- Quant' au troisième DTR C3.31 « Ventilation naturelle-Locaux à usage d'habitation » est dédié à la ventilation naturelle [58].

16 ans après, une mise à jour de la version de la réglementation thermique précitée a donné naissance à la DTR C3.2/4, qui a fusionné les deux premiers fascicules [57, 59]. Dans le nouveau DTR, les principes généraux réglementaires relatifs au chauffage et à la climatisation des bâtiments ont été définis et des méthodes simples pour évaluer les besoins énergétiques du bâtiment durant l'été et l'hiver [59] sont mises à la disposition des professionnels du domaine. Il est également indiqué dans la nouvelle réglementation thermique algérienne (RTA) que les déperditions thermiques par transmission ( $D_t$ ) pendant la période de chauffage doivent être limitées à une valeur de référence ( $d_{ref}$ ) [57] :

$$D_T < 1.05 \times D_{ref} \quad (II.7)$$

$$D_{ref} = a.S_1 + b.S_2 + c.S_3 + d.S_{21} + e.S_5 \quad (II.8)$$

a, b, c, d, e représentent les coefficients de transmissions thermiques du toit, du plancher, des murs, de la porte et des fenêtres respectivement (tableau II.4).

$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  représentent les surfaces des parois précédentes.

Zone	Bâtiment individuel					Bâtiment passif				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
<b>A</b>	0.9	2	1.2	3	3.8	0.9	2	1.2	3	3.8
<b>A1</b>	0.9	2	1.2	3	3.8	0.9	2	1.2	3	3.8
<b>B</b>	0.9	2	1	3	3.8	0.75	2	1	3	3.8
<b>C</b>	0.9	2	1	3	3.8	0.75	2	1	3	3.8
<b>D</b>	0.9	2	1.2	3	3.8	0.9	2	1.2	3	3.8

**Tableau II.4. Coefficients de référence [57]**

En outre et selon la RTA, les apports de chaleur à travers les parois opaques (APO) et vitrées (AV) calculés à 15 h au mois de Juillet (considéré comme étant le mois le plus chaud de l'année [57]), doivent être inférieurs à une limite appelée 'Apport de Référence (Aref), tel que :

$$Apo + Av \leq 1.05 \times Aref \quad (II.9)$$

## II.4. Les stratégies solaires passives

### II.4.1. La fenêtre

Sur le plan architectural, le terme fenestration désigne la disposition des ouvertures (fenêtres, portes, lucarnes [60]), sur le toit ou sur les parois verticales d'un bâtiment.

La fenêtre est constituée essentiellement d'un dormant, d'un châssis et d'un vitrage (partie la plus importante) car il permet l'admission de la lumière naturelle d'une part et d'avoir une vue sur l'extérieur, d'autre part [60].

D'un point de vue thermique, elle a une influence significative sur l'efficacité énergétique des bâtiments car c'est un élément sensible entre les ambiances intérieure et extérieure. En effet, elle laisse passer la lumière tout en permettant de capter l'énergie solaire pour chauffer l'ambiance intérieure [61, 62-64].

Les performances thermiques de la fenêtre sont les plus faibles, comparativement à celles des autres éléments de construction. Il a été noté que la fenêtre est responsable de près de 50 % de la consommation totale d'énergie dans les bâtiments, une valeur appelée à croître en raison de la préférence actuelle des bâtiments entièrement vitrés [65].

Les dimensions des fenêtres les plus appropriées dépendent de la masse thermique du bâtiment et de son orientation. La réglementation thermique française, recommande une valeur de référence de 16,5% (pourcentage de la surface vitrée par rapport à la surface habitable), mais cette valeur peut aller jusqu'à 22%. Des valeurs plus élevées augmenteraient les risques de surchauffe pendant la période estivale [64].

Il est connu que, dans les bâtiments passifs, les surfaces vitrées orientées vers le nord doivent être réduites par rapport à celles installées sur la face sud. Ces dernières doivent être larges afin de diminuer les pertes thermiques [66] qui sont estimées de 10% à 25% dans le cas des climats froids [67]. Persson et al. [66], ont démontré par une étude numérique, que l'intégration d'une fenêtre thermiquement performante sur la face sud serait une meilleure option que celle d'avoir un mur isolé sans fenêtre.

La surface vitrée est amenée à remplir différentes fonctions, chacune d'entre elles comporte néanmoins un effet indésirable, à savoir [68] :

- Laisser passer la lumière du jour (qui limite la consommation d'énergie destinée à l'éclairage) tout en évitant l'éblouissement lorsque les valeurs de l'albédo sont élevées.
- Assurer un contact avec l'extérieur tout en respectant l'intimité des occupants.
- Apporter l'air neuf en diminuant les pertes thermiques par ventilation.
- Apporter des gains solaires directs en évitant les surchauffes en saisons chaudes et les pertes thermiques excessives en périodes de froid.

### II.4.1.1. La fenêtre idéale

Le rayonnement solaire qui peut être visible ou pas, s'étale sur un large éventail de longueurs d'ondes (figure II.2). Lorsqu'il atteint la surface de la fenêtre, il peut selon sa longueur d'onde, être absorbé, transmis ou bien réfléchi [69].

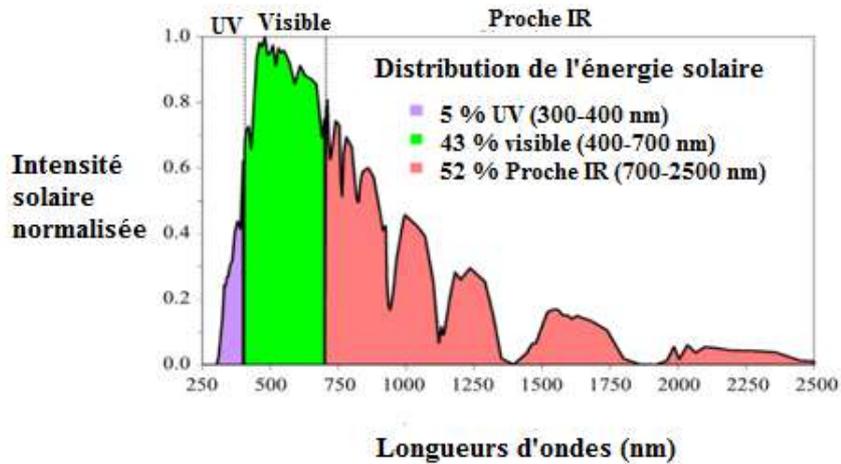


Figure II.2. Distribution spectrale de l'énergie solaire [69]

Afin d'évaluer les performances et les caractéristiques d'un vitrage, trois paramètres principaux sont utilisés [69, 70] :

- Le coefficient de transfert thermique global (U) pour estimer la quantité de chaleur perdue par mètre carré de vitrage lorsque la différence de température entre les milieux intérieur et extérieur est de 1° K.
- Le coefficient de gain solaire (CGCS), rapport entre l'énergie totale entrant par le vitrage (énergie solaire transmise ajoutée à celle qui est absorbée puis réémise) et l'énergie solaire incidente. Sa valeur varie entre 0 et 1, les plus grandes valeurs correspondent à de grandes quantités d'énergie solaire gagnées.
- Le coefficient de transmission lumineuse (TL), facteur de visibilité du vitrage qui caractérise sa capacité à laisser passer l'énergie lumineuse. Il est défini comme étant la fraction de lumière visible transmise au milieu intérieur.

Ainsi, la fenêtre idéale pour les climats chauds doit réfléchir tous les rayonnements UV et IR venant du soleil et de l'environnement, être transparente au rayonnement IR venant de l'intérieur comme elle doit permettre à tout le rayonnement visible d'entrer à l'intérieur du bâtiment [69]. Pour les climats froids, la fenêtre idéale doit quant à elle avoir la faculté de transmettre toutes les longueurs d'onde du rayonnement solaire sauf celles de l'UV et de réfléchir tout le rayonnement venant de l'intérieur (figure II.3) [69].

Notons que dans les deux cas (climats chaud et froid), la fenêtre doit idéalement avoir un coefficient U nul. En réalité, la fenêtre idéale avec les exigences souhaitées est difficile à

atteindre, néanmoins les valeurs recommandées pour les meilleures performances sont consignées dans le tableau II.5 [69].

Climat	U	CGCS	TL
Froid	< 2	> 0.60	> 0.70
Chaud	< 4	> 0.50	> 0.70

Tableau II.5. Propriétés recommandées pour la fenêtre [69]

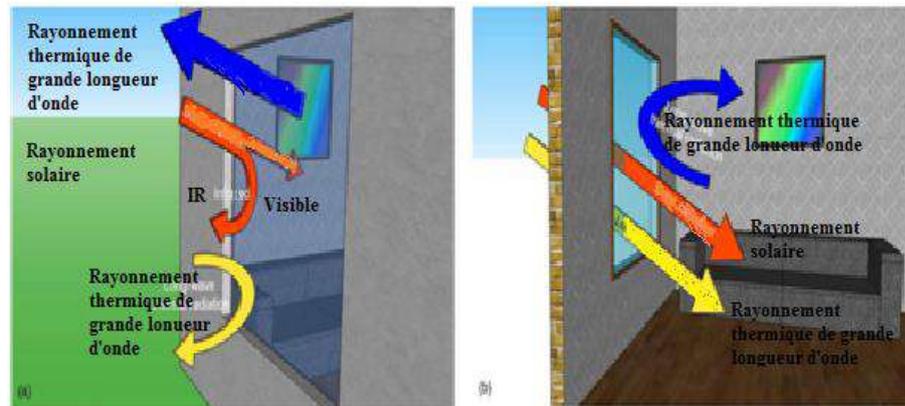


Figure II.3. Propriétés optiques de la fenêtre idéale en climats chaud et froid [69]

#### II.4.1.2. Les différents types de vitrages

Les échanges thermiques entre la fenêtre et l'occupant se font selon trois modes de transfert, par rayonnement de GLO, par pénétration du rayonnement solaire de CLO à travers le vitrage ainsi que par les courants d'air induits par le drainage de l'air froid hors de la surface de la fenêtre [71].

Par conséquent, un vitrage performant permet de contrôler le rayonnement thermique, la transmission de la chaleur par conduction et la ventilation provoquée par le phénomène de la convection. En se basant sur les caractéristiques précitées, un vitrage performant peut être classé en fonction des modes de transfert thermique tel qu'illustré par la figure II.4 [60].

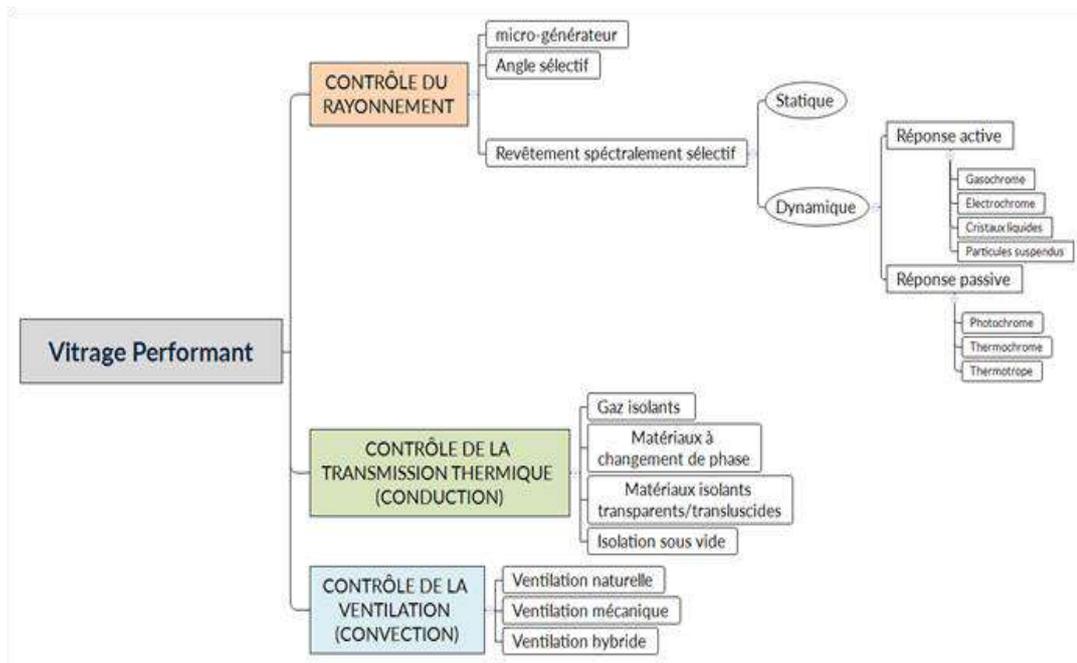


Figure II. 4. Vitrages performants selon leur mode de contrôle du mécanisme de transfert [60]

Parmi les techniques utilisées pour contrôler la fraction d'énergie échangée entre le vitrage et le bâtiment par rayonnement on peut citer le vitrage spectralement sélectif qui peut être statique ou dynamique.

#### II.4.1.2.a. Vitrage à propriétés statiques

Un vitrage est qualifié de statique lorsque ses propriétés thermiques et optiques (coefficients de transmission ( $\tau$ ) et de gain de chaleur solaire (CGCS), transmission thermique U), ne varient pas [72].

Une fenêtre à double ou triple vitrage est la combinaison de deux ou trois couches de verre séparées par un espace rempli d'air ou de tout autre gaz inerte afin de réduire les pertes de chaleur [60]. Cette technologie innovante, inventée au début du XX<sup>ème</sup> siècle aux états unis, est une véritable révolution dans le domaine de la fenestration car elle s'adapte à tous les bâtiments quelle que soit la qualité générale de l'isolation [53].

Shakouri et al. [73] ont prouvé que la consommation énergétique annuelle d'un bâtiment où le ratio fenêtre/surface au sol est de 16% doté d'une fenêtre à double vitrage est toujours supérieure à celle d'un bâtiment ayant une fenêtre à triple vitrage. De plus la fenêtre à double vitrage permet de gagner plus de chaleur que celle à triple vitrage. O. Kaynali [74] a démontré que les besoins de chauffage d'un bâtiment avec une fenêtre à simple vitrage sont supérieurs de 20% à ceux d'un bâtiment avec une fenêtre à double vitrage.

De nombreux modèles de vitrages à propriétés statiques peuvent être recensés dans la littérature, parmi lesquels :

- **Vitrage anti-rélecteur**

Les revêtements antireflets sont utilisés dans les vitrages depuis les années 60 pour réduire l'éblouissement et les gains solaires par la réduction de la différence entre les indices de réfraction du verre et de l'air. Composés de nanoparticules d'oxydes métalliques, les revêtements antireflets permettent de diminuer la part de lumière réfléchi et d'augmenter celle de la lumière transmise au travers du vitrage.

Parmi les oxydes métalliques utilisés on trouve le  $\text{SiO}_2$ , le  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et le  $\text{MgF}_2$ . Cependant, le  $\text{SiO}_2$  reste le plus largement utilisé en raison de sa stabilité, de son faible indice réfraction et de ses propriétés de diffusion de surface [75].

En termes de transmission lumineuse, un vitrage à couche antireflet permet au bâtiment de gagner 10% de plus en énergie lumineuse [71].

- **Vitrage autonettoyant**

Ce concept a été introduit pour la première fois par Watanabe et ses collaborateurs en 1992, sur un carré de céramique revêtu d'une couche d'oxyde de titane [71].

Un revêtement autonettoyant est appliqué sur le vitrage pour réduire les besoins d'entretien et contrôler le rayonnement solaire en réduisant la contamination organique de la surface du verre [69].

Ce type de vitrage est recouvert par un revêtement de type oxydes métalliques inorganiques hydrophiles et photocatalytiques, spécialement le dioxyde de titane  $\text{TiO}_2$ . La matière organique sur la vitre réagit par une réaction chimique photocatalytique induite par le rayonnement UV avec le  $\text{TiO}_2$ . A cause de l'hydrophilie du verre autonettoyant, les gouttelettes d'eau se propagent en une couche uniforme (équivalente à un film) sur sa surface. Ainsi, la pluie lave le vitrage car le film glisse vers le bas [75].

- **Vitrage à faible émissivité**

Connu également sous l'appellation "low E", ce type de vitrage a été développé la première fois aux débuts des années 80. Le traitement du verre transparent ordinaire (caractérisé par un coefficient d'émission élevé  $\epsilon=0.84$ ) avec une fine couche de revêtement dont l'épaisseur varie entre 10 et 75 nm réduit son émissivité à des valeurs faibles de 0.03 et 0.15, ce qui améliore nettement sa réflexion du rayonnement aux grandes longueurs d'onde (figure II.5) [75].

Ainsi, le vitrage à faible émissivité permet aux apports solaires de CLO de pénétrer dans la maison (courtes longueurs d'onde), d'une part et empêche la perte de chaleur émise par les objets à l'intérieur du bâtiment (grandes longueurs d'onde) en hiver, d'autre part. Inversement, en été, ce vitrage empêche les gains thermiques par le rayonnement des objets extérieurs [75].

Des travaux récents [71] ont montré clairement que ce type de vitrage permet de réduire les gains de chaleur à travers les fenêtres de près de 48 %.

Les revêtements à faible émissivité utilisés précédemment étaient basés sur des semi-conducteurs, In-SnO<sub>2</sub> (ITO) ou bien F-SnO<sub>2</sub> (FTO), caractérisés par leur durabilité et leur adéquation aux climats froids.

A l'heure actuelle, les revêtements utilisés sont constitués de plusieurs couches à base d'argent appliqués sur du verre trempé. Ils ont une meilleure transparence, une émissivité plus réduite et une transmission solaire réglable en fonction du type de climat (chaud ou froid) [75].

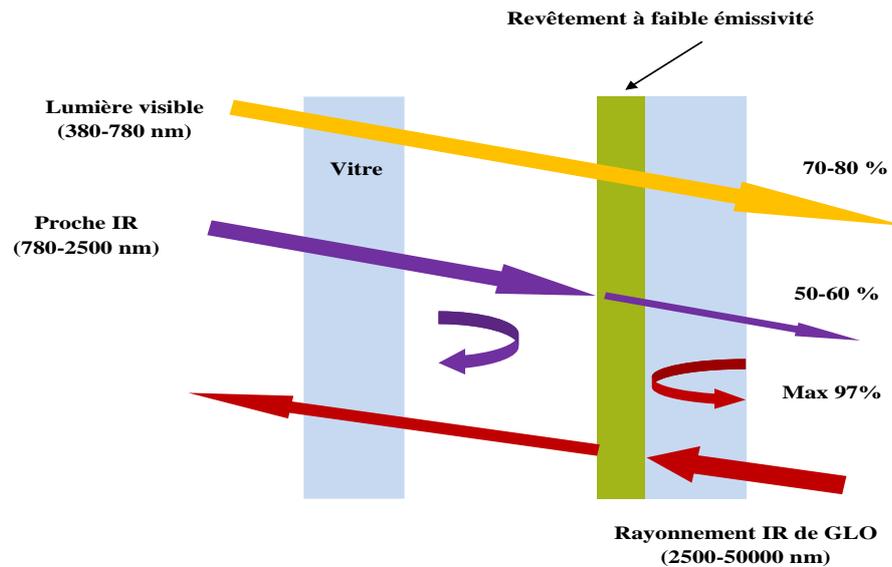


Figure. II.5. Revêtements à faible émissivité sur la troisième surface de la vitre pour les climats froids [75]

- **Vitrage électrothermique**

Appelés aussi vitrages chauffants par effet Joule, ils ont été développés au début des années 80. Ce type de vitrage est fabriqué en déposant, sur un panneau de verre ou de polymère flexible, une couche d'oxydes métalliques transparents électriquement conducteurs, principalement les ITO et FTO (figure II.6) [75].

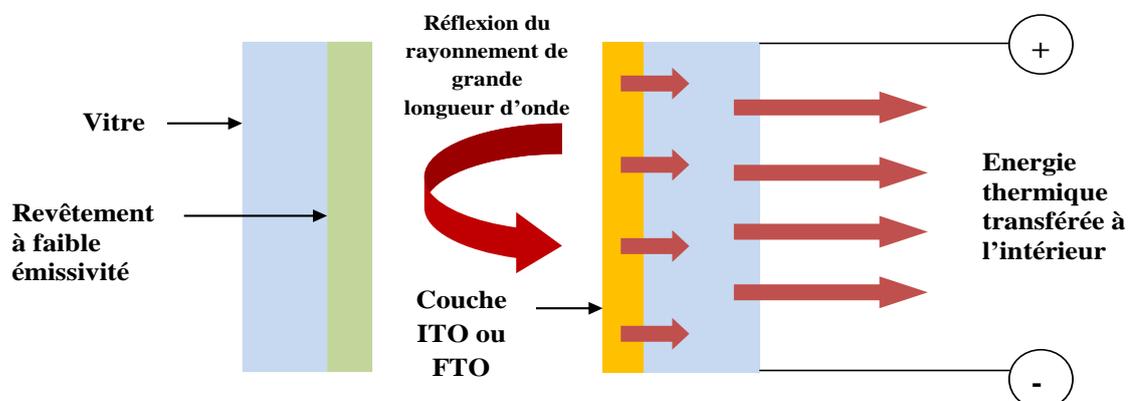


Figure II. 6. Vitrage électrothermique [75]

- **Vitrage photo-thermique**

C'est un vitrage revêtu d'une couche d'un matériau spectralement selectif caractérisé par une transmission élevée du rayonnement visible et d'une forte absorption du rayonnement UV et du proche IR.

Ce type de vitrage convertit le rayonnement absorbé en rayonnement thermique IR à grande longueur d'onde, ce qui permet de réduire la différence de température entre le vitrage et le milieu ambiant intérieur. Sur sa face intérieure, est appliquée une couche de revêtement photothermique sur laquelle est posée un revêtement à faible émissivité pour empêcher les pertes de rayonnement IR (figure II.7) [75].

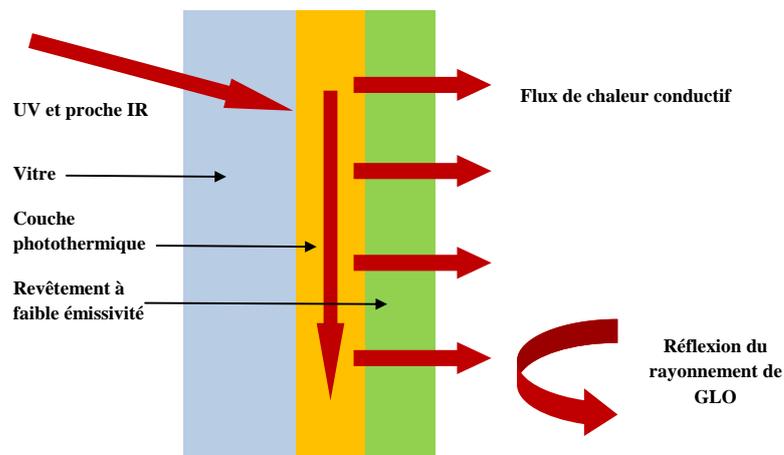


Figure II. 7. Revêtement photothermique à faible émissivité sur la face intérieure du vitrage [75]

#### II.4.1.2.b. Vitrage à propriétés dynamiques

De nos jours, les systèmes de fenestration sont devenus de plus en plus développés spécialement ceux dont les propriétés sont passées de l'état statique à l'état dynamique grâce à de nouvelles technologies [72].

Un vitrage dynamique ou intelligent utilise une technologie qui lui acquiert la faculté de changer ses propriétés physiques en réponse à un courant électrique ou à un changement des conditions de l'environnement. Il permet de favoriser l'apport d'éclairage naturel même si les apports solaires sont limités [60].

Parmi les vitrages à propriétés dynamiques, on peut trouver :

- **Vitrages à cristaux liquides**

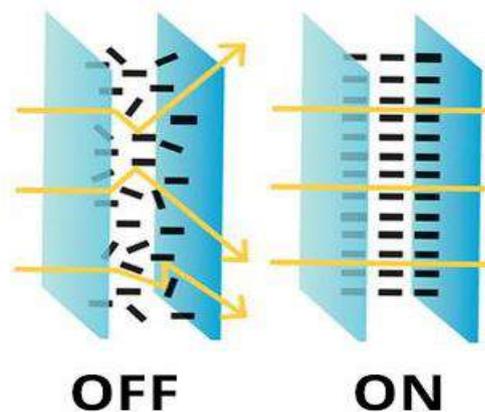
Ce genre de vitrage est conçu en s'inspirant de la technologie des écrans LCD. Une matrice polymère, placée entre deux électrodes, contient des cristaux liquides sous formes de microgouttelettes. En mode hors tension (mode OFF), ces gouttelettes entre les deux vitres sont disposées aléatoirement ce qui leur permet de réfléchir la lumière incidente dans toutes

les directions. Dans ce cas, le vitrage se trouvera dans un état translucide et empêchera la visibilité de l'autre côté de la fenêtre (figure II.8). Lorsque le vitrage est alimenté par un courant alternatif (mode ON), les cristaux liquides vont s'aligner régulièrement selon la direction du champ électrique ce qui permet à la lumière de traverser la vitre, d'où la transparence du vitrage [60,76].

Les avantages d'un tel vitrage sont [77,78] :

- Processus de fabrication relativement simple ;
- Bonnes propriétés optiques ;
- Un grand angle de vision ;
- Temps de commutation rapide ;
- Absence de traitement de surface ;
- Possibilité de contrôler le niveau de transmission ;

Cependant, ce dispositif nécessite une puissance continue pour fonctionner et se dégrade à long terme par l'effet des rayons UV [60, 76].



Figures II. 8. Vitrages à cristaux liquides [60]

Hemaida et al. [78] ont étudié un vitrage à cristaux liquides qui passe d'un état translucide à un autre transparent, lorsqu'une différence de potentiel de 20 V (AC) lui est appliquée. Pour ce faire, les auteurs ont exposé le vitrage à différents rayonnement solaires (1000, 800, 600 et 400 W/m<sup>2</sup>) pendant 180 mn. L'évaluation optique a montré que le vitrage étudié possède une faible transmission pour le rayonnement UV (8 %) et le proche IR (44 %) à l'état translucide. Il a été également noté un coefficient de gain solaire de ce vitrage de 0,68 et de 0,63, respectivement pour les états transparent et translucide, ce qui indique que l'échantillon étudié pourrait être plus efficace pour réduire les charges thermiques dans un climat froid.

- **Vitrages à particules suspendues**

Ce type vitrage peut changer de transmission optique lorsqu'il est alimenté par un courant alternatif. Ainsi, il peut fonctionner directement en le connectant à un secteur tel qu'illustré par la figure II.9. La tension requise pour passer de l'opacité à la transparence est

proportionnelle à la surface du vitrage et varie généralement entre 20 et 110 V. La plage de transmission du vitrage à particules suspendues dans le domaine du visible varie généralement de 20 à 60 % (ou de 10 à 50 %) et de 0,1 à 10 %, pour les états « opaque et transparent », tandis que la vitesse de commutation varie entre 100 et 200 ms [79].

Les investigations menées par Ghosh et al. [79], ont démontré que les coefficients globaux de transfert thermique relatifs aux vitrages à particules suspendues aux états, opaque et transparent sont quasiment similaires. En outre les auteurs ont prouvé qu'une cellule munie de ce type de vitrage, (opaque ou transparent) ne subit pas une élévation de la température.

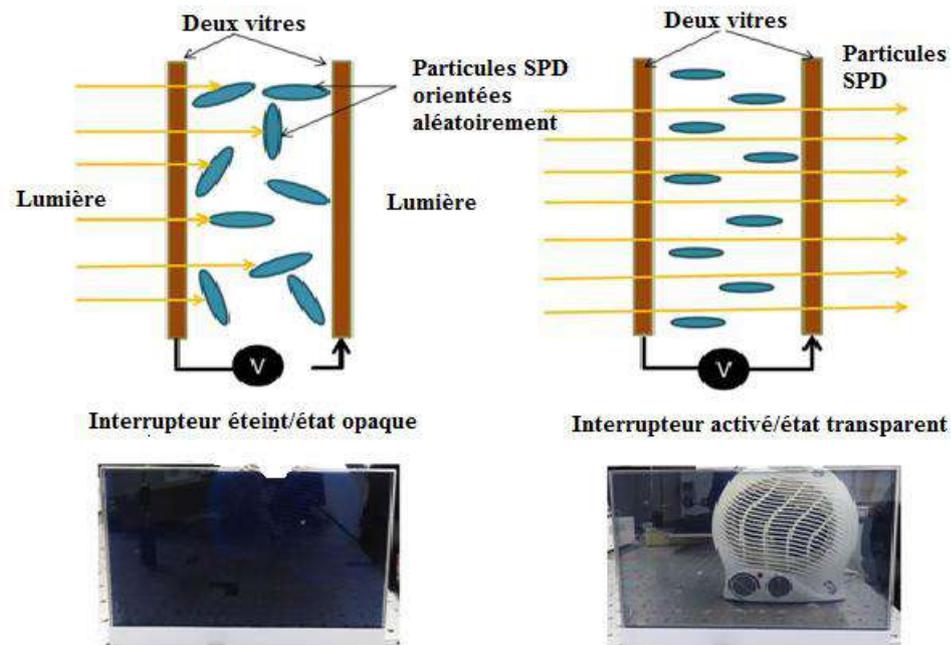


Figure II. 9. Vitrages à particules suspendues [79]

- **Vitrage électrochrome**

Parmi les types de fenêtres intelligentes, la technologie du vitrage électrochrome est très populaire. Au cours des deux dernières décennies, ce type de vitrage a été le plus commercialisé au Japon, en Europe et aux États-Unis [72].

Le terme électrochromisme a été employé, à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, pour identifier l'ensemble des réactions électrochimiques réversibles qui provoquent un changement de transmission de la lumière qui traverse un matériau [80]. Ainsi, un matériau est qualifié d'électrochrome s'il possède la faculté de modifier, sous l'action d'un courant ou d'un potentiel électrique, sa transmission et sa réflexion (figure II.10) [81]. Il existe trois types de vitrages électrochromes, organique, inorganique ou hybride [80].

La structure des dispositifs électrochromes typiques est composée de cinq couches, une électrode (électrochromique), un électrolyte (conductrice d'ions) et une couche de stockage d'ions qui est une contre-électrode prise en sandwich entre deux conducteurs transparents).

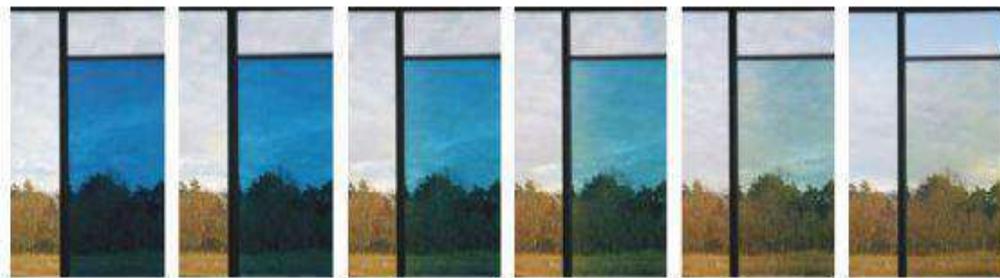
La structure multicouche peut être déposée entre des substrats de verre feuilleté ou sur des films polymères souples comme le PET [75].

Le vitrage électrochrome, est moins énergivore comparativement à d'autres technologies de vitrage intelligent telles que les dispositifs à cristaux liquides ou à particules en suspension. Cependant, il possède un temps de commutation plus lent [82].

Les Indicateurs de performance de différents systèmes électrochromes sont regroupés dans le tableau II.6.

Type de vitrage électrochrome	Temps de commutation	Effet miroir	Contraste	Durabilité
Organique	30 s	Inexistant	600	Sensible à la radiation UV
Inorganique	Quelques secondes	Quelques heures	30	Bonne durabilité à long terme
Hybride	Quelques minutes	Une semaine	30	Raisonnable à long terme

**Tableau II.6. Indicateurs de performance de différents systèmes électrochromes. Valeurs moyennes pour un système de 10 x 10 cm [80]**



**Figure II. 10. Séquence de changement d'un état clair à un état teinté pour un vitrage électrochrome [60]**

- **Vitrage gazochrome**

Il est considéré comme l'une des technologies des fenêtres intelligentes les plus répandues. Le vitrage gazochrome exploite les propriétés des matériaux chimiochromes, qui ont la capacité de changer de couleur lorsqu'ils sont exposés à certains éléments chimiques. Un tel vitrage est constitué d'une fine couche de trioxyde de tungstène ( $WO_3$ ) de moins de 1 mm d'épaisseur, recouverte d'une fine couche de platine.

Lorsque l'hydrogène gazeux dilué à une concentration inférieure à 3%, est en contact avec ce revêtement, une réduction du tungstène en résulte, ce qui donne une coloration bleue au vitrage. En revanche, ce dispositif blanchit lorsqu'il est exposé à l'oxygène et prend ainsi sa couleur transparente d'origine (figure II.11) [83, 84].

Feng et al. [85] ont étudié numériquement l'effet des fenêtres à vitrage gazochrome, sur la consommation d'énergie des bâtiments dans les régions climatiques de la Chine. Les auteurs ont prouvé que ce type de vitrage peut réduire la consommation annuelle des charges HCVC de 25 à 35 % par rapport au verre flotté transparent simple.

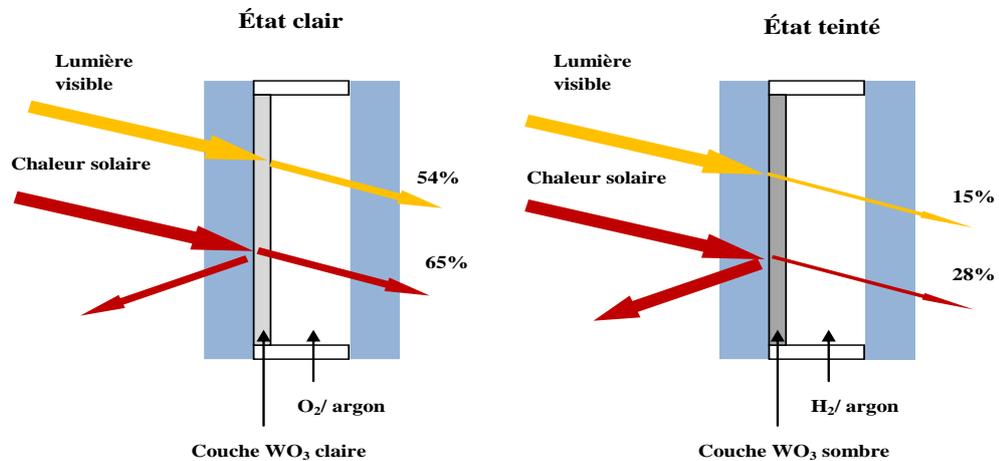


Figure II. 11. Vitrage gazochrome [84]

- **Vitrage photochrome**

Le photochromisme est un phénomène dynamique qui a été découvert en 1888 par Wilhelm Marckwald, lorsqu'il étudiait les propriétés de la molécule tétrachloronaphtalène [82]. La fenêtre photochrome est constituée d'une couche de verre couverte par un film photochrome. Ce type de vitrage intelligent passe d'un état clair à un autre teinté en réponse à l'absorption du rayonnement solaire UV par la couche photochrome. Cependant, son exposition simultanée aux rayonnements visible et UV lui donne une couleur teintée transparente (figure II.12) [75].

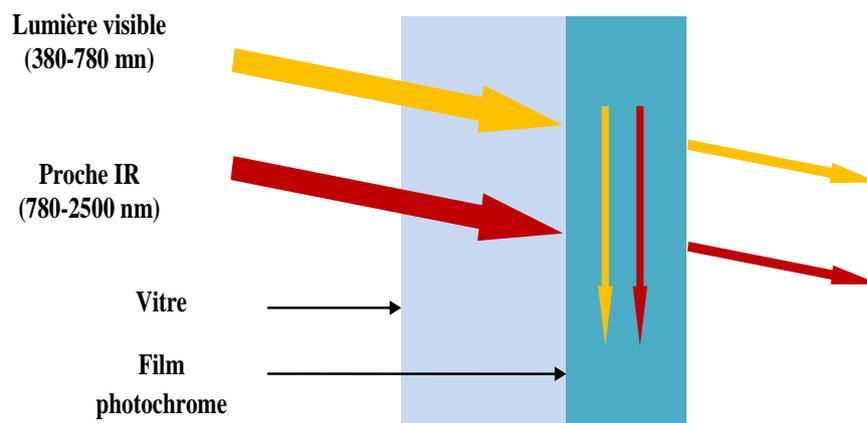


Figure II. 12. Incorporation de films photochromiques flexibles sur la surface vitrée intérieure [75]

- **Vitrage thermochrome**

Le thermochromisme, découverte par Morin en 1959, représente la capacité d'un matériau de changer d'une façon réversible ses propriétés thermo-optiques lorsqu'il est soumis à un changement de température. Généralement, la température d'activation du processus thermochromique est comprise entre  $-10\text{ °C}$  et  $69\text{ °C}$  [60, 86].

Ainsi, lorsqu'un vitrage thermochrome absorbe de l'énergie solaire, il voit sa température augmenter d'où l'activation du phénomène thermochromique ce qui conduit à la limitation de la transmission de l'énergie solaire incidente [60].

Arrivé à sa température de transition critique évaluée à  $68\text{ °C}$ , le dioxyde de vanadium  $\text{VO}_2$  subit une transformation structurelle qui le fait passer d'un état semi-conducteur clair relativement transparent au rayonnement infrarouge à un état métallique opaque et absorbant à un tel rayonnement [65]. Le principe de fonctionnement d'un double vitrage thermochrome est illustré par la figure II.13.

Les fenêtres à vitrage thermochrome ont la capacité de réduire la demande en énergie de chauffage et de refroidissement de 5,0 à 84,7% en fonction des conditions climatiques, comparativement à une fenêtre dotée d'un verre ordinaire [65].

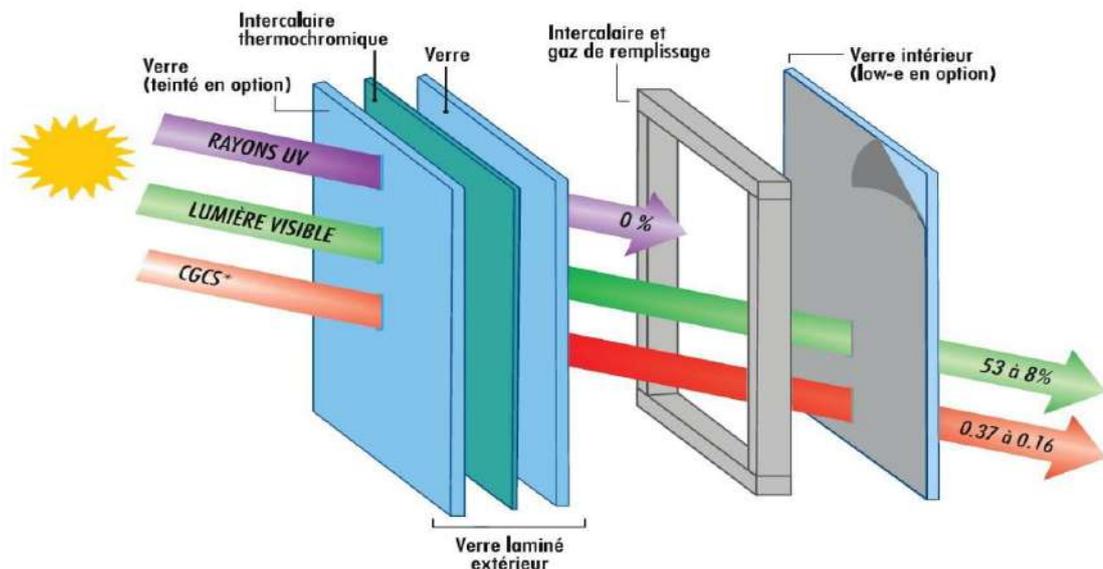


Figure II.13. Principe de fonctionnement d'un double vitrage thermochrome [60]

- **Vitrage thermotrope**

Sous l'effet d'un changement de températures, les propriétés optiques d'un tel vitrage varient et l'état de ce dernier passe de la transparence à la translucidité [60]. Lorsque la température de commutation est atteinte, les deux composants principaux d'une couche thermotrope (polymère et eau) se mélangent de manière homogène et leurs indices de réfraction sont apparentés, ce qui donne une apparence claire avec une transmission de 85% [87]. Bien que le

vitrage thermotrope fonctionne selon le même principe que le vitrage thermochrome, le changement de ses propriétés se fait via un processus physique (figure II.14).

Resch et al. [88] ont montré que les propriétés optiques des films thermotropes aux états transparent et translucide dépendent étroitement des différences entre les indices de réfraction des composants, du contenu additif et de la distribution, ainsi que de la taille du domaine de diffusion.

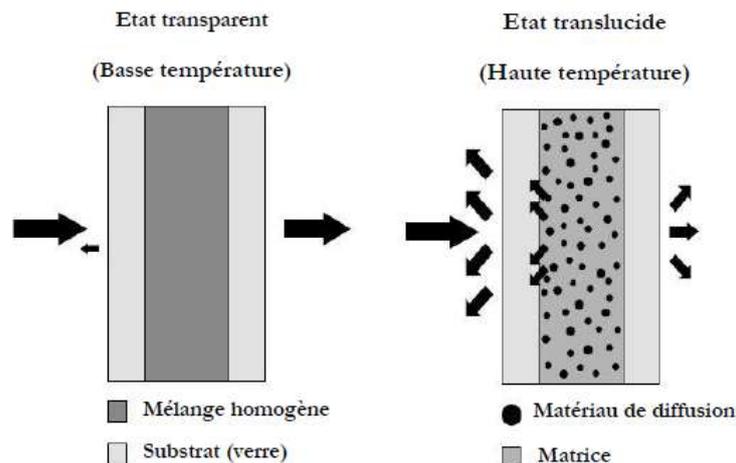


Figure II.14. Phases de transition et réarrangement des molécules dans le vitrage thermotrope [60]

Il existe bien d'autres techniques pour contrôler les échanges thermiques par conduction entre le vitrage et le milieu intérieur, parmi lesquelles :

- **Vitrage avec matériaux à changement de phase**

Les études récentes sur la combinaison des composantes transparentes de l'enveloppe du bâtiment et des MCP remontent à une trentaine d'années. Ce concept a été développé initialement pour être utilisé dans les climats froids. Des travaux récents ont montré qu'il peut être également efficace pour les climats chauds et tempérés [89, 90].

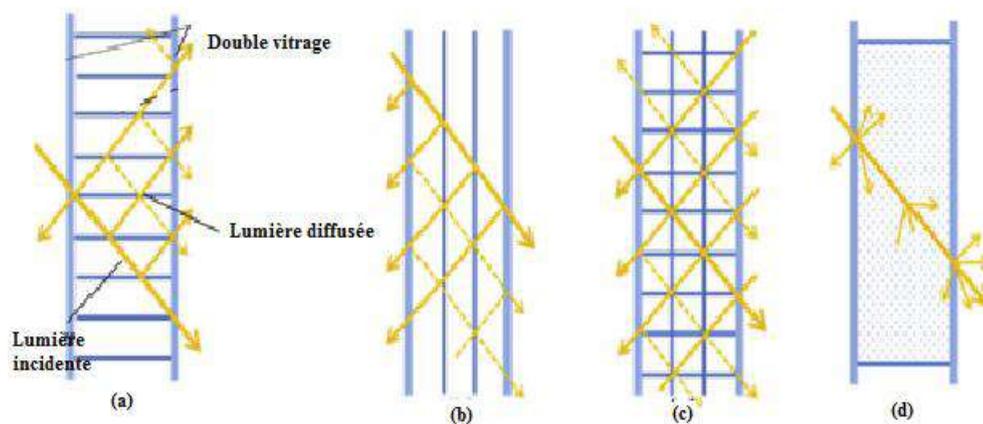
Ce système performant et prometteur est constitué d'un double ou triple vitrage dans lequel la lame d'air est remplacée par un MCP. Pendant la période d'ensoleillement, la couche de verre absorbe de l'énergie solaire qu'elle transmettra par conduction au MCP qui passera de l'état solide à l'état liquide, en gardant une température constante. En l'absence du rayonnement solaire, le MCP retrouve son état solide initial en libérant la quantité d'énergie latente emmagasinée [91].

Dans un travail expérimental B. Nghana et al.[92], ont démontré qu'un bâtiment ayant un vitrage avec MCP dans un climat modéré a permis de réduire la consommation d'énergie de 57% en hiver. Les auteurs ont constaté que le PCM avait réduit la température maximale de l'air intérieur de 0,6 °C et augmenté la température minimale de 0,8 °C.

- **Vitrage à matériaux isolants transparents/translucides**

L'utilisation des matériaux isolants transparents est l'une des stratégies adoptées pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments. Ce type de matériaux isolants a la faculté de réduire les pertes de chaleur en offrant une résistance thermique élevée tout en transmettant efficacement l'énergie lumineuse [93].

Les matériaux isolants transparents sont placés dans l'espace interstitiel d'un double vitrage. En fonction de leurs structures, ces matériaux peuvent être classés en quatre catégories, perpendiculaire (a), parallèle (b), mixte (c) ou bien homogène (c) (figure II.15) [93].



**Figure II. 15. Schéma de principe de quatre types typiques des matériaux isolants transparents a) structure perpendiculaire, b) structure parallèle, c) structure mixte et d) structure homogène [93]**

Une étude numérique entreprise par Sun [94] a révélé qu'un double vitrage doté d'une couche de 3 mm d'un matériau isolant transparent ayant une structure alvéolaire pouvait conduire à une réduction de 35%-46% de la conductance thermique comparativement à un simple double vitrage.

- **Vitrage à gaz isolant**

L'espace interstitiel dans un vitrage multiple peut être comblé par de l'air ou par un gaz noble. L'air est caractérisé par une conductivité thermique (à température ambiante et à pression atmosphérique) de 0.026 W/m.K qui est plus élevée que celles de l'argon (0.018), du krypton (0.0095) et du xénon (0.0055), qui ont donc un pouvoir isolant thermique meilleur de celui de l'air. De plus ces gaz sont également plus lourds et plus visqueux, d'où une réduction des pertes thermiques convectives. Bien que les pouvoirs isolants du krypton et du xénon soient meilleurs que celui de l'argon, ce dernier reste le plus largement utilisé de part, son moindre coût [70, 71].

Le gaz isolant permet de diminuer en été la fraction de l'énergie solaire qui pourrait être transmise par le vitrage, alors qu'en hiver, il réduit les pertes thermiques (figure II.16) [95].

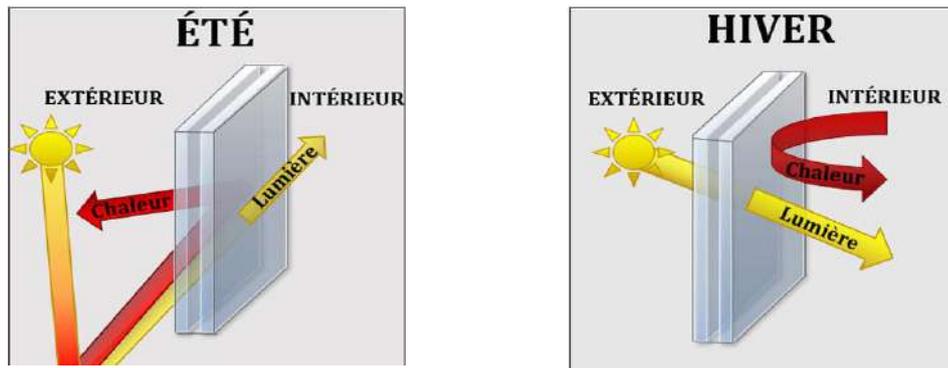


Figure II.16. Vitrage à gaz isolant [95].

- **Vitrage sous vide**

Ce concept a été introduit la première fois en 1913 par Zollerin mais sa fabrication réalisée par Robin Son et Collins à l'Université de Sidney [96], n'a pas connu de succès qu'en 1989.

Le vitrage sous vide est une technologie performante qui permet de réduire les pertes de chaleur et d'offrir une transmittance visible élevée, sans nécessiter un processus de fabrication compliqué [96]. Ce type de vitrage est composé de deux feuilles de verre séparées par un milieu sous vide et d'un ensemble de piliers, (à une distance de 2 à 3 m les uns des autres), qui servent de support pour maintenir ces dernières (figure II.17) [96].

En utilisant des piliers de support en acier inoxydable et quatre revêtements à faible émissivité, le vitrage sous vide peut avoir un coefficient de transfert thermique global de  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Une amélioration de plus de 30% de ce dernier peut être obtenue si des piliers de support d'aérogel hautement isolants sont utilisés à la place des piliers de support conventionnels [96].

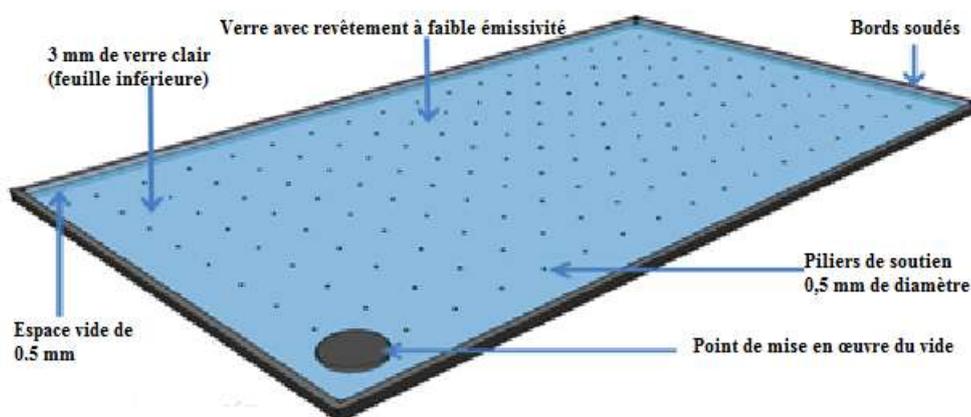


Figure II.17. Schéma d'un vitrage sous vide conventionnel [96]

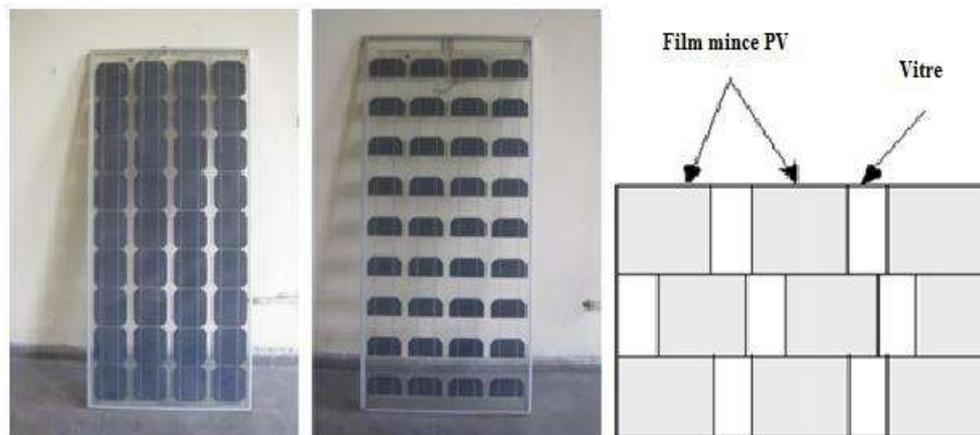
Il existe d'autres types de vitrages performants tels que :

- **Vitrage photovoltaïque**

C'est un nouveau concept de l'architecture moderne qui en plus de l'économie d'énergie qu'il apporte, permet de produire de l'énergie électrique d'où sa contribution dans la réduction des émissions des gaz à effets de serre [69, 71].

Le vitrage photovoltaïque s'inscrit dans la technologie des PV semi transparents intégrés aux bâtiments BISPV (Building Integrated Semi Transparent PV), une technologie relativement nouvelle qui a commencé à être importante à la fin des années 1990. Dans cette technologie, il existe plusieurs types de cellules PV qui peuvent être opaques en silicium intégrées à une surface transparente, ou bien fabriquées avec un film transparent tel que le a-Si/Lc-Si, ou alors des cellules organiques [97].

Une des variantes des PV semi-transparentes, sont les cellules opaques intégrées à une surface transparente espacées tel que le rayonnement solaire puisse être transmis entre les cellules [97]. Plusieurs configurations de BISPV (figure II.18), ont été étudiées par Vats et al. [46].



**Figure II. 18. Configurations des cellules PV opaques intégrées à une surface transparente [46]**

Selon Tadyet al. [98], l'augmentation de la surface des cellules PV opaques intégrés à une couche transparente permet de produire davantage d'électricité mais réduit les gains solaires. Ainsi, un équilibre doit être réalisé entre l'éclairage, les gains thermiques et l'électricité produite.

Une autre technologie des BISPV est basée sur la pulvérisation d'un revêtement de nanoparticules de silicium sur la fenêtre, qui fonctionnent comme des cellules photovoltaïques [71]. Ce type de vitrage PV présente une meilleure transmittance comparativement au cas précédent.

### II.4.1.3. Tache solaire et comportement thermique du bâtiment

Le vitrage de la fenêtre laisse passer le rayonnement solaire global (direct et diffus). Le rayonnement solaire direct va projeter la surface du vitrage sur les parois verticales et sur le plancher du bâtiment en créant une surface éclairée nommée « tache solaire » [99].

L'utilisation d'une méthode de calcul, aussi précise que possible, de la distribution de la tache solaire sur les surfaces internes des parois d'un bâtiment, est un paramètre très important qui affecte directement la précision des résultats de simulation thermique des bâtiments. La prise en compte précise de la tache solaire dans les codes de calcul a un impact direct sur les températures des parois, les coefficients d'échanges thermiques (conductif, convectif et radiatif) et sur la température de l'air ambiant. Le confort thermique et l'estimation des besoins de chauffage et de climatisation sont également influencés par la prise en compte de la tache solaire [100].

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différentes investigations qui ont été avancées pour étudier

Pour donner au lecteur une vision globale sur l'impact de la prise en compte précise de la tache solaire dans les modèles thermiques sur la température, le confort thermique et la consommation d'énergie, les travaux de quelques auteurs en rapport avec le sujet en question seront relatés dans ce qui suit.

- **En rapport avec la température et le confort thermique**

Rodler et al. [101] ont étudié l'impact de la tache solaire sur la température opérative et le confort thermique. Les températures opérative et radiante sont des paramètres importants pour l'évaluation des indices du confort thermique (PMV et PPD) qui pour être calculés, nécessitent en plus les champs des températures de surfaces.

Selon la norme ISO 7730, qui prend également en compte l'inconfort local, la température opératoire doit être maintenue à  $24,5 \pm 1$  °C pour un espace ouvert et  $24,5 \pm 2,5$  °C pour un espace fermé. Les différences verticales de la température opératoire quant 'à elles ne doivent pas dépasser 2°C pour un espace ouvert et 4°C pour un espace fermé (restaurant).

Les auteurs ont dressé un modèle numérique qui simule avec précision le comportement thermique transitoire d'un bâtiment constitué d'une seule pièce ( $3 \times 3 \times 3$  m<sup>3</sup>). Un modèle de calcul de la surface de la tache solaire et sa localisation a été introduit dans le code de calcul.

Les auteurs ont démontré que la température opératoire et sa répartition sont influencées par la surface de la tache solaire et sa localisation. En effet, d'après les résultats obtenus, les températures des surfaces internes des parois varient entre 28 et 46 °C à 15h30. Ainsi, cet écart a un impact direct sur les températures opératoires qui sont comprises entre 31.5° C et 28.5 °C soit une différence de 3° C [101].

Les auteurs ont déduit que la prise en compte de la tache solaire dans le modèle mathématique influence directement l'estimation du confort thermique.

- **En rapport avec la consommation d'énergie et l'inertie thermique**

Tittlein [102] a étudié l'impact du modèle choisi de la tache solaire sur la consommation d'énergie d'un bâtiment. Pour aboutir à cette fin, l'auteur a étudié le cas d'une école constituée de deux pièces superposées dont les dimensions sont indiquées sur la figure II.19.

L'auteur a comparé deux types d'enveloppe, l'une fortement inertielle construite avec du béton lourd et l'autre de faible inertie thermique fabriquée avec du bois. Les deux enveloppes sont isolées avec une couche de 20 cm d'isolant thermique.

En comparant ses résultats avec d'autres ici de la littérature [102], Tittlein a démontré que, dans le cas du bâtiment à faible inertie, la puissance de chauffage est presque la même quel que soit le modèle choisi de la tache solaire. Ce comportement s'explique par le fait que les parois sont légères et ne stockent pas assez d'énergie pour la restituer la nuit. A l'opposé du bâtiment à forte inertie où les écarts des besoins de chauffage avec et sans prise en compte de la tache solaire peuvent atteindre jusqu'à 8.5%.

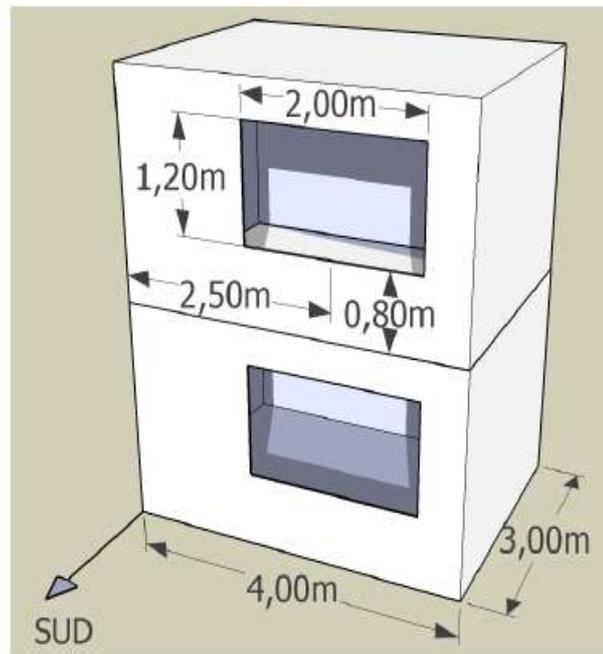


Figure II.19. Dimensions des pièces testées [102]

#### II.4.2. Les matériaux de construction

L'enveloppe du bâtiment est considérée comme étant sa composante principale. Elle présente plusieurs fonctions qui consistent essentiellement à assurer à l'occupant une protection du milieu extérieur et de lui offrir un espace de vie intime, sain et confortable.

La qualité de l'enveloppe est un paramètre clé dont dépend la consommation d'énergie. Aussi, pour améliorer le caractère énergétique et environnemental des bâtiments, il est

primordial d'optimiser les composantes de l'enveloppe par le choix adéquat des matériaux de construction, l'intégration de l'isolation thermique et/ou par l'option d'une enveloppe hybride. L'enveloppe du bâtiment est constituée des murs, du toit, du plancher, des fenêtres et des portes, qui seront succinctement présentées dans ce qui suit.

#### II.4.2.1. Le toit

Vertical ou incliné, le toit représente une partie très importante de l'enveloppe du bâtiment. Il reçoit plus d'énergie que les parois verticales et influence ainsi, de façon directe, le confort thermique des occupants notamment dans le cas des bâtiments à grandes surfaces. Il est responsable de 70% des pertes calorifiques globales [103]. Pour améliorer ses performances thermiques, le toit a subi plusieurs améliorations et fait l'objet de multiples recherches. Parmi les types de toits communément utilisés on peut trouver :

- **Toits en maçonnerie**

Les toits en maçonnerie lourde tel que le béton de ciment armé sont caractérisés par leurs résistances aux parasites, aux catastrophes naturelles ainsi que par la disponibilité et la rentabilité du béton. En outre, ce type de toit a une forte inertie thermique qui lui permet de stocker la chaleur sur une longue durée causant ainsi un inconfort thermique et une augmentation de la consommation d'énergie durant les périodes chaudes. Les températures intérieures peuvent atteindre 40°C pour une température de toit de 65°C. Pour résoudre ce problème, plusieurs techniques ont été proposées telles que l'ombrage, les revêtements ou bien les systèmes de toit composés [104].

- **Toits ventilés et micro-ventilés**

Un système de toit ventilé est constitué de deux dalles délimitant un conduit à travers lequel circule l'air qui va réduire la quantité de chaleur absorbée par le toit et transférée vers l'espace habitable (figure II.20). Ce type de toit est courant dans les zones chaudes. Il est particulièrement utilisé dans les bâtiments de hauteur modérée et de grande surface [104]. Le toit ventilé a suscité l'intérêt des scientifiques et a fait l'objet de plusieurs recherches expérimentales et numériques.

Il a été démontré dans une étude numérique menée par Dong Li et al. [103] que la pente du toit ventilé et la taille de la sortie d'échappement jouent un rôle important dans ses performances. L'augmentation de ces deux paramètres permet la diminution de la température moyenne et du flux de chaleur de la surface supérieure de la couche de base. Les auteurs recommandent une pente du toit comprise entre 33 et 40 %, un rapport entre la surface de sortie et de l'entrée de l'air de 0,5 à 1 ainsi qu'un coefficient d'absorption de la surface extérieure du toit dans l'intervalle 0,6 à 0,9.

Dans une autre étude réalisée Kosny [105], il a été révélé que ce type de toit permet de bénéficier, d'une réduction de 30% et de 50% des charges de chauffage et de refroidissement, respectivement.

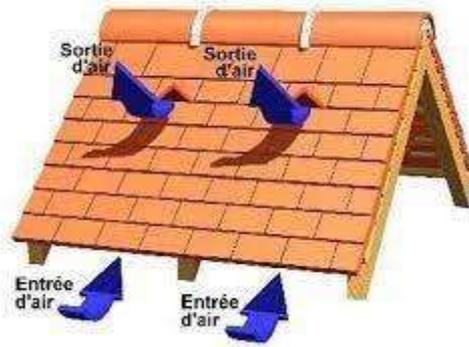


Figure II.20. Toit ventilé

- **Toits voûtés et en dôme**

Ce type de toit est largement utilisé dans l'architecture vernaculaire dans les régions chaudes et sèches. Très populaires dans le moyen orient [104, 106], les toits voûtés et en dôme, construits en briques, sont largement utilisés pour se protéger contre les tempêtes de vents et le fort ensoleillement [106], qui caractérisent ces régions.

L'énergie solaire absorbée par ce toit élève sa température, qui devient supérieure à celle de l'air ambiant. Ainsi, le rayonnement thermique du toit, ajouté au vent qui souffle sur le dôme vont augmenter le transfert de chaleur par convection vers le milieu environnant. Le reste de la chaleur absorbée par le dôme est conduit à travers le matériau du dôme par conduction pour être finalement transféré au milieu intérieur par convection et par rayonnement [107].

La géométrie spéciale de ces toits qui provoque un accroissement de la vitesse du vent au-dessus du dôme, ajoutée à leurs surfaces plus grandes que celles des toits plats conduisent à une augmentation significative du coefficient de transfert de chaleur par convection.

M. Hadavand et al. [107] ont mené une étude comparative entre les toits voûtés et les toits plats, dans laquelle ils ont trouvé que la température de surface des toits plats est quasi uniforme tandis que celle des toits voutés varie tout au long de la surface. En outre, les auteurs ont noté que le toit voûté, avec des angles de rebord inférieurs à  $120^\circ$ , transmet un flux de chaleur inférieur à celui d'un toit plat, mais que celui-ci augmente pour des angles de rebord plus élevés. Néanmoins, il a été constaté que pour tous les angles de rebord des bâtiments à toit voûté, le flux de chaleur transmis reste inférieur à celui du toit plat, pendant la nuit et tôt le matin.

- **Toits verts**

Entièrement ou partiellement recouvert d'une couche de végétation (figure II.21), un toit vert est capable de refléter le rayonnement solaire plus efficacement que la plupart des toits classiques à cause de son albédo qui varie entre 0.7 et 0.85. A titre indicatif l'albédo des toitures bitume/goudron/gravier est de l'ordre de 0.1 à 0.2 [104].

Il a été démontré qu'à Toronto le toit vert permet d'obtenir des réductions moyennes de gain de chaleur en été et de perte de chaleur en hiver respectivement de 70 à 90 % et de 10 à 30 % [104].



Figure II.21. Toit vert

- **Systemes d'isolation des toits**

Isoler un toit thermiquement c'est de lui faire acquérir une barrière de transmission capable d'économiser les charges de chauffage en hiver et de refroidissement en été. En plus d'être un isolant thermique, le toit peut aussi être équipé d'une barrière de transmission radiante à savoir une couche réfléchissante capable de refléter le rayonnement IR (figure II.22) [104].

Parmi les isolants thermiques du toit, on peut citer le polystyrène et le polyuréthane qui ont la capacité de réduire la charge de plus de 50 % par rapport à un toit de bâtiment sans isolation de mêmes dimensions [104].

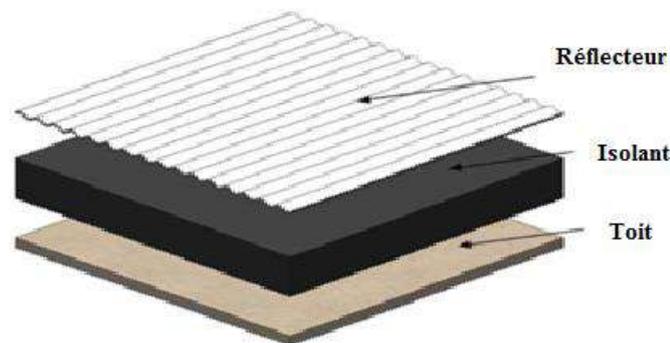


Figure II.22. Toit isolé doté d'un réflecteur [104]

- **Toitures photovoltaïques**

La production d'électricité par des panneaux PV intégrés dans les bâtiments nouveaux ou même existants est une alternative intéressante qui contribue significativement à la transition vers la production de l'énergie verte [108].

Des efforts importants ont été fournis ces dernières années pour intégrer le photovoltaïque dans l'enveloppe du bâtiment dont la capacité photovoltaïque mondiale a connu une augmentation moyenne de 60 GWp depuis 2010 et atteint les 580 GWp en 2019. Il est programmé d'atteindre une production mondiale de 8519 GWp en 2050 dont les 40 % de cette capacité seront couverts par les systèmes PV installés en toiture [109].

Les tuiles photovoltaïques qui sont directement installées sur la structure du toit remplacent les matériaux de toiture. Les cellules solaires en silicium cristallin sont choisies pour être collées directement sur les tuiles en céramique ou sur les ardoises de toit en fibrociment.

En raison de leur faible coût, il y a eu un intérêt croissant pour le PV à couche mince pour les applications BIPV. Les toitures en sandwich qui permettent simultanément la production d'électricité et l'isolation thermique prennent de plus en plus d'essor [104].

#### II.4.2.2. Les parois

De nombreuses solutions ont été proposées afin de diminuer les pertes thermiques à travers bâtiment, et d'améliorer ainsi les performances thermiques des parois, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- **Mur en béton léger**

Il est constitué de béton mélangé à des agrégats légers (pierre ponce, diatomite, argile expansée ou schiste expansé, ou laitier moussé, cendres de combustible pulvérisées frittées etc.), qui lui permettent d'avoir une densité inférieure à 2000 kg/m<sup>3</sup>. Actuellement le béton cellulaire auto clave est fabriqué en mélangeant le béton avec la poudre d'aluminium pour avoir de minuscules bulles d'air conduisant à une densité de 600 à 800 kg/m<sup>3</sup> [104] est de plus en plus utilisé.

- **Mur avec stockage de chaleur latente**

De nos jours, l'utilisation des systèmes de stockage thermique basés sur les matériaux à changement de phase est une stratégie très prometteuse [110]. Un tel système de stockage, basé sur le principe de la chaleur latente, permet d'atténuer les pics des températures diurnes et donc de refroidir/chauffer les bâtiments et d'économiser ainsi de l'énergie [110].

Pour améliorer la capacité de stockage d'un mur, un MCP lui est incorporé. Ce type de mur est généralement en béton ou en plâtre qui a un meilleur potentiel d'imprégnation que le béton. La capacité de stockage thermique d'un tel système dépend de la quantité du MCP imprégné dans les murs qui peut arriver jusqu'à 60 % du poids du mur [104].

Selon J. Koci et al. [110], l'application d'un enduit MCP à base de diatomite et de n-dodécanol, peut générer des économies annuelles de 55 à 650 kWh.

Les résultats de leur étude a permis aux auteurs de conclure que les enveloppes de bâtiment avec des matériaux porteurs ayant une faible conductivité thermique ou des assemblages muraux isolés thermiquement peuvent être considérées comme les plus appropriées pour l'utilisation d'une couche de stockage de chaleur latente sur le côté intérieur.

### II.4.2.3. L'isolation

Un isolant thermique est un matériau (ou un ensemble de matériaux) caractérisé par une faible conductivité thermique et une grande résistance à la chaleur, qui serait capable de retarder le débit de chaleur dans ou hors du bâtiment. L'intégration d'un tel matériau dans le bâtiment permet d'apporter des économies d'énergie et de réduire la taille des systèmes de ventilation. En général, l'épaisseur la plus appropriée de l'isolant pour un mur de 50 cm est de l'ordre de 25 à 30 cm [104].

L'isolation peut être appliquée sur la face externe ou interne de la paroi. Dans le premier cas, elle entraîne une forte inertie thermique car la température intérieure évolue lentement comme elle peut augmenter le temps de déphasage. Dans le second cas elle fait baisser l'inertie thermique et réduit l'espace habitable [111].

Selon une étude expérimentale réalisée par S. M. A Bekkouche sur un habitat fabriqué en pierre, la meilleure façon d'isoler ce dernier est de placer l'isolant seulement sur les murs exposés au soleil afin que le flux de chaleur qui traverse les surfaces isolées soit absorbé par les surfaces non isolées. Il a été remarqué que dans le cas où toutes les surfaces sont isolées, le flux de chaleur qui traverse l'enveloppe est piégé à l'intérieur de la pièce, ce qui provoque une augmentation significative de la température intérieure de la chambre. Il est à noter que ces résultats sont valides pour la ville de Ghardaïa caractérisée par un climat aride avec des températures diurnes très élevées en été, et des températures basses en hiver [112].

### II.4.3. La géométrie du bâtiment

Les besoins énergétiques d'un bâtiment sont également influencés par des paramètres géométriques (orientation du bâtiment, compacité et rapport fenêtre/mur), qui peuvent être gérés par le concepteur. L'orientation du bâtiment définie par la direction de sa façade principale dotée de la plus grande surface vitrée [113], est un paramètre important qui doit être bien choisi, du fait qu'il permet de maximiser les gains solaires passifs durant les périodes froides tout en les limitant durant les périodes chaudes [114].

Dans l'hémisphère nord, la façade sud reçoit le plus de rayonnement solaire en hiver tandis qu'en été, la façade ouest et la toiture sont celles qui en bénéficient le plus (figure II.23). Ainsi, un rapport fenêtre/mur sud égal ou supérieur à 60% est nécessaire pour tirer le meilleur profit du rayonnement solaire. En outre, il faudrait installer des débords de toiture (afin d'éviter les surchauffes en été) et réduire les surfaces des murs est, ouest et du toit [115].



Figure II.23. Orientation du bâtiment dans l'hémisphère nord [115].

Chaque paroi verticale possède une orientation définie par son azimut tel qu'indiqué sur le tableau II. 7.

Orientation	Azimut (degré)	Orientation	Azimut (degré)
N	-180	N	180
NE	-135	NO	135
E	-90	O	90
SE	-45	SO	45
S	0	S	0

Tableau II.7. Azimut de chaque paroi verticale suivant son orientation [113]

Il a été montré que l'identification précise de l'orientation d'un bâtiment et le choix approprié du site d'implantation permettent de réduire de 20% la consommation d'énergie [116].

Le choix de l'orientation optimale d'un bâtiment peut être effectué soit par l'analyse de divers paramètres soit par le développement des conceptions adaptables relatives à chaque gamme d'orientations. Il est clair que la première approche consomme plus de temps et de coûts de conception tandis que la seconde ne permet pas d'identifier l'orientation optimale du bâtiment mais elle est largement utilisée dans l'industrie de la construction en volume [116].

A. Albatayneh et al. [116] ont mené une investigation à l'Université de Newcastle pour identifier l'orientation optimale d'un logement Australien. Les auteurs ont testé les performances thermiques du bâtiment orienté vers les quatre points cardinaux et ont conclu que l'orientation optimale durant l'hiver et celle vers le nord afin de permettre au logement de bénéficier au maximum du rayonnement solaire et d'éviter le courant du vent principal. Cette orientation a permis de minimiser jusqu'à plus de trois fois les pertes thermiques pendant l'hiver comparativement au même logement orienté vers le sud.

Une étude numérique utilisant le logiciel TRNSYS conduite par Bellara et al. [117] pour identifier l'orientation optimale d'un logement situé à Constantine, a montré que l'orientation vers le sud avec un azimut de 15° et 30°, respectivement en été et en hiver donnait les meilleurs résultats.

Pour optimiser la géométrie d'un bâtiment, le coefficient de forme  $C_f$  (rapport entre la surface totale de l'enveloppe et le volume habitable du bâtiment), est un autre paramètre important qui doit être pris également pris en compte pour minimiser la consommation d'énergie. Pour avoir un bâtiment performant, le facteur de forme peut être réduit de trois manières [118] :

- Accroître la taille du bâtiment en augmentant son volume ce qui permet de réduire le coefficient  $C_f$ , tout en gardant la même forme (figure II.24).

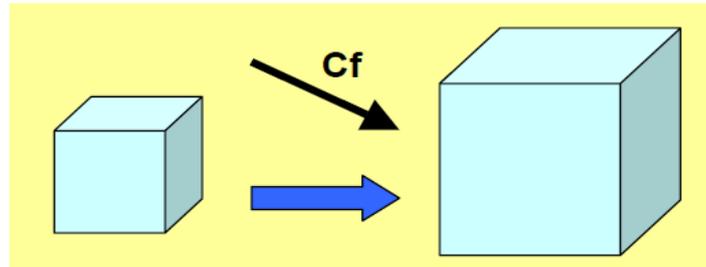


Figure II.24. Influence de la taille du bâtiment [118]

- Opter pour les constructions mitoyennes qui réduisent considérablement les pertes thermiques (figure II.25).



Figure II.25. Constructions mitoyennes

- Choisir une forme géométrique adéquate en gardant le même volume. Le coefficient de compacité de plusieurs formes géométriques est indiqué sur la figure II.26.

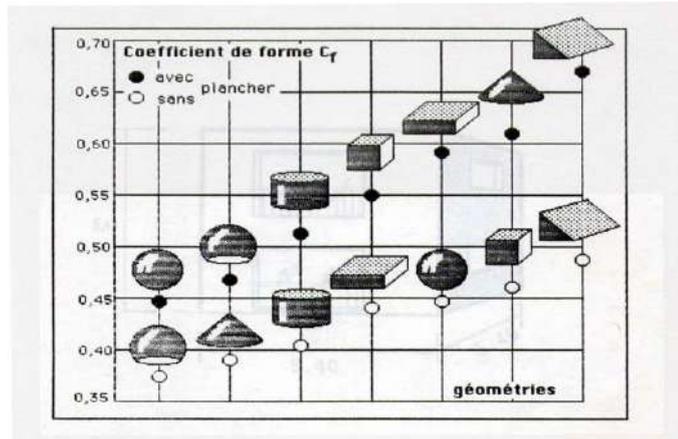


Figure II.26. Hiérarchie des formes après optimisation de leur coefficient de forme  $C_f$  à volume égal pour deux cas de contact avec le sol : posées au sol (série du haut) et sur pilotis (série du bas) [118]

Zhang et al. [119] ont analysé et comparé les performances de plusieurs formes géométriques d'une école (figure II.27) située en Chine durant la période froide.

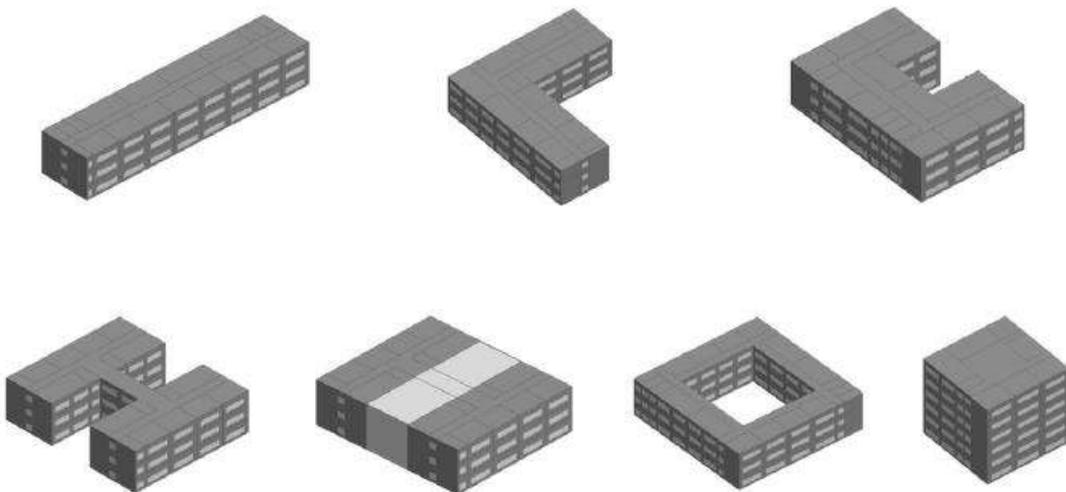


Figure II.27. Formes géométriques de l'école étudiée [119]

Les auteurs ont constaté que, sur le plan thermique, la forme en H était la plus performante. En effet, cette configuration a permis de réaliser des économies d'énergie maximales de 13,6% et une amélioration de 3,8% du confort thermique.

Par ailleurs, les auteurs ont recommandé de réduire la proportion de pièces orientées vers l'ouest afin d'éviter le risque potentiel de chaleur estivale.

Le rapport fenêtre/mur est un paramètre important en science du bâtiment où il a un impact direct sur le confort thermique et la consommation d'énergie [120].

Les résultats d'une étude expérimentale sur un immeuble de six étages, situé dans le sud de Hunan, menée par Li et al. [120], durant une journée typique d'été ont révélé qu'une

augmentation du rapport fenêtre/mur n'est pas bénéfique en termes d'économies d'énergies. En effet, pour des valeurs du rapport fenêtre/mur de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100%, les quantités de l'électricité de refroidissement nécessaires pour baisser la température du bâtiment à moins de 30°C, sont respectivement de 0 kW/h, 19.6 kW/h, 133.7 kW/h, 273.1 kW/h, 374.5 kW/h et 461.9 kW/h.

---

## CHAPITRE III

---

**Etude mathématique**

### III.1. Introduction

La modélisation est un outil dont l'importance pour une meilleure conception d'un bâtiment tout en évitant les erreurs et les reprises sur le chantier n'est plus à démontrer. En effet, elle permet d'estimer les besoins de chauffage et de climatisation avant la mise en œuvre du projet de construction et d'avoir ainsi des bâtiments de meilleure qualité.

La première partie du présent chapitre sera réservée aux notions fondamentales relatives à la modélisation thermique des bâtiments pour donner une idée aussi globale que possible sur cet outil de travail et aux différentes méthodes issues de la littérature pour modéliser et localiser la surface de la tache solaire. L'intégration d'un modèle aussi précis que possible de la tache solaire dans le bilan thermique du bâtiment permettra au concepteur d'avoir des résultats plus précis.

La seconde partie sera dédiée aux différents échanges thermiques (conduction, convection et rayonnement) qui interviennent dans le bâtiment. Les différents modèles proposés dans la littérature pour quantifier les coefficients des échanges thermiques seront également présentés. Dans la dernière partie, les bilans thermiques relatifs aux systèmes qui seront étudiés dans le cadre de ce travail seront dressés. Une computation numérique complétera cette partie.

### III.2. Théorie de la modélisation

La modélisation est définie comme étant l'établissement d'un modèle d'une technologie donnée qui lui serait une représentation aussi fidèle que possible. Cette dernière se fait par l'assemblage des différents éléments essentiels qui contribuent à l'objectif global recherché du système pour lequel il a été conçu [121].

Dans le cas de la thermique du bâtiment, un modèle mathématique, ou analogique est utilisé pour représenter l'ensemble des échanges thermiques qui se produisent dans le système physique. La méthode de l'analogie thermoélectrique [122] est couramment employée.

#### III.2.1. Composante d'un modèle mathématique

Un modèle mathématique est composé de trois éléments [121] :

- Les variables d'entrées qui agissent sur le comportement du système. Ils sont de deux types : contrôlables par l'expérimentateur et incontrôlables telles que les conditions climatiques.
- La structure du système et les paramètres qui le décrivent physiquement ou empiriquement (masse thermique, propriétés mécaniques des éléments etc.).
- Les variables de sortie qui décrivent le comportement du système sous l'influence des variables d'entrée.

Dans le cas d'un modèle thermique, les équations reliant les variables d'état qui décrivent les lois des échanges thermiques forment un système d'équations algébriques lorsqu'il s'agit d'un

régime permanent ou bien un système d'équations différentielles dans le cas d'un régime transitoire [122].

### III.2.2. Approches de la modélisation

Nous pouvons citer :

- **L'approche *amont***

L'approche *amont* ou *classique* permet à l'expérimentateur, en connaissant parfaitement le système et les paramètres d'entrée, de prédire les variables de sortie du modèle [121].

Elle permet de découvrir, d'expliquer et de prédire certains comportements du système réel à condition d'avoir les informations détaillées et précises de ce dernier, ainsi que les phénomènes physiques qui s'y déroulent et les différentes interactions entre eux [121, 122].

Un modèle de connaissance qualifié de déterministe pour résoudre des problèmes de conception optimale et de dimensionnement est ainsi obtenu. Il est à noter que cette approche permet d'étudier l'influence des paramètres caractéristiques de l'habitat (surfaces vitrées, orientation, isolation, etc.), sur les performances du bâtiment étudié et de les optimiser [121, 122], ainsi que le comportement thermique d'un bâtiment muni de tout système de chauffage ou autre.

Il faut également signaler que cette approche permet à l'expérimentateur de connaître les paramètres physiques qui ne sont pas accessibles directement par l'expérience (estimation des températures du bâtiment à chaque instant, effet des conditions climatiques sur le comportement thermique de l'habitat pour un pas de temps réduit [122]).

Dans le cadre de cette thèse, l'approche *amont* est retenue pour étudier le comportement thermique du bâtiment et le système proposé.

- **L'approche *inverse***

En connaissant les valeurs des variables d'entrée et de sortie, l'approche *inverse* peut être utilisée pour la description mathématique du système et pour l'évaluation des paramètres qui identifient sa structure, permettant ainsi d'estimer ou d'identifier le problème [121].

Deux types de modèles sont distingués [121] :

- Le modèle appelé *boite noire* ou *empirique* qui permet de corréler les données d'entrée et de sortie du système en utilisant des fonctions mathématiques relativement simples.
- Le modèle dit *boite grise* ou *semi-empirique*, basé sur les lois fondamentales de la physique et la connaissance technique du fonctionnement du système.

### III.2.3. Etapes de la modélisation

Le processus de modélisation d'un système donné comprend principalement deux étapes [122] :

- **Etablissement du modèle**

La mise en place du modèle nécessite la connaissance parfaite du système et des phénomènes physiques impliqués (dans le cas de la modélisation classique). Ensuite, le modélisateur, doit avoir une connaissance globale aussi précise que possible des paramètres d'entrée.

Le système d'équations algébriques, si le régime est stationnaire, ou différentielles dans le cas d'un régime transitoire, obtenu, est alors résolu par la méthode numérique la plus appropriée.

- **Validation du modèle**

Pour vérifier l'exactitude des résultats de simulation et valider ainsi le modèle proposé, une comparaison de ceux-ci avec ceux issus de l'expérimentation et/ou d'un logiciel de calcul (tel que le TRNSYS) s'avère nécessaire. Dans le cas d'un écart important, des corrections doivent être faites et le processus de simulation précédent doit être réitéré.

### III.3. Niveaux de discrétisation spatiale du bâtiment

Les différentes approches sur lesquelles reposent les outils de prédiction des comportements thermiques des bâtiments peuvent être classées suivant le niveau de discrétisation souhaité (tableau III.1), en trois catégories (figure III.1).

- *Le modèle des codes de champs*

Ce modèle connu sous l'acronyme CFD (Computational Fluid Dynamics) est une approche microscopique détaillée pour la modélisation du bâtiment. Elle découpe le volume étudié en un très grand nombre de mailles allant jusqu'à des dizaines ou des centaines de milliers de mailles construites géométriquement.

L'utilisation des CFD pour prédire et étudier les phénomènes liés au bâtiment (thermiques, hydriques, aérauliques, etc.) est devenue de plus en plus courante depuis les années 1970 avec l'amélioration de la puissance des moyens de calcul et le développement des méthodes numériques. Cependant, les CFD sont typiquement utilisés pour étudier le comportement d'une pièce (volume relativement faible) car ils nécessitent des calculateurs à grandes capacités ainsi que des temps de calcul longs. De ce fait, ces méthodes ne peuvent pas donner des informations sur de longues périodes d'observation tel que le calcul des besoins de chauffage sur l'année [123, 124, 125].

- *Le modèle monozone*

Né en 1975 après la mise en œuvre de l'efficacité énergétique des bâtiments, ce modèle est considéré comme le plus simple des modèles de discrétisation spatiale des habitations.

Dans cette approche, l'intérieur entier d'un bâtiment est considéré comme une seule maille dont les caractéristiques sont parfaitement uniformes (température, pression, ...etc.).

Malgré la particularité de ce modèle de constituer une approche intéressante en termes de temps de calcul, il n'est pas adapté aux évaluations du confort thermique [123, 126].

- *Le modèle multizone*

Le modèle multizone ou approche nodale ou encore en réseau, permet de représenter le bâtiment par un ensemble de nœuds où chaque zone correspond à une seule pièce ou à un ensemble de pièces ou à l'extérieur [127].

La modélisation de chaque zone se fait en régime variable en prenant en compte les effets climatiques (température ambiante, rayonnement solaire, vent), et en considérant que les propriétés de chaque zone sont uniformes et régies par les lois des gaz parfaits [127]. De ce fait, cette approche montre ses limites dans le cas d'une forte hétérogénéité de l'air à l'intérieur d'une pièce [123].

Parmi les avantages de cette approche, on peut citer son aptitude de décrire les comportements thermiques et/ ou aérauliques des bâtiments entiers contenant un grand nombre de nœuds sur de longues périodes de temps, ce qui nous permet d'analyser les consommations énergétiques des bâtiments étudiés.

Un autre avantage de ce modèle est de donner la possibilité au concepteur de dimensionner les systèmes dans les bâtiments. Il constitue un bon compromis entre les modèles monozones et les codes de champs, aussi bien au niveau du temps de calcul que de la précision des résultats [123].

Il existe une multitude de codes calcul reposant sur le principe du modèle multizone dont TRNSYS, CONFIE, CLIM2000, SPARK, etc.

- *Le modèle zonal*

Ce modèle possède une précision intermédiaire entre les codes de champs et les modèles multizones où chaque pièce est fractionnée en plusieurs zones géométriques, et les équations de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement sont résolues pour chaque maille. Cette approche permet de traiter aussi bien les grands volumes que les bâtiments à faible nombre de pièces, et de représenter avec succès les stratifications thermiques.

La limite principale de ce modèle réside dans la nécessité d'une connaissance préliminaire des écoulements moteurs (présence des jets de ventilation, des panaches thermiques, ...etc.) afin de pouvoir découper la pièce en plusieurs zones [123, 125].

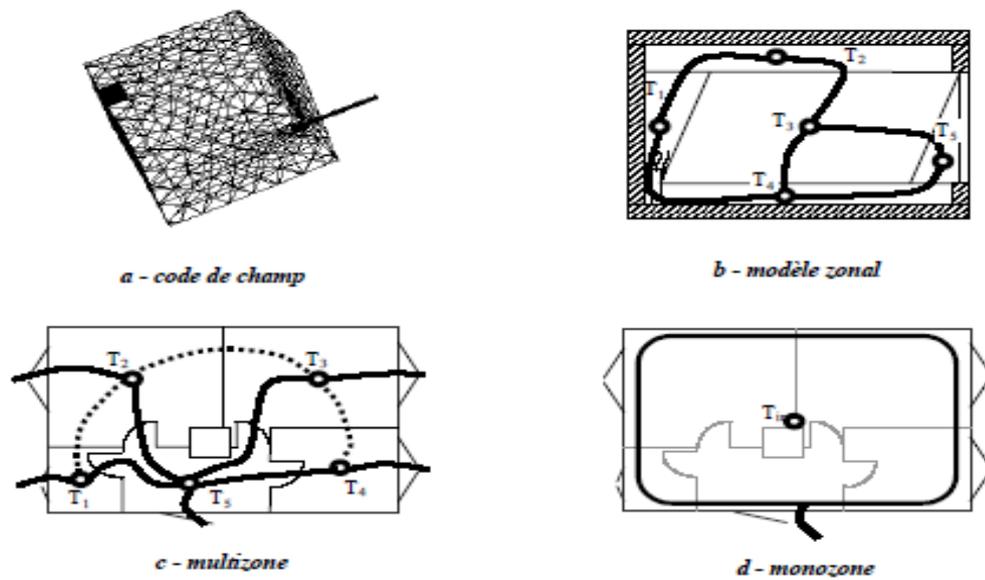


Figure III.1. Modèles de discrétisation spatiale du bâtiment [123]

Approche	Zone d'air	Enveloppe
Simplifiée	Mono-zone	Modèle type fonction de transfert
Intermédiaire	Multizone	Modélisation 1D
Fine	Zonal	Modélisation 2D
Très fine	CFD	Modélisation 3D

Tableau III. 1. Niveaux de discrétisation spatiale du bâtiment [126]

Dans le cadre de ce travail nous avons opté pour l'approche multizone pour étudier l'impact de la prise en considération de la tâche solaire sur le comportement thermique d'une chambre qui n'est équipée d'aucun système de chauffage, pour la méthode zonale pour mettre en évidence l'effet des systèmes de chauffage proposés.

#### III.4. Modélisation de la tache solaire

Une des hypothèses prises en compte par certains logiciels [102], pour simuler la surface de la tache solaire est de supposer que le flux solaire transmis par le vitrage est entièrement reçu par le plancher et réparti sur celui-ci de manière uniforme, tout au long de la journée.

Cependant cette hypothèse est loin d'être réaliste car durant la période hivernale, la hauteur du soleil est relativement basse ce qui permet au rayonnement direct de tomber sur toutes les parois verticales et le plancher, contrairement à ce qui se passe en été où quasiment la totalité du rayonnement transmis incide sur le plancher [128].

Dans d'autres logiciels [102], l'estimation du flux qui arrive sur chaque paroi est laissé soit à l'appréciation de l'utilisateur et gardé constant durant toute la simulation ou supposé être égal à 60% du flux atteignant le plancher.

La surface de la tache solaire, sa forme et sa localisation dépendent de la position apparente du soleil, de l'orientation du bâtiment, des coordonnées géographiques du lieu d'implantation et des dimensions de la fenêtre et de son emplacement.

De nombreux modèles qui permettent le calcul de la surface de la tache solaire et la détermination de sa localisation peuvent être recensés dans la littérature, parmi lesquels nous pouvons citer :

### **Modèle de Serre et trombe**

Trombe *et al.* [129] ont proposé une méthode géométrique pour définir la surface de la tache solaire qui consiste à projeter les vertex de la fenêtre sur les parois internes de la chambre. Cependant, la totalité ou une fraction de la projection peut se placer à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment. Pour résoudre ce problème, les auteurs ont proposé de projeter les vertex de la fenêtre sur des plans infinis verticaux et horizontaux contenant les parois verticales et le plancher respectivement.

Pour visualiser leur méthode, considérons la projection des quatre sommets de la fenêtre sur un plan horizontal contenant le plancher, tel qu'illustré par la figure III.2.

L'équation de cette projection est :

$$k \overrightarrow{sun} = \overrightarrow{M_j O} + \overrightarrow{OO_i} + \overrightarrow{O_i N_{ij}} \quad (III. 1)$$

k étant un facteur multiplicatif,  $M_j$ ,  $j^{\text{ème}}$  le sommet de la fenêtre et  $N_{ij}$ , sa projection sur le plan (i)

$\overrightarrow{M_j O}$  et  $\overrightarrow{OO_i}$ , sont des quantités connues qui dépendent de la géométrie de la chambre.

$\overrightarrow{sun}$ , dépend de la position du soleil dans le ciel.

Un système d'équations à trois inconnues, k,  $x_i(N_{ij})$  et  $y_i(N_{ij})$  pour chaque vertex est alors obtenu. Après la résolution du système d'équations précédent, les points d'intersection entre la projection et la surface doivent être déterminés.

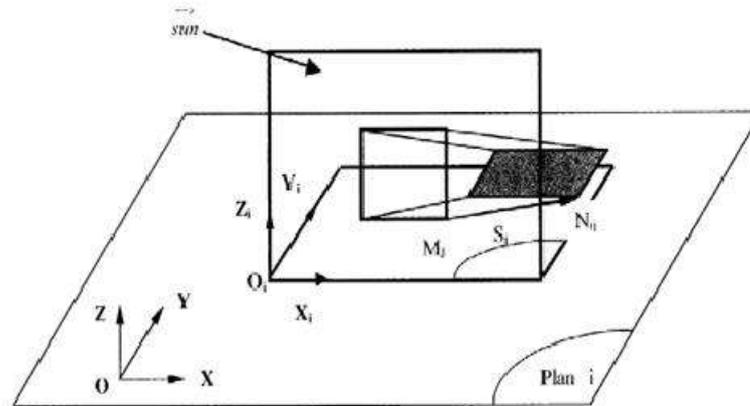


Figure III.2. Modèle de Serre et Trombe [129]

### Modèle de Bouia

Une méthode de calcul de la surface de la tache solaire pour une pièce parallélépipédique orientée vers le sud et équipée de deux virages régulièrement espacés horizontalement et verticalement (figure III.3), a été proposée par Bouia *et al.* [128].

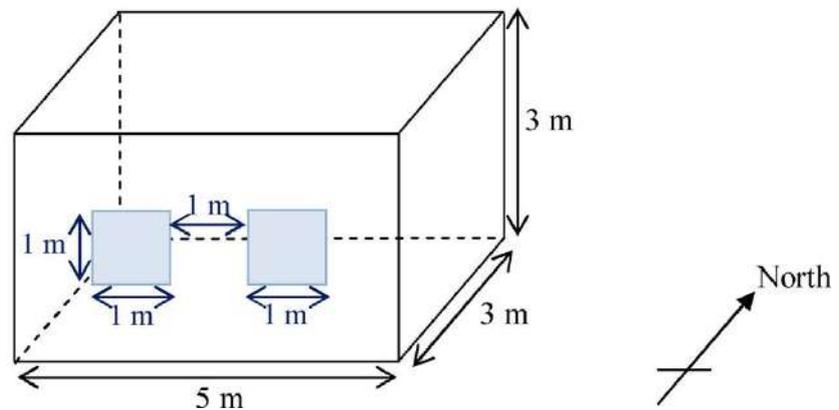


Figure III.3. Modèle de Bouia [128]

Le principe de cette méthode est basé sur le maillage des parois verticales et du plancher en utilisant la triangularisation de Delaunay. La surface de la tache solaire est modélisée comme étant constituée uniquement de l'ensemble des mailles triangulaires dont le centre de gravité voit le soleil. Selon les auteurs, la modélisation pourrait être encore plus fine en envisageant des subdivisions récursives en plusieurs triangles, d'un triangle du maillage limite intercepté partiellement par la tache solaire [128]. Le modèle proposé de la tache solaire est fait en calculant à priori les paramètres astronomiques (déclinaison, angle horaire, temps universel, temps solaire vrai et l'équation du temps). Il est apte à répondre aux attentes des thermiciens

du bâtiment comme il peut être intégré et adapté à des logiciels de thermique du bâtiment [128].

Pour démontrer l'applicabilité de leur modèle, Bouia *et al.* [128] ont simulé la position et la surface de la tache solaire relative à la chambre pré-décrite, située à Lyon et à Marseille pour les journées des 21 Juin 2002 et 21 Décembre 2002. La localisation de la tache solaire est décrite par la figure III.4.

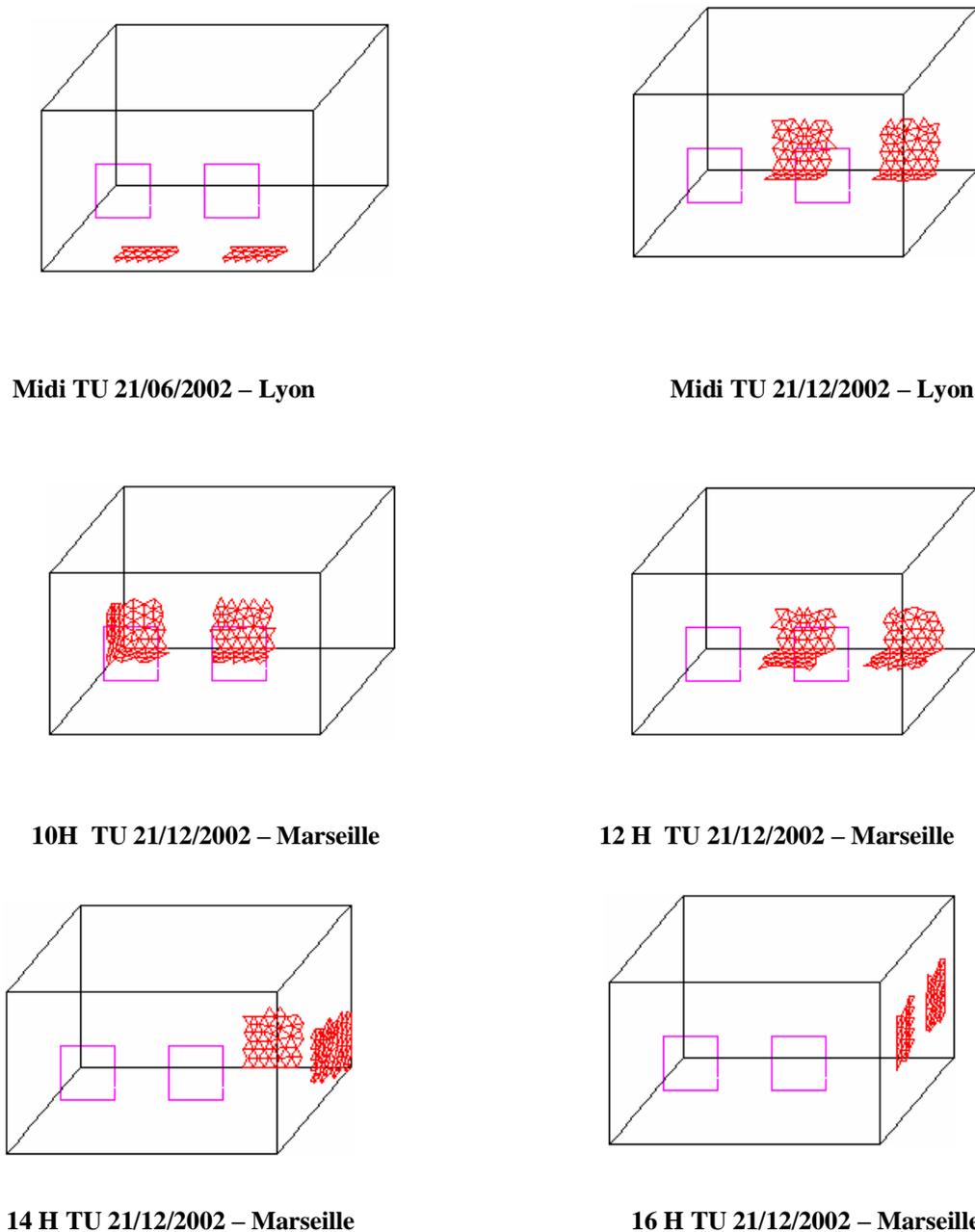


Figure III.4. Positions spatio-temporelles de la tache solaire obtenues par le modèle de Bouia [128]

**Modèle de Boukhris**

Boukhris *et al.* [100] ont proposé un modèle pour calculer et localiser la surface de la tache solaire. Ce modèle qui a été intégré à l'outil ZAER est qualifié de simple, robuste et peu gourmand en temps de calcul.

Les deux premières étapes pour la localisation et le calcul de la surface de la tache solaire sont la description géométrique de la cellule et le calcul des paramètres astronomiques, temps solaire, angle horaire, déclinaison et azimut.

Les auteurs ont considéré une chambre parallélépipédique équipée d'une fenêtre. L'orientation de la chambre est identifiée par l'azimut ( $ab$ ) relatif à la direction sud (figure III.5) [100].

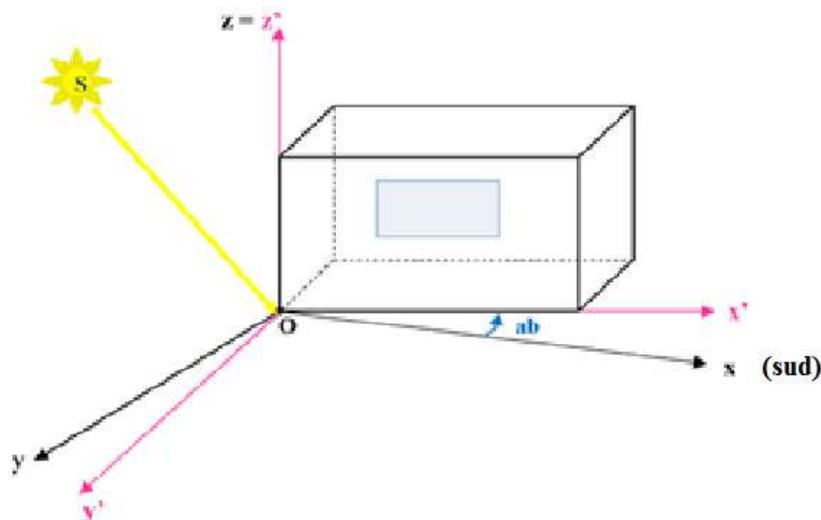


Figure III.5. Orientation de la chambre [100]

Les composantes du vecteur unitaire  $\overline{SO}$  dans le repère  $(O, XYZ)$  sont données en fonction de l'altitude ( $h$ ) et l'azimut ( $AZ$ ) du soleil [100] :

$$A = -\cos(h) \cos(AZ) \quad (III.2)$$

$$B = -\cos(h) \sin(AZ) \quad (III.3)$$

$$C = -\sin(AZ) \quad (III.4)$$

Dans le système orthonormé  $(O, X'Y'Z')$  relatif à l'orientation de la cellule test, ces composantes deviennent [100] :

$$A' = A \cos(ab) + B \sin(ab) \quad (III.5)$$

$$B' = A \sin(ab) + B \cos(ab) \quad (III.6)$$

$$C' = C \quad (III.7)$$

Afin de chercher les parties irradiées de chaque face de la cellule, chaque mur est subdivisé en un ensemble de petites facettes. A partir du barycentre de chaque facette, on projette un vecteur dont la direction est opposée au soleil. Si ce vecteur intercepte la surface de la fenêtre, la surface élémentaire est irradiée dans le cas contraire celle-ci est à l'ombre (figure III.6).

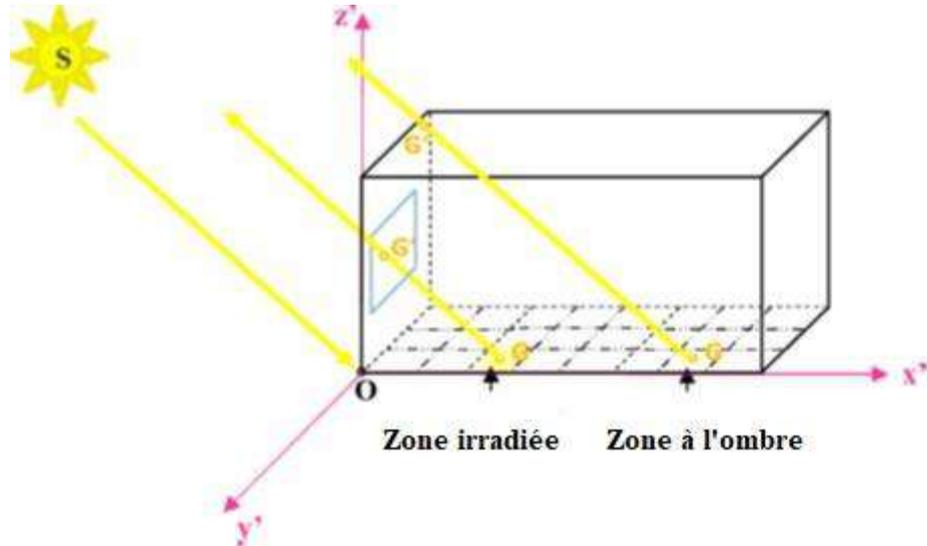


Figure III.6. Principe de la méthode

Soit  $G(XG, YG, ZG)$  le barycentre de la facette  $M$  dans le repère orthonormé  $(O, X'Y'Z')$  et  $G'(XG', YG', ZG')$  sa projection. Comme le soleil est supposé à l'infini, on peut écrire [100] :

$$\overrightarrow{GG'} \begin{pmatrix} XG' - XG \\ YG' - YG \\ ZG' - ZG \end{pmatrix} \wedge \overrightarrow{SO} = 0 \quad (III.8)$$

D'où :

$$XG' = XG + \frac{A'}{C'}(ZG' - ZG) \quad (III.9)$$

$$YG' = XG + \frac{B'}{A'}(XG' - XG) \quad (III.10)$$

$$ZG' = XG + \frac{C'}{B'}(YG' - YG) \quad (III.11)$$

En comparant ces coordonnées aux dimensions de la fenêtre il pourra être jugé si la facette  $M$  est irradiée. La surface de la tache solaire sur chaque mur et sur le plancher est calculée par la somme des surfaces élémentaires irradiées [100].

Dans le but de tester la validité de cette méthode, les auteurs ont comparé leurs résultats avec ceux obtenus par H. Bouia *et al.* [128] et ont trouvé une bonne concordance [100].

Dans le cadre de notre travail, le modèle de Boukhris et al. a été adopté pour calculer et localiser la surface de la tache solaire.

### Modèle de Rodler

Rodler [130] a calculé la surface de la tache solaire et déterminé sa localisation en appliquant un test d'appartenance dont les étapes sont les suivantes :

- Choix d'un plan (N) normal aux rayons du soleil dans le repère orthonormé défini par la base directe  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  à savoir que le vecteur  $\vec{i}$  est horizontal et dirigé vers le sud tandis que  $\vec{k}$  est vertical et dirigé vers le haut.  
Les coordonnées du plan (N) sont données par :

$$N_x = \cos(h) \cos(a) \quad (III.12)$$

$$N_y = \cos(h) \sin(a) \quad (III.13)$$

$$N_z = \sin(h) \quad (III.14)$$

- Division des parois du bâtiment en mailles dont les centres et le contour de la fenêtre sont projetés sur le plan (N). Soit A  $(X_A, Y_A, Z_A)$  le centre de la maille à projeter sur le plan (N) prédéfini et A'  $(X'_A, Y'_A, Z'_A)$  sa projection (figure III.7), dont les coordonnées sont données par :

$$X'_A = (1 - u^2)X_A - uvY_A - uwZ_A \quad (III.15)$$

$$Y'_A = -uvX_A + (1 - v^2)Y_A - uwZ_A \quad (III.16)$$

$$Z'_A = -uwX_A - vwY_A + (1 - w^2)Z_A \quad (III.17)$$

$(u, v, w)$  sont les coordonnées d'un vecteur colinéaire aux rayons du soleil.

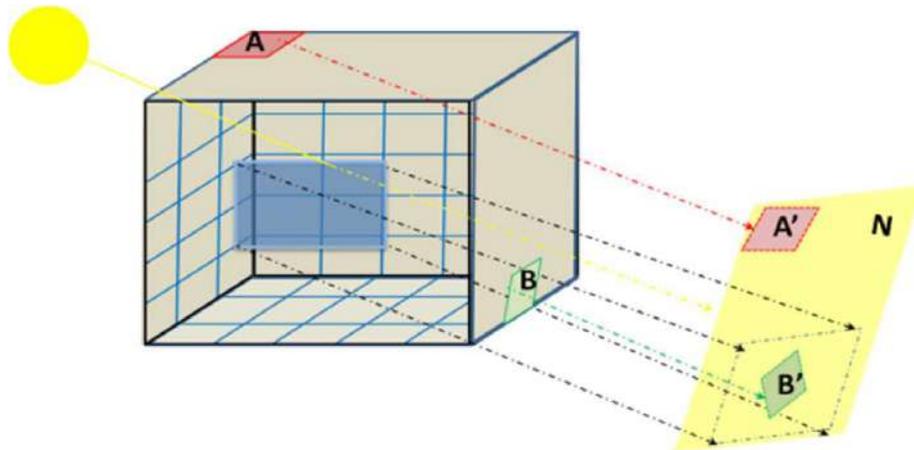


Figure III. 7. Projection du cadre de la fenêtre et des centres de mailles sur le plan [130]

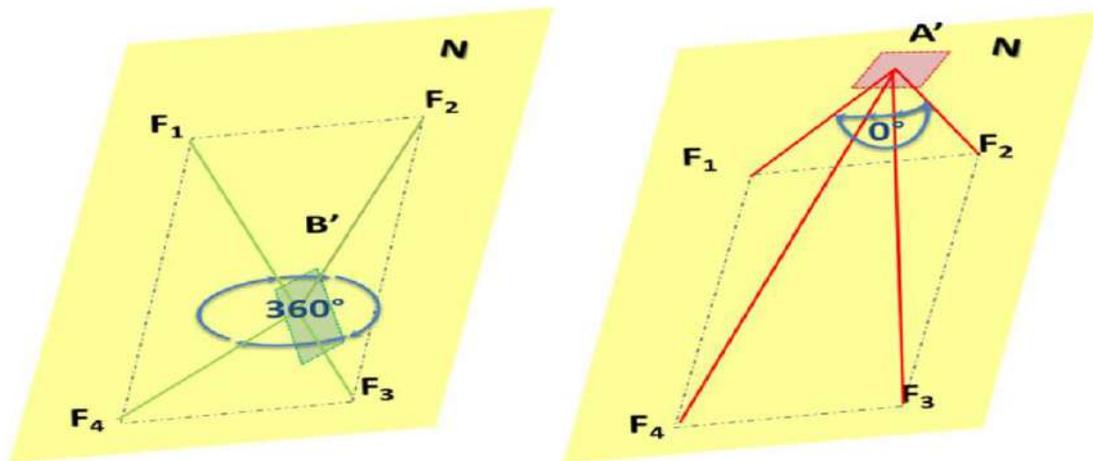
- Application d'un test d'appartenance pour vérifier l'inclusion ou l'exclusion des centres des mailles dans la tache solaire. Une maille de centre B est considérée incluse dans la tache solaire si la projection de son centre B' est incluse dans le polygone image de la fenêtre dans le plan (N).

Soient  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$  et  $\vec{F}_4$  les coordonnées des sommets du quadrilatère image de la fenêtre sur le plan (N), (figure III.8), l'inclusion du point B' est vérifiée si la condition suivante est satisfaite :

$$\sum_{i=1}^4 (B\vec{F}_i, B\vec{F}_{i+1}) \rightarrow 360^\circ$$

Au contraire, la maille A est exclue de la tache solaire si :

$$\sum_{i=1}^4 (A\vec{F}_i, A\vec{F}_{i+1}) \rightarrow 0^\circ$$



(a) Cas d'inclusion dans la tache solaire

(b) Cas d'exclusion de la tache solaire

Figure III. 8. Tests d'appartenance [130]

### Modèle de Tittlein

Tittlein [102] a proposé une modélisation simple et peu coûteuse en temps pour calculer et localiser la surface de la tâche solaire. Ce modèle basé sur des notions astronomiques est intégré dans la plateforme SimSpark pour la simulation globale du bâtiment.

L'auteur a distingué 20 cas de figure où la tache solaire peut se localiser sur les parois d'une chambre parallélépipédique équipée d'une fenêtre sur sa face sud. Ces 20 combinaisons dépendent de la position de la fenêtre sur la paroi sud et de celle du soleil. La tache solaire peut exister entièrement sur une paroi (est, ouest ou nord) ou bien entièrement sur le sol.

Comme elle peut exister simultanément sur deux ou trois parois. Pour chaque cas, Tittlein a établi une équation qui définit avec précision la surface de la tache solaire sur chaque paroi.

Soit B, C, D et E les quatre coins de la fenêtre et B', C', D' et E' leurs projetés sur les surfaces intérieures de la pièce. Selon la position de ceux-ci, les 20 cas énumérés annoncés par l'auteur peuvent être identifiés. Pour ce faire, les coordonnées des projetés B1, C1, D1 et E1 des quatre coins de la fenêtre sur un plan infini contenant le plancher doivent être calculés (figure III.9).

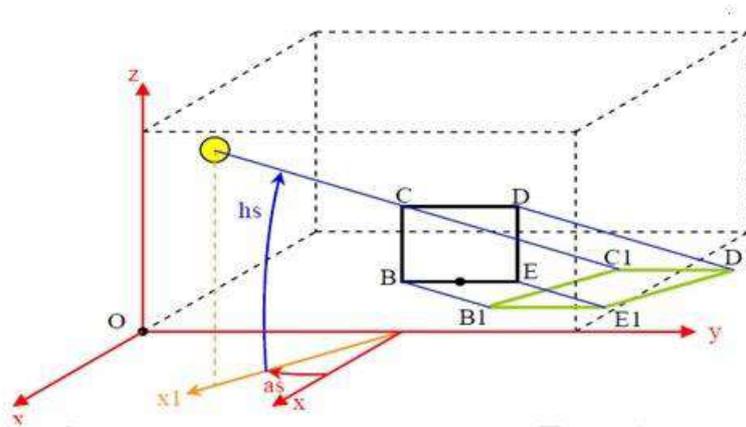


Figure III.9 : Paramétrage géométrique de la tache solaire [102]

Les projetés B2, C2, D2 et E2 des quatre coins de la fenêtre sur la paroi du fond tel qu'illustré par la figure III.10, sont également calculés.

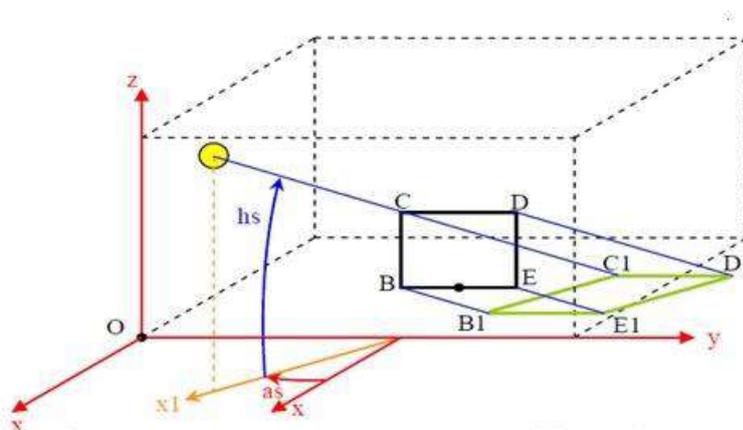


Figure III.10 : Paramétrage géométrique de la tache solaire [102]

On doit par la suite comparer les coordonnées de ces 8 points avec les dimensions de la chambre pour identifier le cas auquel nous avons affaire parmi les 20 cas cités.

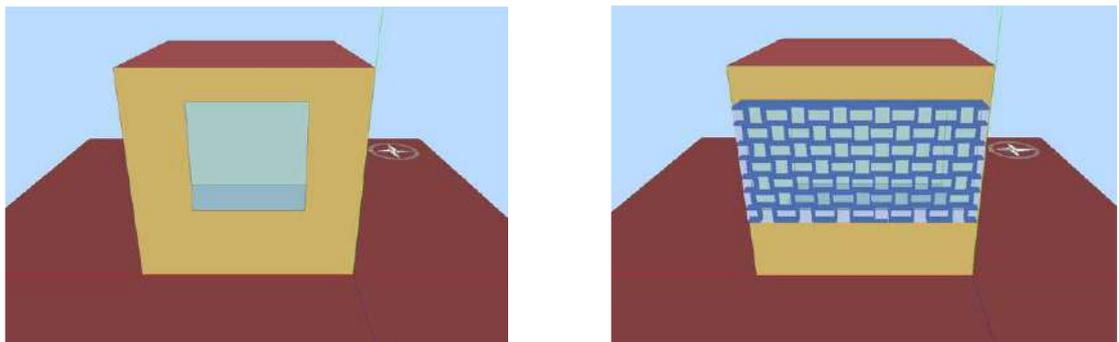
### *Modèle de Domus*

Almeida Rocha *et al.* [131] ont proposé d'utiliser la méthode « comptage de pixels » reconnue comme une technique puissante pour le calcul des protections solaires externes, pour calculer la surface de la tache solaire sur les parois internes et le sol. Les auteurs ont intégré cette méthode dans le logiciel Domus.

La technique de comptage de pixels introduite par Yezioro and Shaviv [131] peut calculer durant la simulation et pour chaque pas de temps, la zone éclairée sur l'enveloppe du bâtiment par traitement d'image en utilisant certaines fonctionnalités dans la carte graphique de l'ordinateur.

Ce procédé utilise deux images, la première contient uniquement la surface du bâtiment en cours d'analyse, dessinée en utilisant une couleur spécifique, tandis que la seconde image contient la totalité de la scène, c'est-à-dire toutes les surfaces de construction et les obstacles (dispositifs d'ombrage, arbres ou bâtiments voisins). La surface analysée dans la deuxième image doit être dessinée en utilisant une couleur différente du reste des surfaces et des obstacles du bâtiment. En utilisant la première image, le nombre total de pixels représentant la surface totale peut être déterminée. En employant la deuxième image, le nombre de pixels qui se trouvent dans la zone éclairée peut être défini. Ainsi, on peut obtenir la fraction de surface éclairée.

Es auteurs ont simulé la surface de la tache solaire en utilisant la méthode pré-décrite sur deux chambres de mêmes dimensions (3.0m×2.9×2.8m) (figure III.11). La première chambre est équipée d'une fenêtre (1.4m×1.4m) sur sa face ouest tandis que celle intégrée dans la seconde chambre est de type cobogó (2.7m×1.4m).



**Figure III.11 : Modèle de Domus [131]**

En comparant les résultats obtenus par la méthode de « comptage de pixels » intégrée dans l'outil Domus avec ceux obtenus par l'outil « SHADING Tools Plugin v1.0 plug -in », les auteurs ont trouvé une bonne concordance, en ce qui concerne la fraction des parois éclairées par le soleil.



On écrit que la projection numéro  $q$  est simultanément dans le plan  $(j)$  et sur la droite définie par le vecteur  $\overrightarrow{sol}$  et le coin de la fenêtre que l'on projette :

$$r\overrightarrow{sun}_q = \begin{pmatrix} x_{ji} \\ y_{ji} \\ z_{ji} \end{pmatrix}$$

La solution du système d'équations précédent donne l'information sur l'existence ou pas de la tache solaire sur le plan de la paroi  $(j)$ . Dans le cas où ce système n'a pas de solution il est déduit alors que la tache solaire n'existe pas sur ce plan.

Cependant, même si les quatre coins de la fenêtre ont été projetés sur le plan de la paroi  $(j)$  cela ne prouve aucunement que ces projections soient dans les limites de la pièce.

Pour accomplir cette vérification, les auteurs ont utilisé des relations angulaires et distingué trois cas possibles :

- Point interne
- Point situé à la périphérie
- Point externe

Dans le cas d'un point interne, nous avons (figure III.14) :

$$\varphi_{12} + \varphi_{23} + \varphi_{34} + \varphi_{41} = 2\pi \quad (III.18)$$

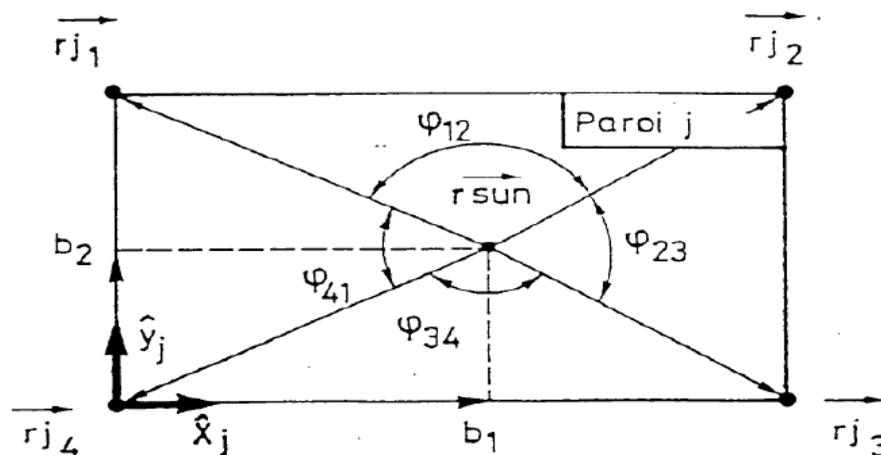


Figure III.13. Vérification de l'appartenance d'un point à une paroi [99]

Si deux projections consécutives ne figurent pas sur la même surface, le point de l'arête qui appartient à la tâche solaire doit être déterminé, ce qui nous permet de calculer la surface de la tache solaire sur chaque paroi et sur le plancher.

$$\begin{bmatrix} x_{ki} \\ y_{ki} \\ z_{ki} \end{bmatrix} + b_1 \vec{x}_k + b_2 \vec{y}_k = \begin{bmatrix} x_{ji} \\ y_{ji} \\ z_{ji} \end{bmatrix} + b_3 \vec{x}_j + b_4 \vec{y}_j \quad (III.19)$$

$$\vec{r}w_q + b_5(\vec{r}w_q + \vec{r}w_q) + b_6 \vec{sol} = \begin{bmatrix} x_{ji} \\ y_{ji} \\ z_{ji} \end{bmatrix} + b_3 \vec{x}_j + b_4 \vec{y}_j \quad (III.20)$$

L'équation (III.19) nous informe que le point est sur l'intersection des deux plans (j) et (k), tandis que l'équation (III.20) traduit l'intersection du plan défini par les rayons et les projections q et q+1 avec le plan (j).

### III. 5. Modélisation de l'enveloppe

Le bâtiment est un système très complexe soumis à des sollicitations externes et internes diverses et aléatoires (conditions climatiques, échanges radiatifs solaires entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment, charges internes). L'enveloppe du bâtiment protège la vie des occupants des conditions extérieures et assure le confort intérieur. Les transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement) qui se produisent à travers l'enveloppe du bâtiment, (figure III.14) causent partiellement une consommation excessive d'énergie si le bâtiment est peu ou mal isolé [132].

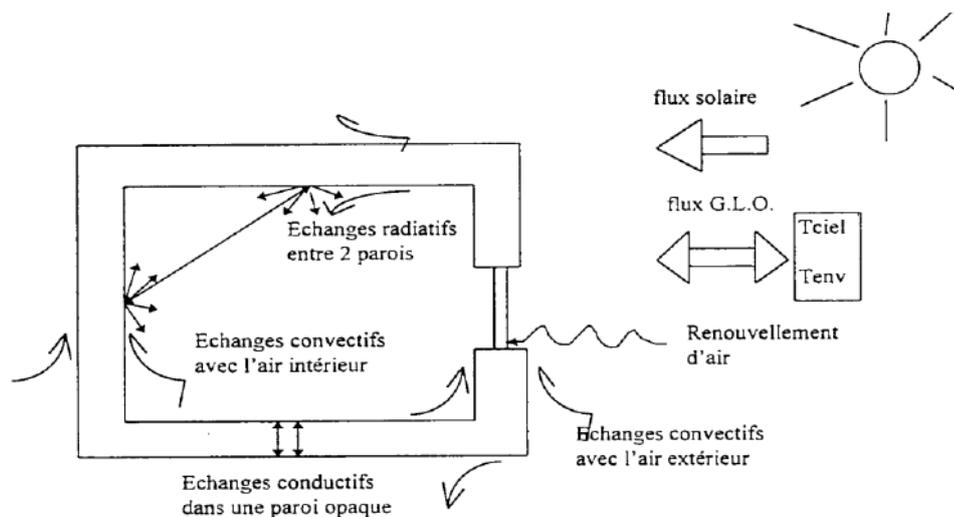


Figure III.14. Echanges thermiques mis en jeu dans le bâtiment

#### III.5.1. Echange thermique par conduction

A l'échelle microscopique, la conduction tend, par le phénomène de diffusion, à distribuer d'une façon homogène l'énergie cinétique moyenne des particules des zones où la valeur moyenne de l'énergie est élevée vers celles où elle est plus faible [133].

Ainsi, la conduction intervient au sein des parois de l'enveloppe dont l'évolution des températures est obtenue par l'association de l'équation de chaleur et des conditions initiales et aux limites dont la forme est [133] :

$$\Delta T = \frac{\rho C_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial T} (\text{grad } T)^2 + \frac{P}{\lambda} \quad (\text{III. 21})$$

Les conditions aux limites sont de trois types :

- Condition de Dirichlet lorsque la température de surface est imposée.
- Condition de Newman lorsque le flux surfacique est imposé.
- Condition de Fourier lorsque le transfert thermique à l'interface solide/fluide dépend de la température de surface.

Dans notre étude, le problème de conduction en utilisant la méthode de l'analogie thermoélectrique [134, 135] a été traité (figure III.15). Cette méthode a été introduite en transfert thermique par Paschkis et Baker, en 1941 [135].

Selon Changhai Peng et al. [135], la méthode de l'analogie thermoélectrique est plus efficace et plus simple pour résoudre le problème de conduction thermique dans le bâtiment, comparativement à d'autres méthodes communément utilisées telles que la transformé de Laplace et la méthode harmonique (méthode de séparation des variables).

Dans cette approche l'analogie qui existe entre les lois de Fourier et Ohm [134] qui induisent la correspondance entre les groupes  $(\Phi, j)$ ,  $(\lambda, \sigma)$  et  $(T, V)$ , est considérée [135].

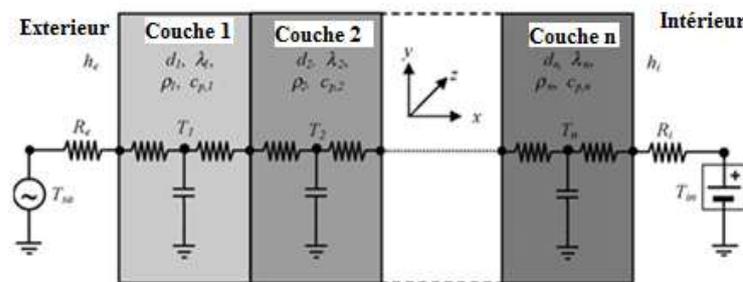


Figure III.15. Modélisation de la conduction thermique dans un mur multicouche en utilisant l'analogie thermoélectrique

### III.5.2. Echange par convection

La convection traduit les échanges thermiques entre deux milieux, solide et fluide. Ce mode de transfert de chaleur obéit à des phénomènes complexes qui représentent un axe de recherche basé sur la théorie et l'expérimentation [133].

Les transferts thermiques surfaciques convectifs entre une paroi (i) et l'air environnant sont modélisés par la loi semi-empirique suivante [136] :

$$q_{cv} = h_{cv} \times S_i \times (T_{am} - T_i) \quad (\text{III. 22})$$

Le coefficient d'échange convectif est un paramètre essentiel qui nous informe de la qualité des échanges convectifs entre le solide et le fluide.

Les échanges thermiques par convection relatifs au bâtiment peuvent être internes ou externes, libres ou forcés.

### III.5.2.1. La convection intérieure

Dans la convection intérieure, qui est généralement naturelle, il s'agit de déterminer le coefficient d'échange par convection entre l'air de la zone et les parois qui constituent l'enveloppe du bâtiment.

Chaque surface interne caractérisée par son inclinaison et une différence entre sa température et celle de l'air de la zone, possède un coefficient d'échange convectif différent.

La détermination précise de ce dernier est d'une grande importance dans la thermique du bâtiment. Ce mécanisme détermine des paramètres spécifiques tels que, le temps et le degré avec lesquels les gains solaires absorbés par les surfaces internes réchauffent l'air ambiant [137]. Les coefficients d'échange par convection interne peuvent être constants ou variables.

#### III.5.2.1.a. Coefficients de convection constants

L'hypothèse qui suppose que les coefficients d'échange convectif peuvent être considérés invariables dans le temps a été la plus courante pendant longtemps. Elle est fondée sur les points suivants [136] :

- Les mouvements d'air dans le bâtiment sont difficilement prévisibles et les vitesses de l'air sont faibles.
- Le choix d'un coefficient d'échange convectif variable conduit à une non-linéarité des échanges thermiques qui sont difficiles à traiter.
- Les températures dans une zone d'air sont relativement stables.
- Les échanges superficiels sont influencés par la présence des objets proches de la paroi, tels que les meubles.

Les valeurs courantes du coefficient d'échange par convection constant selon *Boyer* [133], sont indiquées dans le tableau III.2.

Type de paroi	Coefficient d'échange convectif (W/m <sup>2</sup> . K)
Paroi verticale	3.7
Paroi horizontale (flux ascendant)	5.7
Paroi horizontale (flux descendant)	0.5

**Tableau III.2. Coefficients de convection interne constants [133]**

D'autres tables qui donnent les coefficients d'échange convectif en fonction du type de la paroi et de la saison sont trouvées dans la littérature (tableau III.3) [133].

	Eté	Hiver
Paroi verticale	$h_{cvi}=2.5$ (W/m <sup>2</sup> . K)	$h_{cvi}=5.6$ (W/m <sup>2</sup> . K)
Plancher	$h_{cvi}=0.5$ (W/m <sup>2</sup> . K)	$h_{cvi}=1.0$ (W/m <sup>2</sup> . K)
Plafond	$h_{cvi}=6.0$ (W/m <sup>2</sup> . K)	$h_{cvi}=6.6$ (W/m <sup>2</sup> . K)

**Tableau III.3. Coefficients de convection interne constants [133]**

Supposer un coefficient d'échange constant pour toute la surface de la paroi est toutefois une approximation grossière et trop simplificatrice du fait que la distribution de température peut être très hétérogène sur toute la surface de la paroi [133, 130].

### III.5.2.1.b. Coefficients de convection variables

Les coefficients d'échange convectif variables dans le temps sont calculés par simulation pour chaque surface et pour chaque pas de temps.

Plusieurs corrélations qui calculent le coefficient de transfert dans le cas de la convection naturelle, qui représente notre cas d'étude, peuvent être trouvées dans la littérature. Dans le cas de la convection forcée ou mixte, beaucoup d'auteurs ont établi les coefficients d'échanges convectifs correspondants mais qui ne seront pas présentés dans ce chapitre.

Il existe également des corrélations, issues de l'expérimentation, qui donnent des formules du coefficient d'échange convectif en fonction de l'écart entre la température de l'air de la zone (supposé isotherme) et celle de la paroi. Elles sont généralement de la forme [133] :

$$h_{cvi} = a(T_s - T_{am})^n + b \quad (III.23)$$

Dans le tableau III.4, quelques coefficients proposés par différents auteurs ont été regroupés [138] :

Auteurs	Surfaces verticales			Surfaces horizontales					
				Flux ascendant			Flux descendant		
	a	n	b	a	n	b	a	n	b
Briis	1.88	0.32	0	2.42	0.31	0	0	0	0.6
Byvok	0	0	4	0	0	5	0	0	2.5
Heat	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7
Gaignou	1.845	0.25	0	-	-	-	-	-	-
Mitalas	1.02	0.33	0	-	-	-	-	-	-
Ferries	1.6	0.33	0	2.1	0.33	1	1	0.33	0

Tableau III.4. Valeurs de quelques coefficients empiriques [138]

Selon l'ASHRAE [139], le coefficient d'échange thermique par convection peut être donné en fonction de la longueur caractéristique de la paroi ( $L_c$ ) et des coefficients empiriques  $c$  et  $m$  par l'expression suivante :

$$h_{cvi} = C \left( \frac{\Delta T}{L_c} \right)^m \quad (III.24)$$

Les coefficients empiriques  $c$  et  $m$  sont indiqués dans le tableau III.5 [139].

Paroi		C	m	
Verticale	Petite plaque- Ecoulement laminaire		1.42	0.25
	Grande plaque- Ecoulement turbulent		1.31	0.33
Horizontale	Orientée vers le haut quand chauffée	Petite plaque- Ecoulement laminaire	1.32	0.25
		Grande plaque- Ecoulement turbulent	1.52	0.33
	Orientée vers le bas quand chauffée	Petite plaque Ecoulement laminaire	0.59	0.25

Tableau III.5. Valeurs de quelques coefficients empiriques [139]

Ces formules ne sont valables que dans le cas de la convection naturelle [139].

D'autres corrélations ont été proposées par *Khalifa et Marshall* en se basant sur des expériences réalisées sur une cellule test de dimensions (2.95 m x 2.35 x 2.05 m), et ayant une fenêtre à simple vitrage dotée de plusieurs émetteurs de chaleur (convecteurs, radiateurs, plancher chauffant) [136].

Les corrélations obtenues par les auteurs, (tableau III.6), et dont l'incertitude maximale est estimée à 15%, sont présentées sous la forme de l'équation suivante :

$$h_{cvi} = a(\Delta T)^b \quad (III. 25)$$

Parois	Position du radiateur	Paroi incluant un radiateur	hcvi	
			a	b
Murs	Sous la vitre	-	2.30	0.24
	Ailleurs	Oui	1.98	0.32
		Non	2.07	0.23
Vitrage	Sous la vitre	-	8.07	0.11
	Ailleurs	-	7.61	0.06
Plafond	Sous la vitre	-	3.10	0.17
	Ailleurs	-	2.72	0.13

Tableau III.6. Valeurs de quelques coefficients empiriques obtenus par *Khalifa et Marshall* [136]

Les formules proposées par *Alamdari et Hammond* sont les plus largement utilisées dans la simulation thermique dynamique des bâtiments dans le cas de la convection naturelle [136]. Elles sont données pour les surfaces verticales et horizontales tel qu'indiqué dans tableau III.7, [136] :

Type des parois	Sens du flux thermique	$h_{cvi}(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Paroi verticale	Horizontal	$\left\{ \left( 1.5 \times \left( \frac{\Delta T}{H} \right)^{1/4} \right) + (1.23 \times \Delta T^{1/3})^6 \right\}^{1/6}$
	Ascendant	$\left\{ \left( 1.4 \times \left( \frac{\Delta T}{H} \right)^{1/4} \right) + (1.63 \times \Delta T^{1/3})^6 \right\}^{1/6}$
Paroi horizontale	Ascendant	$\left\{ \left( 1.4 \times \left( \frac{\Delta T}{H} \right)^{1/4} \right) + (1.63 \times \Delta T^{1/3})^6 \right\}^{1/6}$
	Descendant	$\left\{ \left( 1.4 \times \left( \frac{\Delta T}{H} \right)^{1/4} \right) + (1.63 \times \Delta T^{1/3})^6 \right\}^{1/6}$

Tableau III.7. Formules proposées par Alamdari et Hammond [136]

La variation des coefficients d'échange convectif intérieur en fonction de la différence de température  $\Delta T$  entre les surfaces des parois et l'air ambiant proposés par Alamdari et Hammond [136], est représentée sur la figure III.16.

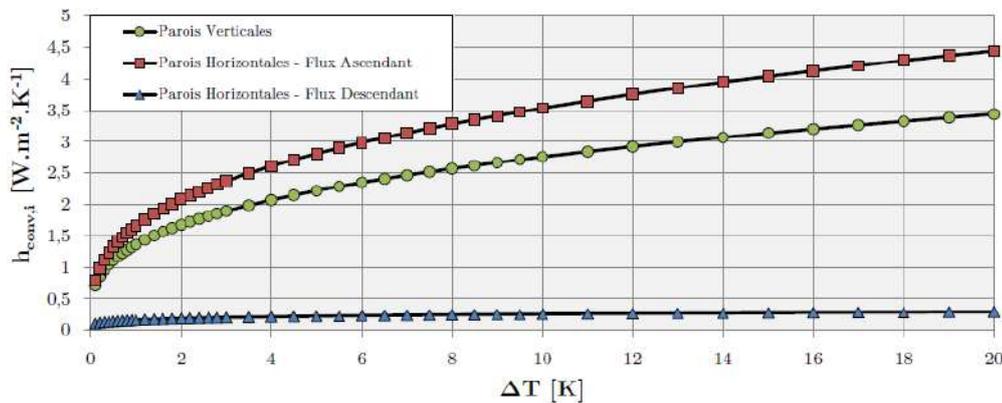


Figure III. 16. Profils des Coefficients d'échanges convectifs intérieurs en fonction de l'écart de température entre les surfaces et l'air proposés par Alamdari et Hammond [136]

### III.5.2.2. La convection extérieure

Il existe dans la littérature, une multitude de relations qui donnent le coefficient d'échange convectif entre les surfaces extérieures de l'enveloppe du bâtiment et l'air environnant. Plusieurs techniques ont été utilisées pour déterminer empiriquement ce coefficient. Defraeye et al. [140], proposent :

- **Expériences sur plaques plates**

Certaines corrélations qui donnent le coefficient d'échanges convectifs extérieur sont basées sur l'analogie du transfert de chaleur et de la quantité de mouvement en utilisant seulement des informations empiriques sur le champ d'écoulement. Ce type de corrélations fonction du nombre de Nusselt est donné par la relation :

$$Nu_x = a \times Re_x^b \times Pr^c \quad (III.26)$$

Les coefficients a, b et c sont des paramètres empiriques.

D'autres corrélations ont été obtenues suite à des expériences de transfert de chaleur par convection sur des plaques planes dans des souffleries, parmi lesquelles, celle de Jürges [140]:

$$h_{cve} = 4 \times V_{al} + 5.6 \quad V_{al} < 5 \frac{m}{s} \quad (III.27.a)$$

$$h_{cve} = 7.1 \times V_{al}^{0.78} \quad V_{al} > 5 \frac{m}{s} \quad (III.27.b)$$

- **Expériences à grande échelle**

Le besoin d'avoir des corrélations des coefficients d'échange convectif extérieurs plus précis et plus réels a mené à réaliser un grand nombre de mesures expérimentales sur les parois de l'enveloppe et sur le toit des bâtiments.

En se basant sur les données expérimentales, le coefficient recherché peut être corrélé avec la vitesse du vent à un emplacement de référence.

Les vitesses du vent de références les plus couramment utilisées sont :

- La vitesse du vent dans l'écoulement non perturbé à une hauteur de 10 m au-dessus du sol, qui représente la disposition standard des anémomètres des stations météorologiques.
- La vitesse du vent à une certaine distance au-dessus du toit.
- La vitesse du vent près de la surface du bâtiment.

Des écarts significatifs ont été trouvés entre différentes corrélations empiriques liés probablement aux limites des expériences.

Des corrélations obtenues par cette méthode, sont consignées dans le tableau III.8, [140].

Auteur	Géométrie du bâtiment	Vitesse du vent		Corrélation
		Localisation	Plage	
Nicol	Rectangulaire	0-5 m/s	-	$4.35 \times V_v + 7.55$

Jayamaka et al.	Mur vertical (1.2 m x1.8 m)	0-4 m/s	Au-dessus du mur vertical	$1.444 \times V_v + 4.955$
Sturrock	Tour de 26 m de hauteur	-	-	$6.1 \times V_v + 11.4$

**Tableau III.8. Corrélations obtenues par des expériences à grande échelle [140]**

- **Expériences en soufflerie**

Plusieurs expériences ont été réalisées en soufflerie principalement sur des cubes placés dans une couche limite turbulente. Contrairement aux expériences menées à grande échelle, celles-ci donnent des informations détaillées, de la distribution du coefficient d'échanges convectifs extérieur sur chaque surface.

- **Les méthodes numériques**

L'utilisation du CFD comme méthode d'évaluation du coefficient d'échange convectif extérieur de l'enveloppe du bâtiment est nouvelle. Elle peut être appliquée aux bâtiments ayant des configurations spécifiques et complexes, comme elle permet de donner des informations détaillées sur les champs d'écoulement et les champs thermiques.

Dans les études qui adoptent cette méthode, une analyse détaillée de la répartition du coefficient d'échange convectif extérieur est possible, de même que celle de l'influence de la turbulence et de la vitesse du vent.

Dans le cadre de notre travail, la formule de McAdams qui a été rapportée à partir des données de Jürges [141] a été utilisée :

$$h_{ce} = 5.7 + (3.8 V_v) \quad (III.28)$$

### III.5.3. Echange par rayonnement

Dans le secteur de l'habitat, les températures sont relativement basses, de ce fait, l'effet des phénomènes radiatifs (infra rouge) est équivalent à celui de la convection naturelle et a ainsi une influence significative sur le confort thermique des usagers [139].

Lorsque le milieu qui sépare des éléments solides en interaction est au moins partiellement transparent aux ondes électromagnétiques, les échanges thermiques par rayonnement entrent en jeu (cas de l'air considéré comme transparent au rayonnement thermique [133]).

Dans la thermique du bâtiment, le flux radiatif à la surface des parois doit être nécessairement déterminé car il est considéré comme être une condition aux limites des problèmes de conduction thermique. Le flux radiatif est donné par l'expression suivante [133] :

$$\phi_{net} = S \left( \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} M_{\lambda}^o d\lambda - \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda \right) \quad (III.29)$$

Le calcul de l'intégrale totale de la formule (III.29) sur le spectre total est trop complexe et nécessite la connaissance des caractéristiques monochromatiques de chaque surface de l'enveloppe du bâtiment [133]. Pour résoudre ce problème dans la thermique du bâtiment, les échanges thermiques radiatifs peuvent être classifiés selon deux critères à savoir les longueurs d'ondes et le caractère extérieur ou intérieur des échanges [133].

Dans le domaine de la thermique du bâtiment, les longueurs d'ondes qui sont prépondérants peuvent être classées selon deux critères [133], en grandes ( $\lambda > 2.5 \mu\text{m}$ ) et courtes, longueurs d'onde ( $\lambda < 2.5 \mu\text{m}$ ), d'une part et selon le caractère extérieur ou intérieur des échanges, d'autre part.

### III.5.3.1. Sollicitations thermiques de courtes longueurs d'ondes

Les longueurs d'ondes de ces sollicitations s'étalent sur le spectre  $[0.25, 2.5] \mu\text{m}$  avec un maximum au voisinage de  $0.5 \mu\text{m}$ . Ces radiations correspondent au rayonnement solaire dont le maximum du spectre est dans le domaine du visible [133, 142].

#### - Echanges de courtes longueurs d'ondes avec l'extérieur

Le flux radiatif de CLO absorbé par une surface (i) exposée à l'environnement extérieur vient du soleil et représente une source de chaleur qui s'exprime par :

$$\varphi = \alpha_i \times S_i \times G \quad (III.30)$$

Toutes les surfaces extérieures sont soumises à ce flux de chaleur, excepté celles exposées au nord qui ne sont soumises qu'au rayonnement diffus.

#### - Echanges de courtes longueurs d'ondes avec l'intérieur

Ces échanges concernent les apports solaires à travers de vitrages et représentent une source de chaleur sur les surfaces internes. Ils sont généralement appelés apports solaires directs et sont donnés par :

$$\phi_{clo.i} = \alpha \times \tau(\theta) \times STS \times G \quad (III.31)$$

Avant de déterminer l'intensité de ces apports, il est nécessaire de calculer la surface de la tache solaire.

Le coefficient de transmission de la vitre  $\tau(\theta)$  est donné par [141] :

$$\tau(\theta) = T_a \times T_r \quad (III.32)$$

Avec :

$$T_a = \exp\left(\frac{-K \times ev}{\cos(\theta_2)}\right) \quad (III.33)$$

et

$$T_r = \frac{1 - r}{1 + r} \quad (III.34)$$

Où :

$T_r$  : transmission due à la réflexion

$T_a$  : coefficient dû à l'absorption

$r$  : pouvoir réflecteur du verre

$k$  : coefficient d'extinction du verre

$e_v$  : épaisseur de la couverture

$\theta_2$  : angle de réfraction

### III.5.3.2. Sollicitations thermiques de grandes longueurs d'ondes

#### - Echanges de grandes longueurs d'ondes avec l'intérieur

Les grandes longueurs d'onde, ou infrarouge lointain dont le spectre s'étale de 5  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ , avec un maximum à 10 $\mu\text{m}$ , correspondent aux longueurs d'onde d'émission des corps à la température de 20 °C [133].

Le flux radiatif reçu par une surface  $s$  et émis par l'ensemble de l'enceinte composée par  $N$  surfaces est donné par [142] :

$$\phi_{GLO,i} = \sum_{i=1}^N h_{is} \times (T_i^4 - T_s^4) \quad (III.35)$$

Avec :

$$h_{is} = \frac{\sigma}{\frac{1-\varepsilon_i}{S_i \times \varepsilon_i} + \frac{1-\varepsilon_s}{S_s \times \varepsilon_s} + \frac{1}{S_i \times F_{is}}} \quad (III.36)$$

Le facteur de forme entre deux surfaces  $i$  et  $j$  a pour expression :

$$F_{ij} = \frac{S_j}{\sum_{k=1}^N S_k} + \frac{S_j^2}{\sum_{k=1}^N S_k^2} \times \frac{S_i}{\sum_{k=1}^N S_k} \quad (III.37)$$

Il existe dans la littérature des coefficients d'échanges radiatifs constants estimés pour une émissivité de 0.9 [136] (tableau III.9).

Type de parois	$h_{ri}$ (W/m <sup>2</sup> . K)
Verticales	4.84
Plafonds	4.84
Planchers	4.89

Tableau III.9. Coefficients d'échanges radiatifs internes constants [136]

### - Echanges de grandes longueurs d'ondes avec l'extérieur

Ce type d'échange intervient entre les parois externes et le toit du bâtiment et le sol, le ciel et l'environnement. Les coefficients d'échange radiatif sont :

$$h_{CLO,s} = \sigma \times \varepsilon_{se} \times \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \times (T_{ciel} + T_{se}) \times (T_{ciel}^2 + T_{se}^2) \quad (III.38)$$

$$h_{GLO,env} = \sigma \times \varepsilon_{se} \times \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \times (T_{env} + T_{se}) \times (T_{env}^2 + T_{se}^2) \quad (III.39)$$

$$h_{GLO,g} = \sigma \times \varepsilon_{se} \times \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \times (T_{sol} + T_{se}) \times (T_{sol}^2 + T_{se}^2) \quad (III.40)$$

$T_{ciel}$ , la température du ciel est modélisée par l'équation modifiée de Swinbank :

$$T_{ciel} = 0.037536 \times T_{am}^{1.5} + 0.32 \times T_{am} \quad (III.41)$$

$T_{sol}$ , la température du sol est prise égale à la température ambiante.

### III.5.4. Bilan thermique de l'enveloppe

Pour dresser le bilan thermique de l'enveloppe les hypothèses simplificatrices adoptées sont :

- Le transfert thermique dans les parois est unidimensionnel
- L'air interne est considéré comme étant un gaz parfaitement transparent
- Les propriétés thermophysiques des matériaux sont constantes
- La participation de l'énergie des occupants est négligeable.
- La convection à l'intérieur du bâtiment est naturelle
- Les surfaces sont considérées isothermes, grises complètement opaques
- L'émission et la réflexion GLO sont isotropes
- L'éclairement des surfaces est uniforme
- Le ciel et le milieu environnant extérieur sont assimilés à des corps noirs

Le modèle de l'enveloppe est composé des bilans thermiques des parois, du toit et du plancher. Chaque élément a deux nœuds interne et externe. Le bilan thermique est établi en se basant sur le premier principe de la thermodynamique.

Les bilans thermiques des nœuds intérieur et extérieur sont donnés respectivement par les équations (III.42) et (III.43) :

$$cp_m m_m \frac{dT_{si}}{dt} = h_{cvi} S_i (T_{ai} - T_{si}) + \sum_{i \neq j}^n h_{ri} S_i (T_{sj} - T_{si}) + \frac{k_m}{e_m} S_i (T_{se} - T_{si}) \quad (III.42)$$

$$cp_m m_m \frac{dT_{se}}{dt} = h_{cve} S_e (T_{am} - T_{se}) + h_{rciel} S_e (T_{ciel} - T_{se}) + h_{rsol} S_e (T_{sol} - T_{se}) + \frac{\lambda_m}{e_m} S_e (T_{si} - T_{se}) + \Phi_{clo} \quad (III.43)$$

Le volume d'air intérieur est représenté par un nœud centré dont la température est influencée par les températures des surfaces de l'enceinte. L'équation du bilan thermo convectif de l'air est :

$$C_{ai} \frac{dT_{ai}(t)}{dt} = \sum_{j=1}^N h_{ci} S_j (T_{ai}(t) - T_{sj}(t)) + \Phi(t) \quad (III.44)$$

$\Phi(t)$  sont les gains internes.

Dans notre étude, deux bilans thermiques ont été établis, l'un est relatif à une chambre ayant une enveloppe à faible inertie thermique et l'autre concerne l'enveloppe d'une chambre à haute inertie thermique. Les propriétés thermophysiques des deux enveloppes sont regroupées dans les tableaux III.10.

Murs	De l'intérieur vers l'extérieur	e(m)	k (W/m. K)	Cp (J/kg. K)	$\rho$ (kg. m <sup>3</sup> )
Sud, nord, est, ouest	Fibrociment	0.005	0.95	1003	1600
	Polyuréthane	0.05	0.03	1380	45
	Fibrociment	0.005	0.95	1003	1600
Toit	Fibrociment	0.005	0.95	1003	1600
	Polyuréthane	0.05	0.03	1380	45
	Tôle	0.001	163	904	2787
Plancher	Béton lourd	0.05	1.75	653	2100
	Polystyrène	0.05	0.04	1380	25
	Terre pleine en béton	0.2	1.75	653	2100
Porte	Bois	0.018	0.11	1500	600
Vitre	Verre ordinaire	5	1.4	750	2500

Tableau III.10. Propriétés thermophysiques de l'enveloppe à une forte inertie thermique

Murs	De l'intérieur vers l'extérieur	e(m)	k (W/m. K)	Cp (J/kg. K)	$\rho$ (kg. m <sup>3</sup> )
Sud, nord, est, ouest	Métal	0.0005	45.28	46	8000
	Carton	0.05	0.041	1100	71
	Métal	0.0005	45.28	460	8000
Toit	Métal	0.0005	45.28	46	8000
	Mousse de polystyrène	0.075	0.035	1100	20
	Métal	0.0005	45.28	46	8000
Plancher	Bois	0.013	0.15	1630	521
Porte	Bois	0.018	0.11	1500	600
Vitre	Verre ordinaire	5	1.4	750	2500

**Tableau III.11. Propriétés thermophysiques de l'enveloppe à faible inertie thermique**

### III.6. Modélisation du système Barra-Costantini

La modélisation des systèmes proposés est réalisée en se basant sur la méthode de l'analogie thermoélectrique et sur la méthode nodale, considérées comme étant très puissantes pour les investigations menées sur les systèmes thermiques [135, 143]. Les travaux de Imessad *et al.* [26] et de Buzzoni *et al.* [3], relatifs à la simulation du comportement thermique du système B-C en utilisant le modèle mathématique établi par Cammarata et al [25], ont démontré l'efficacité de la méthode nodale. Le modèle physique présenté ci-dessous est obtenu en assemblant les modèles thermiques de chaque élément de l'enveloppe et du système B-C.

#### III.6.1. Description du système

Chaque une des deux configurations proposées de même que le système B-C classique est intégrée à une cellule (6m×2.5m ×4.5m) située au site de Ksar Challala, à l'ouest algérien (35.1 N, 2.19 E, 800m).

Les parois verticales de la chambre sont fabriquées en brique avec une isolation thermique placée sur la face externe du mur sud. Le plancher et le toit sont en béton.

Le système B-C conventionnel, composé d'une vitre, d'un absorbeur et de canaux incorporés (insérés) au toit, est intégré sur la face externe du mur sud et au toit du local.

La vitre responsable de la création de l'effet de serre est insérée verticalement à une distance de 6.5 cm du mur sud. Un absorbeur sombre est placé au milieu de l'espace entre le mur sud et la vitre ce qui permet de doubler la surface d'échange entre l'absorbeur et l'air qui circule dans la cheminée solaire et de bénéficier ainsi d'une double circulation naturelle [3, 26].

L'air de la chambre qui sort de l'orifice (A) circule par thermosiphon dans la cheminée d'air en captant la chaleur des deux côtés de l'absorbeur. Une fois arrivé à l'orifice (B), il pénètre dans les canaux intégrés au toit. Tout au long de son déplacement (par convection libre), dans les canaux, l'air chaud cède une partie de la chaleur au plafond. Une fois arrivé à l'orifice (C), l'air chaud est injecté dans la chambre pour chauffer l'espace intérieur [3, 26].

Le principe de fonctionnement du système B-C conventionnel désigné par "cas 1" est illustré par la figure (III.17). Dans la première configuration proposée du système B-C désignée par "cas 2", la vitre du système conventionnel est remplacée par une vitre PV semi-transparente devant laquelle une autre vitre simple est intégrée à une distance de 4 cm (figure III.18).

Dans la seconde configuration proposée, la vitre simple du cas 1 est remplacée par une vitre PV. Cette dernière est désignée par "cas 3" (figure III.19). Dans les cas 2 et 3, l'air qui sort de l'orifice (A) et qui pénètre dans la cheminée solaire gagne de l'énergie thermique par convection de la part de l'absorbeur ainsi que des cellules PV qui produisent de la chaleur lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Les vitres PV peuvent avoir plusieurs configurations du fait qu'elles peuvent être placées sur la vitre de diverses façons. Dans le cadre de notre étude, la configuration étudiée expérimentalement par Shukla *et al.* [144] (figure III.20), est choisie.

Les orifices (B) et (A) sont fermés dès que la température de l'air dans la chambre est supérieure à celle de l'air dans la cheminée solaire.

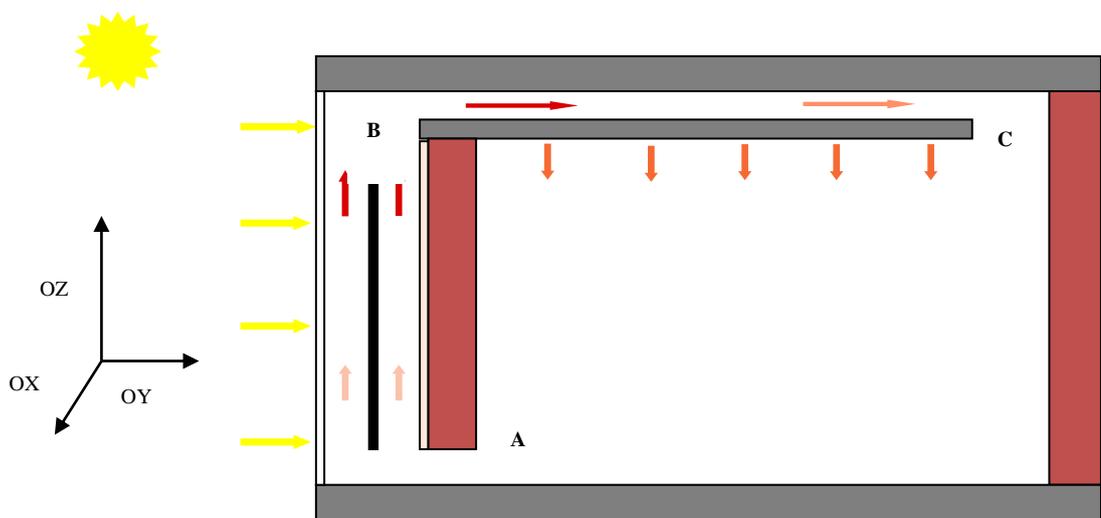


Figure III.17. Principe de fonctionnement du système B-C conventionnel (cas 1)

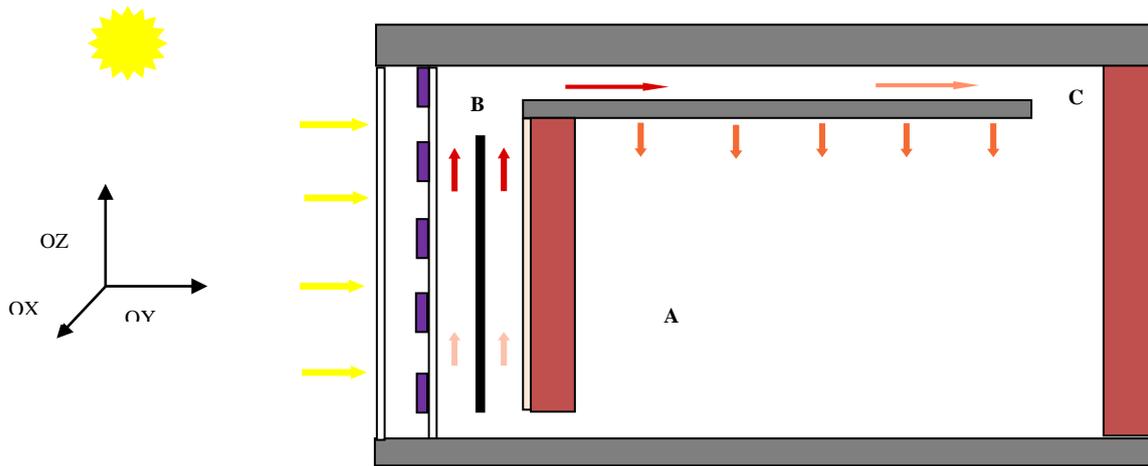


Figure III.18. Principe de fonctionnement du système B-C avec une vitre PV vitrée (cas 2)

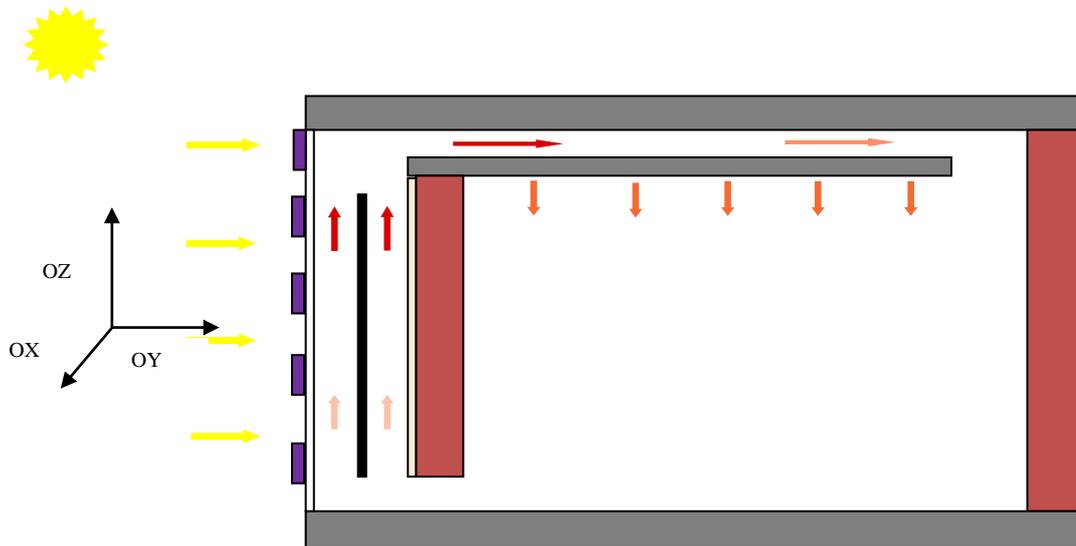


Figure III.19. Principe de fonctionnement du système B-C avec une vitre PV (cas 3)

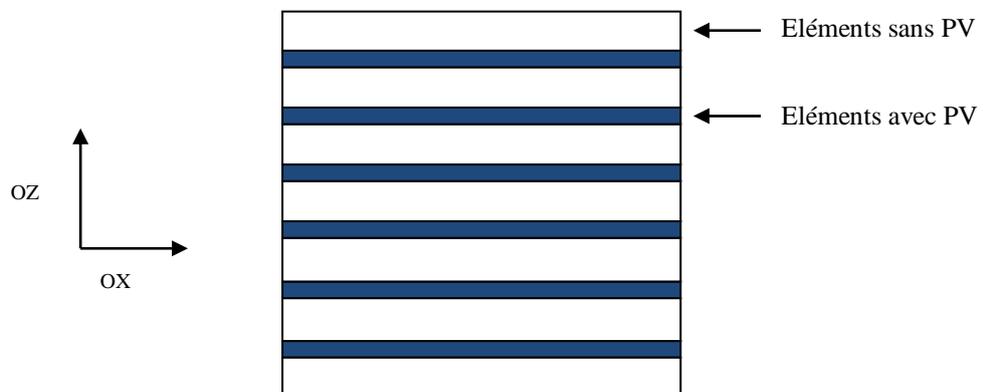


Figure III.20. Schéma d'une vitre PV [144]

Les propriétés thermophysiques des composants des systèmes étudiés sont regroupées dans le tableau III.12.

Murs	Matériaux	Dimensions (m <sup>2</sup> )	e(m)	ki (W/m. K)	Cp (J/kg. K)	ρ (kg/ m <sup>3</sup> )	α	ε
Isolant	Polystyrène extrudé	3m x 2.5 m	0.05	0.039	1300	24	0.4	0.11
Murs sud, nord	Brik	3m x 2.5 m	0.25	0.12	1000	700	0.75	0.93
Murs est, ouest	Brik	3m x 4.5 m	0.25	0.12	1000	700	0.75	0.93
Canaux	Cuivre	0.1m x 0.45m	0.003	384	385	8920	0.85	0.14
Absorbeur	Cuivre	3m x 2.5m	0.003	384	385	8920	0.85	0.14
PV	Polycrystalline silicium	5cm x 3m	0.002		903	2702	0.85	0.95
Toit, plancher	Béton		0.2	1.5	1000	2300	0.6	0.88
Vitre	Verre ordinaire	3m x 2.5 m	0.003	1.4	750	2500	0.066	0.88

Tableau III.12. Propriétés thermophysiques et géométriques des matériaux de construction

### III.6.2. Mise en équations du système Barra-Costantini

Dans cette partie, nous allons dresser les bilans thermiques qui décrivent le comportement thermique du système Barra-Costantini et des deux nouvelles configurations proposées.

#### - Air de la cellule

L'injection de l'air chaud des canaux du plafond dans la chambre conduit à la création d'une stratification thermique de l'air de la chambre suivant la direction verticale (OZ) [44, 145, 146]. Par ailleurs, la fenêtre permet au rayonnement solaire de pénétrer dans la chambre et de former une tache solaire sur le plancher et les parois verticales et donc une augmentation de leurs températures, ce qui induit un flux thermique ascendant. Ainsi, il se produit deux flux, l'un du haut vers le bas causé par l'injection de l'air chaud produit par le système, et l'autre produit par les apports internes, ce qui conduit par conséquent à un flux mixte qui Jie *et al.* [146], est difficile à modéliser. Pour résoudre cette problématique, la chambre est divisée en deux zones de même largeur ( $w_1=w_2=3m$ ), selon la direction (OX) (figure III.21) [146].

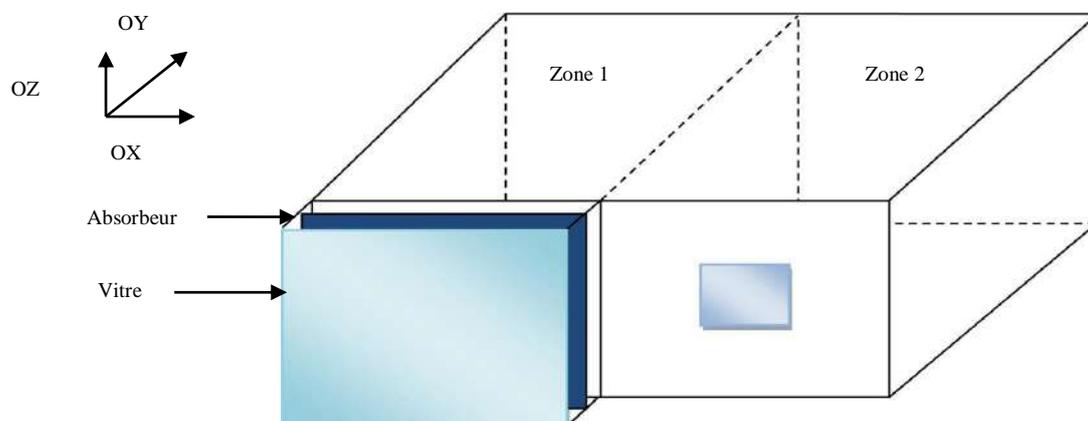


Figure III. 21. Vue en plan de la chambre

L'équation du bilan thermique de l'air dans la zone 1 est :

$$\rho_{ai1} \times Cp_{ai} \times L_r \times \frac{\partial T_{ai1}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n h_{ci} \times (T_{ai1} - T_{si}) - \dot{m} \times \frac{Cp_{ai}}{w_1} \times \frac{\partial T_{ai1}}{\partial y} + gain \quad (III.45)$$

Gain : étant l'énergie thermique générée par le système B-C.

Le bilan thermique de la zone 2 est donné par :

$$\rho_{ai2} \times Cp_{ai2} \times L_r \times \frac{\partial T_{ai2}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n h_{ci} \times (T_{ai2} - T_{si}) - \frac{\Phi_{CLOI}}{w_1 \times \partial y} \quad (III.46)$$

La température moyenne de l'air de la chambre est constituée des températures de l'air des zones 1 et 2 est calculée par la méthode des moyennes pondérées comme suit :

$$T_{ai} = \frac{w_1 \times T_{ai1} + w_2 \times T_{ai2}}{w_1 + w_2} \quad (III.47)$$

#### - La vitre

Pour modéliser la vitre PV, deux équations sont utilisées une pour les parties sans PV et l'autre pour les parties avec PV. La faible épaisseur des cellules PV intégrés à la vitre, permet de supposer que leur capacité thermique est négligeable [44]. La température des PV est uniforme selon la direction (OX) et varie selon la direction (OY).

Les parties de la vitre sans PV sont modélisées comme suit :

$$\rho_v Cp_v e_v \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v G + [h_{rv-sol}(T_{sol} - T_v)] + [h_{rv-ciel}(T_{ciel} - T_v)] + [h_{ve}(T_{am} - T_v)] \\ + [h_{cqv-f1}(T_{f1} - T_v)] + [h_{rv-ab}(T_{ab} - T_v)] \quad (III.48)$$

Avec :

$$h_{rv-ciel} = \sigma \varepsilon_v \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (T_{ciel} + T_v)(T_{ciel}^2 + T_v^2) \quad (III.49)$$

$$h_{rv-sol} = \sigma \varepsilon_v \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (T_{sol} + T_v)(T_{sol}^2 + T_v^2) \quad (III.50)$$

Les parties de la vitre avec PV sont modélisées selon :

$$\rho_v Cp_v e_v \frac{dT_{pv}}{dt} = \alpha_{pv} G - E + [h_{rpv-sol}(T_{sol} - T_{pv})] + [h_{rpv-ciel}(T_{ciel} - T_{pv})] \\ + [h_{cve}(T_{am} - T_{pv})] + [h_{cqv-pv-f1}(T_{pf1} - T_{pv})] \\ + [h_{rpv-ab}(T_{ab} - T_{pv})] \quad (III.51)$$

Avec :

$$h_{rpv-ciel} = \sigma \varepsilon_{pv} \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (T_{ciel} + T_{pv}) (T_{ciel}^2 + T_{pv}^2) \quad (III.52)$$

$$h_{rpv-sol} = \sigma \varepsilon_{pv} \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (T_{sol} + T_{pv}) (T_{sol}^2 + T_{pv}^2) \quad (III.53)$$

E, la puissance électrique générée par les cellules PV [44, 146] a pour expression :

$$E = G \eta_o [1 - 0.0045(T_{pv} - 298.15)] \quad (III.54)$$

$\eta$ , le rendement électrique des cellules PV est donné par [146]:

$$\eta = \frac{E}{G} \quad (III.55)$$

Le bilan thermique de la vitre placée devant la vitre PV dans le cas 2 est donné par :

$$\begin{aligned} \rho_{vv} C p_{vv} e_{vv} \frac{dT_{vv}}{dt} &= \alpha_v G + [h_{rvv-sol}(T_{sol} - T_{vv})] + [h_{rvv-ciel}(T_{ciel} - T_{vv})] \\ &+ [h_{cve}(T_{am} - T_{vv})] + [h_{rvv-v}(T_v - T_{vv})] + [h_{vvv-v}(T_v - T_{vv})] \quad (III.56) \end{aligned}$$

Le bilan thermique de la vitre utilisée dans le cas 1 est donné par l'équation (III.48).

### - La cheminée solaire

L'air dans la cheminée solaire est divisé en deux zones 1 et 2, une située entre la vitre (ou la vitre PV dans le cas 2) et l'absorbeur, et l'autre zone entre l'absorbeur et le mur sud. Le fluide en contact avec l'absorbeur est chauffé, il se dilate et devient moins dense. Il subit par conséquent une poussée ascendante. Ainsi, la température de l'air dans chaque zone varie selon la direction verticale (OZ). Le bilan thermique de l'air dans les zones 1 et 2 de la cheminée solaire s'écrit par [44, 145, 146] comme suit :

$$\rho_{f1} C p_{f1} D \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} = h_{cvv-f1}(T_{f1} - T_v) + h_{cvab-f1}(T_{f1} - T_{ab}) - \rho_{f1} V_{f1} D C p_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial y} \quad (III.57)$$

$$\rho_{f2} C p_{f2} D \frac{\partial T_{f2}}{\partial t} = h_{cvmse-f2}(T_{f2} - T_{mse}) + h_{cvab-f2}(T_{f2} - T_{ab}) - \rho_{f2} V_{f2} D C p_{f2} \frac{\partial T_{f2}}{\partial y} \quad (III.58)$$

La vitesse du fluide dans la cheminée solaire est assimilée au cas d'un mur Trombe. Elle est donnée par [44] :

$$V = \sqrt{\frac{0.5 g (T_{srt} - T_{ent}) L \bar{\beta}}{C_f \frac{L}{d} + \frac{C_{ent}}{A_{ent}^2} A^2 + \frac{C_{srt}}{A_{srt}^2} A^2}} \quad (III.59)$$

Où :

$$C_{ent} = 0.25 ; C_{srt} = 0.3C_f = 0.3 \times 1.368 \times Gr_y^{0.084}$$

Le diamètre hydraulique  $d$  est donné par :

$$d = 2(w_1 + D) \quad (III. 60)$$

Les coefficients d'échange convectif  $h_{c_{vv-f1}}, h_{c_{vab-f1}}, h_{c_{vmse-f1}}, h_{c_{vab-f2}}$  sont corrélés en utilisant les nombres adimensionnels de Nu, Ra et Pr [17, 24] :

$$h_{cv} = \frac{Nuk_f}{D} \quad (III. 61)$$

$$Nu = \max[1; 0.288(KaGrPr)^{0.25}; 0.039(GrPr)^{0.333}] \quad (III. 62)$$

$$Ka = \frac{Ho}{D} \quad (III. 63)$$

### - L'absorbeur

Le bilan thermique de l'absorbeur est :

$$\begin{aligned} \rho_{ab} C_{p_{ab}} e_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} &= \alpha_{ab} \tau_v G + h_{c_{vab-f1}}(T_{f1} - T_{ab}) + h_{c_{vab-f2}}(T_{f2} - T_{ab}) \\ &+ h_{r_{ab-mse}}(T_{mse} - T_{ab}) + h_{r_{ab-v}}(T_v - T_{ab}) \end{aligned} \quad (III. 64)$$

$$h_{r_{ab-v}} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}}\right) - 1} (T_v^2 + T_{ab}^2)(T_v + T_{ab}) \quad (III. 65)$$

$$h_{r_{ab-mse}} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{mse}}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}}\right) - 1} (T_{mse}^2 + T_{ab}^2)(T_{mse} + T_{ab}) \quad (III. 66)$$

### - L'air dans les canaux

La température de l'air à l'entrée des canaux est égale à la moyenne des températures de l'air à la sortie des deux compartiments de la cheminée solaire. La température de l'air dans les canaux est modélisée par :

$$\rho_{f3} c_{p_{f3}} H_1 \frac{\partial T_{f3}}{\partial t} = 2h_{c_{vc-f3}} \left(\frac{H_1}{H_2} + 1\right) (T_{f3} - T_t) - \rho_{f3} c_{p_{f3}} H_1 V_{f3} \frac{\partial T_{f3}}{\partial z} \quad (III. 67)$$

Le coefficient  $h_{vc-f3}$  est donné par [3] :

- Entre la face supérieure du canal et l'air :

$$h_{cvc-f3} = 0.58 \frac{\lambda_{f3}}{D_h} Ra^{0.2} \quad (III.68)$$

- Entre la face inférieure du canal et l'air :

$$h_{cvc-f3} = 0.13 \frac{\lambda_{f3}}{D_h} Ra^{0.333} \quad Ra \leq 2 \times 10^8 \quad (III.69)$$

$$h_{cvc-f3} = 0.16 \frac{\lambda_{f3}}{D_h} Ra^{0.333} \quad Ra > 2 \times 10^8 \quad (III.70)$$

- **Les canaux**

Le bilan des canaux est donné par :

$$\rho_c S_c e_c c p_c \frac{dT_c}{dt} = h_{vc-f3} S_{c-f3} (T_t - T_{f3}) + h_{cc-t} S_{c-t} (T_t - T_c) \quad (III.71)$$

$$h_{cvc-t} = \frac{\lambda_c S_{t-c}}{e_c} \quad (III.72)$$

### III.7. Computation numérique

Pour étudier l'évolution de la tache solaire et son impact sur le comportement thermique du bâtiment, deux bilans thermiques, un pour une cellule à faible inertie thermique et l'autre pour une cellule à forte inertie thermique ont été établis. Deux systèmes équations linéaires relatives, aux deux faces de chaque composant de la cellule (murs verticaux, toit, plancher, fenêtre, porte) et au volume d'air interne, ont été obtenus.

Nous avons également dressé trois bilans thermiques relatifs au système B-C classique (cas 1), au système B-C avec une vitre PV semi-transparente (cas2) et au système B-C avec vitre PV semi-transparente vitrée (cas 3).

Soit, cinq bilans thermiques au total.

Les principales étapes suivies sont relatées dans la partie qui suit.

- **Discrétisation et résolution**

La simulation du comportement de la tache solaire et son évolution dans l'espace et dans le temps ainsi que la simulation des performances thermiques et électriques des systèmes proposés (cas 1, cas2 et cas 3) sont effectuées en utilisant les modèles mathématiques pré-décrits et en établissant cinq codes de calcul en langage Fortran.

La simulation de la tache solaire est réalisée sur des périodes de cinq jours successifs pour chaque saison, du 19 au 23 des mois de Mars, Juin et Décembre 2017. Alors que la simulation

des comportements des systèmes relatifs aux cas 1, 2 et 3 n'est faite que durant la période hivernale, du 19 au 23 décembre 2017, du fait que ces systèmes sont utilisés pour le chauffage des bâtiments.

Les conditions initiales introduites dans les codes de calcul sont prises égales à la température ambiante :

$$A t = 0 \quad T = T_{am} \quad (III.73)$$

Tandis que les conditions spatio-temporelles relatives à chaque paroi sont :

$$A x = 0 \quad - \lambda S_e \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = h_{cve} S_e (T_{se} - T_\infty) + \sigma S_e (T_{se}^4 - T_\infty^4) \quad (III.74)$$

$$A x = e \quad - \lambda S_i \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=e} = h_{cvi} S_i (T_{si} - T_\infty) + \sigma S_i (T_{si}^4 - T_\infty^4) \quad (III.75)$$

Pour suivre l'évolution spatiale des températures, chaque élément de chaque système (cas 1, cas 2 et cas 3) est discrétisé en mailles tel qu'il est illustré par la figure III.22. Les éléments horizontaux (toit, tubes, air dans les canaux et plancher) sont divisés en mailles selon la direction (OY). Les éléments verticaux (parois, vitre simple, vitre PV et l'air dans la cheminée solaire) sont discrétisés selon la direction (OZ).

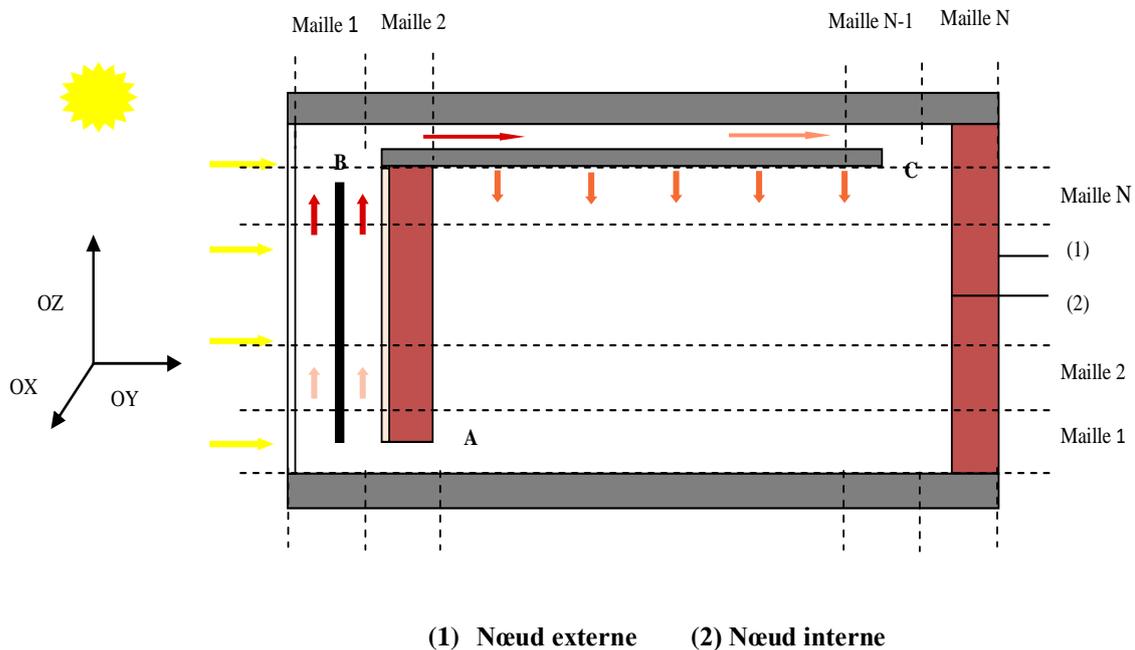


Figure III.22. Schéma de la découpe du prototype en mailles

Nous avons par la suite discrétisé, toutes les équations en utilisant la méthode des différences finies (schéma explicite) pour les mettre sous une forme matricielle.

Afin de, nous avons utilisé La méthode itérative de Gauss-Seidel a été utilisée pour résoudre les cinq systèmes d'équations.

#### - Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée des codes de simulation incluent les conditions climatiques du site, les paramètres de configurations et thermophysiques, des systèmes étudiés.

Les conditions climatiques introduites dans les codes sont celles du site de Ksar Chellala (35.10N, 2.19E, Altitude 800m) situé au nord-ouest de l'Algérie, pour les journées du 19 au 23 des mois de Mars, Juin et Décembre 2017. La température ambiante, les rayonnements solaires, global et direct et la vitesse du vent (prises chaque minute), des périodes considérées sont illustrées respectivement par les figures III.23, III.24 III.25, III.26, III.27 et III.28. Les paramètres de configuration et thermophysiques d'entrée pour les deux systèmes sont introduites telles qu'elles sont affichées dans les tableaux III.10, III.11 et III.12.

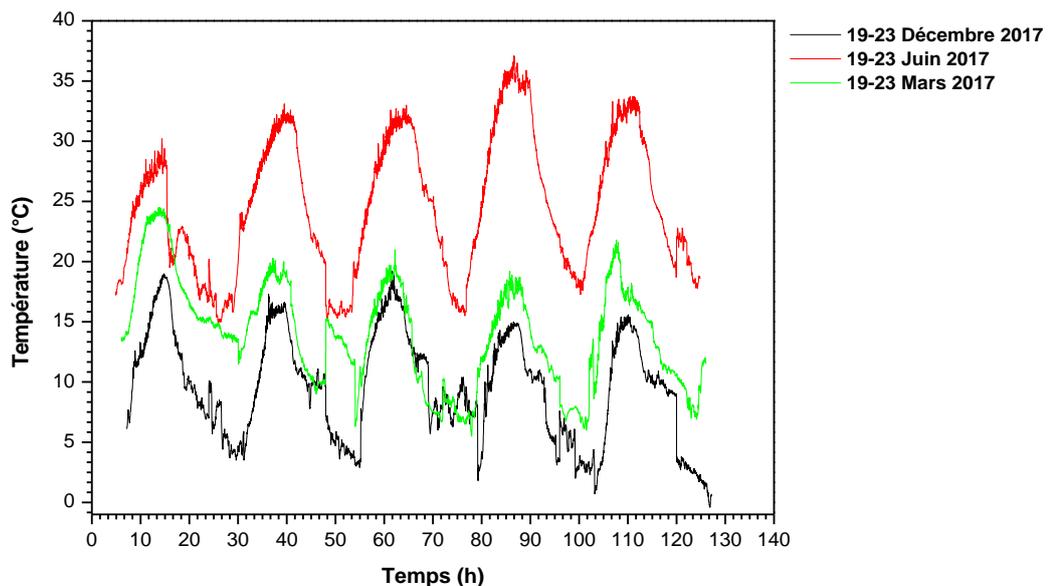


Figure.III.23. Variation temporelle de la température ambiante

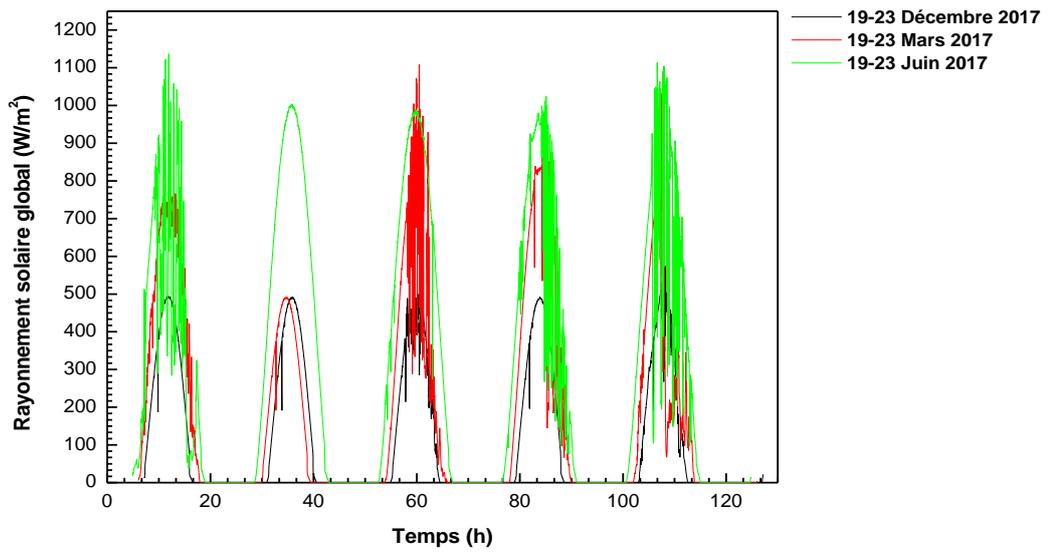


Figure. III. 24. Variation temporelle du rayonnement solaire global

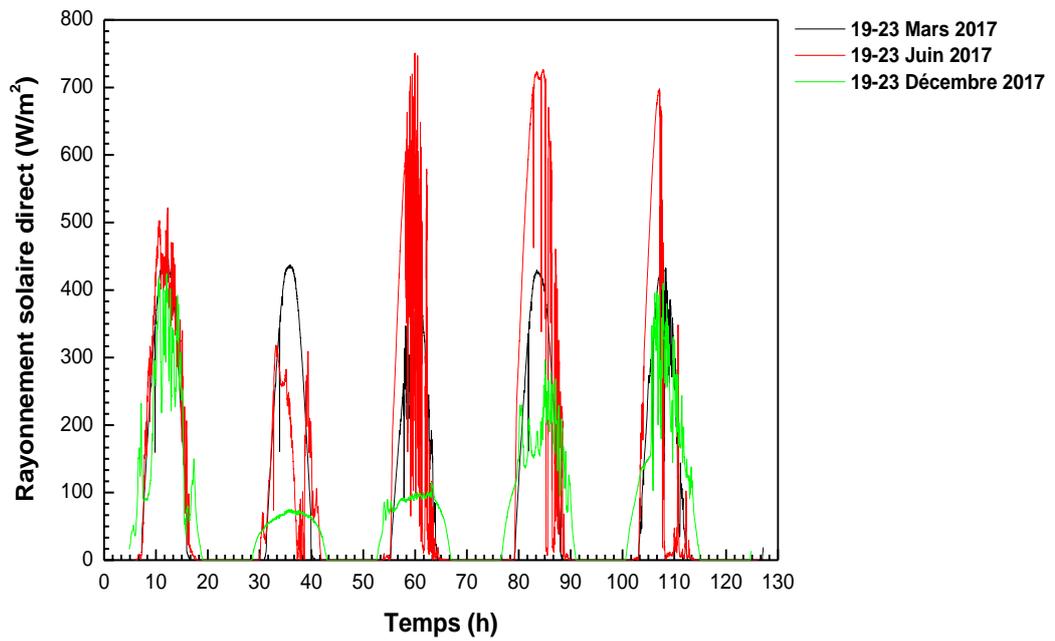


Figure. III.25. Variation temporelle du rayonnement direct

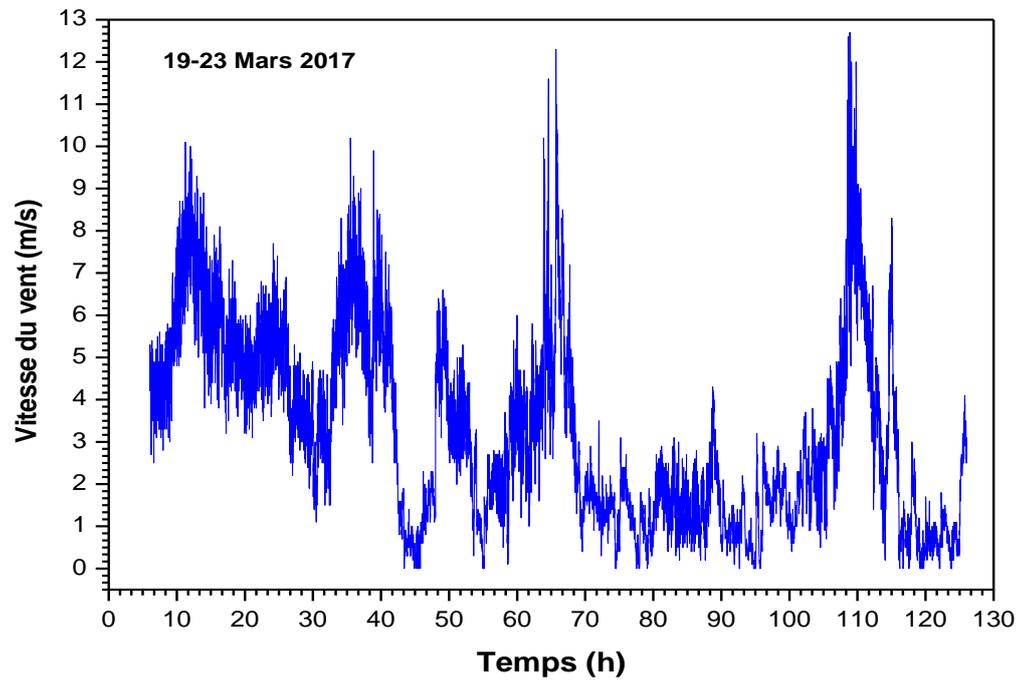


Figure III. 26. Variation temporelle de la vitesse du vent (19-23 Mars 2017)

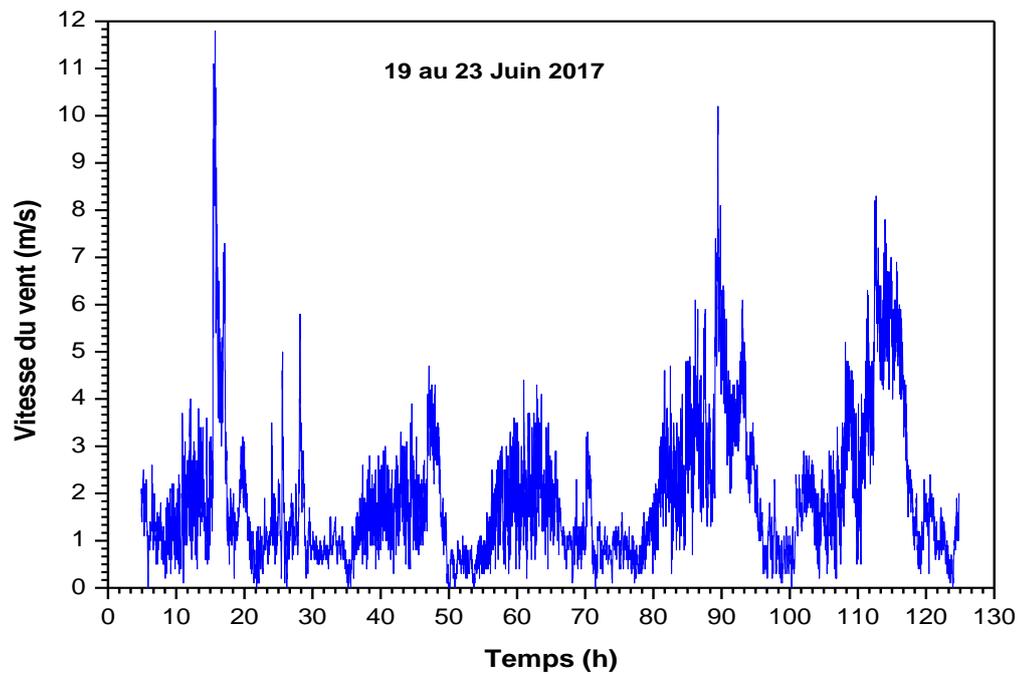


Figure III. 27. Variation temporelle de la vitesse du vent (19-23 Juin 2017)

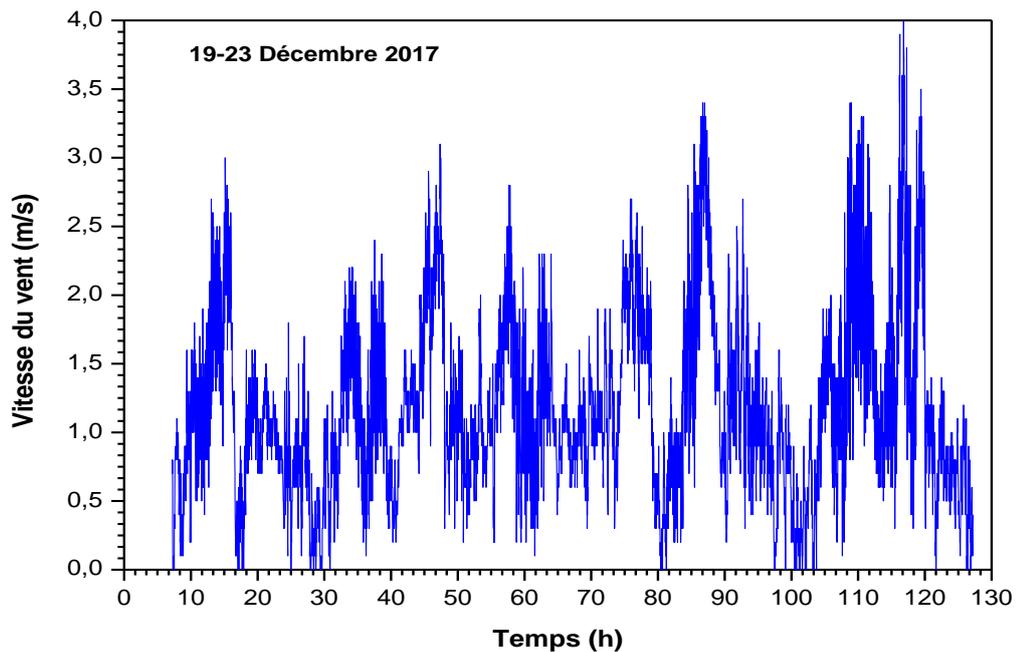


Figure III. 28. Variation temporelle de la vitesse du vent (19-23 Décembre 2017)

Le rayonnement solaire global est mesuré par un pyranomètre avec une thermopile de type noir et blanc composée de 64 thermocouples en série et disposées dans une étoile.

Le pyranomètre mesure le rayonnement solaire global entre  $0.3\mu\text{m}$  à  $2.5\mu\text{m}$  avec une sensibilité approximative de  $2\ 100\ \text{mV} / \text{mW} / \text{cm}$  et un de temps de réponse à 99% égal à 30s. Il est associé à une station automatique CIEMEL.

Un pyréliomètre de type CE183, d'une sensibilité de  $2\ 20\text{mV} / \text{W} / \text{m}$  et une précision de  $0.5^\circ$  est utilisé pour mesurer le rayonnement solaire direct s'étendant entre  $0.3\ \mu\text{m}$  et  $2\ \mu\text{m}$ . La température ambiante est obtenue à l'aide d'une sonde de résistance platine du type CE185C (avec une précision de  $0.1^\circ\text{C}$ ). Un anémomètre de type CE155 mesure la vitesse du vent.

#### - Exécution

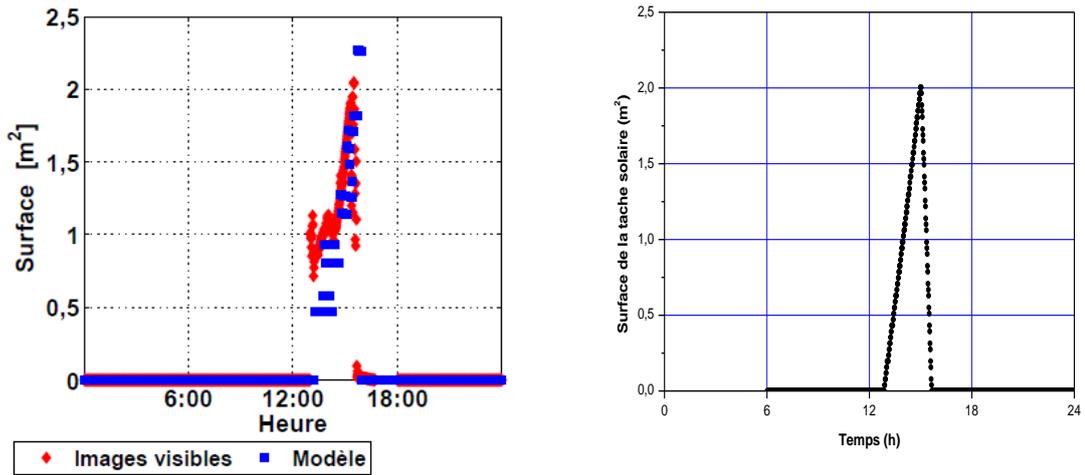
Le pas de temps choisi dans les cinq codes de calcul est égal à une minute pour un intervalle de temps de 120h (équivalent à, soit, 7200 mn).

Le nombre de mailles qui garantit la stabilité des codes de calcul relatifs aux cas 1, 2 et 3, évalué après un certain nombre de tests et une validation par des résultats expérimentaux est de 750 mailles. Les résultats obtenus sont donnés pour chaque maille et pour chaque minute ( $\Delta t = 1\ \text{mn}$ ).

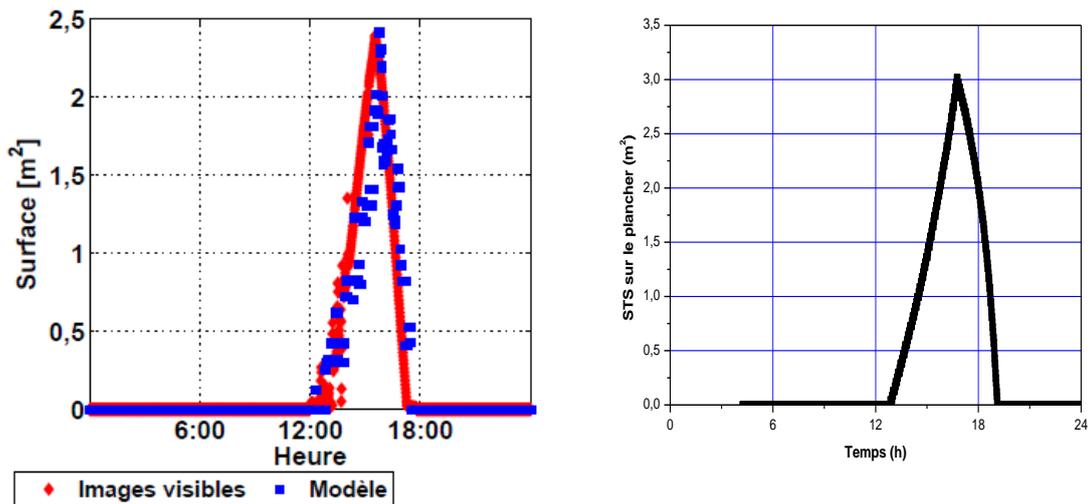
- Validation expérimentale des résultats

Afin de vérifier la validité de nos codes de calcul, une comparaison de nos résultats de simulation avec ceux issus de l'expérimentation, dans les mêmes conditions climatiques et avec les mêmes caractéristiques de configuration a été entreprise.

Pour la tâche solaire, une confrontation de nos résultats numériques avec ceux de Rodler [130], montre un bon accord (figure III.29).



(a) Surface de la tache solaire sur le mur nord en Décembre 2013 [130]



(b) Surface de la tache solaire sur le plancher en Juillet 2013 [130]

Figure III.29. Evolution temporelle de la surface de la tache solaire

Pour valider nos résultats numériques relatifs au cas 1 (chambre munie d'un système B-C classique), leurs confrontations avec ceux obtenus par ENEA (Energia Nucleare ed Energie

Alternative) lors d'une campagne de mesures sur un bâtiment muni d'un système Barra-Costantini à Salisano situé à 50 km de Rome (42°16' N, 12°45'W, 460 m) [24], a été effectuée. Pour évaluer la différence entre les résultats numériques et expérimentaux, la méthode d'analyse statistique [147] utilisée a été :

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum (x_i)^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum (y_i)^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (III.76)$$

$$e = \sqrt{\frac{\sum (e_i)^2}{N}} \quad (III.77)$$

r, étant un coefficient de corrélation et e, la différence moyenne relative entre les valeurs numériques et expérimentales.

Le pourcentage d'erreur ( $e_i$ ) pour chaque valeur est donné par :

$$e_i = \frac{x_i - y_i}{x_i} 100 \quad (III.78)$$

Pour les températures de l'air de la chambre, il apparaît sur la figure III.30, un léger écart de l'ordre de 6.45%, (< 10%) entre nos résultats de simulation et ceux issus de l'expérimentation menée par L. Buzzoni [3], ce qui démontre un bon accord. Les températures maximales, de l'air obtenue par simulation et mesurée [3] sont respectivement de 23.36°C et de 22.50°C.

S'agissant de la vitesse de l'air dans les canaux, il est aisé de remarquer sur les courbes de la figure III.31, que les valeurs numériques et celles issues de l'expérimentation [3] concordent. L'écart entre les valeurs maximales des vitesses de l'air dans les canaux, simulée ( $v=0.6$  m/s) et mesurée ( $V=0,56$ ) est de l'ordre de 0,04.

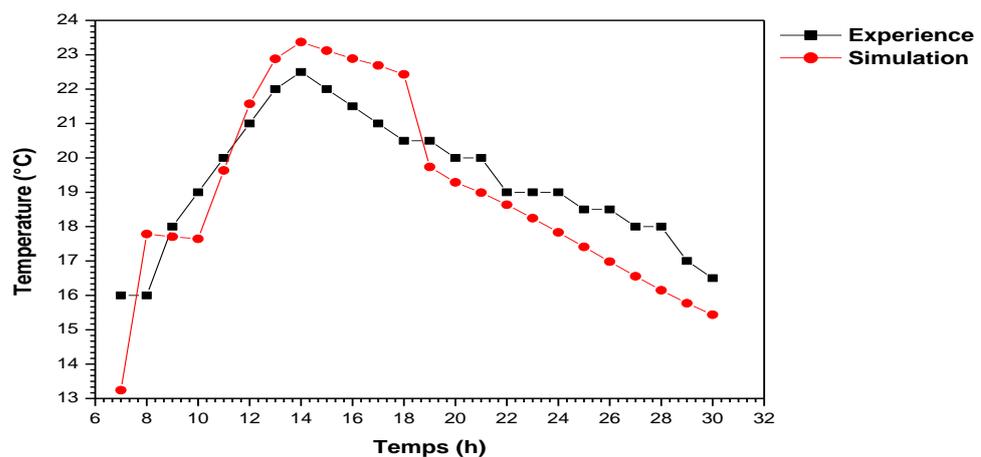


Figure III.30 Variation temporelle de la température de l'air dans la chambre

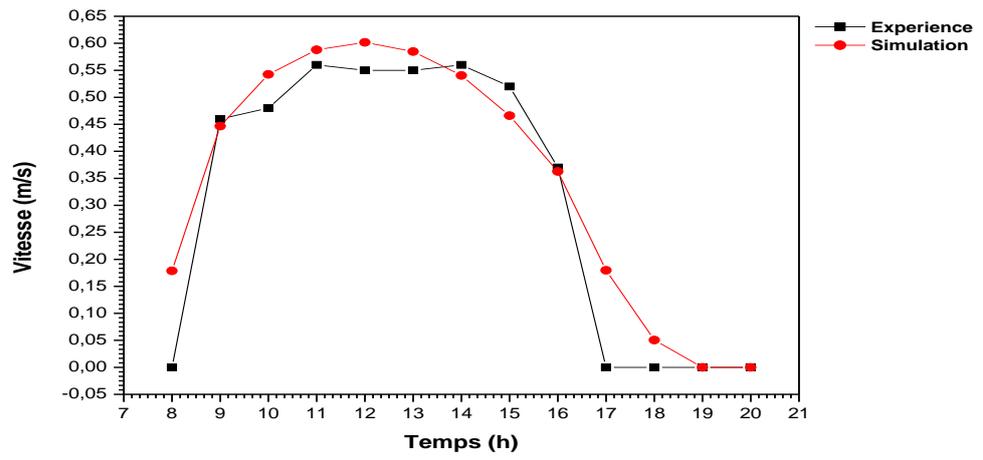


Figure III.31. Variation temporelle de la vitesse de l'air dans les canaux

---

## **CHAPITRE IV**

---

### **Résultats et interprétations**

## IV.1. Introduction

Ce dernier chapitre est réservé à l'ensemble des résultats obtenus et à leur discussion. Nous commencerons par une étude de l'enveloppe de deux bâtiments l'un à faible inertie thermique et l'autre à forte inertie. Les puissances solaires gagnées par la face externe de l'enveloppe, les températures de l'air intérieur et l'orientation des deux bâtiments seront examinées. Nous poursuivrons par une étude de la tache solaire et de sa localisation. Une attention particulière sera portée à l'impact de la prise en compte de la tache solaire sur le comportement thermique des deux bâtiments. Nous terminerons par une analyse fine du comportement énergétique de toutes les parties des systèmes étudiés, B-C classique (cas 1), B-C avec une vitre PV vitrée (cas 2) et PV B-C (cas 3).

Toutes les simulations ont été effectuées sur trois journées successives, du 19 au 23, des mois de Mars (printemps), Juin (été) et Décembre (hiver), de l'année 2017.

## IV. 2. Etude de l'enveloppe du bâtiment

### IV.2.1. Puissance solaire gagnée par la face externe de l'enveloppe du bâtiment

La puissance solaire qui pourrait être gagnée par la face externe de l'enveloppe d'un bâtiment les journées du 19 au 23, des mois de Mars (printemps), Juin (été) et Décembre (hiver), de l'année 2017, a été simulée.

L'analyse des courbes de la figure IV.1 permet de noter que pour les journées du 19 au 23 Mars, les murs nord et sud ainsi que le toit reçoivent de l'énergie solaire durant toute la période d'ensoleillement. Les valeurs maximales reçues étant respectivement de 487 W/m<sup>2</sup>, 798 W/m<sup>2</sup> et 965 W/m<sup>2</sup>. Par contre, les façades est et ouest ne sont ensoleillées que la matinée pour la première et uniquement l'après-midi pour la seconde. Néanmoins, les quantités d'énergie reçues sont quasiment égales avec des maxima respectivement de 571 W/m<sup>2</sup> et de 582 W/m<sup>2</sup>. Il apparaît clairement que c'est le toit qui bénéficie le plus des gains solaires

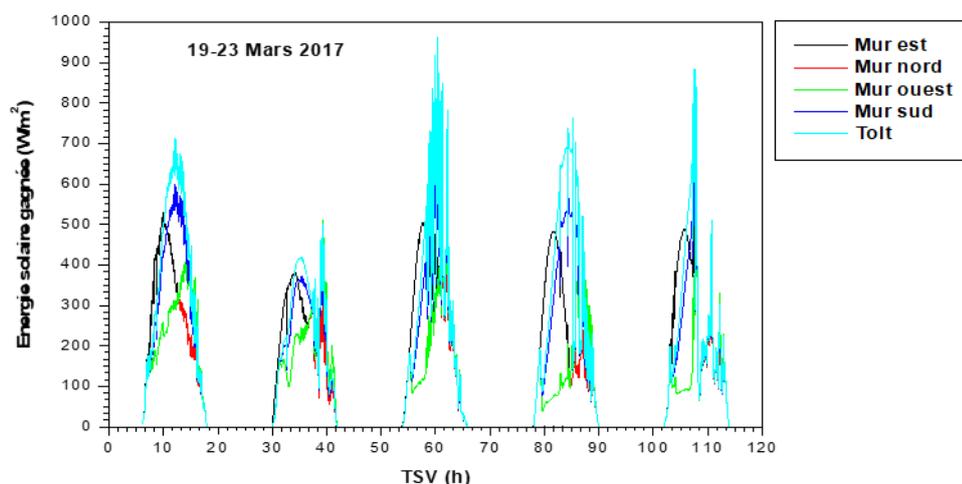
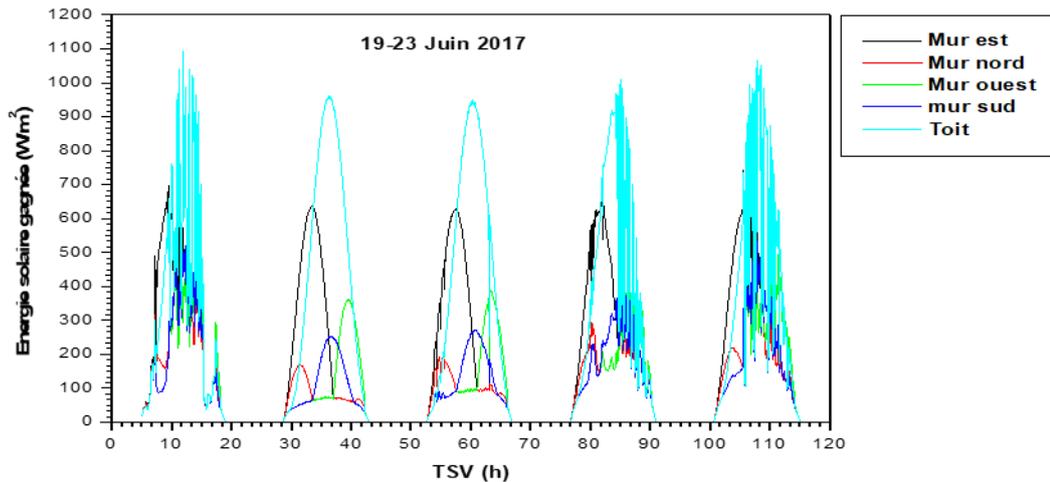


Figure IV.1. Puissance solaire gagnée par l'enveloppe du bâtiment pendant les journées du 19 au 23 Mars de l'année 2017

Pour les journées du 19 au 23 Juin de l'année 2017 (période estivale), les courbes de la figure IV.2 révèlent que le mur nord reçoit l'ensoleillement, le matin et en fin d'après-midi, la puissance solaire maximale de  $424 \text{ W/m}^2$  étant reçue la matinée. Quant au mur sud et au toit, ces derniers sont irradiés tout au long de la journée, ce qui leur permet de gagner des flux solaires, atteignant des valeurs maximales respectivement de  $531 \text{ W/m}^2$  et  $1094 \text{ W/m}^2$ . Par contre le mur est n'est ensoleillé que la matinée et celui de l'ouest uniquement l'après-midi. La puissance solaire reçue par le premier dépasse largement celle gagnée par le second.



**Figure IV.2. Puissance solaire gagnée par l'enveloppe du bâtiment pendant les journées du 19 au 23 Juin de l'année 2017**

Pour les trois journées du 19 au 23 Décembre de l'année 2017 (période hivernale), il est aisé de remarquer sur la figure IV.3, que c'est la paroi orientée vers le sud qui gagne le plus d'énergie solaire, atteignant jusqu'à  $515 \text{ W/m}^2$ , alors que celle reçue par le toit, ne dépasse pas les  $370 \text{ W/m}^2$ , il faut noter qu'elle reste également inférieure à celles qu'il gagne lors des saisons du printemps et de l'été.

De tels comportements résultent du fait que la hauteur du soleil est moins élevée en hiver que pendant les autres saisons. En outre, les courbes de cette figure révèlent également que la paroi est ne reçoit de l'énergie solaire que la matinée, alors que celle orientée vers l'ouest est quant à elle irradiée uniquement l'après-midi, les puissances solaires maximales reçues étant respectivement de  $335 \text{ W/m}^2$  et de  $162 \text{ W/m}^2$ .

Il apparaît ainsi que le mur nord est celui qui gagne le moins d'énergie solaire et ce à cause de la course du soleil qui est relativement courte en hiver.

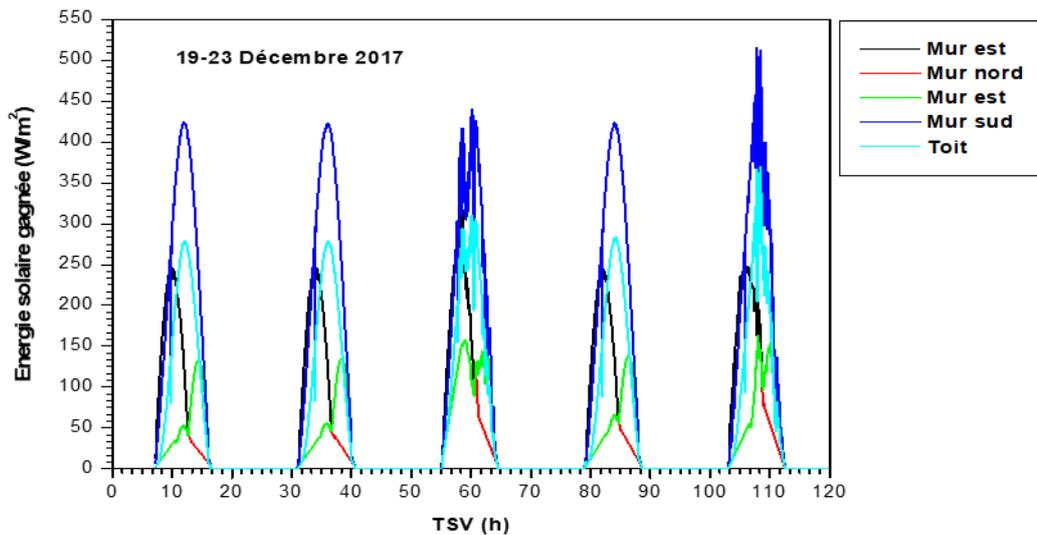
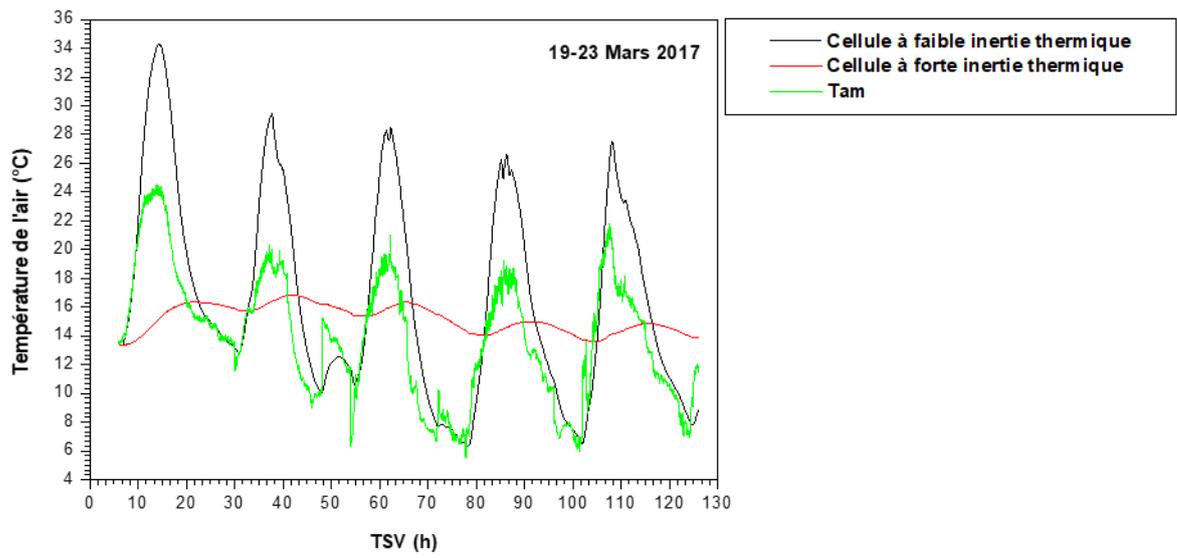


Figure IV.3. Puissance solaire gagnée par l'enveloppe du bâtiment pendant les journées du 19 au 23 Décembre de l'année 2017

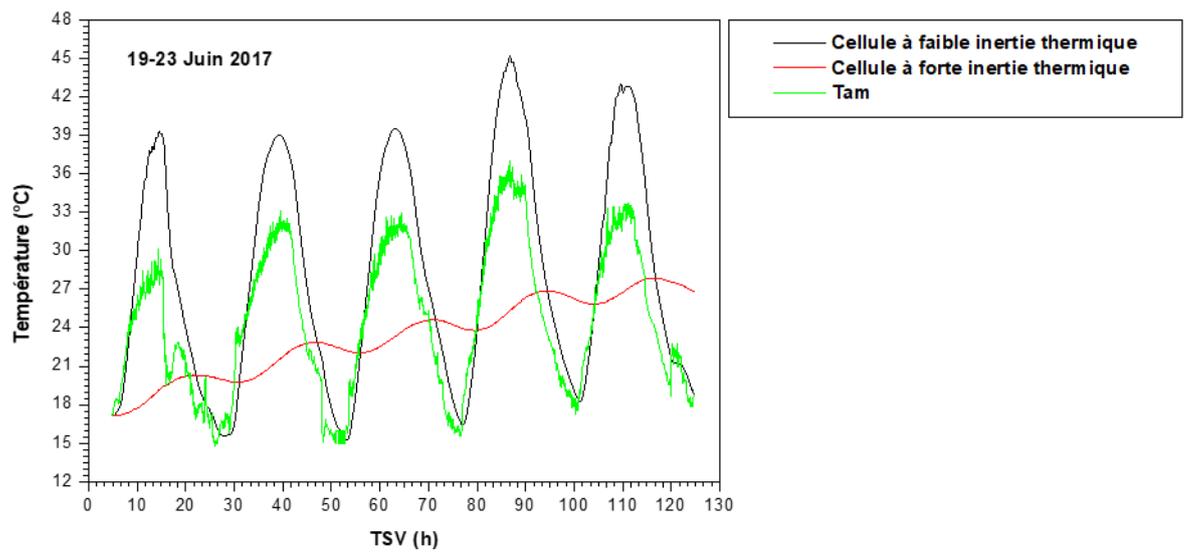
#### IV.2. 2. Températures de l'air

Les variations temporelles des températures de l'air de deux bâtiments, l'un à faible et l'autre à forte inertie thermique, orientés vers le sud, durant les journées du 19 au 23 des mois de Mars (printemps), Juin (été) et Décembre (hiver), de l'année 2017, sont illustrées par les trois figures IV.4.a, IV.4.b et IV.4.c.

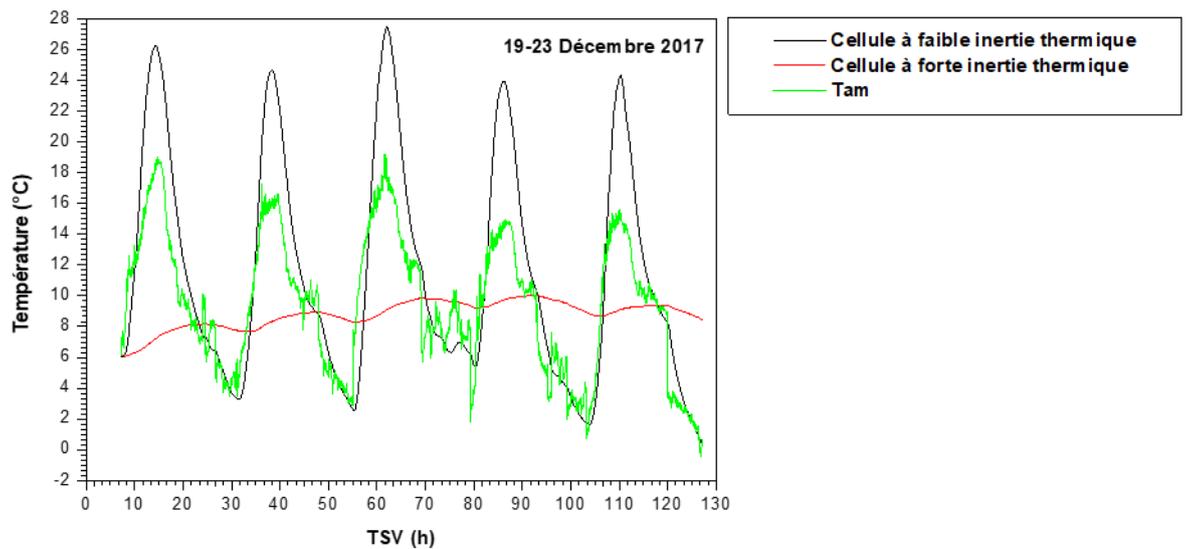
Il apparaît que la variation de l'air de la cellule à faible inertie thermique dépend fortement de celle de la température ambiante extérieure. Par contre cette dernière à peu d'effet sur la température de l'air de la cellule à forte inertie thermique (cellule passive), résultant de sa capacité de stocker la chaleur. Nous pouvons noter dans ce dernier cas que les températures de l'air intérieur varient de 13.3 °C à 16.8 °C et de 17.1 °C à 27.8 °C et 6 °C à 10 °C respectivement pour les journées du 19 au 23 des mois de Mars (printemps), Juin (été) et Décembre (hiver), de l'année 2017.



(a) 19-23 Mars 2017



(b) 19-23 Juin 2017



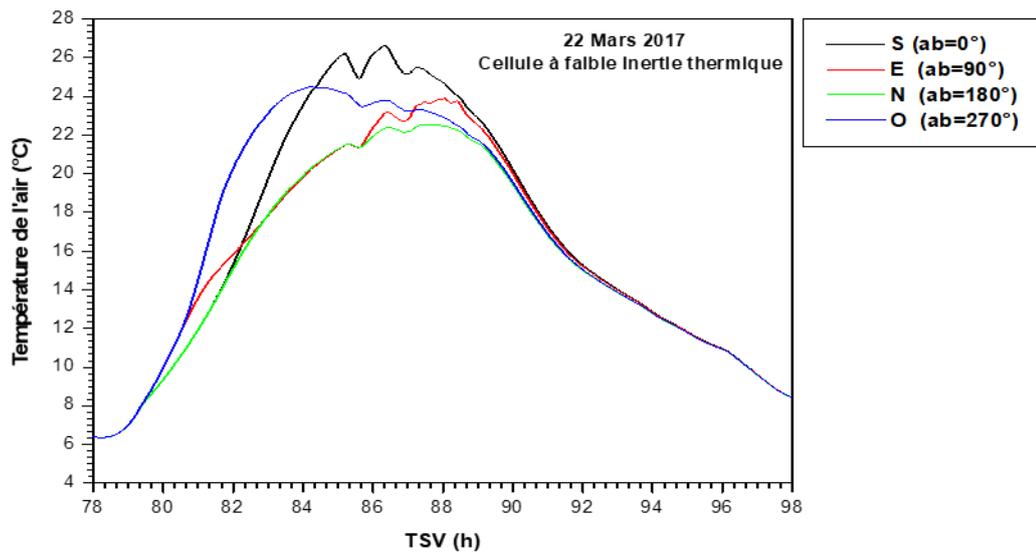
(c) 19-23 Décembre 2017

**Figure IV.4. Variations temporelles de la température de l'air pour deux bâtiments à forte et à faible inerties thermiques orientés vers le sud**

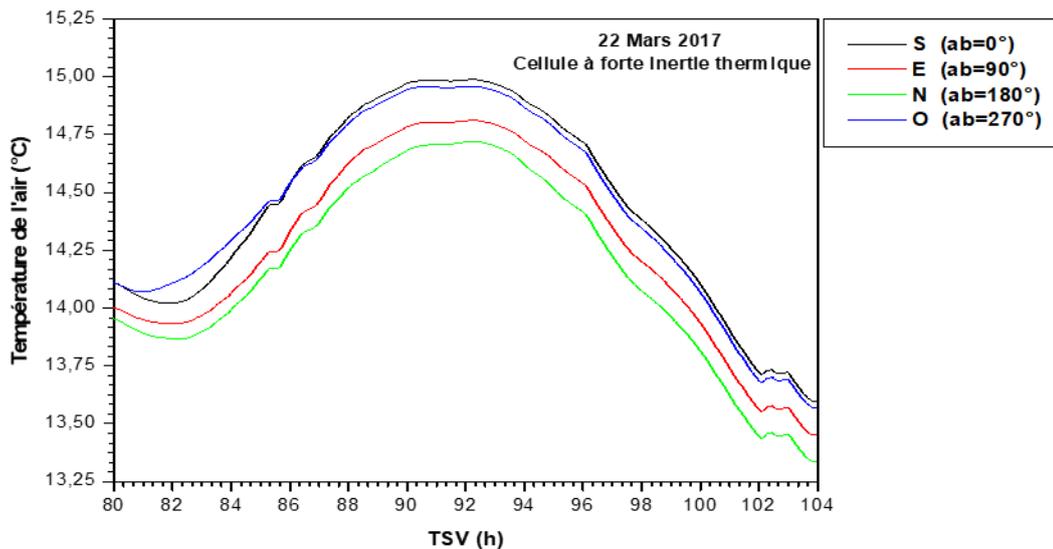
### IV.2. 3. Orientation du bâtiment

L'effet de l'orientation des deux bâtiments (à faible et à forte inerties thermiques), sur la température de l'air de ces derniers, a été examiné. Les simulations ont été effectuées pour les journées des 22 Mars (équinoxe de printemps), 20 Juin (solstice d'été) et du 21 Décembre (solstice d'hiver), de l'année 2017. Pour cela, des orientations  $0^\circ$  (sud),  $90^\circ$  (est),  $180^\circ$  (nord) et  $270^\circ$  (ouest) des deux bâtiments ont été considérées.

L'analyse des courbes de la figure IV.5, révèle que pour l'équinoxe de printemps, l'orientation vers le sud qui conduit aux plus fortes températures intérieures est à retenir.



(a)

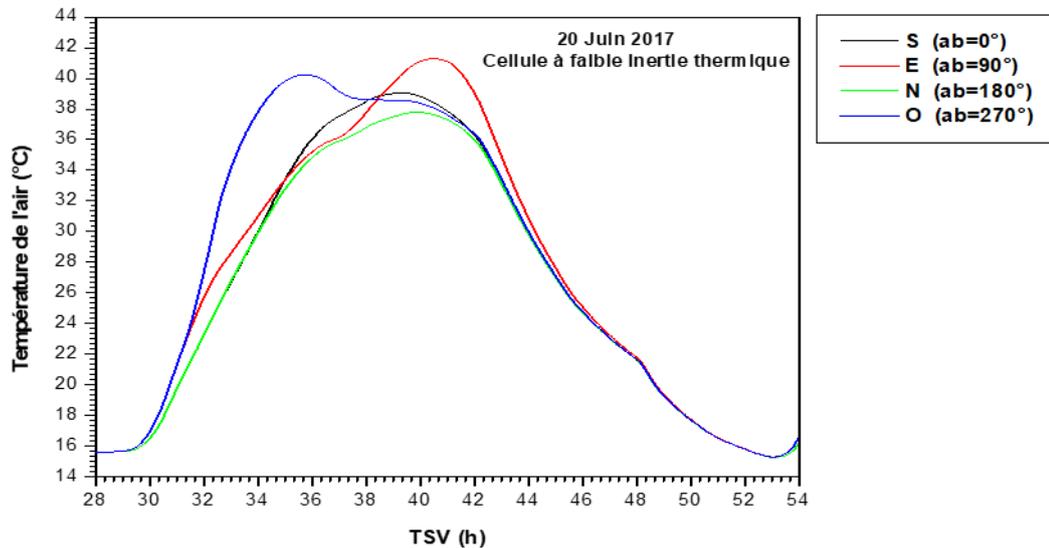


(b)

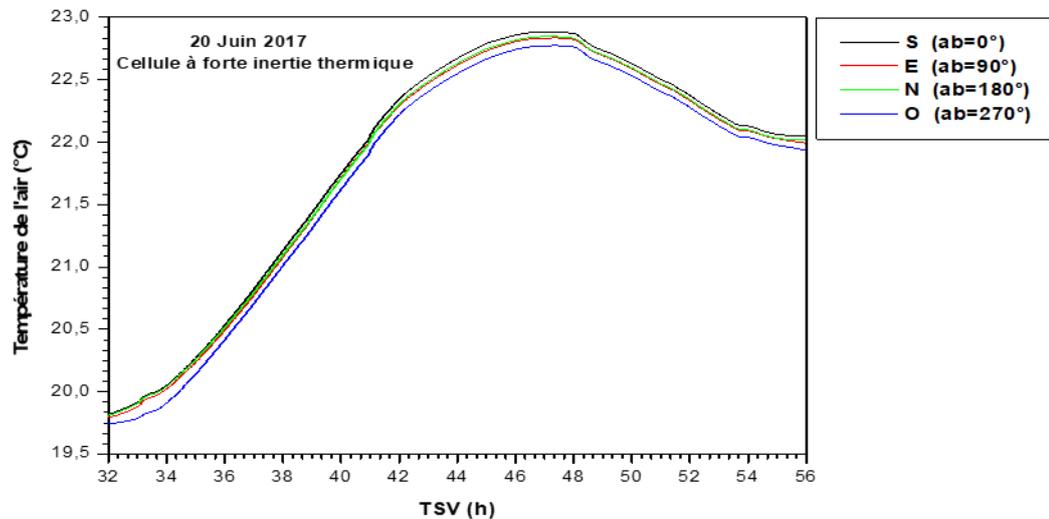
Figure IV.5. Variation temporelle de la température de l'air avec l'orientation du bâtiment (22 Mars 2017)

Pour la journée du 20 Juin, l'observation des courbes de la figure IV.6.a permet de remarquer que pour la cellule à faible inertie thermique, l'orientation vers l'est ou l'ouest conduit aux températures de l'air intérieur les plus élevées. Aussi et afin d'éviter les surchauffes en été, ces deux orientations sont fortement déconseillées, alors que celle vers le nord est à privilégier. Dans le cas de la cellule à forte inertie thermique (cellule passive), l'écart entre les températures de l'air intérieur, relatives aux orientations sud (0°C) et ouest (270°C), n'est que

de 0,12°C (figure IV.6.b), ce qui indique que l'orientation n'a quasiment aucun impact sur la température intérieure.



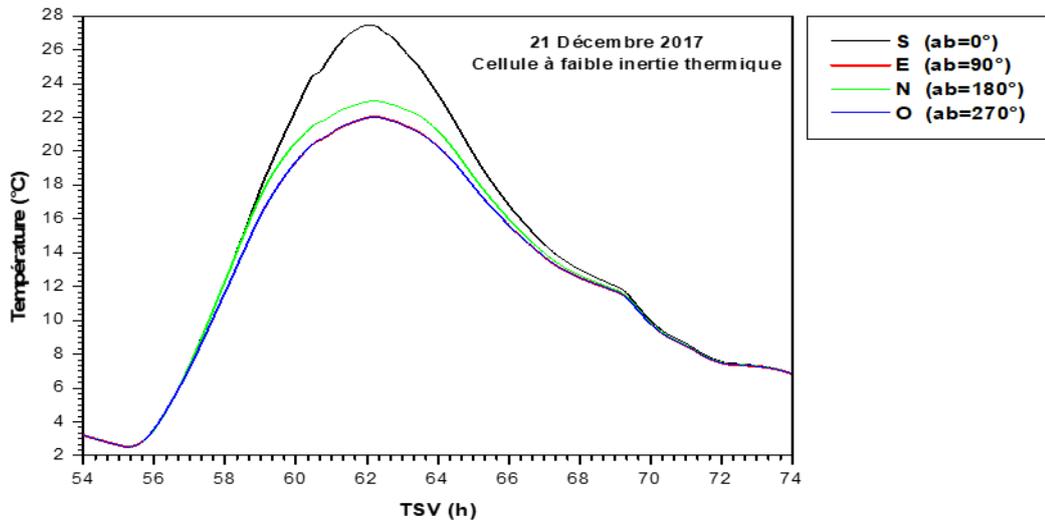
(a)



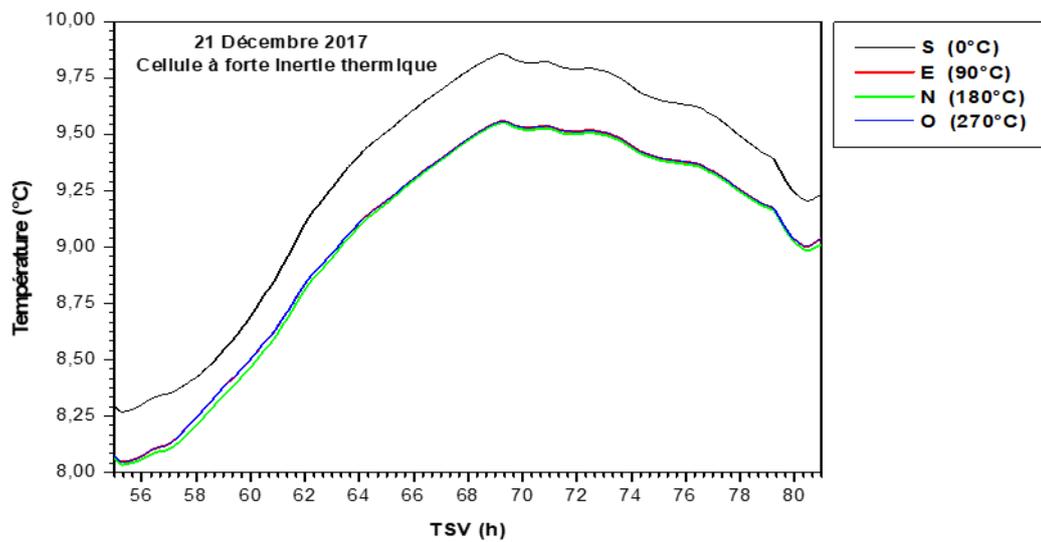
(b)

Figure IV.6. Variation temporelle de la température de l'air avec l'orientation du bâtiment (20 Juin 2017)

Concernant la journée du 21 Décembre 2017, on voit que l'orientation sud (pour les deux cellules) est celle qui conduit aux températures de l'air intérieur les plus élevées (figures IV.7.a et IV.7.b), et donc serait à privilégier. Nous pouvons noter que dans le cas de la cellule passive, les températures de l'air de cette dernière, sont quasiment égales, pour les orientations est, ouest et nord.



(a)



(b)

Figure IV.7. Variation temporelle de la température de l'air avec l'orientation du bâtiment (21 Décembre 2017)

### IV.3. Etude de la tache solaire

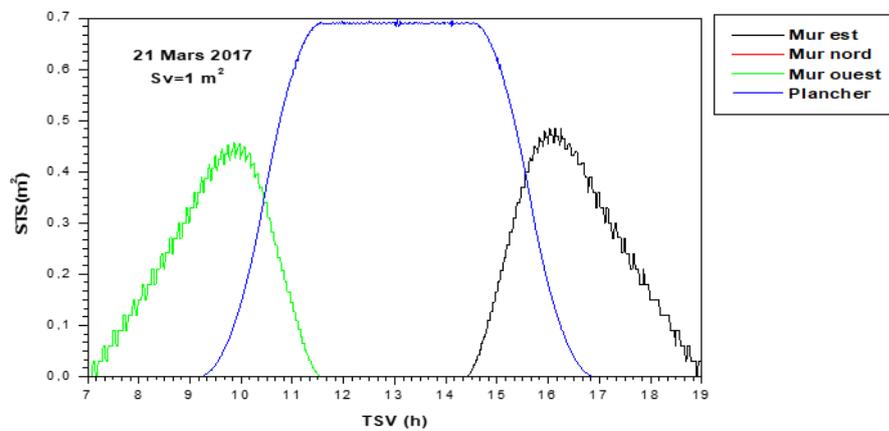
Dans cette partie, une attention particulière sera portée à la tâche solaire et à son impact sur le comportement thermique des deux bâtiments (à faible et à forte, inerties thermiques) considérés.

### IV.3.1. Etude paramétrique

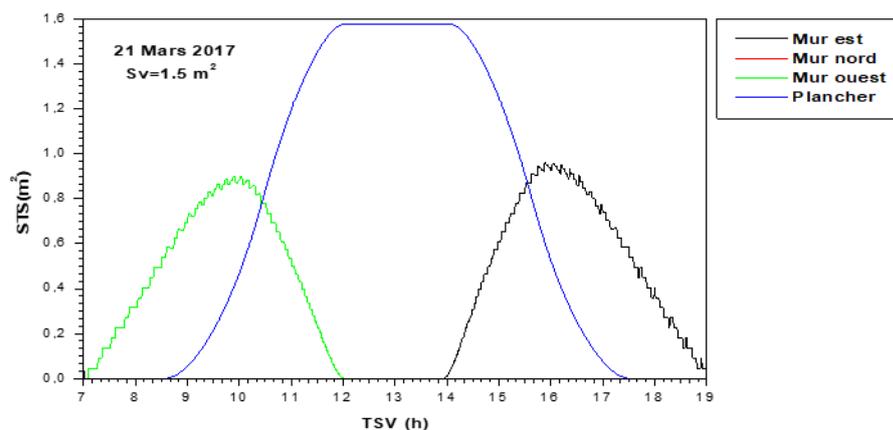
#### - Evolution temporelle de la STS avec les dimensions de la fenêtre

L'évolution temporelle de la surface de la tâche solaire (STS), sur les parois et le plancher pour différentes surfaces vitrées ( $1 \text{ m}^2$ ,  $1.5 \text{ m}^2$  et  $2 \text{ m}^2$ ), pour la journée du 21 des mois de Mars, Juin et Décembre 2017, est examinée.

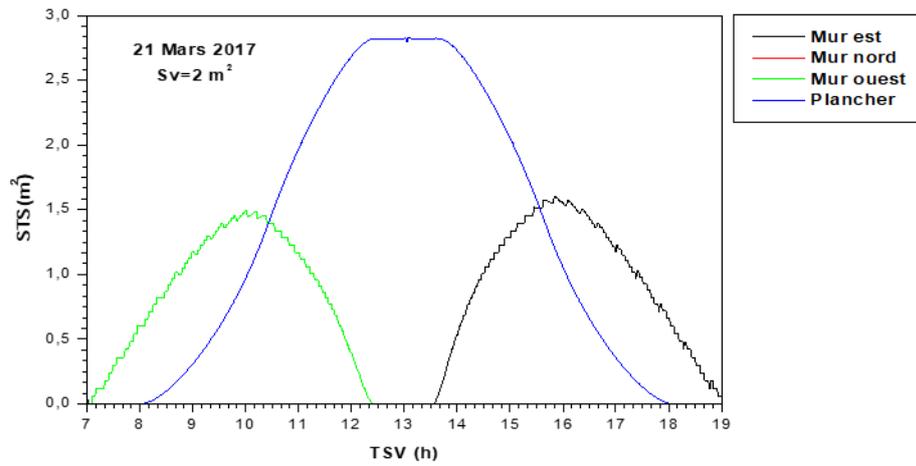
Pour le 21 Mars, l'analyse des courbes de la figure IV.8 permet de noter que les murs ouest, est et le plancher sont respectivement ensoleillés uniquement le matin, l'après-midi et en milieu de la journée. Quant au mur nord, il n'est pas touché par la tache solaire. Nous pouvons également remarquer, d'une part, que la STS est d'autant plus importante que la surface vitrée est plus grande et d'autre part que la STS sur le plancher est largement supérieure à celles sur les autres parties de la cellule et ce pour toutes les vitrées considérées.



(a)



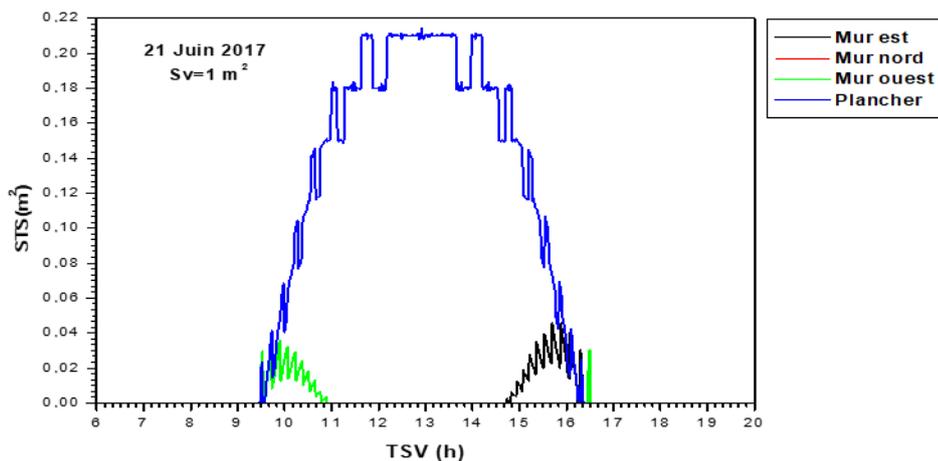
(b)



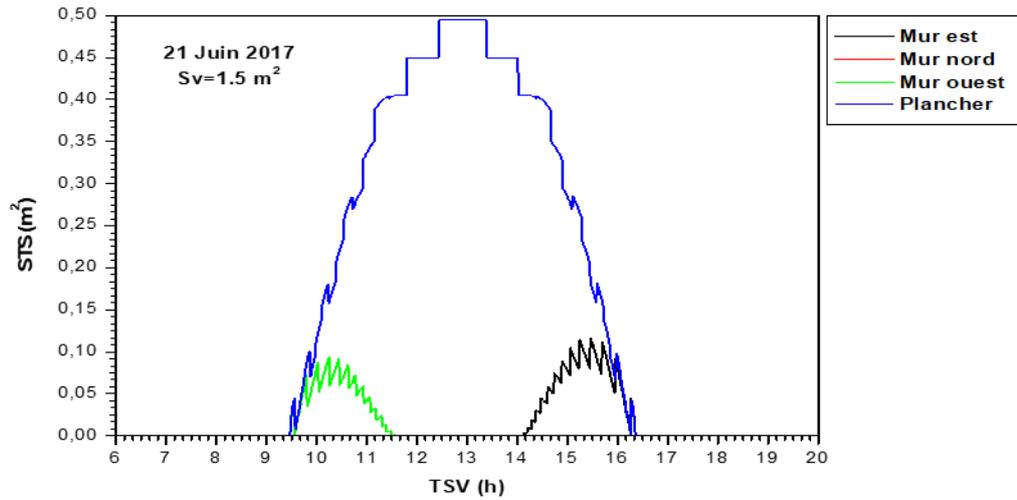
(c)

Figure IV. 8. Evolution temporelle de la STS pour différentes surfaces de la fenêtre (21 mars 2017)

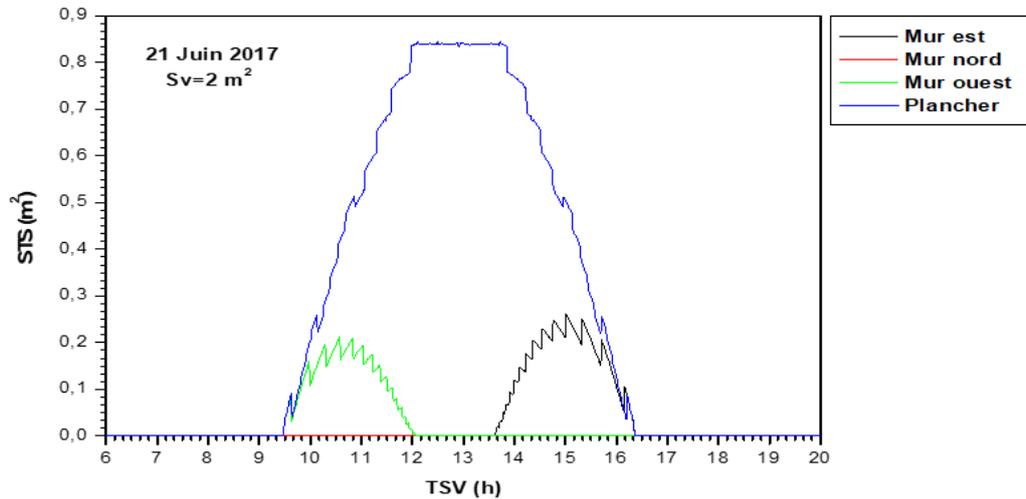
Pour le solstice d’été, la TS n’est visible sur les parois est, ouest et le plancher, qu’entre 9h 50mn et 16h 30mn (figure IV.9). Sa surface augmente significativement avec celle de la vitre. De plus la STS sur le plancher est largement supérieure à celles sur les parois est et ouest. Le mur nord ne reçoit aucun rayonnement solaire. Nous pouvons également noter que la STS pour cette journée est inférieure à celle pour l’équinoxe de printemps (figure IV.8), à cause de la hauteur du soleil qui connaît ses plus grandes valeurs durant l’été.



(a)



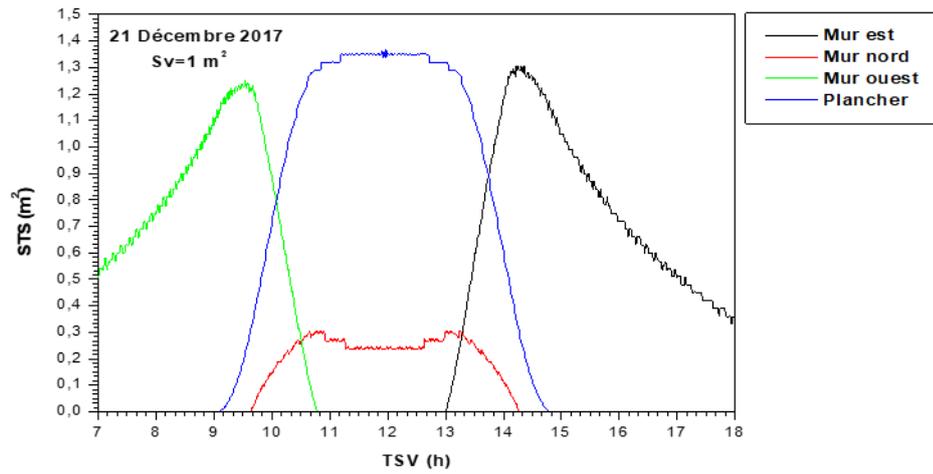
(b)



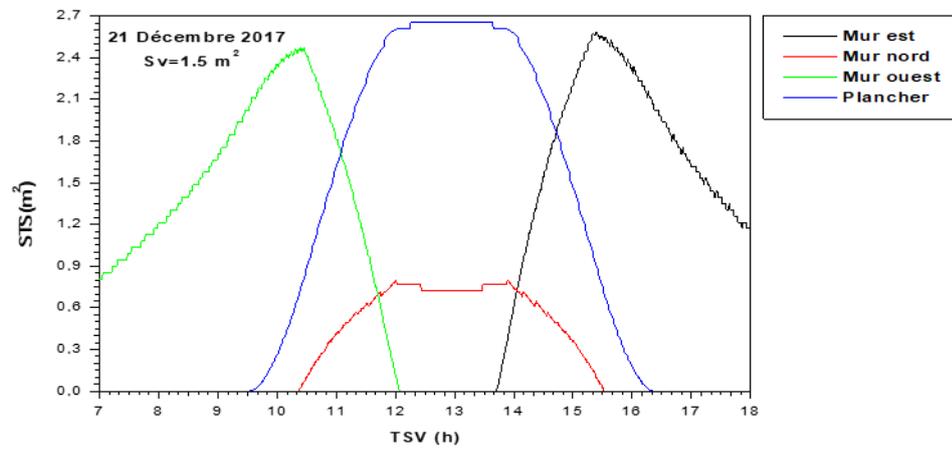
(c)

Figure IV.9. Evolution temporelle de la STS pour différentes surfaces de la fenêtre (21 Juin 2017)

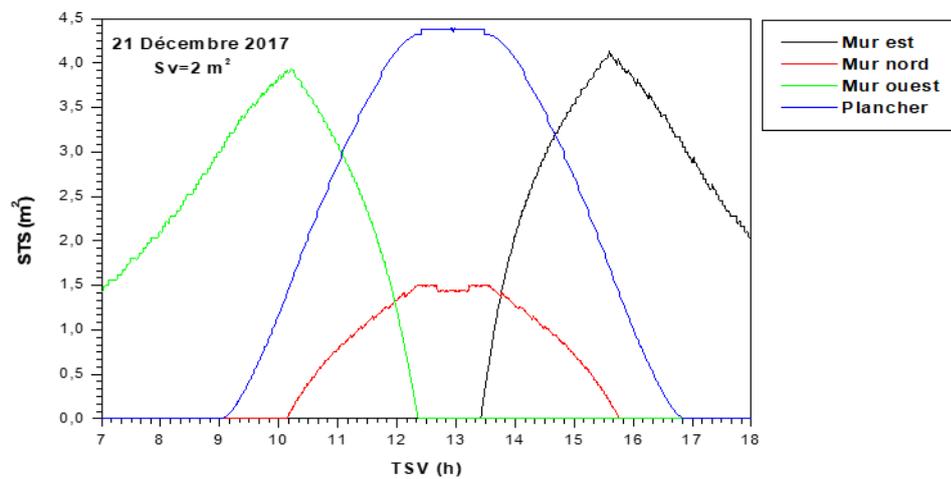
Pour le 21 Décembre (figure IV.10), la tâche solaire est visible sur la paroi ouest uniquement la matinée, sur la paroi est seulement l’après-midi, sur le mur nord, entre 10h et 15h et sur le plancher de 9h à 15h. Dans tous les cas, sa surface augmente avec celle de la vitre. Nous pouvons également remarquer que les STS, sur les parois ouest, est et sur le plancher sont quasiment égales, et nettement supérieures à celle sur le mur nord. La comparaison des figures IV.10, IV.9, IV.8 révèle que la STS est plus grande le 21 Décembre que celles du 21 Mars et du 21 Juin.



(a)



(b)



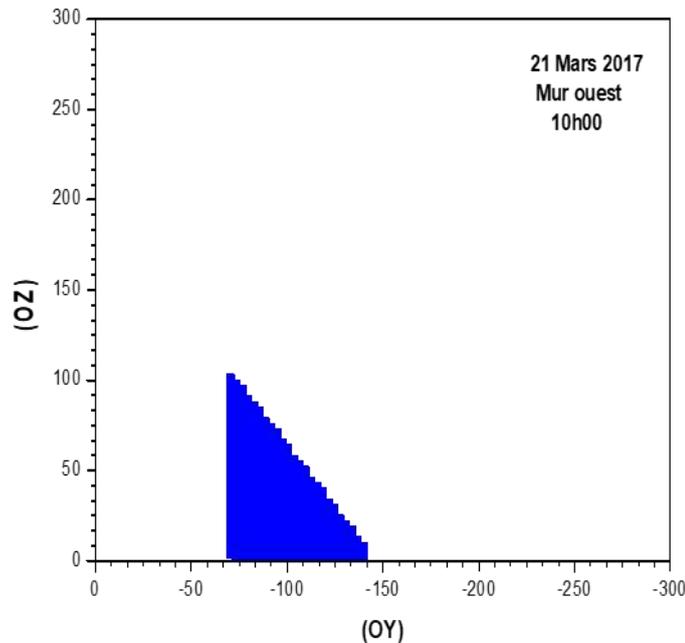
(c)

Figure. IV. 10. Evolution temporelle de la STS pour différentes surfaces de la fenêtre (21 Décembre 2017)

### - Localisation de la STS

Pour affiner l'étude de la tâche solaire, nous examinerons avec précision sa localisation, sa forme et les dimensions de sa surface, sur les parois et plancher de la cellule, pour la journée du 21 des mois de Mars, Juin et Décembre 2017.

Pour le 21 Mars, nous pouvons constater qu'à 10h du matin (figure IV.11.a), la tâche solaire, de très petites dimensions est située à l'extrémité du côté gauche du mur ouest. Elle forme une petite surface trapézoïdale dont la base est située sur l'axe (OY) entre -69 cm et -141 cm, et dont les hauteurs des côtés gauche et droit sont respectivement de 104 cm et de 9.8 cm. A 12h, la tâche solaire, se localise sur le plancher (figure IV.11.b) et forme un parallélogramme dont la base parallèle à l'axe (OX) varie entre 77 cm et 177 cm, et dont les deux autres côtés selon l'axe (OY) sont entre -72 cm et -146 cm. A 15h, la TS, forme sur le mur est une surface triangulaire dont l'angle droit se situe à gauche, sa base est sur l'axe (OY) et varie entre 74.6 cm et 143.6 cm et sa hauteur atteint 97 cm (figure IV.11.c).



(a)

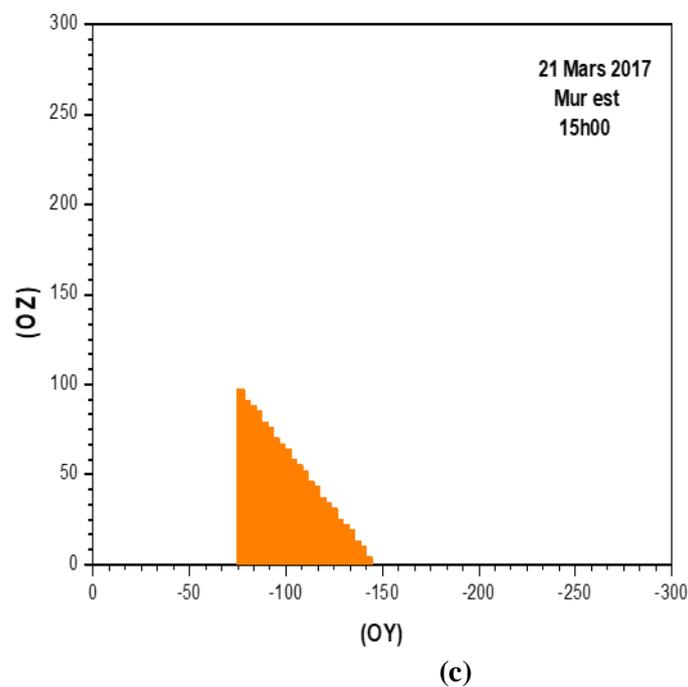
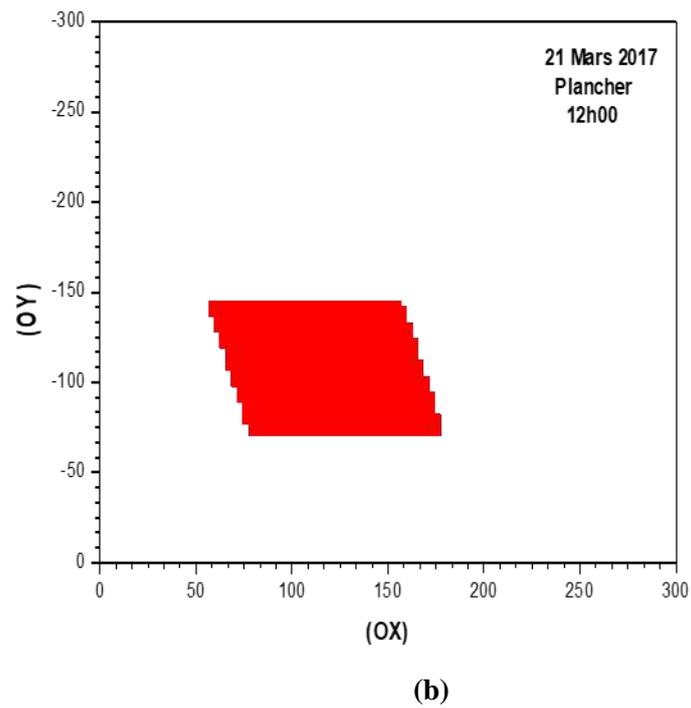


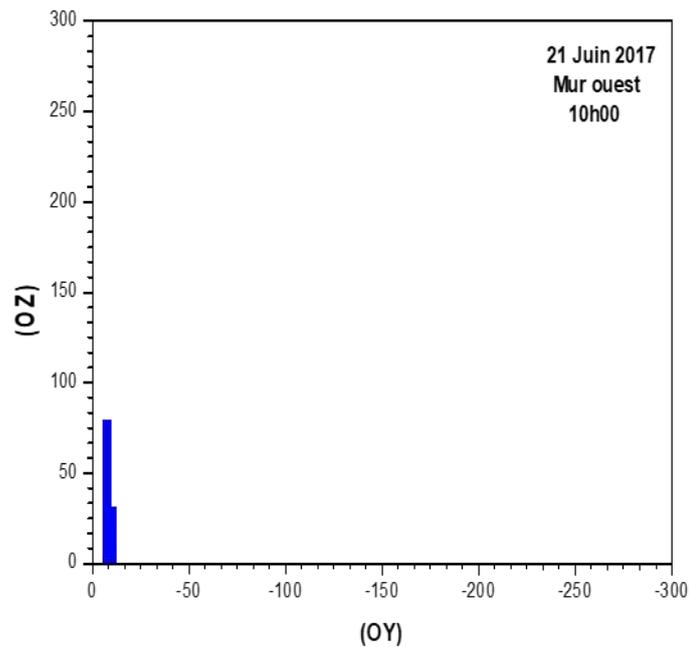
Figure IV.11. Localisation de la TS sur les parois et sur le plancher pour une surface vitrée de 1 m<sup>2</sup> (21 Mars 2017)

Pour le solstice d'été, à 10h (figure IV.12.a), la tâche solaire de petite surface (0,0261 m<sup>2</sup>), se trouve à l'extrémité du côté gauche du mur ouest. A 12h, la TS, dont l'aspect est un

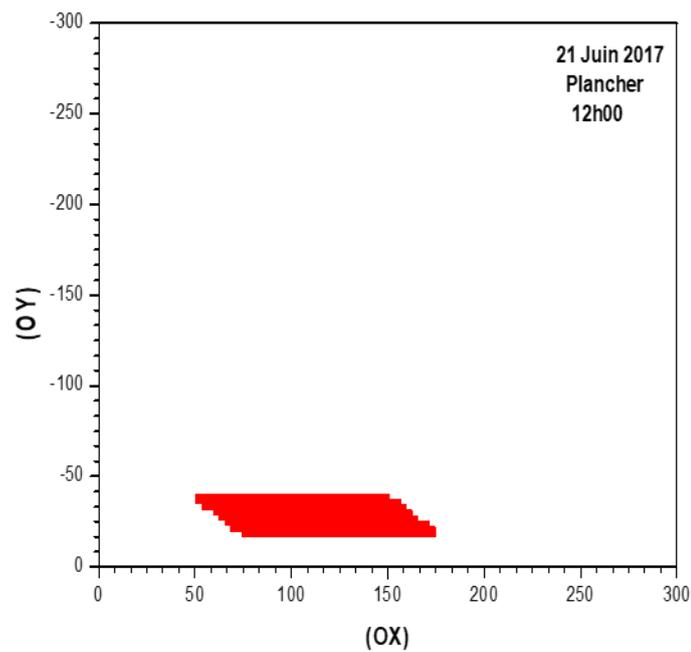
parallélogramme de base entre 75 cm et 174 cm, ses deux autres côtés varient entre -19 cm et -40 cm.

A 15h00 (figure IV.12.c) la TS d'une très petite surface (0,0099 m<sup>2</sup>), est visible sur le bas du côté gauche du mur est.

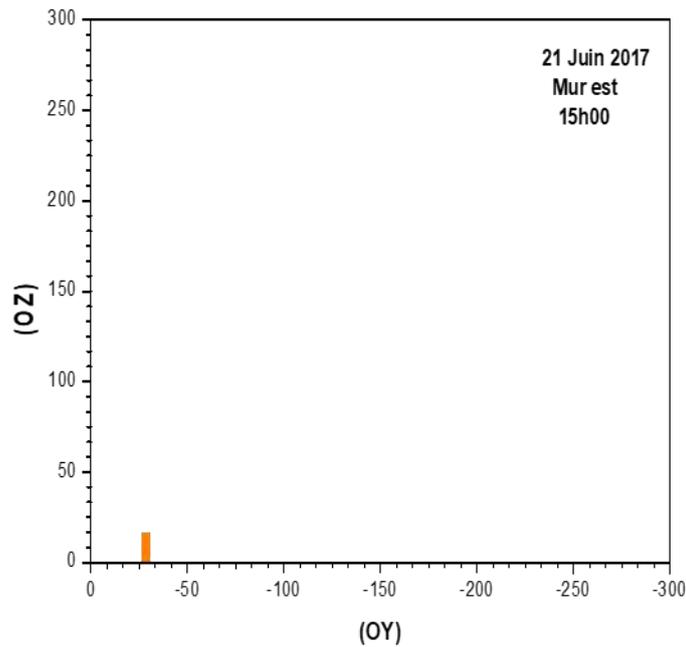
La STS relativement réduite est due à la hauteur du soleil dont les valeurs sont plus importantes durant l'été.



(a)



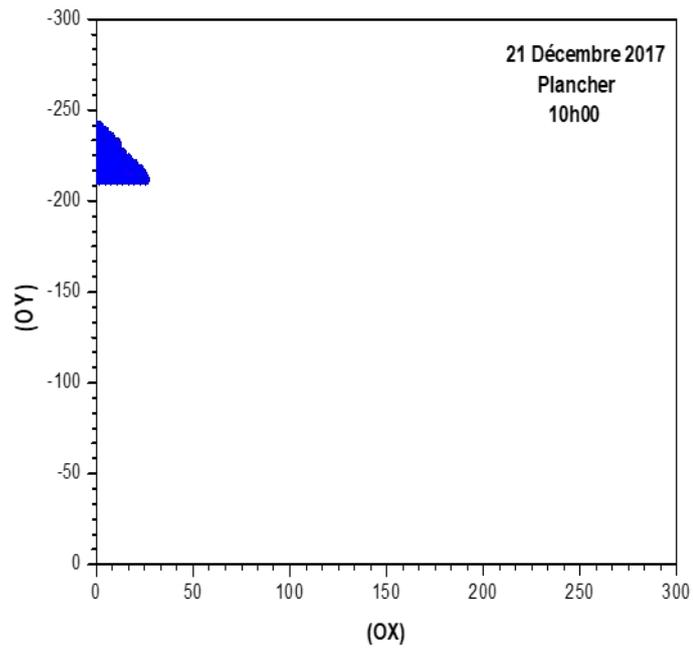
(b)



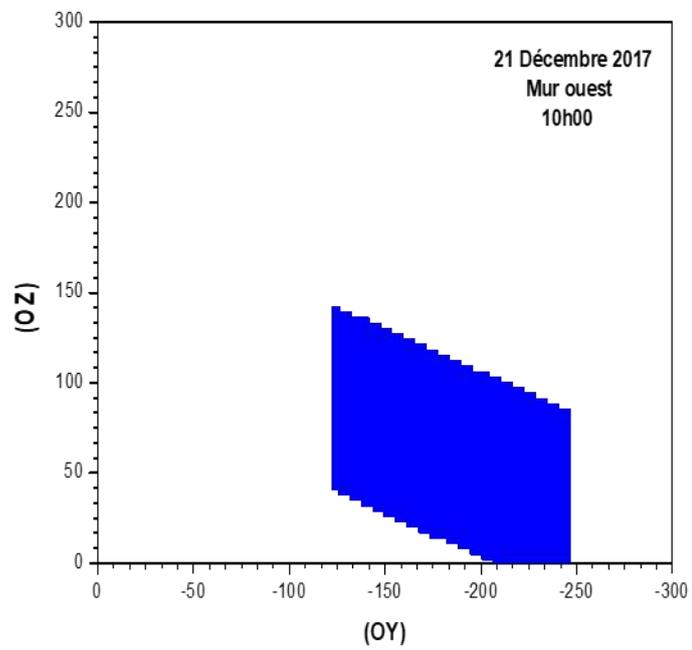
(c)

**Figure IV.12. Localisation de la TS sur les parois et sur le plancher pour une surface vitrée de 1 m<sup>2</sup> (21 Juin 2017)**

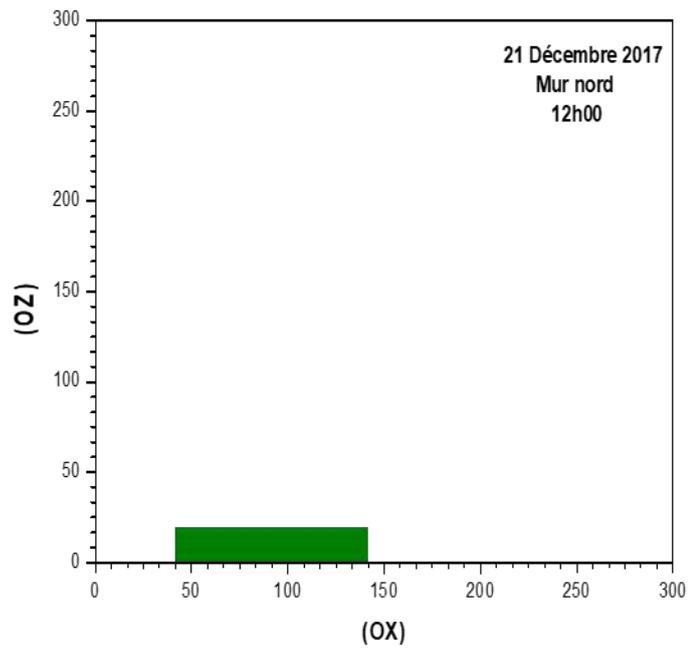
Pour le 21 Décembre, l'examen des différentes illustrations de la TS représentées sur la figure IV.13, permet de noter qu'à 10h00, la TS apparaît simultanément sur le mur ouest et sur le plancher. Elle forme sur le mur un parallélogramme dont le côté droit se situe sur le plancher, sous l'aspect d'une surface triangulaire (figure IV.13.b). A 12h00, la TS est visible en même temps sur le mur nord (surface rectangulaire) ((figure IV.13.c) et sur le plancher sur lequel elle forme un parallélogramme (figure IV.13.d). A 15h00, la TS forme sur le mur est un parallélogramme dont le coté bas gauche se trouve sur le plancher sous l'aspect d'une surface triangulaire (figures IV.13.e et IV.13.f).



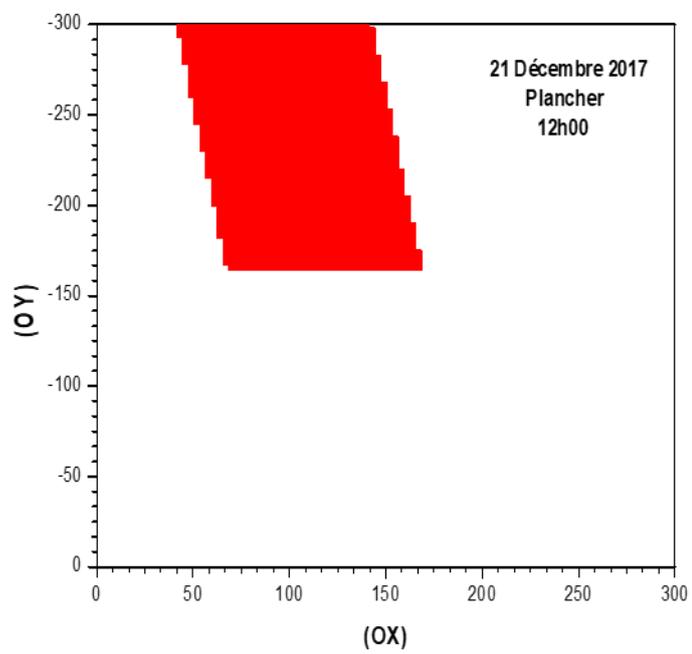
(a)



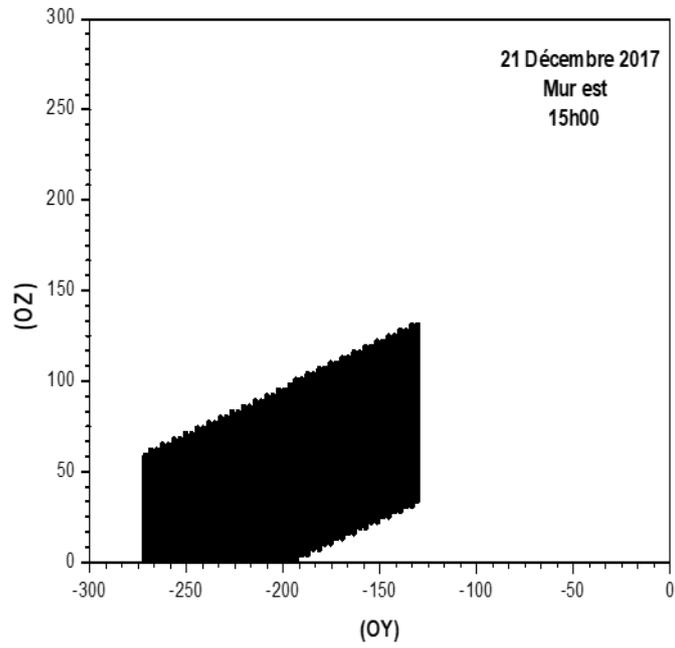
(b)



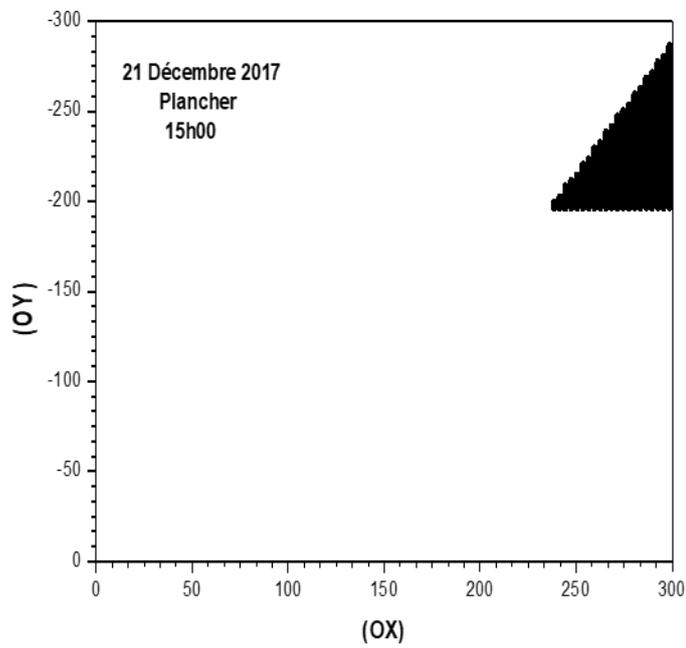
(c)



(d)



(e)



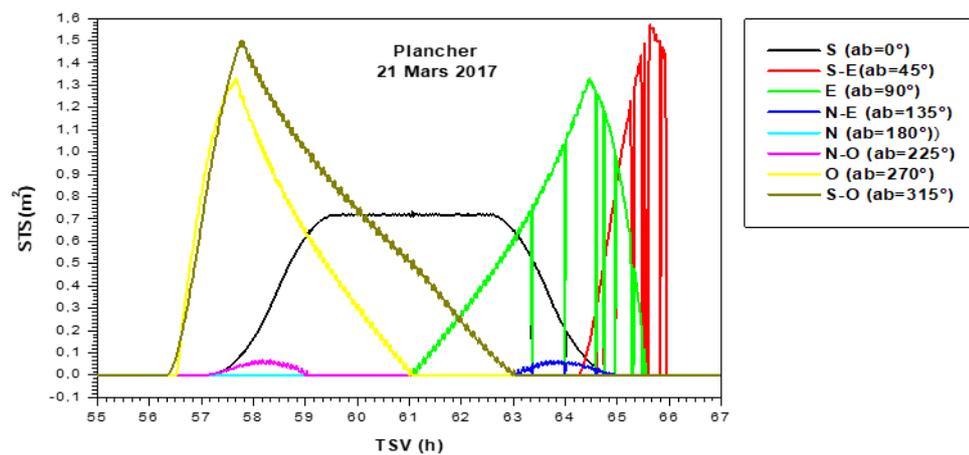
(f)

Figure IV.13. Localisation de la TS sur les parois et sur le plancher pour une surface vitrée de 1 m<sup>2</sup> (21 Décembre 2017)

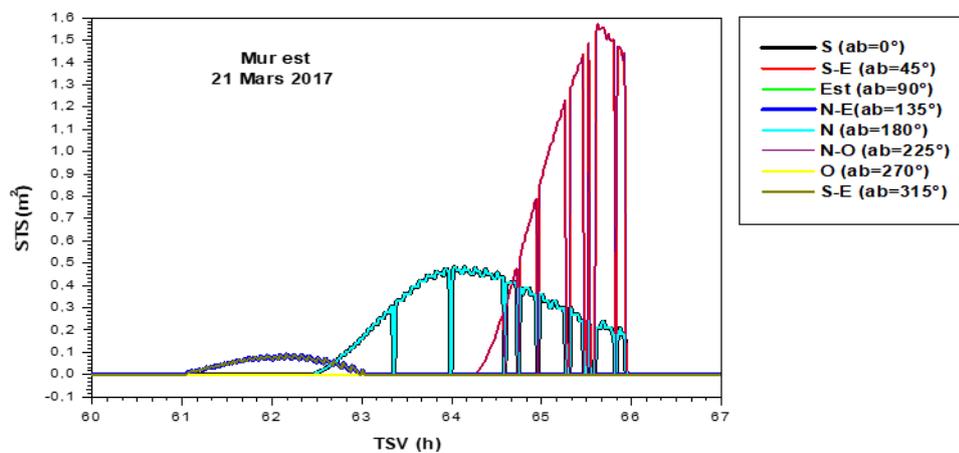
- Evolution de la surface de la tache solaire en fonction de l'orientation de la fenêtre

L'effet de l'orientation de la surface vitrée sur la STS, est étudié pour la journée du 21 des mois de Mars, Juin et Décembre de l'année 2017.

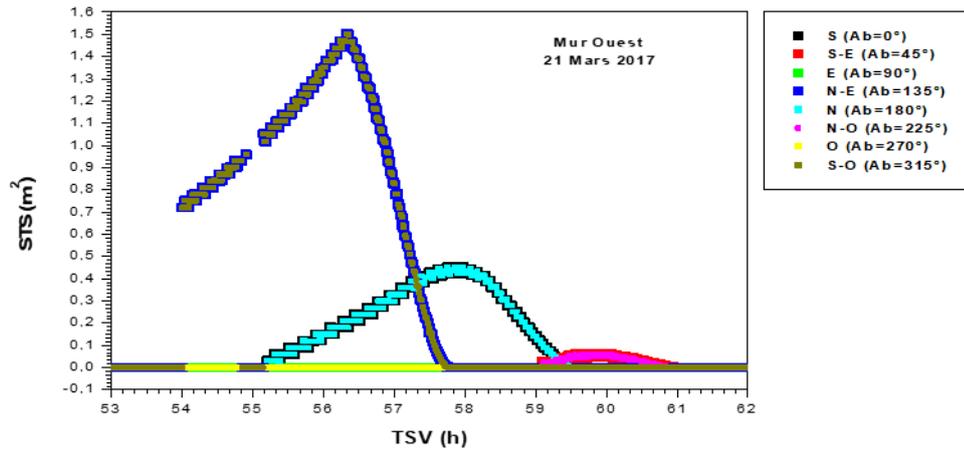
Pour l'équinoxe de printemps, nous pouvons remarquer sur la figure IV.14.a que les orientations de la fenêtre vers les, sud, sud-est, est, ouest et sud-ouest conduisent aux plus grandes valeurs de la STS, sur le plancher, alors que celles vers les nord-ouest et nord-est ne créent sur celui-ci que des TS de petites surfaces. Nous noterons également l'absence de TS sur le plancher pour l'orientation nord. Il apparait également que les plus grandes STS, sur les murs est (figure IV.14.b) et ouest (figure IV.14.c), correspondent respectivement aux orientations sud-est et nord-ouest et aux orientations nord-est et sud-ouest. Par ailleurs, l'examen de la figure IV.14.d révèle d'une part l'absence de TS sur le mur nord pour les orientations sud et nord de la surface vitrée et d'autre part que la TS se forme sur le mur nord, la matinée, pour les orientations nord-est ou sud-ouest de la fenêtre et l'après-midi si cette dernière est orientée vers le sud-est ou le nord-ouest. Pour toutes les orientations susmentionnées, la valeur de STS formée est de 0.36 m<sup>2</sup>.



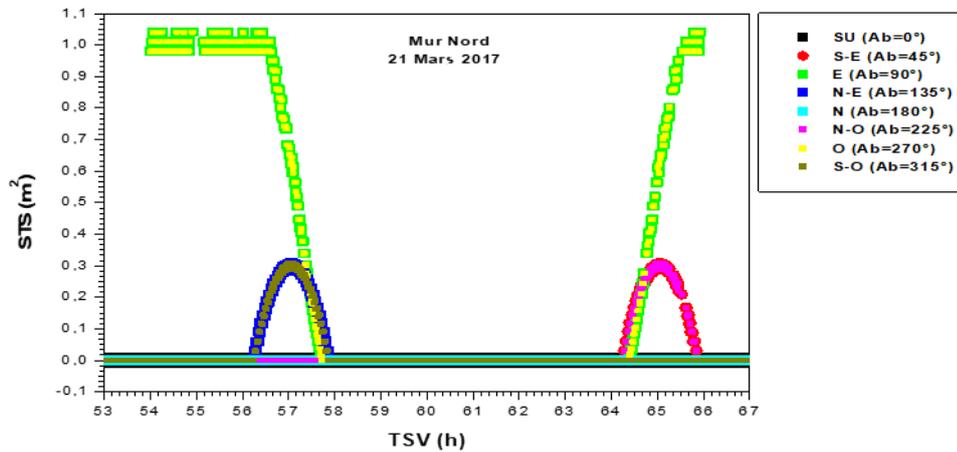
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure. IV. 14. Evolution temporelle de la STS en fonction de l'orientation du bâtiment (21 Mars 2017)

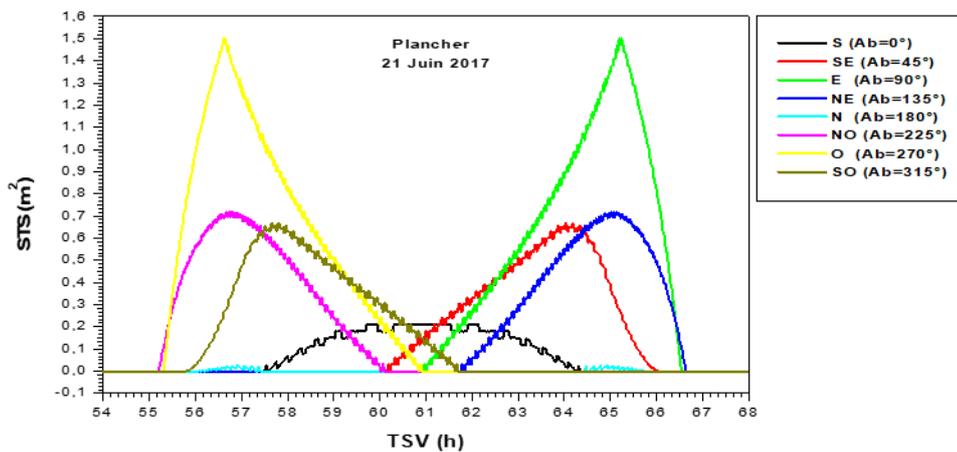
Pour le solstice d'été, l'observation des différentes courbes de la figure IV.15 permet de remarquer que la STS est étroitement liée à l'orientation de la fenêtre.

Concernant la TS sur le plancher (figure IV.15.a), il apparait clairement que les orientations de la fenêtre vers l'ouest ou vers l'est conduisent aux plus grandes surfaces qui peuvent atteindre jusqu'à 1,5m<sup>2</sup>, le matin pour la première et l'après -midi pour la seconde. Les STS correspondantes aux orientations sud-est, sud-ouest, nord-est et nord-ouest, sont quasiment du même ordre de grandeur. Quant' à l'orientation vers le sud, elle permet la création d'une TS d'une surface maximale de 0.21 m<sup>2</sup> qui réside sur le plancher durant la matinée et l'après-midi. Pour l'orientation de la fenêtre vers le nord, deux STS sont observées sur le plancher.

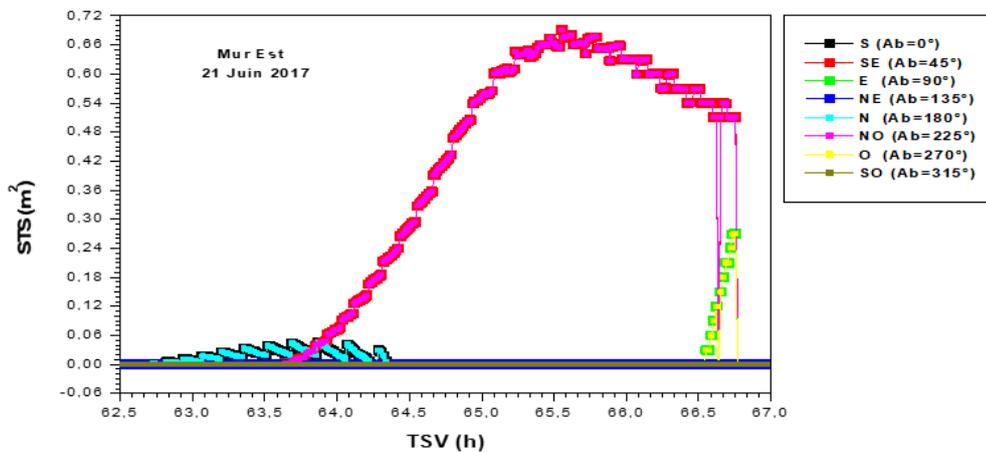
Pour le mur est (figure IV.15.b), il s'avère que les orientations est/ouest, sud/nord et sud-est/nord-ouest de la fenêtre, entraînent la constitution de TS de surfaces égales et dont la valeur maximale est de 0.67 m<sup>2</sup>, alors que les orientations vers le nord-est ou le sud-ouest, ne créent aucune TS, sur ce mur.

Pour le mur ouest, la figure IV.15.c révèle que les orientations sud-nord, est-ouest et nord-est/sud-ouest de la fenêtre conduisent à la formation de TS, de mêmes surfaces, alors que orientations sud-est et nord-ouest de celle-ci, ne créent aucune tâche sur ce mur.

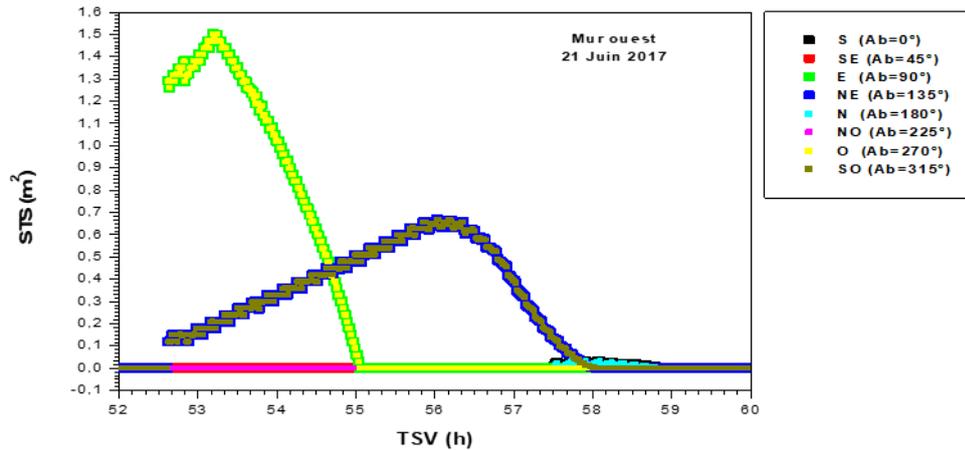
Pour le mur nord, il apparait qu'il est touché par le rayonnement solaire une fois le matin et la seconde l'après-midi si la fenêtre est orientée vers l'est ou l'ouest (figure IV.15.d). Quant 'aux orientations sud-est/nord-ouest et nord-est/ sud-ouest une TS est créée le matin et l'après-midi respectivement. Nous pouvons noter l'absence totale de la TS, pour les orientations vers le sud ou le nord.



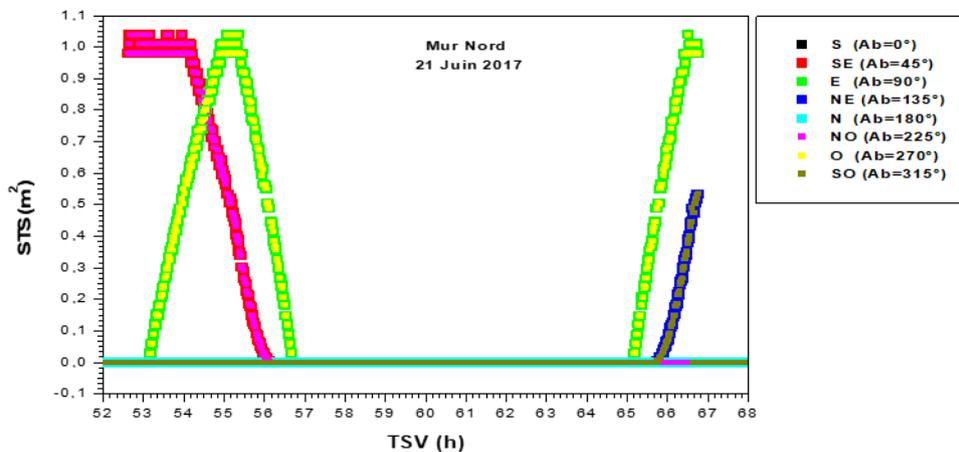
(a)



(b)



(c)



(d)

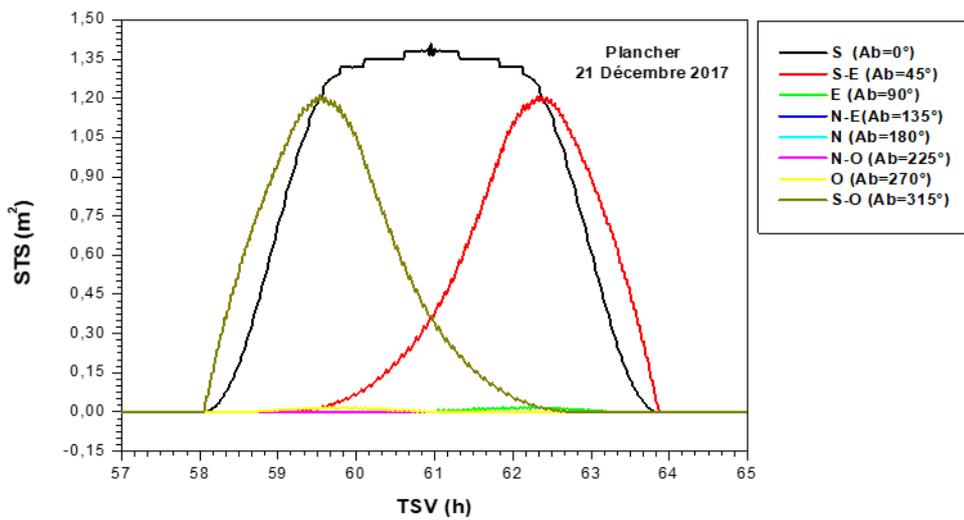
Figure. IV.15. Evolution temporelle de la STS en fonction de l’orientation du bâtiment (21 Juin 2017)

Pour le solstice d’hiver, l’effet de l’orientation de la fenêtre sur la STS sur le plancher et sur les parois de la cellule étudiée est mis en évidence par les différentes courbes de la figure IV.16. Il est aisé de remarquer sur la figure IV.16.a, relative au plancher, que les orientations vers le sud, le sud-ouest ou le sud-est entraînent la formation de STS importantes, aussi bien le matin que l’après –midi, sur celui-ci. Par contre, les STS formées sur le plancher si les orientations de la fenêtre auraient été vers l’est ou l’ouest sont quasiment nulles. Nous pouvons noter l’absence totale de la TS, pour les orientations vers le nord-est, le nord ou le nord-ouest.

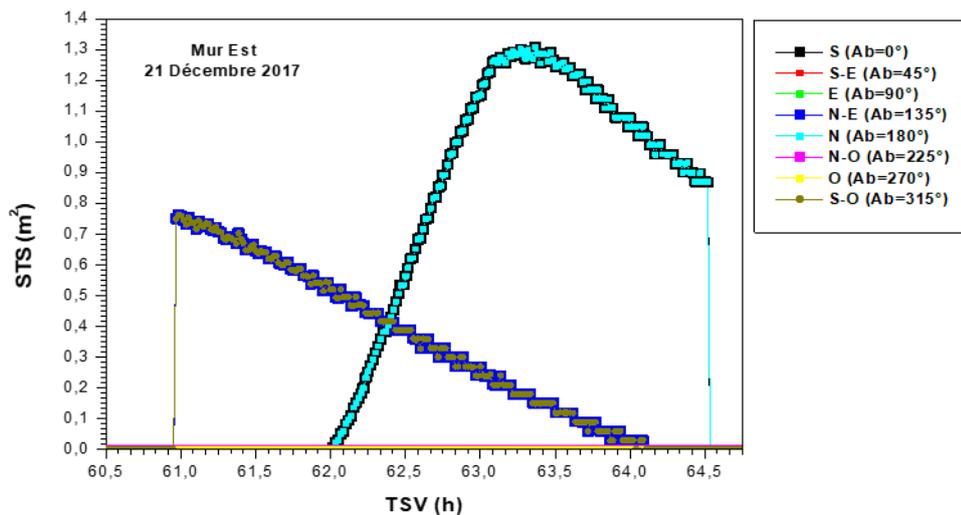
Concernant la formation de la TS sur les murs est et ouest, les figures IV.16.b et IV.16.c, révèlent que les plus grandes STS sont obtenues pour les orientations de la fenêtre vers le sud ou le nord. Les STS formées sur ces murs sont également très importantes si la surface vitrée

est orientée vers le nord-est ou le sud-ouest. Une STS de 0.99 m<sup>2</sup> apparaîtrait le matin sur le mur ouest, si une de ces deux dernières orientations était choisie.

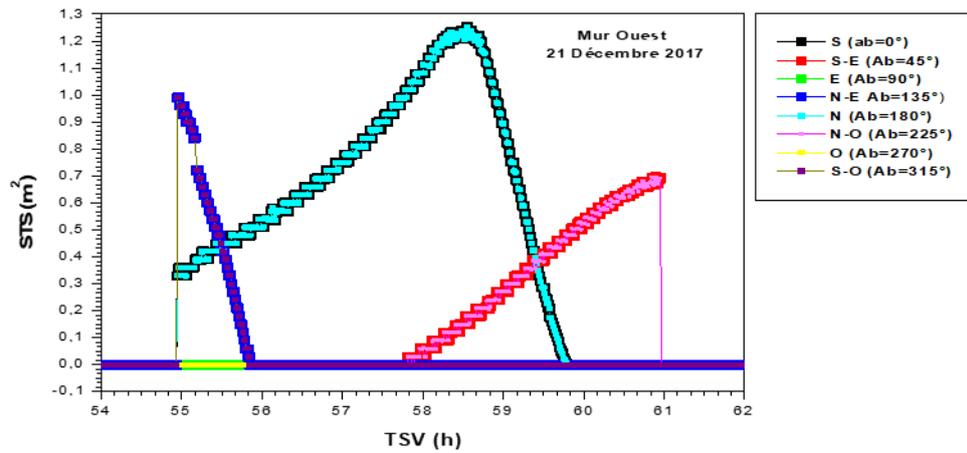
Les orientations est et ouest sont à proscrire en hiver du fait qu'elles ne créent aucune TS sur ces parois. Pour le mur nord (figure IV.16.d), les orientations de la surface vitrée vers le nord-est ou le sud-ouest, engendrent le matin une TS de même surface sur celui-ci, alors que les orientations sud-est et nord-ouest créent quant 'à elles une TS de même surface sur ce mur l'après-midi. Nous pourrions également noter que si la fenêtre est orientée vers l'est ou l'ouest, la STS sur le mur nord, est de 1m<sup>2</sup> le matin.



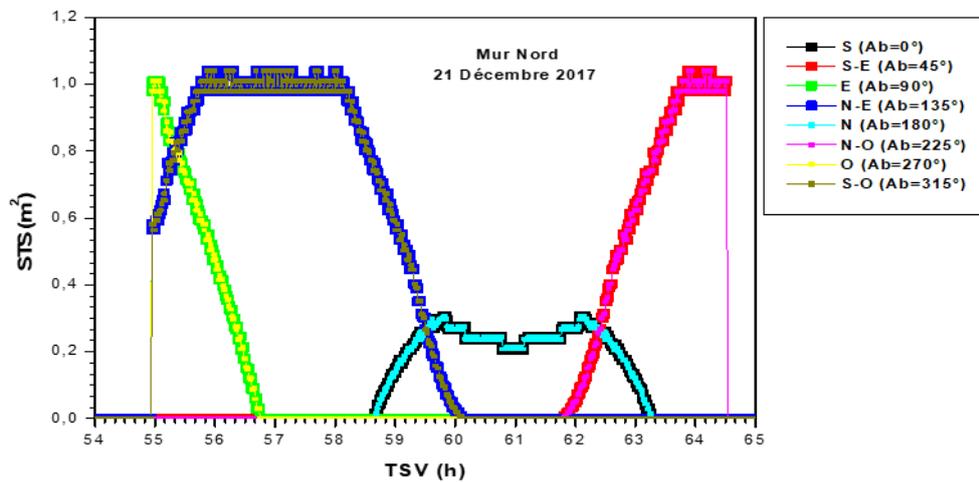
(a)



(b)



(c)



(d)

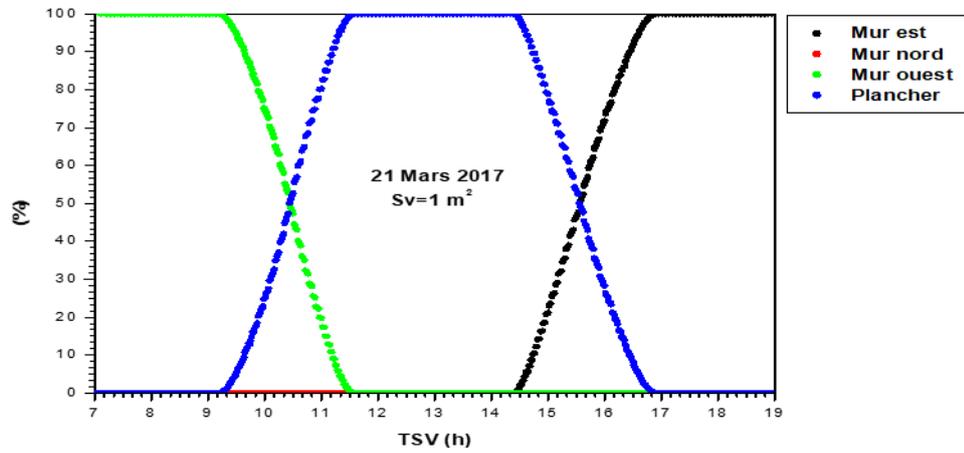
Figure. IV.16. Evolution temporelle de la STS en fonction de l'orientation du bâtiment (21 décembre 2017)

**- Variation temporelle du pourcentage de distribution de la STS sur les parois et sur le plancher**

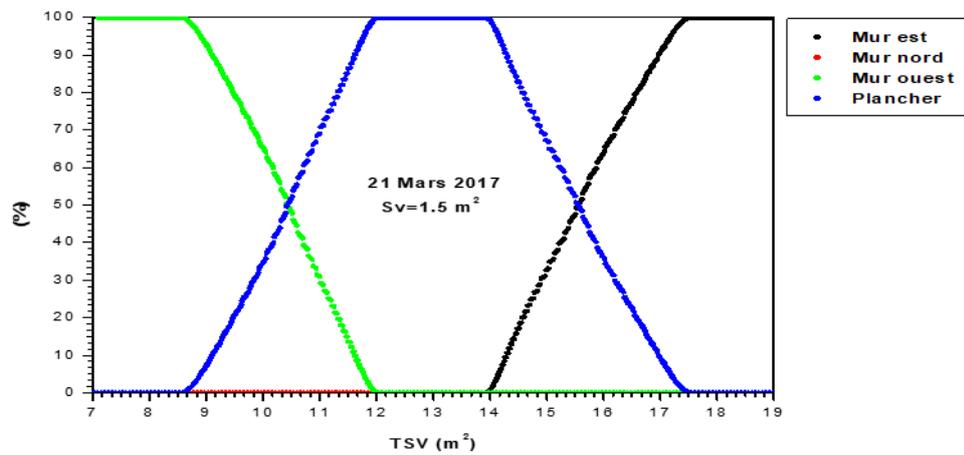
La distribution de la STS sur les parois et le plancher de la pièce, pour l'équinoxe de printemps et les solstices d'été et d'hiver est examinée dans cette partie.

Pour le solstice de printemps, l'observation des courbes de la figure IV.17, permet de constater que pour des surfaces de la fenêtre de 1m<sup>2</sup> (figure IV.17.a), de 1,5m<sup>2</sup> (figure IV.17.b) et de 2m<sup>2</sup>(figure IV.17.c), la TS peut en fonction du moment de la journée se placer en totalité sur une paroi donnée. En effet, le matin, tout le flux de courte longueur d'onde (CLO) qui pénètre à travers la fenêtre irradie tout le mur ouest, puis la STS formée diminue peu à peu et se déplace progressivement sur le plancher où elle se situera en totalité, puis elle se déplacera

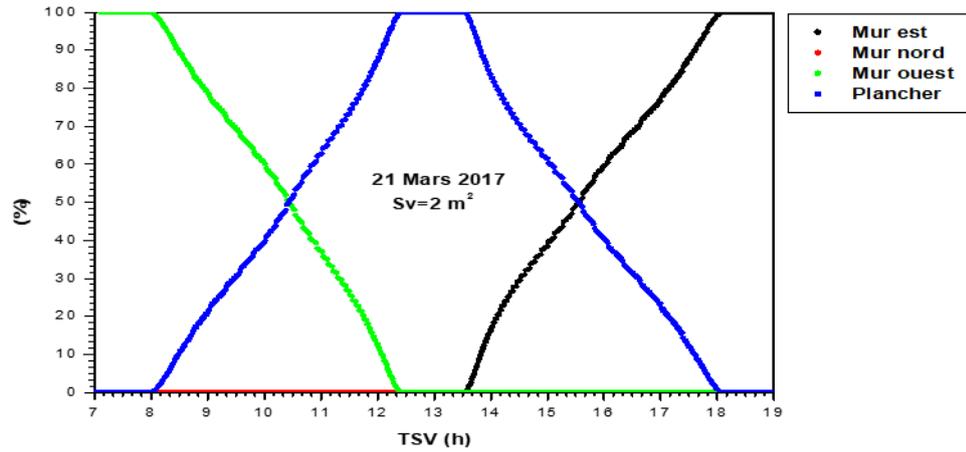
de nouveau graduellement à partir de l'après-midi sur le mur est qu'elle occupera totalement. Nous pouvons également remarquer que le temps de séjour de la TS sur la paroi qui reçoit tout le rayonnement solaire incident diminue quand les dimensions de la fenêtre sont augmentées.



(a)



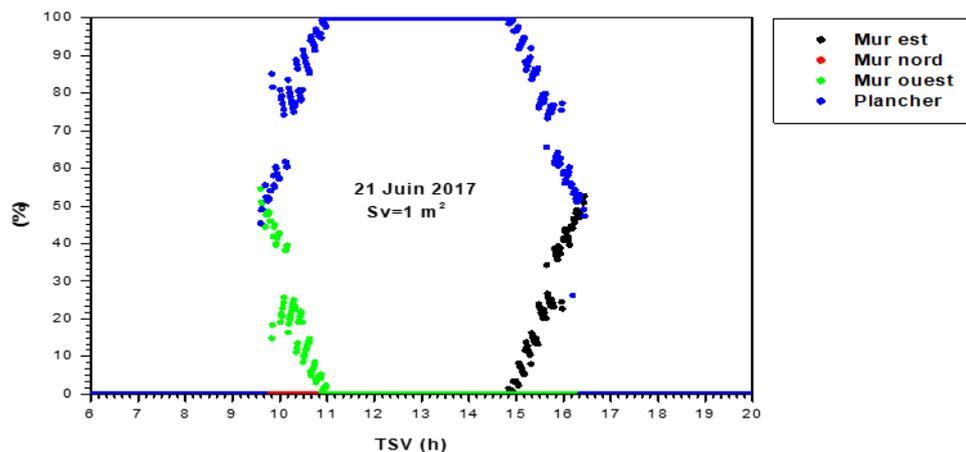
(b)



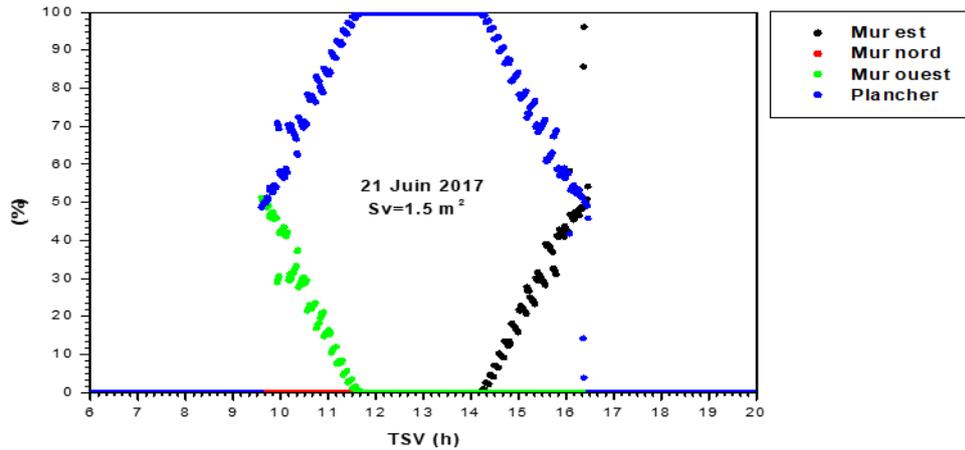
(c)

Figure IV.17. Evolution temporelle du pourcentage de distribution de la TS sur les parois et sur le plancher avec la surface de la fenêtre (21 mars 2017)

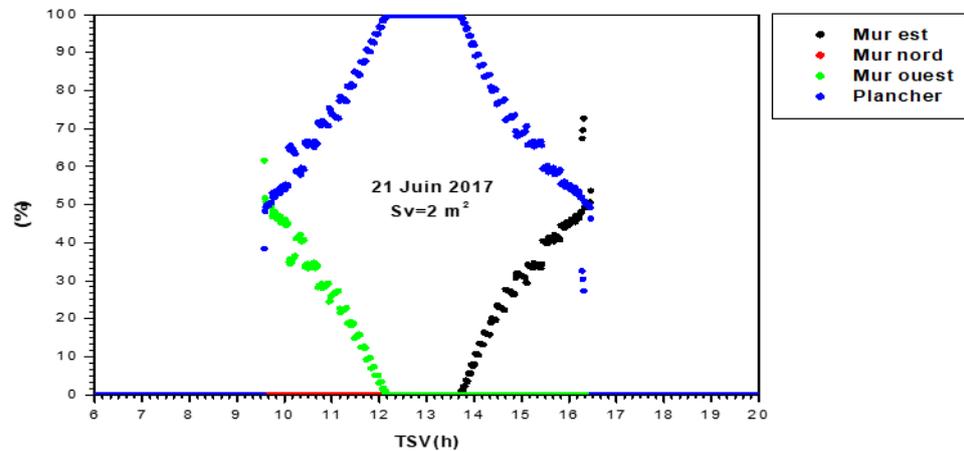
Pour le solstice d'été, nous remarquons sur la figure IV.18 que seul le plancher reçoit la totalité du rayonnement CLO incident, tandis que les murs est et ouest n'en reçoivent approximativement que 50% et ce pour toutes les surfaces de vitre considérées ( $1 \text{ m}^2$ ,  $1.5 \text{ m}^2$  et  $2 \text{ m}^2$  représentées respectivement par les figures IV.18.a, IV.18.b et IV.18.c). Il apparait également que la durée de temps pour laquelle le plancher reçoit 100% du rayonnement incident diminue avec l'augmentation des dimensions de la vitre.



(a)



(b)

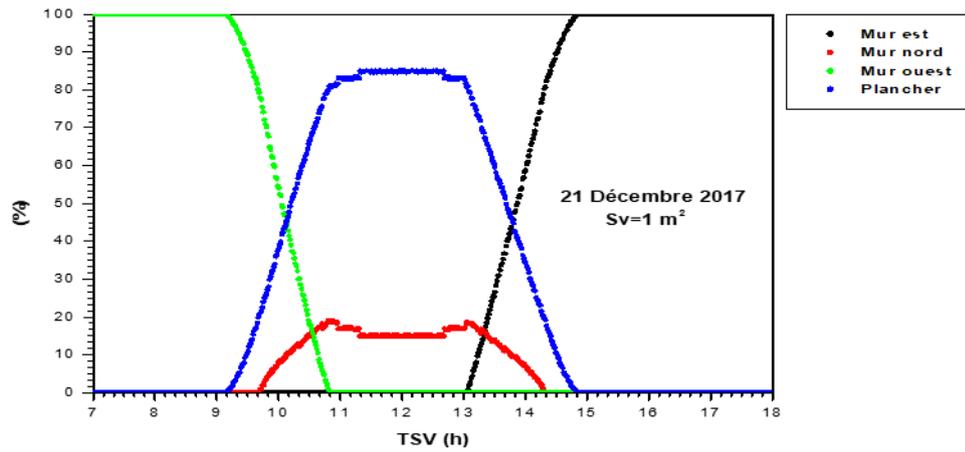


(c)

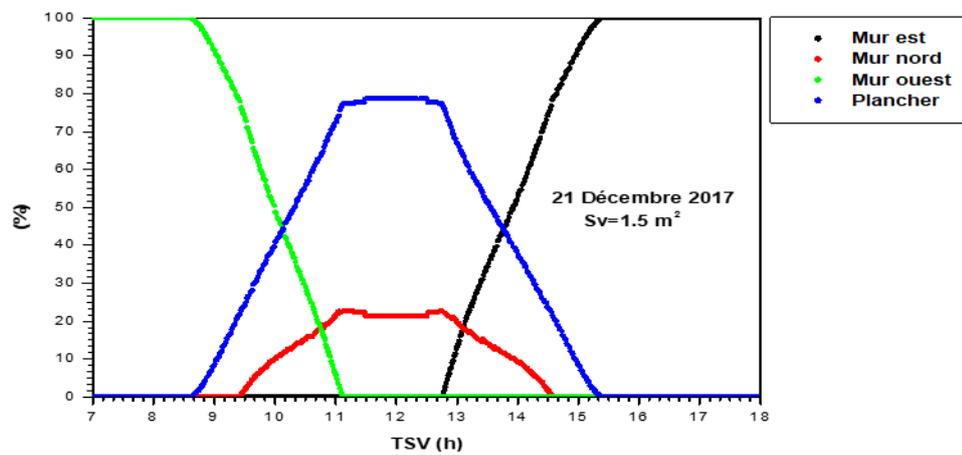
**Figure IV. 18. Evolution temporelle du pourcentage de distribution de la TS sur les parois et sur le plancher avec surface de la fenêtre (21 juin 2017)**

L'examen des courbes de la figure IV.19 révèle que pour la journée du 21 décembre 2017, seuls les murs est et ouest reçoivent la totalité du rayonnement incident, le premier la matinée et le second l'après-midi. Le plancher et le mur nord reçoivent quant à eux le rayonnement incident simultanément durant l'avant et l'après-midi.

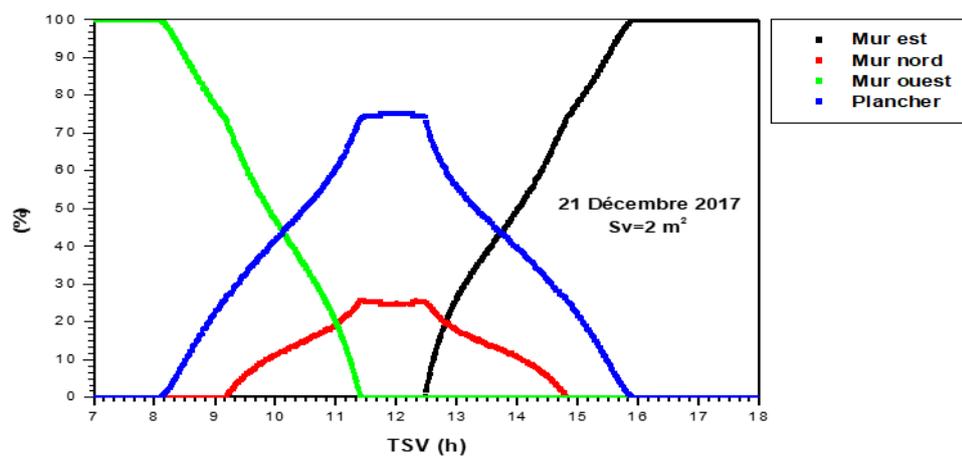
L'analyse des figures IV.19.a, IV.19.b et IV.19.c permet de déduire qu'en augmentant la surface vitrée, le pourcentage de distribution de la TS sur le mur nord croit alors que celui de la TS sur le plancher diminue.



(a)



(b)



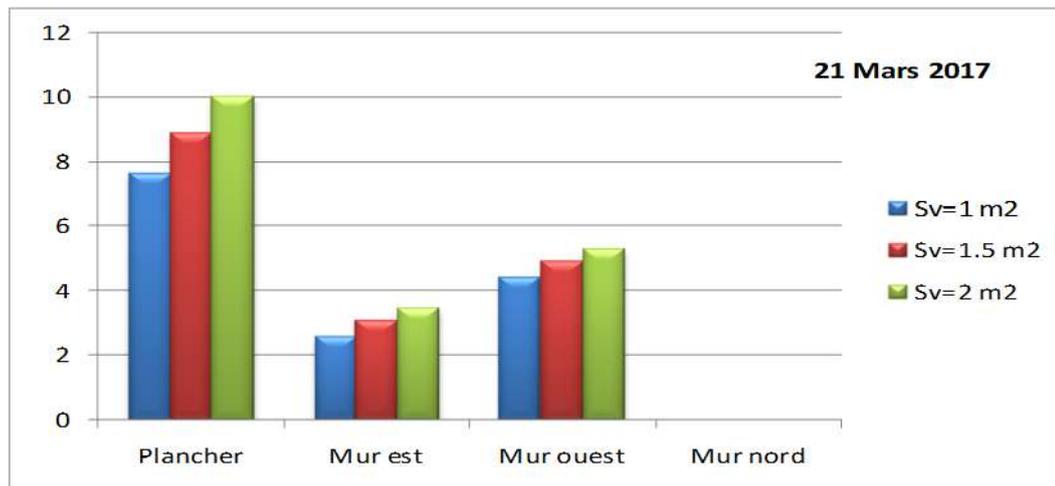
(c)

Figure IV.19. Evolution temporelle du pourcentage de distribution de la TS sur les parois et sur le plancher avec les dimensions de la fenêtre (21 décembre 2017)

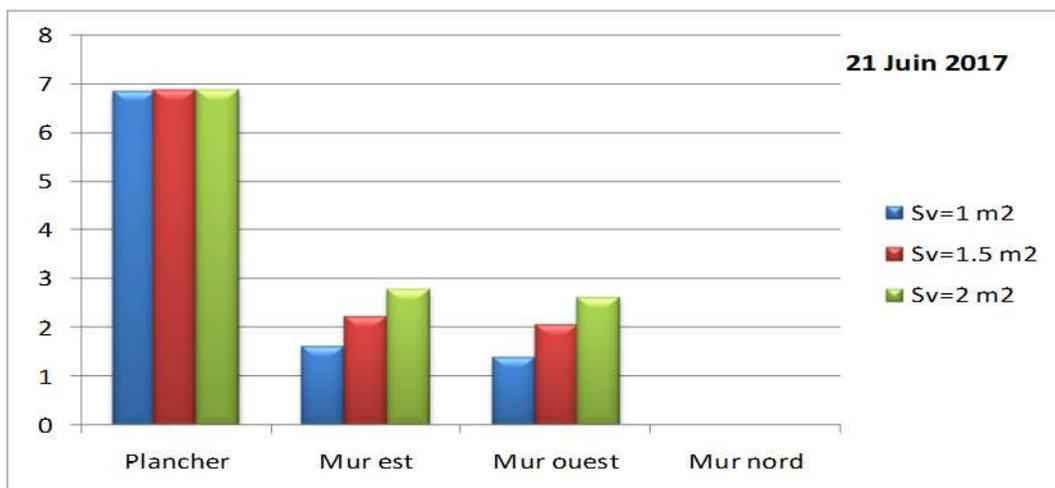
- Temps de séjour de la TS sur les parois et sur le plancher

L'effet des dimensions de la vitre sur le temps de séjour de la TS sur chacune des parois et sur le plancher, pour la journée du 21, des mois de Mars, Juin et Décembre 2017 est mis en évidence par les histogrammes représentés sur la figure IV.20. Pour le 21 mars 2017 (figure IV.20.a), nous remarquons que le temps de séjour de la TS sur le plancher et sur les parois croît avec l'augmentation des dimensions de la fenêtre. Néanmoins, son accroissement est plus significatif pour le plancher, puis qu'en doublant la vitre de 1 m<sup>2</sup> à 2 m<sup>2</sup> il passe de 7.64 h à 10.03 h.

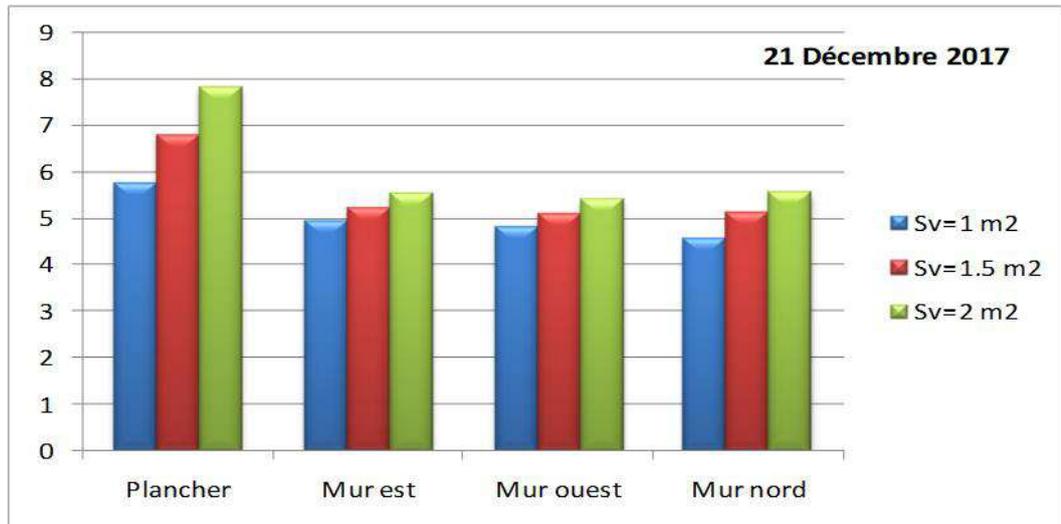
Pour la journée du 21 Juin, le temps de séjour de la TS sur le plancher reste le même pour toutes les surfaces de la fenêtre considérées, alors que ceux de la TS sur les murs est et ouest augmentent avec les dimensions de celle-ci (figure IV.20.b). Concernant le 21 du mois de Décembre (figure IV.20.c), il apparait clairement que le temps de séjour de la TS augmente avec la surface de la vitre, sur toutes les parois et notamment sur le plancher pour lequel une augmentation de près de 2h est observée quand la surface de vitrage augmente de 1 à 2 m<sup>2</sup>.



(a)



(b)

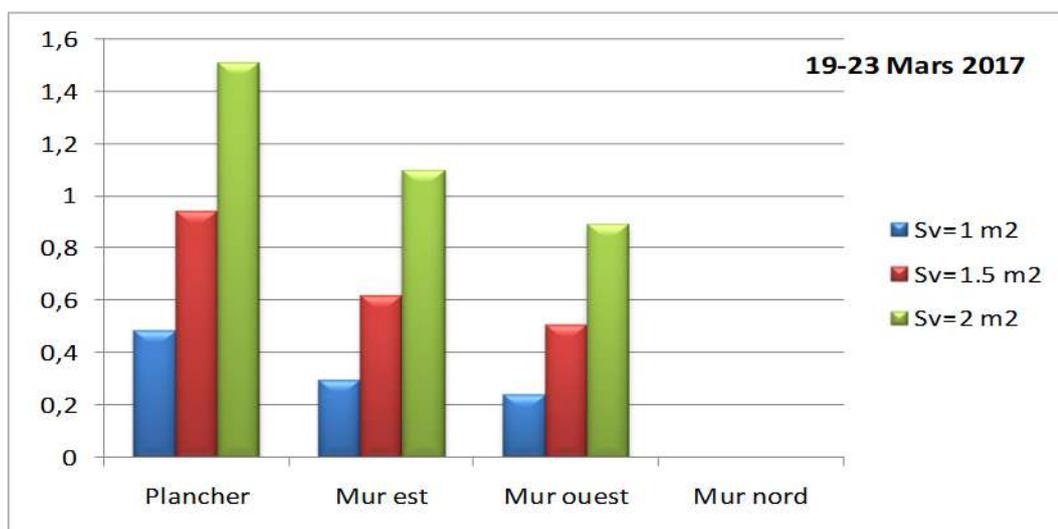


(c)

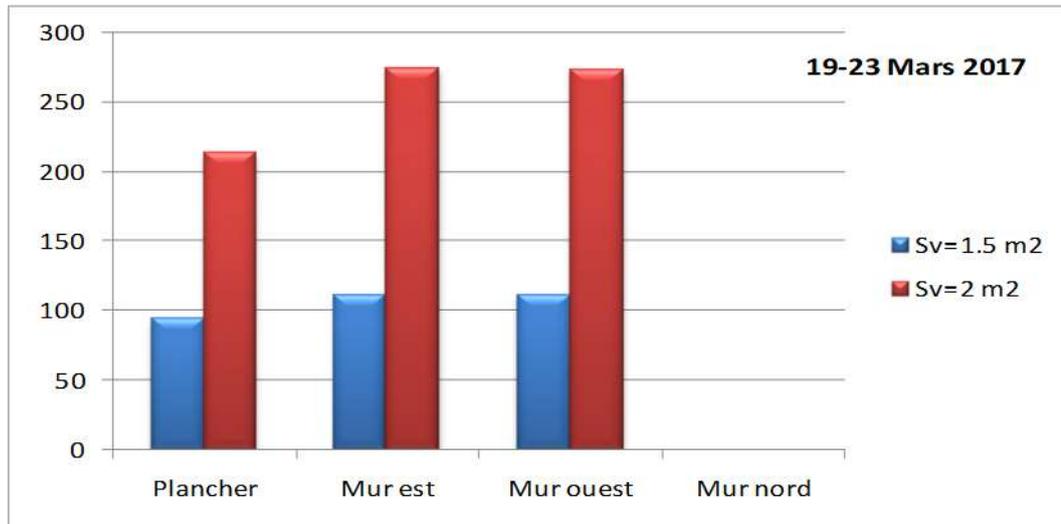
Figure IV.20. Variation du temps de séjour de la TS sur les parois et sur le plancher avec les dimensions de la vitre

- **Variation de la surface moyenne de la TS et son taux de croissance sur les parois et sur le plancher avec les dimensions de la fenêtre**

La variation de la surface moyenne de la TS sur les parois et sur le plancher ainsi que le taux de croissance de la STS avec la surface de la vitre pour les journées du 19 au 23 Mars sont illustrés par les histogrammes de la figure IV.21. Nous pouvons noter sur la figure IV.21.a que la STS est d'autant plus grande que les dimensions de la fenêtre sont importantes, notamment sur le plancher. Concernant le taux de croissance de la STS, il apparait clairement sur la figure IV.21.b que ce dernier est moins important pour le plancher que pour les murs est et ouest quasiment de même valeur. Les taux de croissance de la surface moyenne de la TS sur les murs est et ouest sont respectivement de l'ordre de 274,43 % et de 273,17 % quand la surface de la fenêtre est augmentée de 1 m<sup>2</sup> à 2 m<sup>2</sup>.



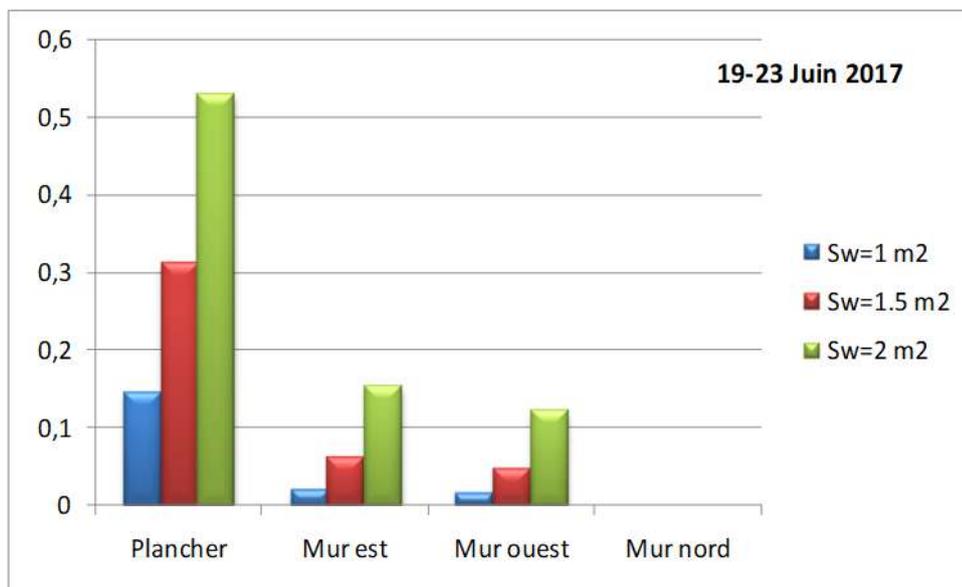
(a)



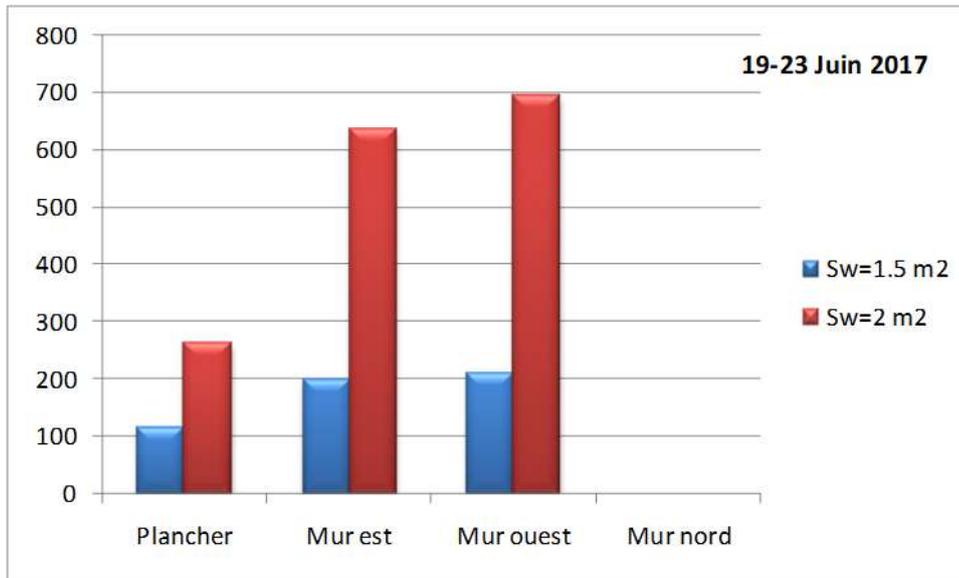
(b)

Figure IV. 21. (IV.21.a) Variation de la surface moyenne de la TS sur les parois et sur le plancher (IV.21.b) Taux de croissance de la STS moyenne avec les dimensions de la fenêtre

Pour les journées du 19 au 23 Juin 2017, l'examen de la figure IV.22.a montre que la STS moyenne sur le plancher est nettement supérieure à celle qui se forme sur les autres parois. Par ailleurs son taux de croissance avec les dimensions de la vitre est le plus faible (figure IV.22.b). En effet, la STS moyenne sur le plancher augmente de 265,10 % pour une surface vitrée de 2 m<sup>2</sup> par rapport à celui d'une fenêtre de 1 m<sup>2</sup>. Par ailleurs nous pouvons constater sur la figure IV.22.b que taux de croissance de la STS le plus important est relatif au mur ouest. Il arrive jusqu'à 695,67 % pour une surface vitrée de 2 m<sup>2</sup> comparativement à une surface de la fenêtre de 1 m<sup>2</sup>.



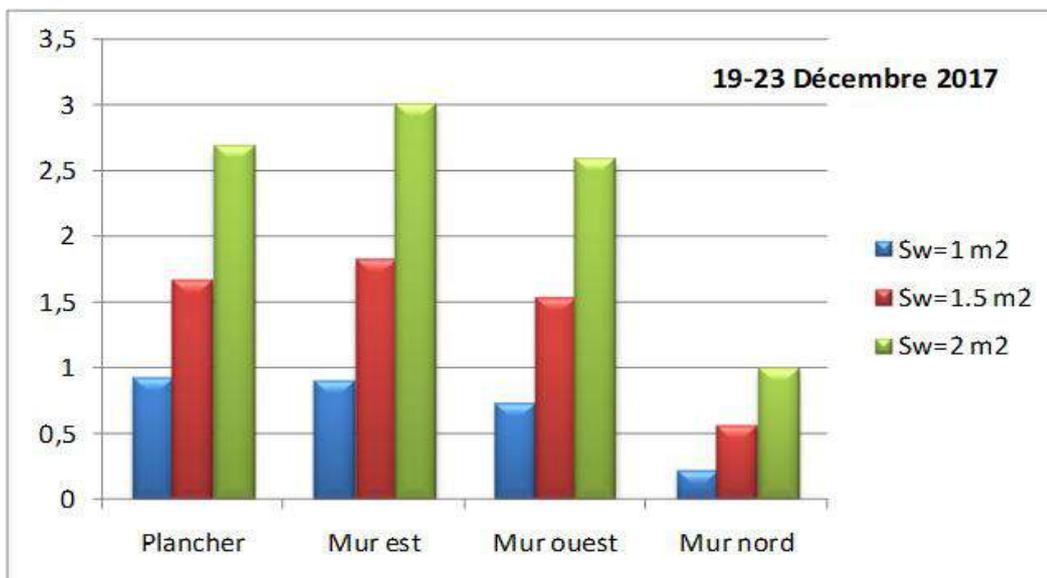
(a)



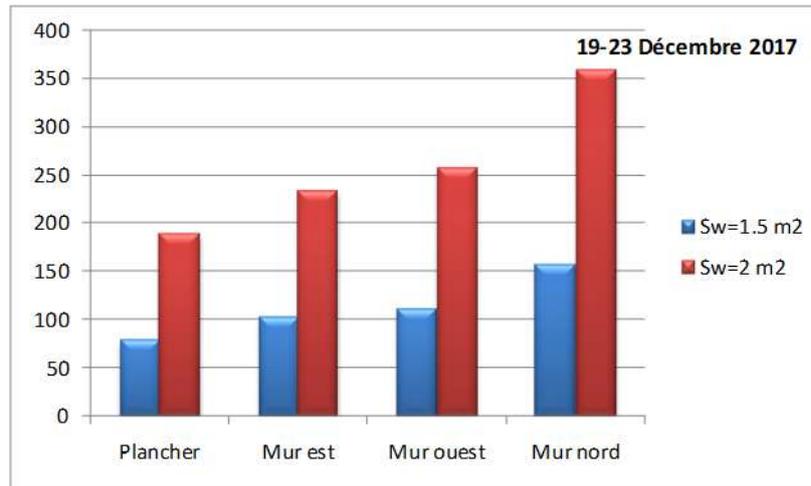
(b)

Figure IV.22. (IV.22.a) Variation de la surface moyenne de la TS sur les parois et sur le plancher (IV.22.b) Taux de croissance de la STS avec les dimensions de la fenêtre

Pour les journées du 19 au 23 Décembre 2017, nous pouvons noter que la plus grande STS moyenne est celle qui figure sur le mur est alors que la plus petite est observée sur le mur nord (figure IV.23.a). Néanmoins c'est cette dernière qui a le taux de croissance le plus élevé (figure IV.23.b). En effet, en augmentant la surface vitrée à 2 m<sup>2</sup>, la surface moyenne de la tache solaire sur le mur nord augmente plus que 3.5 fois plus que celle obtenue si on a surface de la fenêtre de 1 m<sup>2</sup>.



(a)



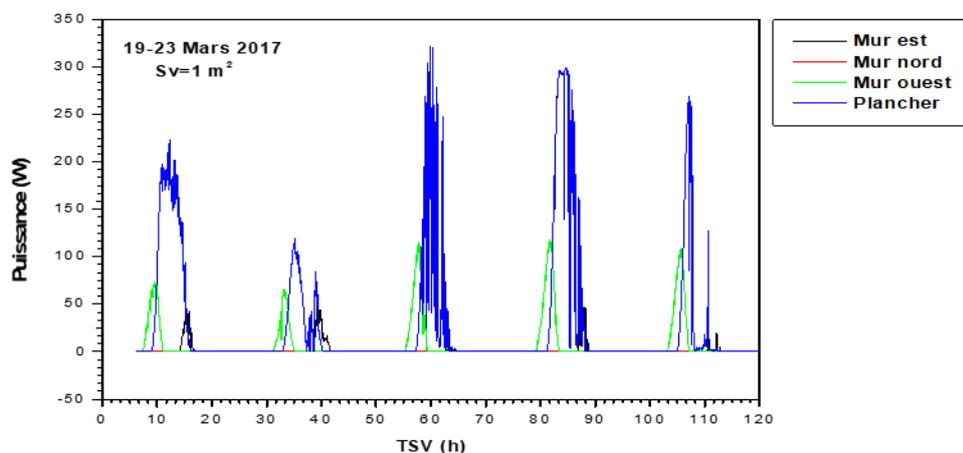
(b)

Figure IV. 23. (IV.23.a) Variation de la surface moyenne de la TS sur les parois et sur le plancher (IV.23.b) Taux de croissance de la STS moyenne avec les dimensions de la fenêtre

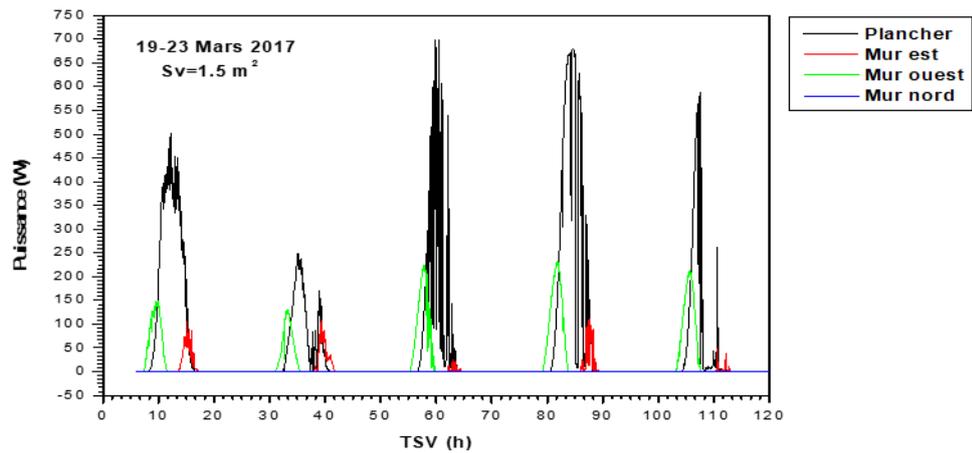
- **Effet des dimensions de la fenêtre sur la puissance solaire gagnée**

L'analyse des courbes des figures IV.24.a, IV.24.b et IV.24.c montre clairement que l'énergie solaire gagnée chaque seconde par les faces internes des parois et le plancher est en relation directe avec l'intensité du rayonnement solaire incident et la STS.

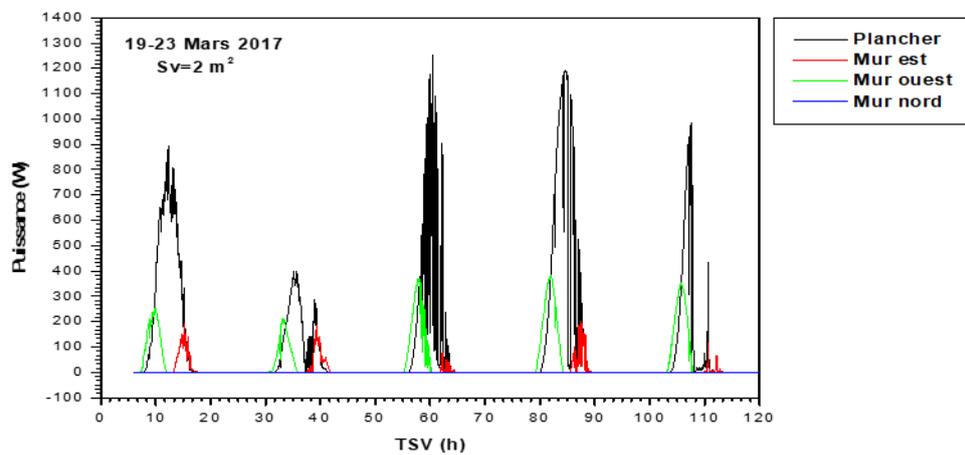
En outre, elle révèle que l'augmentation de la surface vitrée conduit à l'accroissement de la puissance gagnée par chaque paroi. Par ailleurs, il peut être remarqué que la puissance solaire gagnée le 20 Mars est nettement inférieure à celles des autres journées à cause de la diminution du rayonnement solaire direct.



(a)



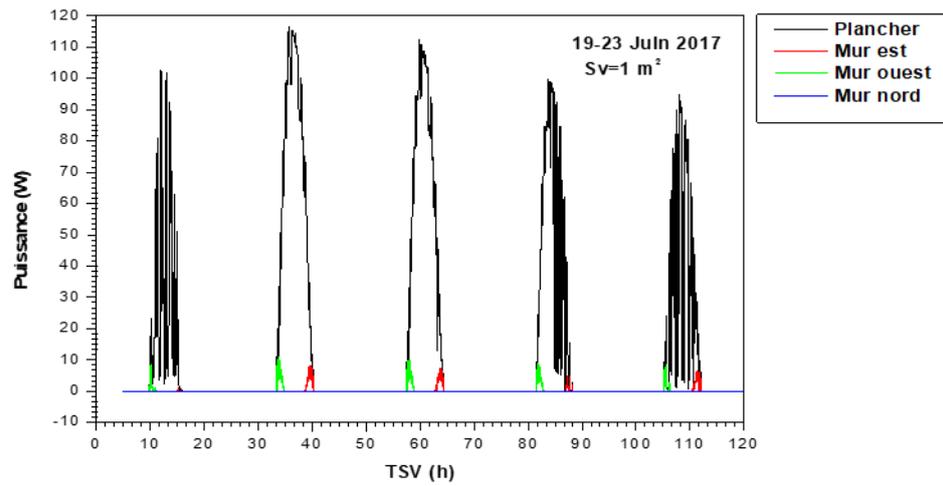
(b)



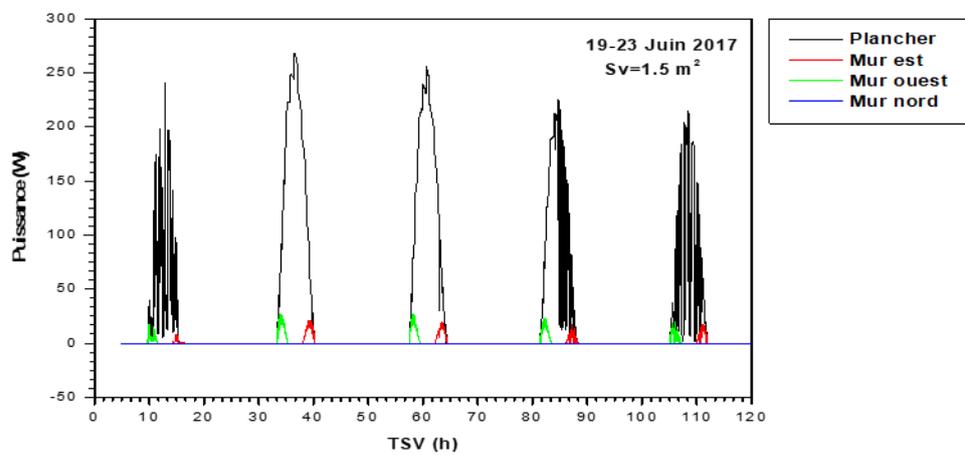
(c)

Figure IV. 24. Variation temporelle de la puissance solaire gagnée par chaque paroi et par le plancher en fonction des dimensions de la fenêtre (19-23 Mars 2017)

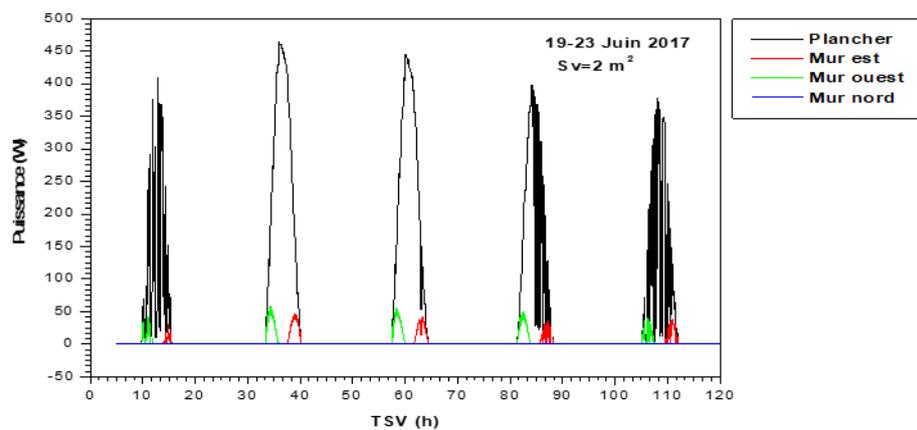
L'intensité du rayonnement solaire durant la période estivale est la plus importante de toute l'année. L'agrandissement de la surface vitrée engendre des gains importants d'énergie comme il est clair sur les figures IV.25.a, IV.25.b et IV.25.c. En outre, on voit que l'énergie reçue par le plancher est nettement supérieure à celles gagnées par les autres parois.



(a)



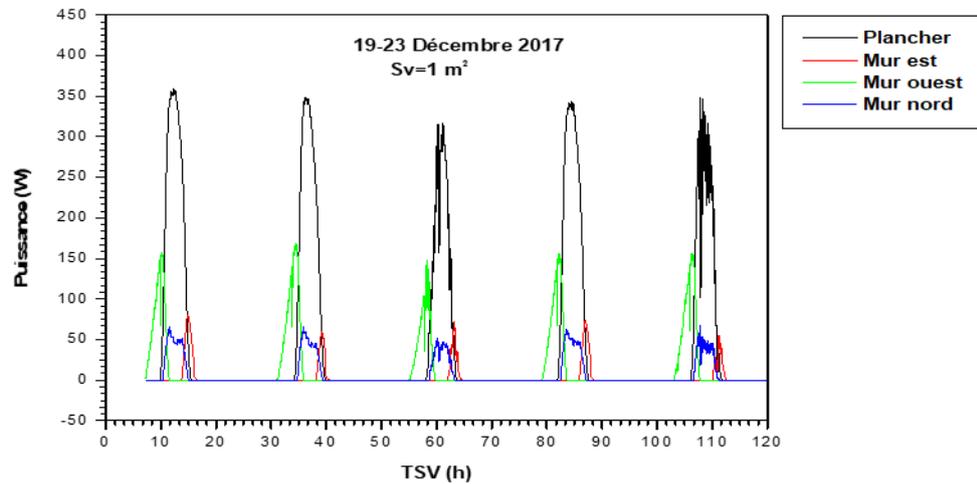
(b)



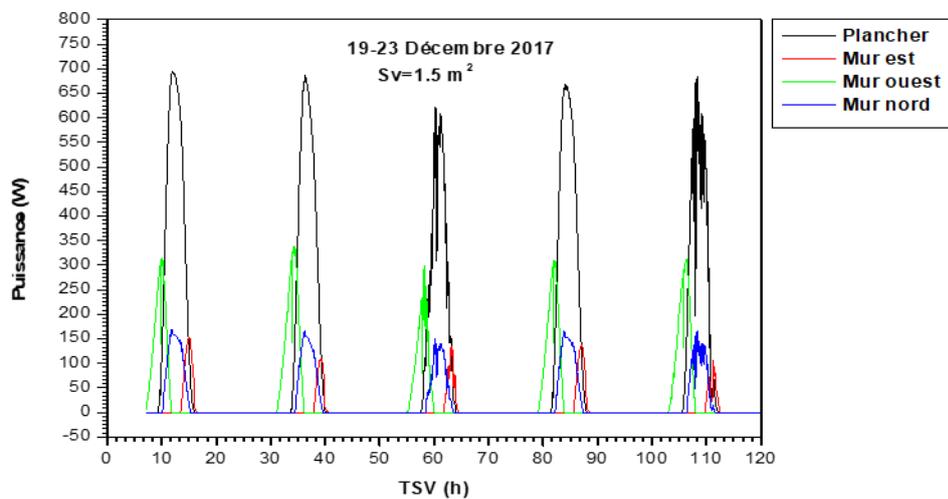
(c)

Figure IV. 25. Variation temporelle de la puissance solaire gagnée par chaque paroi et par le plancher en fonction des dimensions de la fenêtre (19-23 Juin 2017)

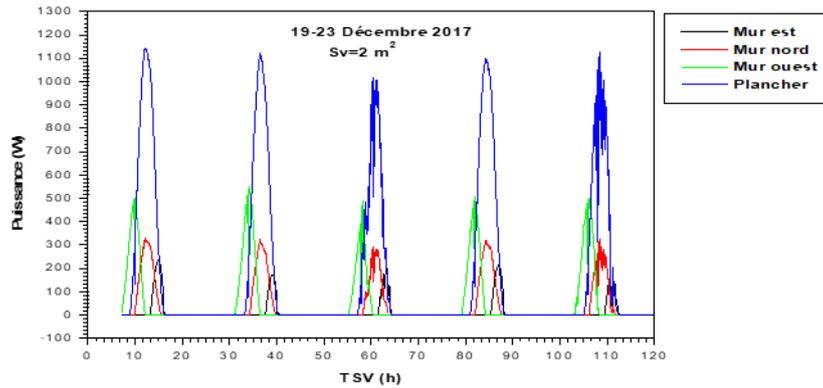
L'examen des figures IV.26.a, IV.26.b et IV.26.c révèle que l'accroissement de la surface vitrée a une augmentation significative de la puissance solaire gagnée par le plancher et par les parois verticales. De plus, il apparait clairement que la puissance reçue par le mur est, est très faible par rapport à celle gagnée par les autres parois. Nous pourrions également noter que, c'est le plancher qui gagne le plus d'énergie.



(a)



(b)



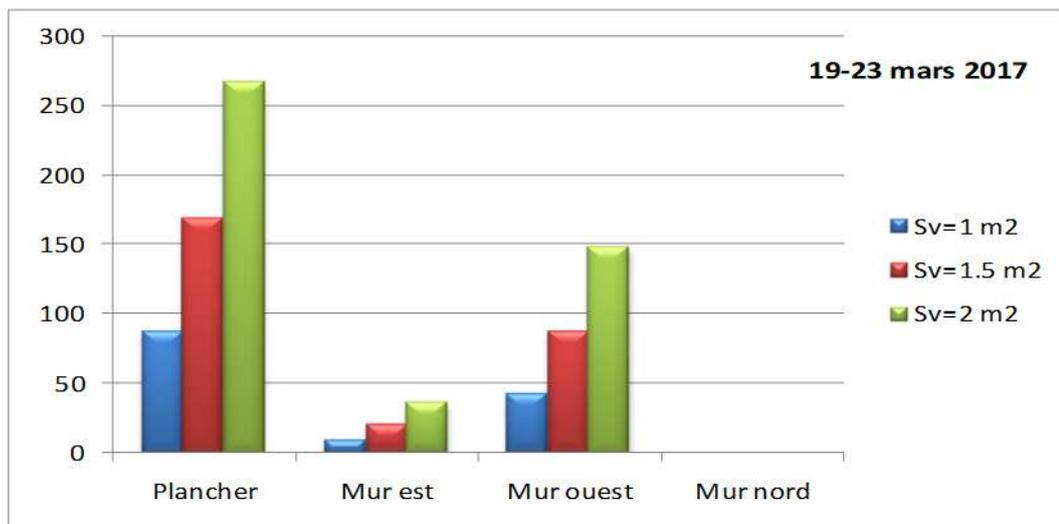
(c)

Figure IV.26. Variation temporelle de l'énergie gagnée par chaque paroi et par le plancher en fonction des dimensions de la fenêtre (19-23 Décembre 2017)

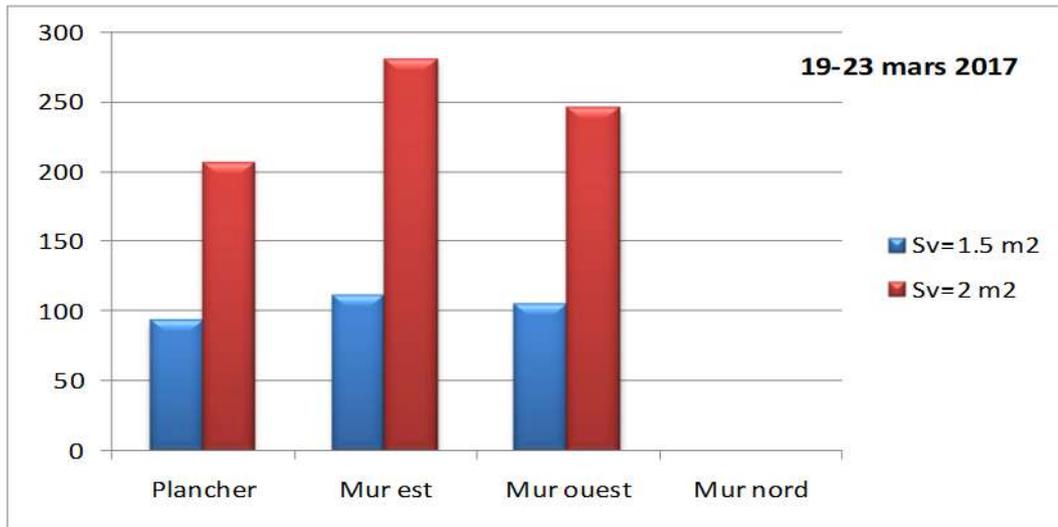
**- Variation de la puissance solaire moyenne gagnée par les parois et par le plancher et son taux de croissance avec les dimensions de la fenêtre**

Dans ce qui suit, nous allons analyser l'évolution de la puissance solaire moyenne reçue par les parois verticales et par le plancher par rapport à la surface de la fenêtre qui sera variée entre 1m<sup>2</sup>, 1.5m<sup>2</sup> et 2m<sup>2</sup>.

Pour les journées du 19 au 23 Mars 2017, l'histogramme de la figure IV.27 permet de noter que, pour une surface vitrée de 2 m<sup>2</sup>, le plancher reçoit la plus forte puissance solaire (estimée à près de 267,48 W) contrairement au mur est qui reçoit la plus faible puissance solaire évaluée à 36,73 W. En examinant l'histogramme de la figure IV.27.b, on voit que la puissance gagnée par le mur est est celle qui croit le plus avec l'augmentation des dimensions de la vitre. Elle atteint 280,44 % pour une surface vitrée de 2 m<sup>2</sup> par rapport à la surface unité.



(a)

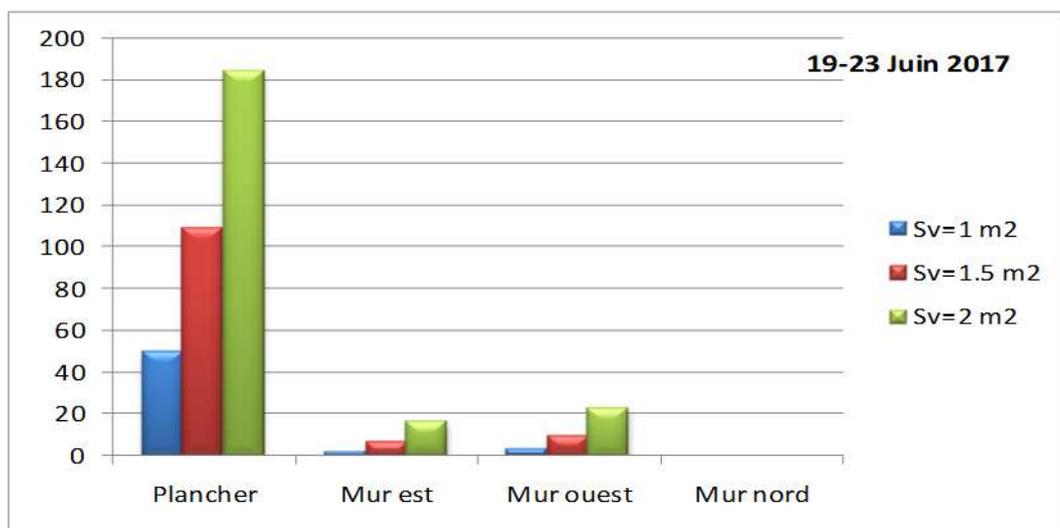


(b)

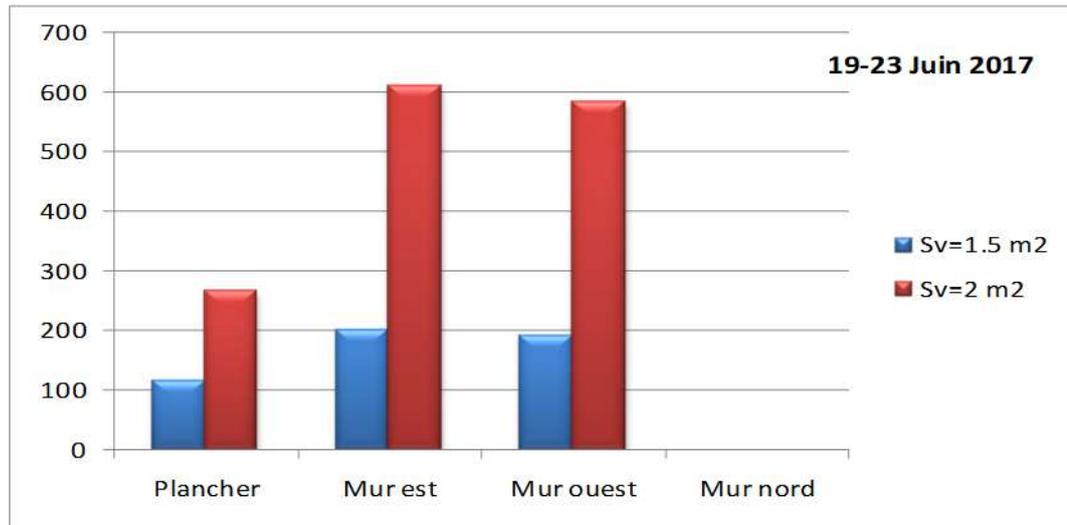
**Figure IV.27. (IV.27.a) Variation de la puissance solaire moyenne gagnée par les parois et par le plancher avec les dimensions de la fenêtre**  
**(IV.27.b) Taux de croissance de la puissance solaire gagnée par les parois et le plancher avec les dimensions de la fenêtre**

Pour les journées du 19 au 23 Juin, on remarque sur l’histogramme de la figure IV.28.a que la puissance solaire moyenne gagnée par le plancher est nettement supérieure à celle gagnée par les autres parois (murs est et ouest) avec une moyenne de 184,50 W pour une surface vitrée de 2 m<sup>2</sup>.

Le taux de croissance de la puissance gagnée par le plancher est le plus faible, tandis que celui de la puissance reçue par le mur est est le plus élevé avec un pourcentage de 610,13 % pour une surface vitrée de 2 m<sup>2</sup> par rapport à la surface unité (figure IV.28.b).



(a)

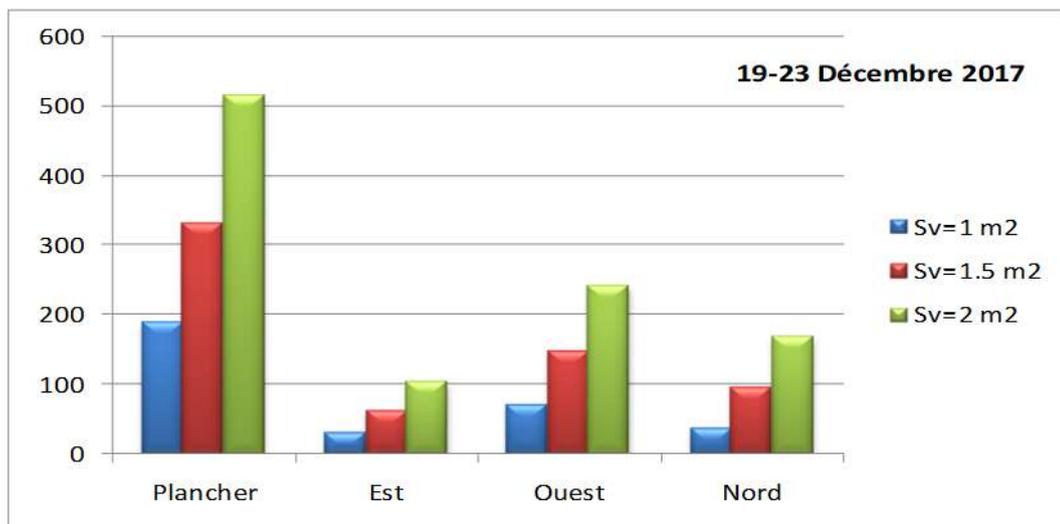


(b)

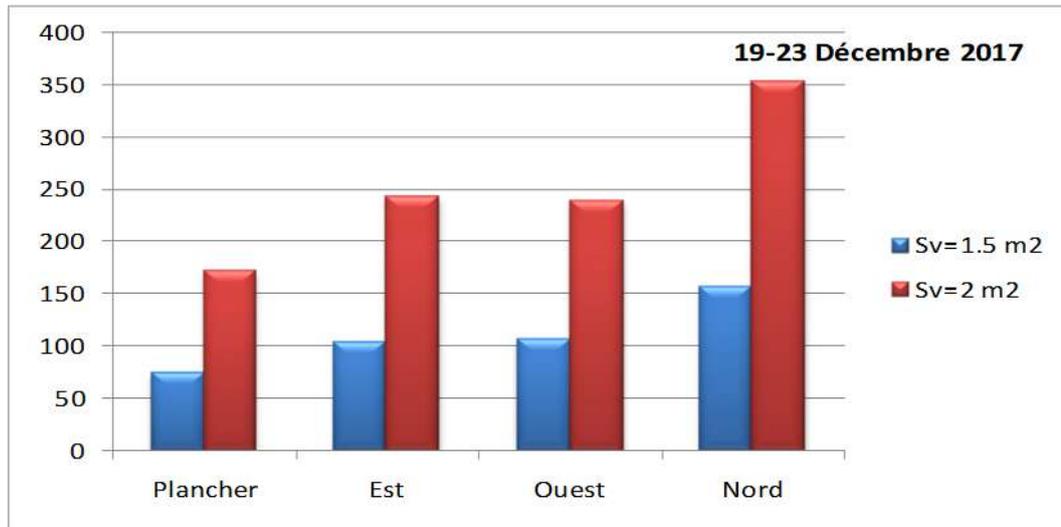
Figure IV.28. (IV.28.a) Variation de la puissance solaire moyenne gagnée par les parois et par le plancher (IV.28.b) Taux de croissance de la puissance solaire gagnée par les parois et par le plancher avec les dimensions de la fenêtre

L'analyse de l'histogramme de la figure IV.29.a, révèle que la puissance moyenne gagnée par le plancher est nettement supérieure à celle reçue par les autres parois. Elle atteint pour une surface vitrée de 2 m<sup>2</sup> une valeur de 516,05 W.

Par ailleurs, nous pouvons remarquer sur la figure IV.29.b que le mur nord bénéficie du taux de croissance de la puissance gagnée le plus important dont la valeur peut atteindre près de 353.64 % pour surface vitrée de 2 m<sup>2</sup> par rapport à la surface unité.



(a)



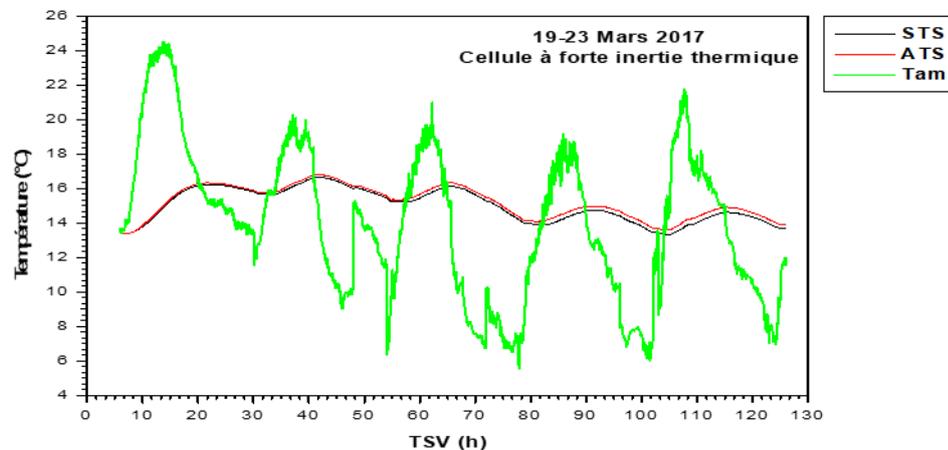
(b)

Figure IV.29. (IV.29.a) Variation de la puissance solaire moyenne gagnée par les parois et par le plancher (IV.29.b) Taux de croissance de la puissance solaire moyenne gagnée par les parois et par le plancher avec les dimensions de la fenêtre

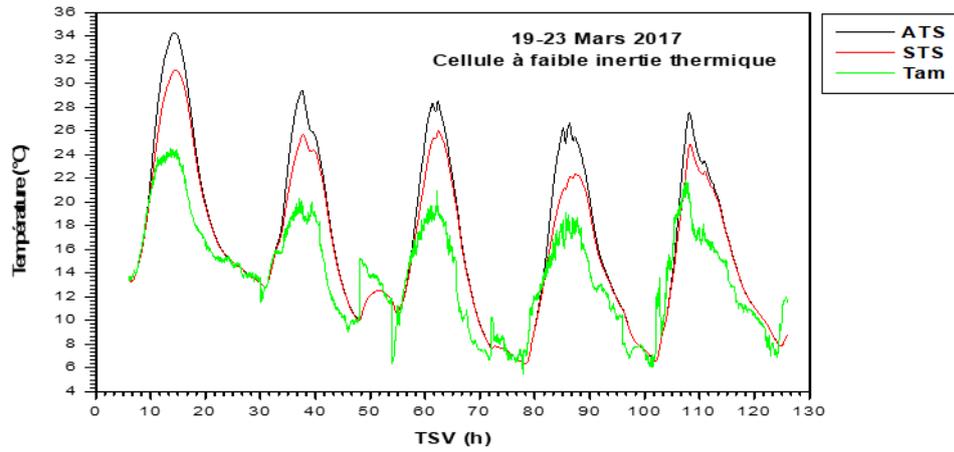
- **Impact de la prise en compte de la tache solaire sur le comportement thermique d'une chambre**

Dans ce qui suit, l'impact de la prise en compte de la tache solaire dans le modèle énergétique de deux chambres, à faible et forte inerties thermiques pour les journées du 19 au 23 des mois de Mars (printemps), Juin (été) et Décembre (hiver), sera examiné.

Il apparait clairement que, pour les journées du 19 au 23 Mars, la prise en considération de la tache solaire a une influence directe sur le bilan thermique des deux cellules. L'analyse des résultats montre que la température de la cellule caractérisée par une forte inertie thermique augmente de  $0.15^\circ\text{C}$  lorsque la tache solaire est prise en compte tandis que celle de la cellule préfabriquée croit de  $5.19^\circ\text{C}$  (figure IV.30).



(a)

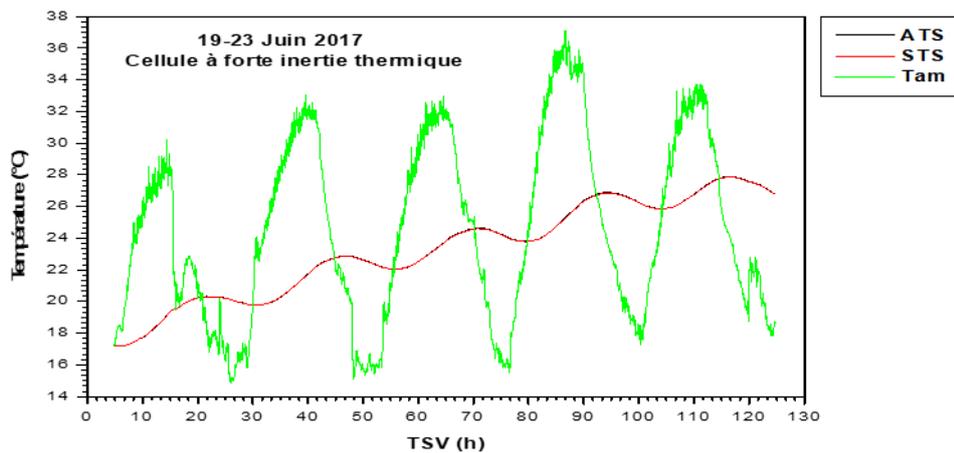


(b)

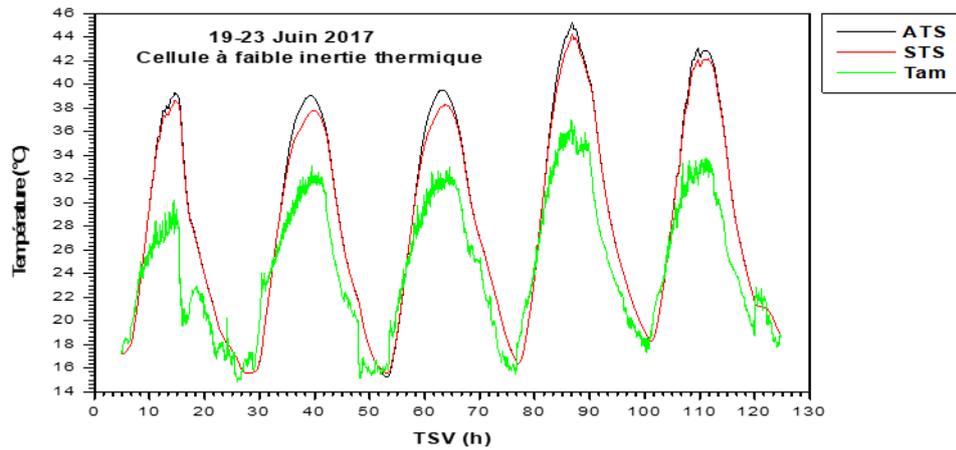
Figure IV.30. Evolution temporelle de la température de l'air d'une cellule à faible et forte inerties thermiques avec et sans prise en compte de la tache solaire (19-23 Mars 2017)

Pour les journées du 19-23 Juin, l'examen des courbes de la figure IV.31.a, permet de remarquer que la prise en compte de la tache solaire dans le bilan thermique d'une chambre caractérisée par une forte inertie thermique n'a quasiment aucun impact sur la température de l'air qui n'a enregistré qu'une augmentation très légère de 0.03°C.

Par ailleurs, il peut être remarqué que la température de l'air de la cellule à faible inertie thermique connaît quant à elle une élévation de 1°C lorsque la tache solaire est prise en considération (figure IV.31.b).



(a)

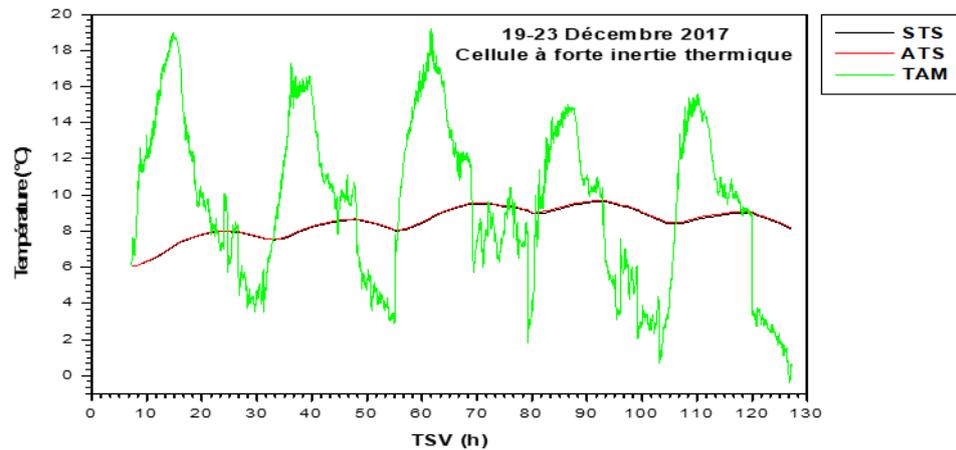


(b)

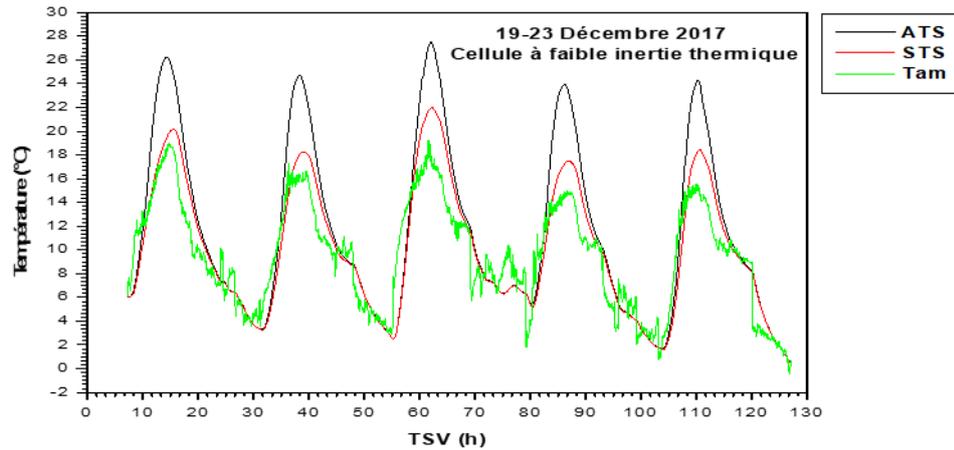
Figure IV.31. Evolution temporelle de la température de l’air d’une cellule à faible et à forte inerties thermiques avec et sans prise en compte de la tache solaire (19-23 Juin 2017)

Pour les journées du 19-23 Décembre 2017, il est aisé de constater que la prise en considération de la tache solaire dans le bilan thermique d’une cellule fortement inertielle fait croître la température de l’air de cette dernière de 0.06°C, qui peut être considérée comme négligeable (figure IV.32.a).

Concernant la prise en compte de la tache solaire dans le bilan thermique d’une cellule à faible inertie thermique, nous pouvons noter sur la figure IV.32.b que la température de l’air dans ce cas a augmenté de 7.1 °C. Cet écart de température est causé par STS sur les parois et le plancher qui est considérable en hiver.



(a)



(b)

Figure IV.32. Evolution temporelle de la température de l'air d'une cellule à faible inertie thermique avec et sans prise en compte de la tache solaire (19-23 Décembre 2017)

#### IV.4. Etude du système Barra-Costantini

Dans cette partie, qui représente le cœur de notre travail de thèse, seront exposés les différents résultats relatifs au système de chauffage B-C classique (cas 1) et aux systèmes B-C avec vitre PV vitrée (cas 2) et PV/B-C (cas 3) pour les journées du 19 au 23 Décembre 2017.

Les comportements thermique et électrique des différentes parties de ces systèmes seront examinés finement.

Pour une meilleure compréhension des résultats, le lecteur est invité à se référer à la partie III.6.1 relative à la description des systèmes susmentionnés.

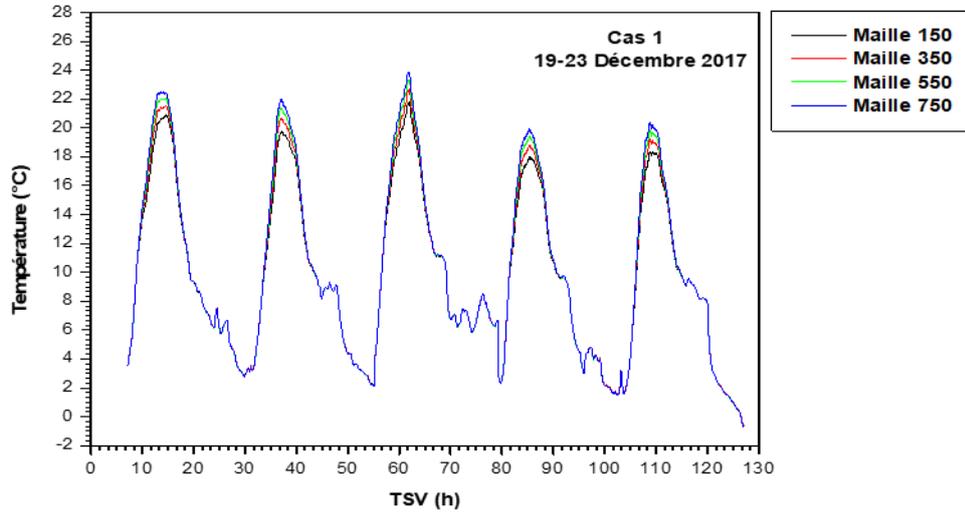
Afin de suivre l'évolution spatiale des températures, chaque élément des systèmes est discrétisé en 750 mailles (figure III.22).

Les éléments horizontaux, tels que le toit, les tubes, le plancher ainsi que l'air dans les canaux sont divisés en mailles selon la direction horizontale (OY) de la gauche vers la droite. Tandis que les éléments verticaux tels que les parois, la vitre simple, la vitre PV, l'absorbeur, l'air dans la chambre et l'air dans la cheminée solaire sont divisés verticalement du bas vers le haut suivant la direction (OZ).

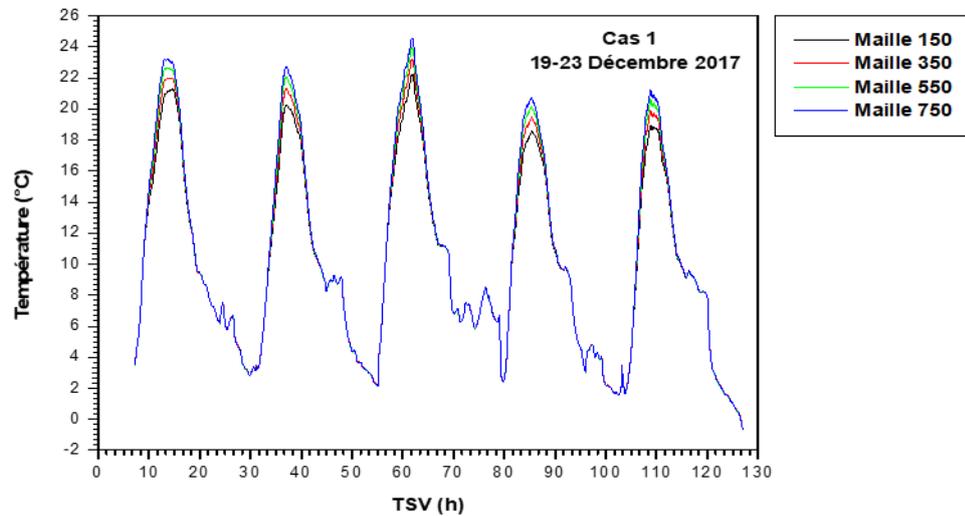
##### IV.4.1. La vitre

C'est un élément important du système B-C, du fait qu'elle est responsable de la création de l'effet de serre et de la diminution des pertes thermiques d'une part, et représente la composante qui fait la différence entre les trois systèmes proposés d'autre part. En effet, dans le cas 1 c'est une vitre simple alors que dans les systèmes relatifs aux cas 2 et 3 c'est une vitre PV semi transparente (figure III.20). Le comportement énergétique de la vitre dans les trois systèmes est illustré par les figures IV.33 et IV.34.

L'analyse des courbes de la figure IV.33, montre clairement que la température des deux faces de la vitre augmente dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur (mouvement ascendant) où les températures les plus basses sont enregistrées en bas de la vitre et les plus grandes en haut de celle-ci. Les températures des deux faces de la vitre sont très proches les unes des autres (températures maximales des faces externe et interne de la vitre respectivement de 23.89°C et de 24.58°C). Ce petit écart revient à sa faible inertie thermique.



(a) Face externe



(b) Face interne

Figure IV.33. Variation temporelle de la température de la vitre du système B-C (cas 1)

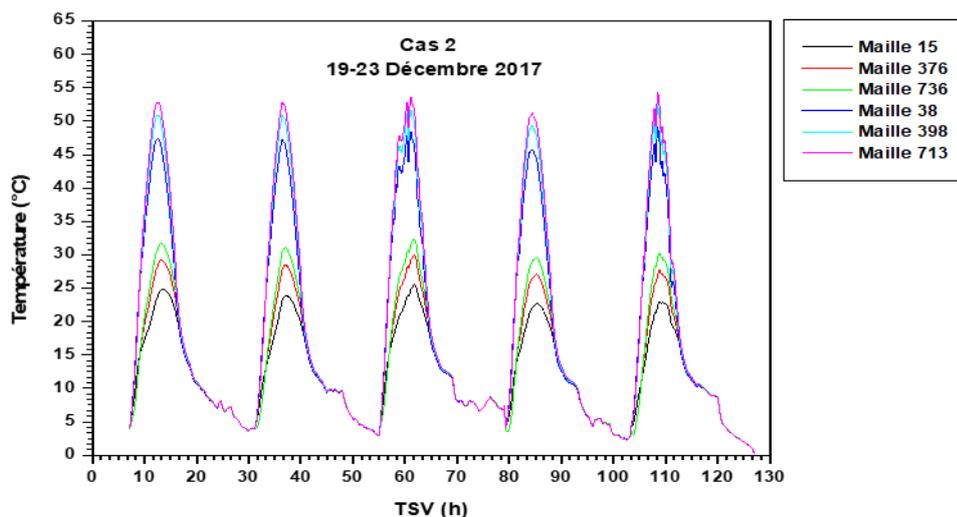
Les figures IV.34.a et IV.34.b représentent l'évolution temporelle des températures des éléments de la vitre PV au niveau de différentes mailles respectivement pour les cas 2 et 3.

La vitre PV est semi transparente puisque constituée d'éléments opaques avec PV et d'autres transparents sans PV (figure III.20). Pour identifier ces deux types d'éléments (opaques et transparents), les mailles (15, 376, 736) et les mailles (38, 398, 713) correspondant aux milieux des éléments situés en bas, au centre et en haut de la vitre PV respectivement pour les éléments sans et avec PV ont été choisis.

L'analyse des courbes des figures IV.34.a et IV.34.b montre clairement que les températures des éléments avec PV (38, 398, 713) sont nettement supérieures à celles des éléments sans PV (15, 376, 736) dans les cas 2 et 3.

La température des éléments opaques atteint une valeur de 54.4 °C dans le cas 2 et de 38.05°C dans le cas 3, tandis que les éléments transparents arrivent à des températures de 32.35 °C dans le cas 2 et de 22.7 °C dans le cas 3. Il est clair que l'effet de serre créé par la vitre placée devant la vitre PV dans le cas 2 a conduit à une augmentation significative des températures de la vitre PV, par rapport au cas 3.

Durant la période nocturne, les températures de la vitre PV diminuent considérablement et s'approchent de la température ambiante.



(a)

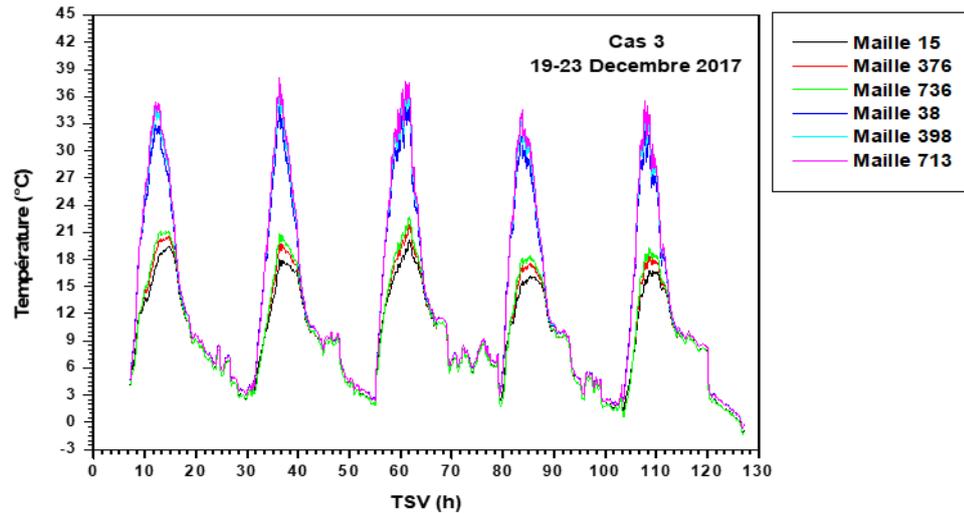


Figure IV.34. Variation temporelle de la température de la vitre PV (cas 2 et 3)

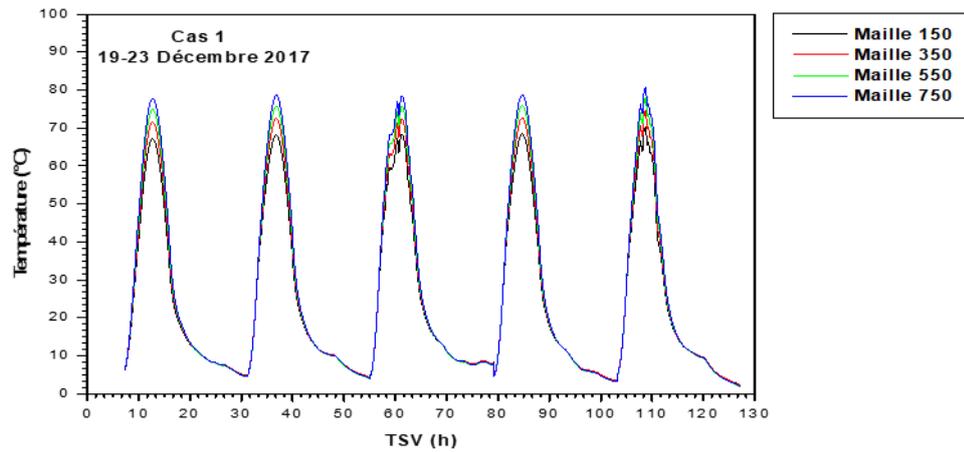
#### IV.4.2. L'absorbeur

L'évolution temporelle de la température de l'absorbeur en différentes mailles pour les cas 1, 2 et 3 est représentée respectivement sur les figures IV.35.a, IV.35.b et IV.35.c.

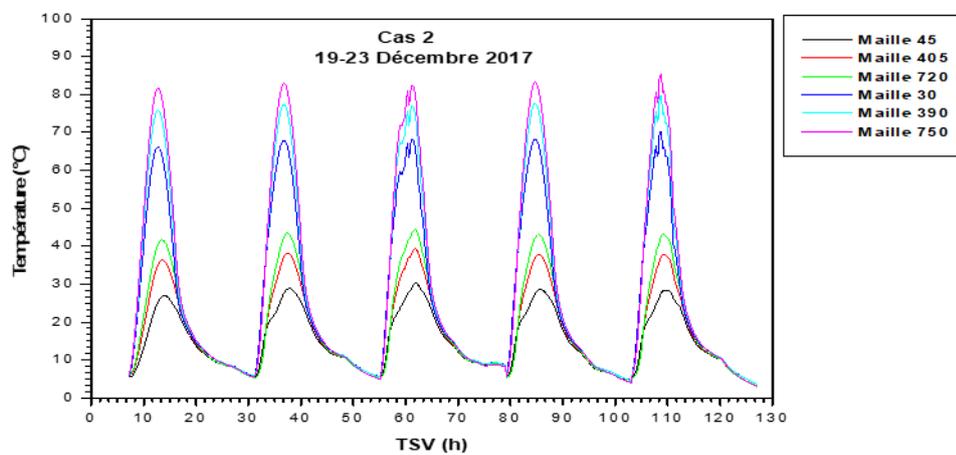
L'analyse des courbes de la figure IV.35.a, révèle que la température de l'absorbeur augmente graduellement dans le sens de l'écoulement de l'air (du bas vers le haut) pour atteindre une température de 80.83 °C en haut de la cheminée solaire (maille 750).

Dans les cas 2 et 3, l'absorbeur étant placé derrière la vitre PV, ne va recevoir le rayonnement solaire direct sur toute sa surface à cause des éléments PV qui vont masquer certaines parties de son aire.

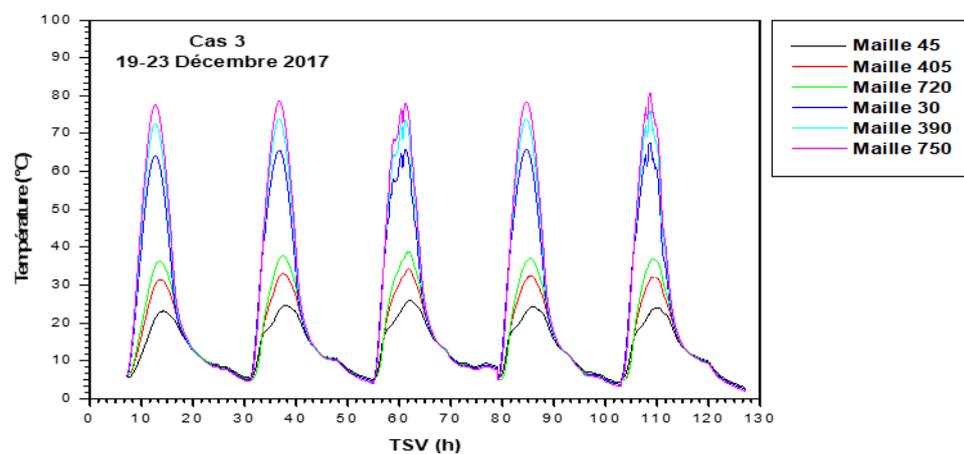
Dans les cas 2 et 3 (figures IV.35.b et IV.35.c), les zones de l'absorbeur qui reçoivent le rayonnement solaire transmis à travers la vitre PV peuvent arriver à des températures de 85.43 °C pour le cas 2 et de 80.6 °C pour le cas 3 (mailles 30, 390 et 750). Les zones de l'absorbeur qui se trouvent masquées par les cellules PV arrivent à des températures de 44.4 °C pour le cas 2 et de 38.8°C pour le cas 3 (mailles 45, 405, 720).



(a)



(b)



(c)

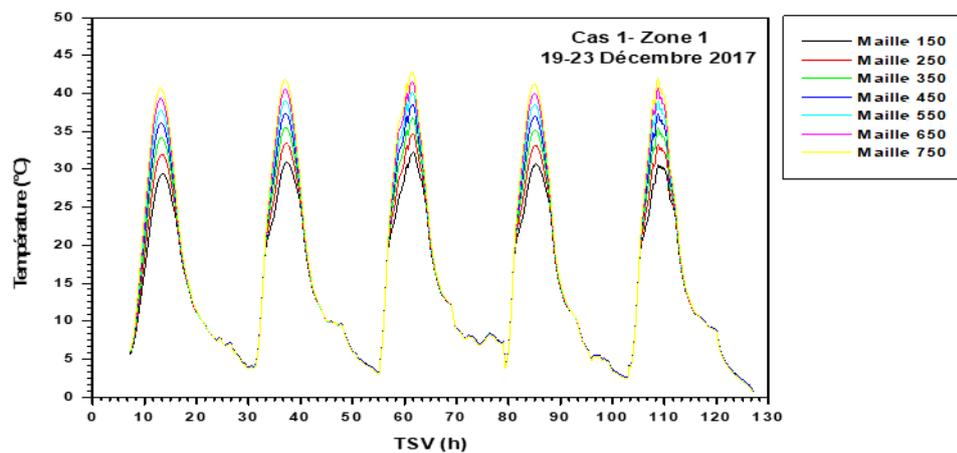
Figure IV.35. Variations temporelles des températures de l'absorbeur en différentes mailles (cas 1, 2 et 3)

#### IV.4.3. Température de l'air dans la cheminée solaire

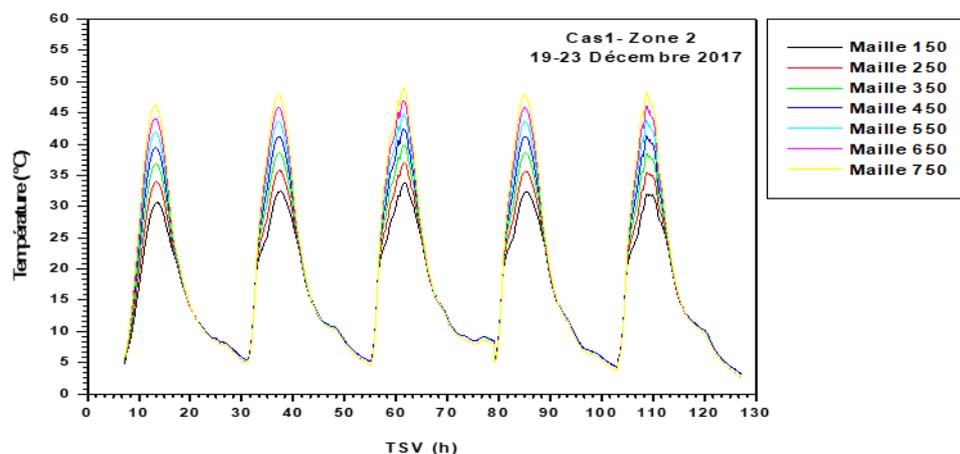
Les variations temporelles de la température de l'air dans les zones 1 et 2 des cheminées solaires, relatives respectivement aux cas 1, 2 et 3 sont illustrées par les figures IV.36, IV.37 et IV.38

Il est aisé de remarquer que dans les trois cas, la température de l'air dans les deux zones de la cheminée solaire augmente graduellement avec le nombre de mailles du bas vers le haut. En outre, il apparaît que la température de l'air dans la zone 2 (entre l'absorbeur et le mur est) est plus grande que celle dans la zone 1 (entre la vitre et l'absorbeur) dans les trois cas. Cette différence résulte des pertes thermiques convectives et radiatives avec le milieu environnant.

Par ailleurs, on trouve que la température de l'air dans la cheminée solaire relative au cas 1 qui est la plus importante comparativement à celles des cas 2 et 3 (avec un maximum de 42.8°C dans la première zone et 48.9°C dans la seconde).

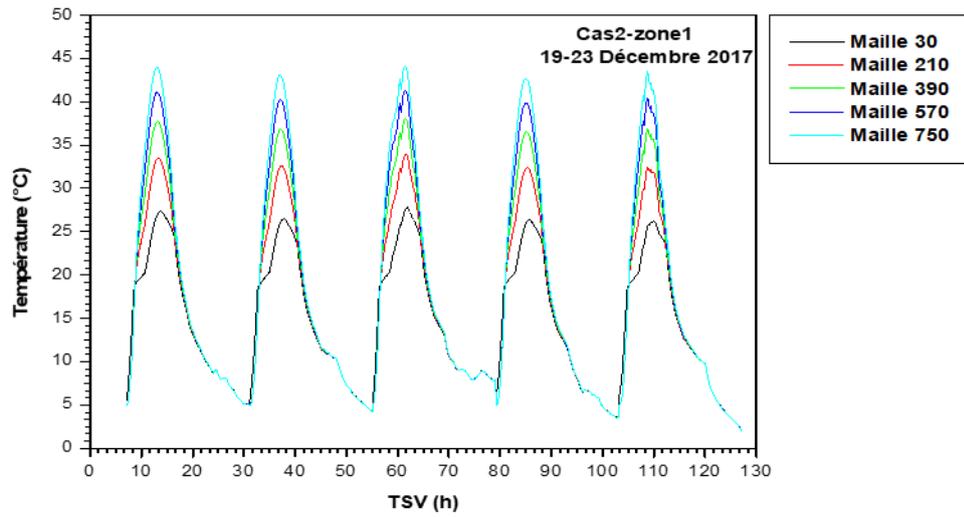


(a)

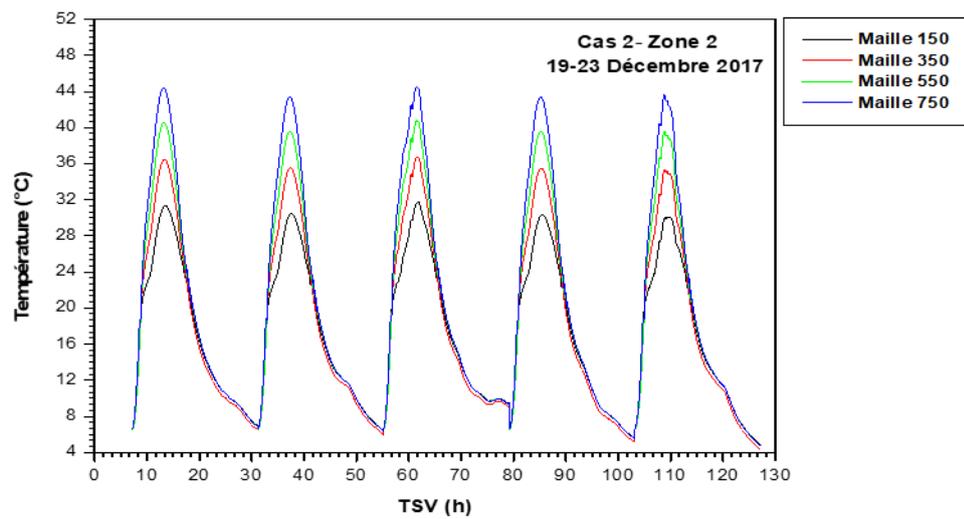


(b)

Figure IV.36. Variation temporelle de la température de l'air dans la cheminée solaire (cas 1)

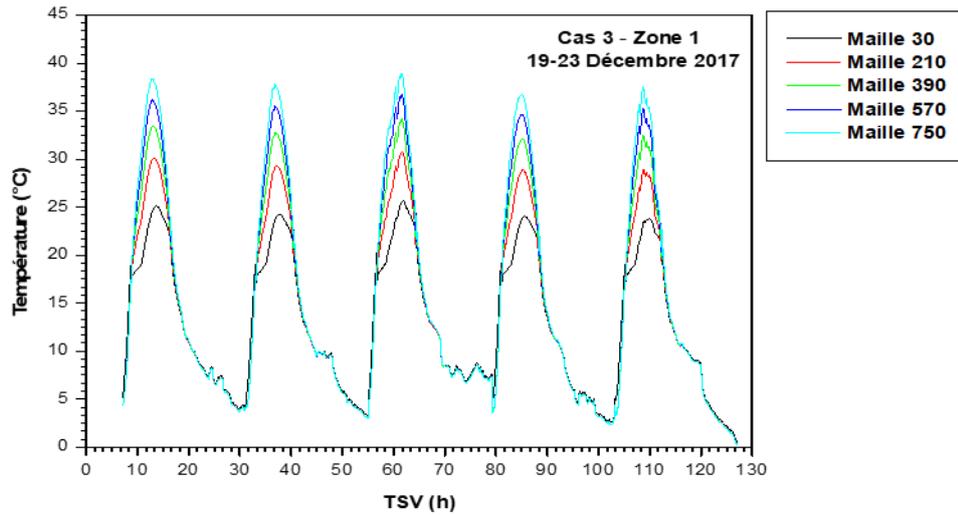


(a)

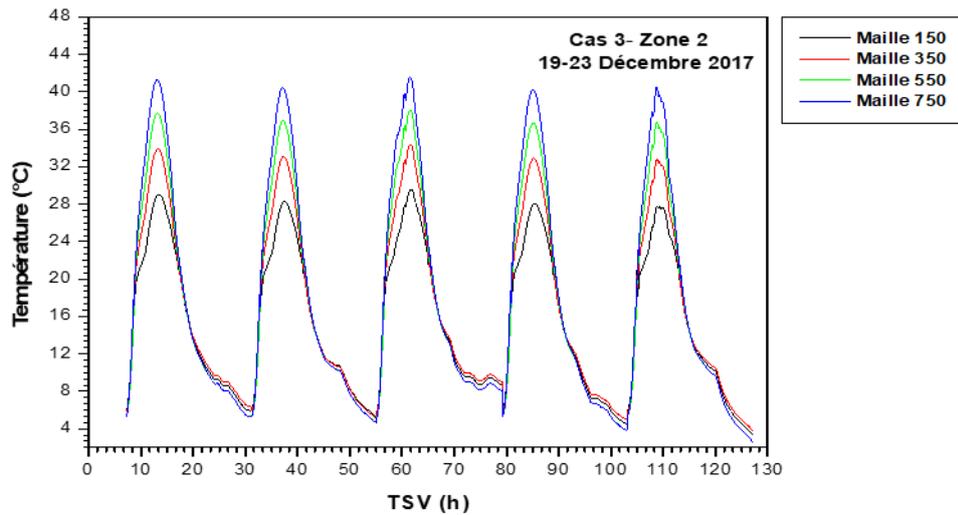


(b)

Figure IV.37. Variation temporelle de la température de l'air dans la cheminée solaire (cas 2)



(a)



(b)

Figure IV.38. Variation temporelle de la température de l'air dans la cheminée solaire (cas 3)

#### IV.4.4. Température de l'air à la sortie de la cheminée solaire

Il peut être observé sur la figure IV.39 que, dans les trois systèmes considérés (cas 1, 2 et 3), la température de l'air à la sortie de la cheminée solaire augmente graduellement dans le temps pour atteindre des valeurs maximales de 45.87 °C pour le cas 1, de 44.30 °C pour le cas 2 et de 40.203 °C pour le cas 3.

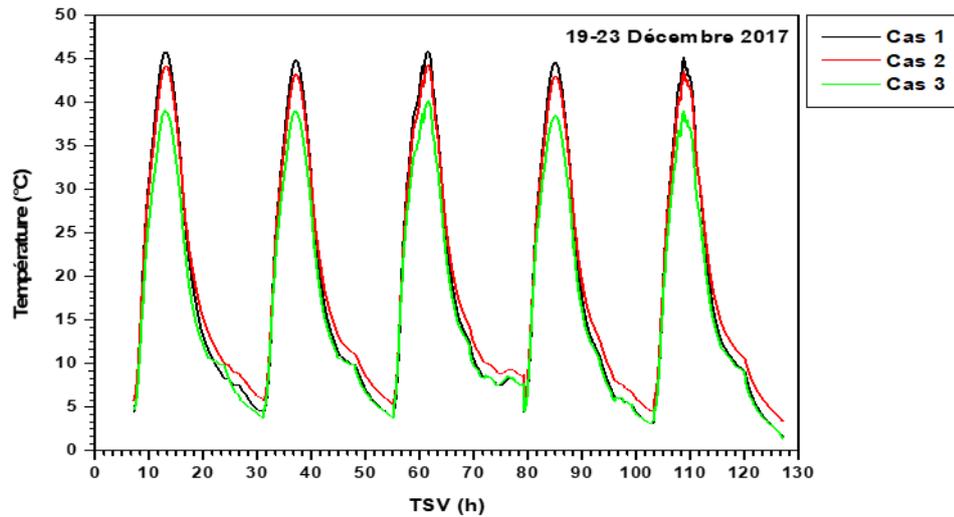


Figure IV.39. Variation temporelle de la température de l'air à la sortie de la cheminée solaire (cas 1, 2 et 3)

#### IV.4.5. Température de l'air dans la chambre

L'analyse des courbes de la figure IV. 40 permet de noter que la température moyenne de l'air de la chambre du cas 1 dont la valeur maximale est de 22.97 °C est la plus élevée comparativement à celles dans les cas 2 et 3.

Nous remarquons néanmoins que l'utilisation d'une vitre PV vitrée (cas 2) a permis d'atteindre une température de l'air maximale, de 22.62 °C (très proche de celle de l'air du cas 1). Pour le local muni de la troisième configuration du système B-C, la température maximale de l'air dans ce dernier (de l'ordre de 21.58 °C) est inférieure à celles des deux autres cas.

En examinant les courbes de la figure IV.40, on déduit que la différence maximale de température de l'air entre les cas 1 et 2, et entre les cas 1 et 3 est respectivement de 0.35 °C et de 1,39 °C.

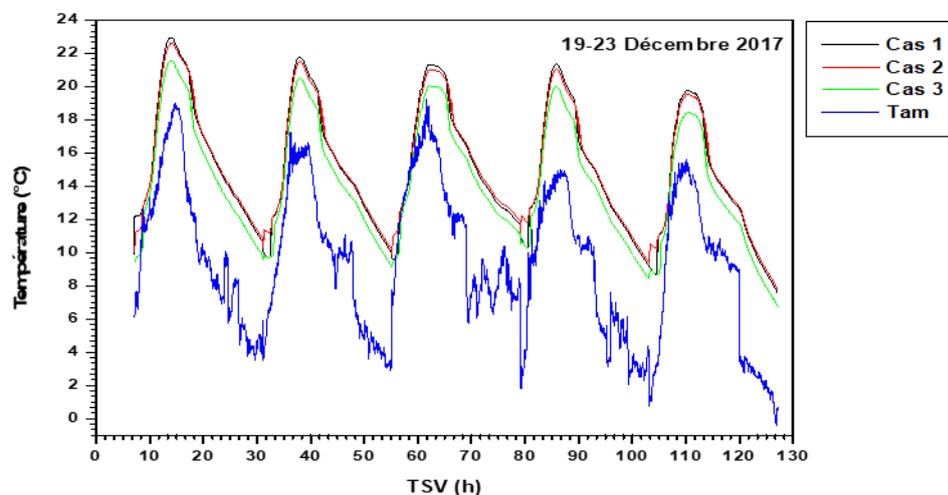
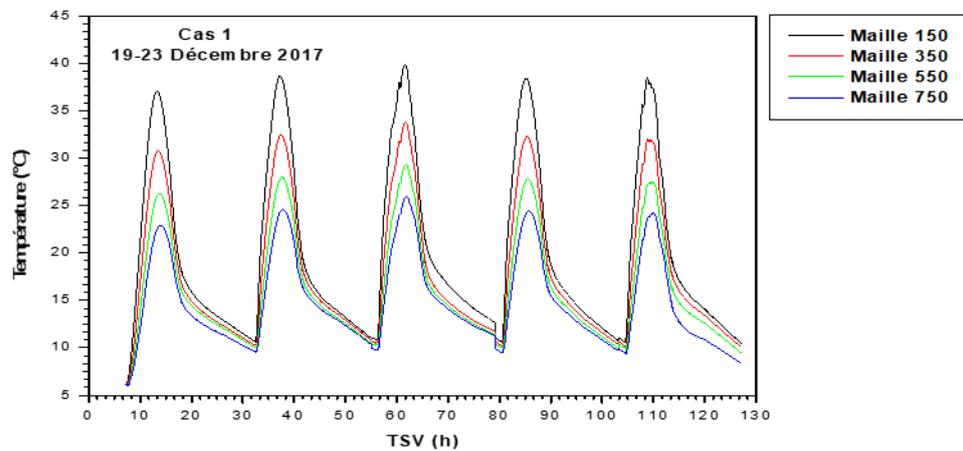


Figure IV.40. Variation temporelle de la température moyenne de l'air dans la chambre (cas 1, 2 et 3)

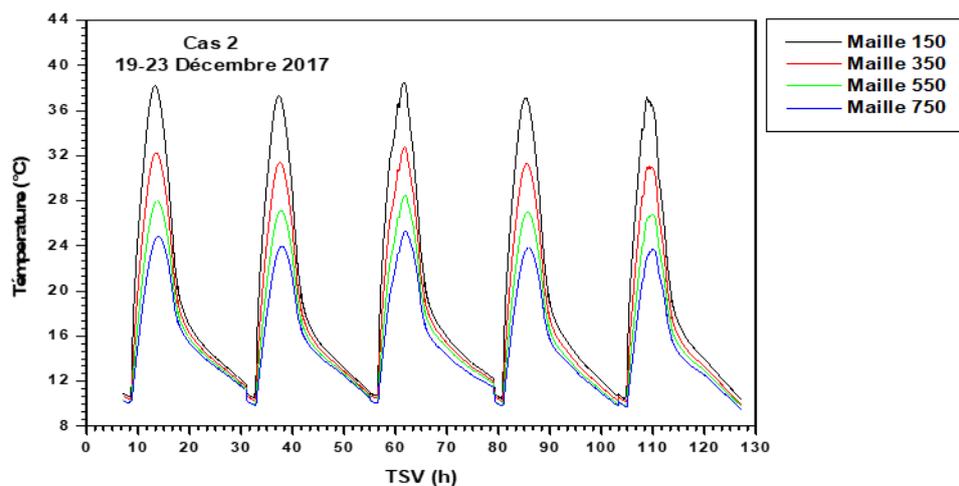
#### IV.4.6. Température de l'air dans les canaux

L'évolution temporelle de la température de l'air qui circule dans les canaux pour les cas 1, 2 et 3 est illustrée respectivement par les figures IV.41.a, IV.41. et IV.41.c.

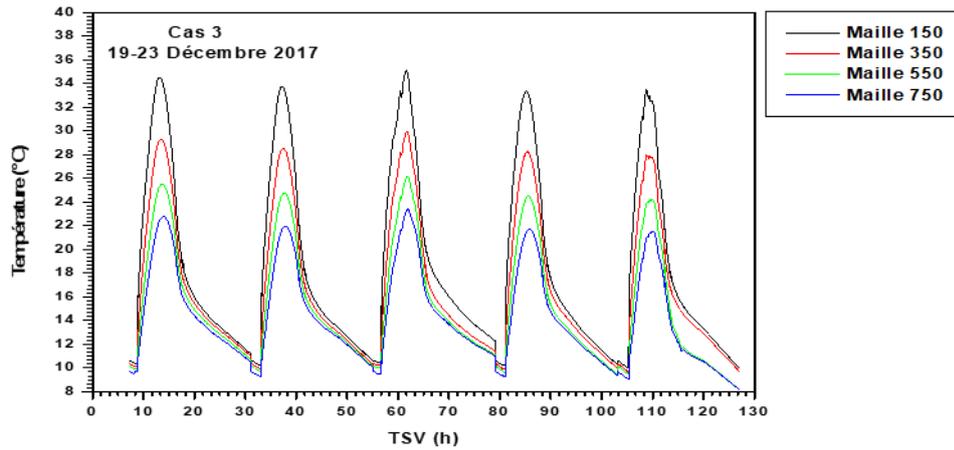
L'examen des différentes courbes révèle que, pour les trois systèmes, l'air chaud pénètre dans les canaux avec des températures maximale dont les valeurs peuvent atteindre des maxima de 45.87 °C pour le cas 1, 44.3 °C pour le cas 2 et 40.2 °C pour le cas 3 lorsque les systèmes sont en plein régime de fonctionnement. Il peut être remarqué que la température de l'air diminue dans le sens de l'écoulement du fluide dans les canaux (OY) car celui-ci cède une quantité de sa chaleur au plafond qui sera gagnée après un certain temps, par l'air de la chambre. A la sortie des canaux, l'air est injecté au côté nord de la chambre avec une température maximale de 29°C pour le cas 1, de 26.7°C pour le cas 2 et de 25.5°C pour le cas 3.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.41. Variation temporelle de la température de l'air dans les canaux en différentes mailles (cas 1, 2 et 3)

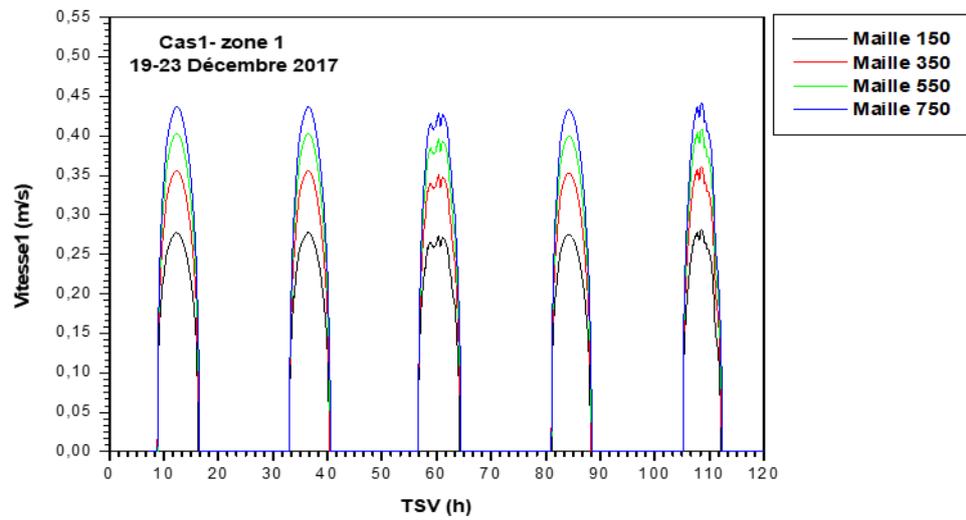
#### IV.4.7. Vitesse de l'air dans la cheminée solaire

Les figures IV.42, IV.43 et IV.44 illustrent les variations temporelles de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire des systèmes correspondants respectivement aux cas 1, 2 et 3.

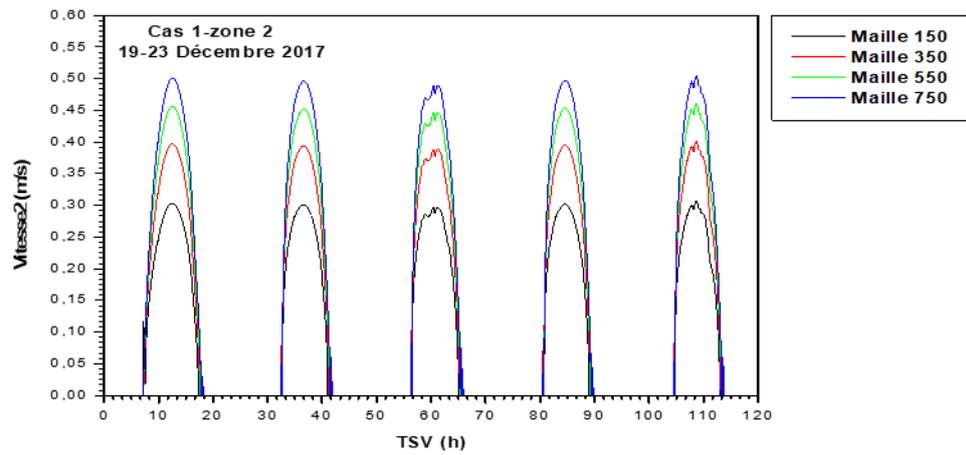
L'examen des courbes des figures précitées montre que la vitesse de l'air dans les deux zones de la cheminée solaire pour les trois cas augmente graduellement avec le nombre de maille dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur où les plus grandes vitesses règnent en haut de la cheminée solaire (maille 750).

Nous pouvons également remarquer que la vitesse de l'air dans la zone 2 de la cheminée solaire (située entre l'absorbeur et le mur sud) est plus grande que celle dans la zone 1 (entre la vitre et l'absorbeur).

Un tel comportement s'explique par la relation entre la température de l'air et sa vitesse d'écoulement (l'air devient d'autant moins dense et donc plus rapide que celui-ci s'échauffe d'autant plus)

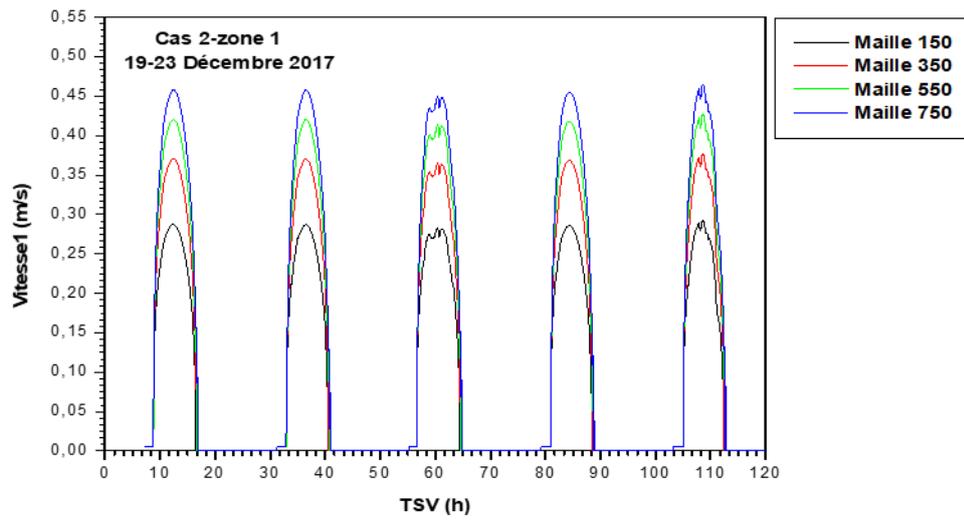


(a)

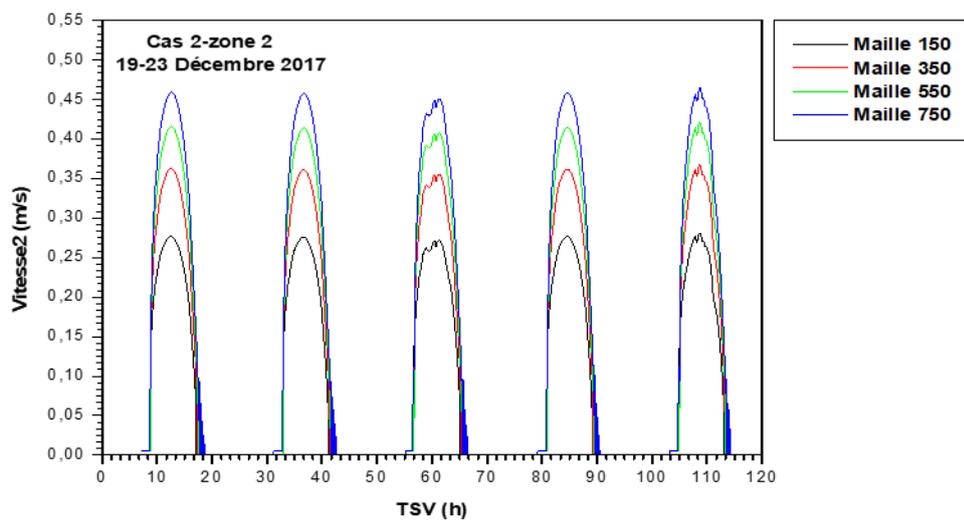


(b)

Figure IV.42. Variation temporelle de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire (cas 1)

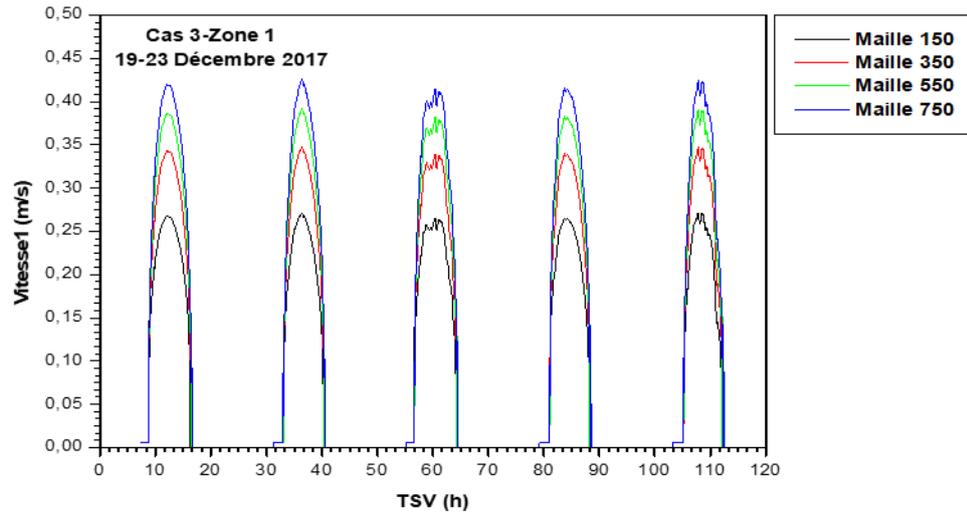


(a)

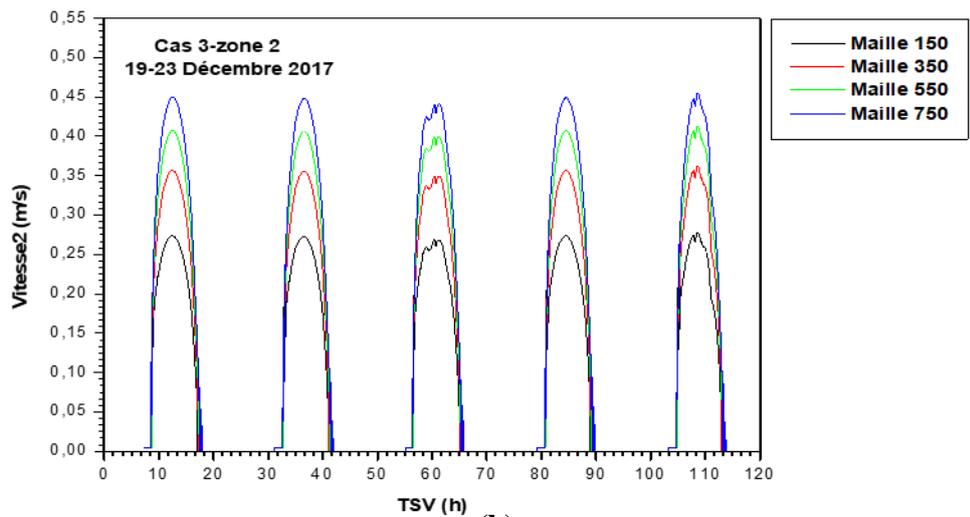


(b)

Figure IV.43. Variation temporelle de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire (cas 2)



(a)



(b)

Figure IV.44. Variation temporelle de la vitesse de l'air dans la cheminée solaire (cas 3)

#### IV.4.8. Vitesse de l'air à la sortie de la cheminée solaire

L'évolution temporelle de la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée solaire pour les trois configurations du système considérées (cas 1, 2 et 3) est illustrée par la figure IV.45. L'examen des différentes courbes permet de noter que la vitesse de l'air qui peut atteindre, à la sortie de la chemine solaire, la valeur de 0.472 m/s est plus importante dans le cas 1 que dans les deux cas 2 et 3, dont les valeurs sont respectivement 0.464 m/s (assez proche de celle du cas 1) et de 0.439 m/s respectivement.

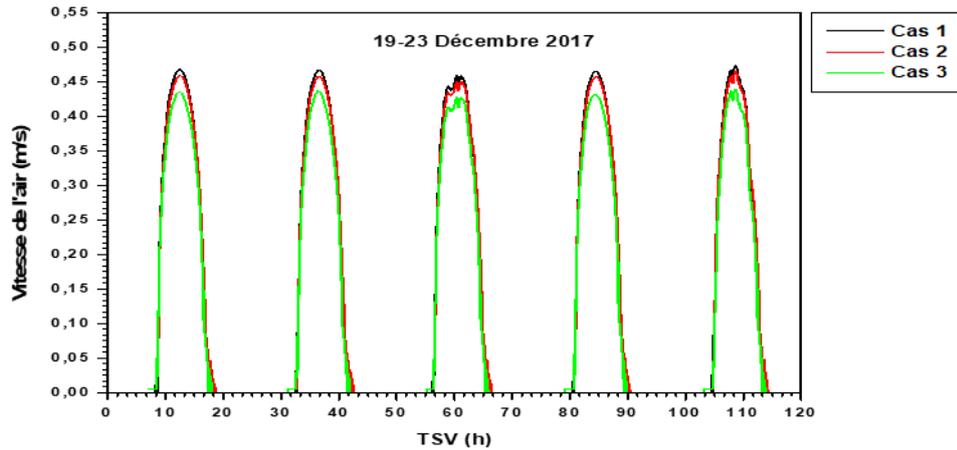


Figure IV. 45. Variation temporelle de la vitesse de l'air à la sortie de la cheminée solaire

#### IV.4.9. Rendement électrique

Les courbes de la figure IV.46 représentent l'évolution temporelle des rendements électriques des cellules PV qui se situent en bas et en haut de la vitre PV, (mailles 38 et 713) dans les cas 2 et 3.

Les valeurs maximale et minimale du rendement électrique sont de 0.155 et 0.121 dans le cas 2 et de 0.156 et 0.131 dans le cas 3. Cette différence est induite par la température des PV qui est plus grande dans le cas 2, ce qui conduit systématiquement à la diminution du rendement électrique.

A cause de la température des cellules PV qui croit dans le sens de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire, le rendement électrique des éléments PV qui se trouvent en bas de la vitre est meilleur que celui des cellules qui sont placées en haut de celle-ci (cas 2 et 3).

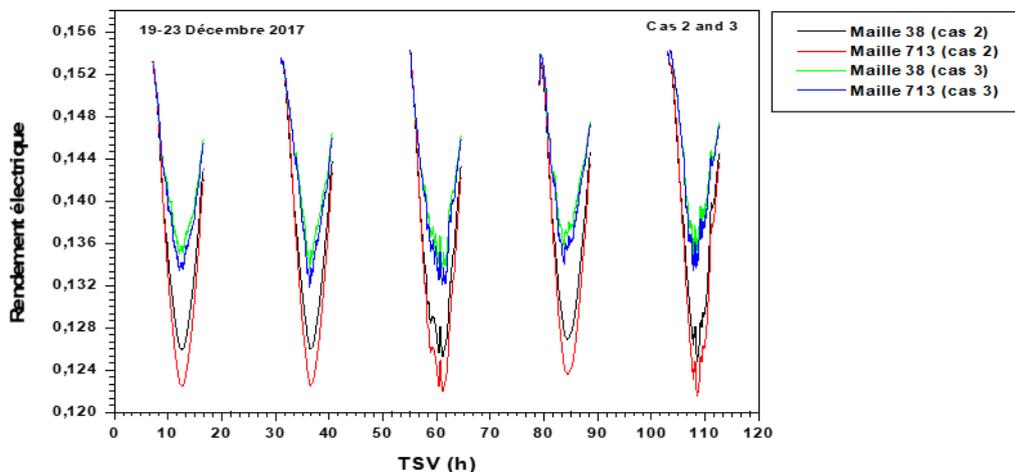


Figure. IV.46. Variation temporelle du rendement électrique des cellules PV dans les cas 2 et 3

#### IV.4.10. La puissance électrique

L'évolution temporelle de la puissance électrique générée par les cellules PV situées en bas et en haut de la vitre PV (mailles 38 et 713) dans les cas 2 et 3 est représentée sur la figure IV.47.

Il est aisé de remarquer que la puissance électrique générée par les cellules PV du système PV/B-C (cas 3) est supérieure à celle du système B-C avec une vitre PV vitrée (cas 2) avec des maxima respectifs de  $45.58 \text{ W/m}^2$  et de  $48.87 \text{ W/m}^2$ . Cette différence entre les puissances est induite par la température des PV qui est plus grande dans le cas 2.

En outre, nous pouvons remarquer que la puissance électrique générée au niveau de la maille 38 (en bas de la vitre PV) est supérieure à celle générée au niveau de la maille 713 (en haut de la vitre PV) dans les deux cas et ce à cause des températures des cellules PV qui sont plus importantes en haut de la vitre PV.

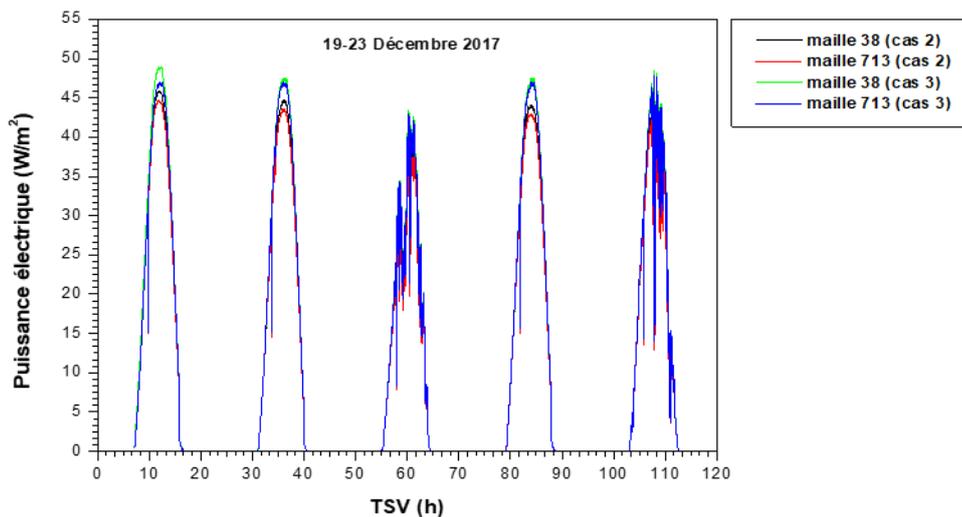


Figure. IV.47. Evolution temporelle de la puissance électrique générée par les cellules PV (cas 2 et 3).

## **Conclusion générale et recommandations**

## Conclusion générale et recommandations

---

Le recours à l'énergie solaire pour diminuer la consommation des énergies fossiles dans le bâtiment et réduire leur impact environnemental est, à l'heure actuelle, une solution intéressante.

C'est dans cette optique que nous avons mené ce travail de thèse dont les objectifs sont multiples. En premier lieu, une étude paramétrique de l'enveloppe de deux types de bâtiment à forte et faible inerties thermiques a été entreprise.

La tache solaire qui, représente un élément essentiel à inclure impérativement dans le bilan thermique de tout local pour avoir des résultats plus précis et fiables a aussi été étudiée d'une manière détaillée.

Nous avons également proposé deux nouvelles configurations du système Barra-Costantini conventionnel, qui n'a connu aucune modification depuis sa proposition vers la fin des années 70, pour améliorer ces performances énergétiques. La première modification consiste au remplacement de la vitre ordinaire par une vitre PV. Pour la seconde, il s'agit de substituer la vitre simple par une vitre PV vitrée. À l'heure actuelle, la technologie des vitres PV semi-transparentes est, très intéressante.

Afin de bien mener l'étude numérique des systèmes proposés, qui représente l'étape initiale et essentielle de tout travail de conception, des modèles mathématiques ont été établis. Les équations de transfert thermique obtenues ont été discrétisées par la méthode des différences finies puis résolues par la méthode de Gauss-Seidel. Les paramètres d'entrée des codes de calcul regroupent les paramètres géométriques des systèmes, leurs caractéristiques de construction ainsi que les conditions climatiques du site de Ksar Challala relatives à cinq jours successifs pendant les mois de Mars, Juin et Décembre 2017.

Afin d'examiner le comportement général du bâtiment, notre attention a porté sur l'étude de son enveloppe. Il a été observé que, durant le printemps et l'été, c'est le toit qui reçoit le maximum de la puissance solaire tandis qu'en hiver c'est le mur sud qui en reçoit le plus avec des maxima respectifs de  $965\text{W/m}^2$ ,  $1094\text{W/m}^2$  et  $515\text{W/m}^2$ .

Par ailleurs, nos résultats de simulation ont montré que, durant les trois saisons, les profils de température de l'air d'un bâtiment à faible inertie thermique sont intimement liés à celui de la température ambiante, à l'opposé d'un bâtiment à forte inertie.

L'impact de l'orientation de ces deux types de bâtiments a aussi été mis au clair par le calcul de la température de l'air relative à chaque orientation. Nous avons pu démontrer que l'orientation vers le sud est la meilleure dans les deux cas durant le printemps tandis que l'orientation vers le nord est la plus défavorable.

En été, dans le cas d'un bâtiment à faible inertie thermique, il est conseillé de choisir l'orientation vers le nord car elle permet d'avoir les plus faibles températures de l'air contrairement aux orientations vers l'est et l'ouest. Si le bâtiment est passif, l'orientation n'a quasiment aucun impact sur la température de l'air interne où nous avons trouvé un écart de  $0.12^\circ\text{C}$  entre les différentes orientations.

## Conclusion générale et recommandations

---

Durant la période hivernale, il a été prouvé que l'orientation vers le sud permet d'avoir les plus grandes températures de l'air dans les deux bâtiments, et sera donc privilégiée durant les périodes froides.

Vu l'importance des apports internes, une partie importante dans cette recherche leurs a été consacrée. Les résultats obtenus montrent clairement que l'augmentation de la surface de la fenêtre de  $1 \text{ m}^2$  à  $2 \text{ m}^2$ , pendant la saison printanière, permet d'avoir un taux de croissance de la surface de la tache solaire de 214%, 274% et 273% respectivement sur le plancher, le mur est et sur le mur ouest. En été, le pourcentage du taux de croissance sur le mur ouest est très important. Il a augmenté de 696% pour une fenêtre de  $2 \text{ m}^2$  par rapport à la surface unité. Ce pourcentage est de 265% et 636% pour le plancher et le mur est respectivement.

Durant l'hiver, où le soleil est caractérisé par une hauteur relativement basse et une course courte, toutes les parois internes sont touchées par le rayonnement solaire. Les pourcentages des taux de croissance de la surface de la tache solaire pour une fenêtre de  $2 \text{ m}^2$  par rapport à la surface unité sont respectivement de 190%, 233%, 257% et 359% pour le plancher, les murs est, ouest et nord.

Pour compléter l'étude de la tache solaire, l'impact de sa prise en compte dans le bilan thermique de deux types de bâtiment (à forte et faible inerties thermiques) a été examiné. Il a été révélé que, durant le printemps, l'écart entre la température de l'air avec et sans prise en considération des apports internes est de  $0.15^\circ\text{C}$  dans le cas d'un bâtiment passif et de  $5.19^\circ\text{C}$  si le bâtiment est faiblement inertiel.

Par ailleurs, il est apparu qu'en été et en hiver, le bilan thermique d'un bâtiment à forte inertie thermique est quasiment inchangé avec la prise en compte de la tache solaire. En effet, la température de l'air n'a augmenté que de  $0.03^\circ\text{C}$  pendant l'été et  $0.06^\circ\text{C}$  durant l'hiver. Ce qui n'est pas le cas du bâtiment à faible inertie où la température de l'air a considérablement augmenté de  $7.1^\circ\text{C}$  pendant l'hiver et de  $1^\circ\text{C}$  pendant l'été.

Pour mettre en évidence la variation des performances énergétiques de chaque système (B-C classique, PV/B-C et B-C avec vitre PV vitrée), une étude a été menée.

Les résultats de simulation ont montré que la température de la vitre ordinaire varie spatialement dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur. Dans le cas de la vitre PV (cas 2 et 3), il a été noté que la température des éléments avec PV est nettement supérieure à celle des éléments sans PV.

Quant à la température de l'air à la sortie de la cheminée solaire, elle est de  $45.9^\circ\text{C}$  dans le cas 1 et respectivement de  $44.3^\circ\text{C}$  et de  $40.2^\circ\text{C}$  dans les cas 2 et 3.

Par ailleurs, la température de l'air interne dans les chambres sont proches les unes des autres, atteignant des valeurs de  $22.9^\circ\text{C}$ ,  $22.6^\circ\text{C}$  et  $21.6^\circ\text{C}$  respectivement dans les cas 1, 2 et 3.

## Conclusion générale et recommandations

---

Les performances électriques des systèmes PV/B-C et B-C avec vitre PV vitrée ont également été examinées. Il est apparu que le rendement électrique des cellules PV dans le cas 2 est bien inférieur à celui du cas 3, avec une baisse de 16.02 %. En outre, la puissance électrique générée par les cellules PV dans le cas 2 est légèrement plus faible que celle du cas 3 avec des maximas respectifs de 45.58 W/m<sup>2</sup> et 48.87 W/m<sup>2</sup>.

Les résultats obtenus ont conduit aux conclusions suivantes :

- Le choix de la meilleure orientation du bâtiment doit se faire minutieusement à la base d'une étude préalable de la température de l'air et de la consommation d'énergie.
- La prise en considération de la tache solaire dans la modélisation du bâtiment est un élément essentiel.
- L'utilisation d'une vitre PV vitrée à la place d'une vitre simple dans le système B-C permet d'obtenir une température de l'air interne très proche de celle obtenue par le système B-C classique avec un écart de 0.3 °C seulement. Ce système permet de chauffer les locaux et de produire de l'électricité simultanément. Ainsi, il est recommandé de choisir cette configuration pour une amélioration efficace des performances du système Barra-Costantini.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

- [1] <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>
- [2] O.A. Barra, E. Pugliese Carratelli, « A theoretical study of laminar free convection in 1-D solar induced flows », *Solar Energy*, vol. 23, pp. 211–215, 1979.
- [3] L. Buzzoni, R. Dall’Olio, M. Spigab, « Energy analysis of a passive solar system », *Rev. Gin. Therm. Vol. 37*, pp. 411–416, 1998.
- [4] T. Güney, « Solar energy, governance and CO2 emissions », *Renewable Energy*, Vol. 184, PP. 791-798, 2022.
- [5] S. Saadi, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d’un capteur solaire plan », mémoire de magister, Université Constantine I, frères Mentouri, 2010.
- [6] J. Yu , H. B. Saydaliev, Z. Liu, R. Nazar, S. Ali, « The asymmetric nexus of solar energy and environmental quality: Evidence from Top-10 solar energy-consuming countries », *Energy*, Vol.247, 2022.
- [7] J. Bonal, P. Rossetti, « énergies alternatives », omniscience, 2007.
- [8] M. Stanislas, N. B. Brou, « Modélisation et commande d’un système de cogénération utilisant des énergies renouvelables pour le bâtiment », thèse de doctorat, Université de Paris-Saclay, 2015.
- [9] Agence Internationale de l’énergie, « global energy review 2020, the impacts of the covid-19 on global energy demand and CO<sub>2</sub> emissions », 2020.
- [10] Ministère de l’énergie, « Bilan énergétique national 2019 », édition 2020.
- [11] N. Benalouache, « L’énergie solaire pour la production d’électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d’échelles », thèse de doctorat, Université Aix-Marseille-Université de Sfax, 2017.
- [12] Agence internationale pour les énergies renouvelables, « La transition énergétique mondiale : une feuille de route pour 2050, Résumé », 2018.
- [13] [http://cemagas.org/wp-content/uploads/2012/12/Programme\\_ENR\\_et\\_efficacite\\_energetique\\_fr.pdf](http://cemagas.org/wp-content/uploads/2012/12/Programme_ENR_et_efficacite_energetique_fr.pdf).
- [14] [http://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2020/12/Rapport\\_CEREFÉ\\_2020\\_FINAL-30-11-2020.pdf](http://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2020/12/Rapport_CEREFÉ_2020_FINAL-30-11-2020.pdf).

## Références bibliographiques

---

- [15] O. Saadatian, K. Sopian, C. H. Lim, N. Asim, M. Y. Sulaiman, «Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 6340–6351, 2012.
- [16] S. Pinard, « Etude d'une paroi ventilée multifonctionnelle adaptée à la rénovation thermique des bâtiments par l'intérieur », thèse de doctorat Université, de Grenoble, 2012.
- [17] J. Shen, S. Lassue, L. Zalewski, D. Huang, « Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls», *Energy and Buildings*, vol. 39, pp. 962–974, 2007.
- [18] J. K. Nayak, «Thermal performance of a water wall», *Building and environment*, Vol. 22 N°1, pp. 83 – 90, 1987.
- [19] S. Menhoudj, D. Sifodil et A. Mokhtari, « Etude expérimentale d'un système solaire actif-PSD», *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15, N°3, pp. 479 – 488, 2012.
- [20] J. K. Nayak, «Thermal performance of a water wall», *Building and environment*, Vol. 22, N°1, pp. 83 –90, 1987.
- [21] N. Madjoudj, K. Imessad, «Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique», *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 19, N° 4, pp. 83 - 90, 1987.
- [22] J. Borderon, « Intégration des matériaux à changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique », thèse de doctorat, Université de Lyon, 2012.
- [23] P. Sdringola, S. Proietti, U. Desideri, G. Giombini, «Thermo-fluid dynamic modelling and simulation of a bioclimatic solar greenhouse with self-cleaning and photovoltaic glasses», *Energy and buildings*, vol. 68, pp. 183–195, 2014.
- [24] A. A. Sfeir, «Ingénierie des systèmes solaires, application à l'habitat », technique et documentation, 1981.
- [25] G. Cammarata, L. Marietta, F. Patane, F. Patania, « Passive cooling of buildings in warm climates by means of the Barra-Costantini system: thermal dynamics and performance evaluations », *The First International PLEA Conference Bermuda: Passive and Low Energy Alternatives I*, pp13-15, 13-15 Septembre 1982.

## Références bibliographiques

---

- [26] K. Imessad, N. Ait Messaoudene, M. Belhamel, « Performances of the Barra-Costantini passive heating system under Algerian climate conditions », *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 357–367, 2004.
- [27] S. Saadi, A. Chaker, M. Boubekri, « Study of two new configurations of the Barra-Costantini system with sunspot modelling », *Applied thermal engineering*, vol. 173, 2020.
- [28] K. N. Rhee, B. W. Olesen, K. W. Kim, « Ten questions about radiant heating and cooling systems », *Building and environment*, vol.112, pp. 367–381, 2017.
- [29] J. Romanía, A. de Graciab, L. F. Cabezaa, « Simulation and control of thermally activated building systems (TABS) », *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 22–42, 2016.
- [30] K. Kapsis, A. K. Athienitis, « A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings », *Solar Energy*, vol. 115, pp.120–132, 2015.
- [31] R. Gao, A. Li, O. Zhang, H. Zhang, « Comparison of indoor air temperatures of different under-floor heating pipe layouts », *Energy conversion and management*, vol. 52, pp. 1295-1304, 2010.
- [32] <https://www.laprimenenergie.fr/les-travaux/le-chauffage/le-plafond-chauffant-hydraulique>
- [33] M. R. Safizadeh, L. Watly, A. Wagner, «Evaluation of Radiant Heating Ceiling Based on Energy and Thermal Comfort Criteria, Part II: A Numerical Study», *Energies*, vol. 12, pp.1-24, 2019.
- [34] [https://switzerland.giacomini.com/sites/giacomini.ch/files/Syst%C3%A8mes\\_plafond\\_rayonnant\\_FR0004.pdf](https://switzerland.giacomini.com/sites/giacomini.ch/files/Syst%C3%A8mes_plafond_rayonnant_FR0004.pdf)
- [35] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/le-chauffage/murs-chauffants>.
- [36] J. Romaní, L. F. Cabeza, A. de Gracia, « Development and experimental validation of a transient 2D numeric model for radiant walls », *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 859-870, 2018.
- [37] J. J. Bezan, « Les systèmes solaires combinés : méthode et analyse des résultats obtenus par 20 suivis sur site », 13<sup>èmes</sup> Journées Internationales de Thermique, Albi, France 28-30 Août 2007.

## Références bibliographiques

---

- [38] K. Imessad, R. Kharchi, S. Bensalem, A. Chenak, A. Hamidat, «Etude expérimentale d'un système solaire combiné pour le chauffage par plancher », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 18, N°3, pp. 399 – 405, 2015.
- [39] I. Zeghib, A. Chaker, « Efficiency of a Solar Hydronic Space Heating System under the Algerian Climate», Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 6, pp. 1274-1279, 2016.
- [40] J. Cronembergera, M. A. Corpasa, I. Cerónb, E. Caamaño-Martínc, S. Vega Sánchez, « BIPV technology application: Highlighting advances, tendencies and solutions through Solar Decathlon Europe houses», Energy and Buildings, vol. 83, pp. 44–56, 2014.
- [41] G.N. Tiwari, R.K. Mishra, S.C. Solanki, « Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling », Applied Energy, vol. 88, pp. 2287–2304, 2011.
- [42] <https://www.test-achats.be/maison-energie/energie-renouvelable/dossier/panneaux-photovoltaiques-et-chauffage-electrique-pas-le-duo-gagnant-que-lon-croit/elements-a-considerer>.
- [43] G. Yu, H. Yang, Z. Yan, M. K. Ansah, « A review of designs and performance of façade-based building integrated photovoltaic-thermal (BIPVT) systems», Applied thermal engineering, vol. 182, 2021.
- [44] J. Jie, Y. Hua, H. Wei, P. Gang, L. Jianping, J. Bin, « Modeling of a novel Trombe wall with PV cells», Building and Environment, vol. 42, pp. 1544–1552, 2007.
- [45] J. Jie, Y. Hua, P. Gang, J. Bin, H. Wei, « Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan», Building and Environment, vol. 42, pp. 3529–3539, 2007.
- [46] K. Vats, V. Tomar, G. N. Tiwari, « Effect of packing factor on the performance of a building integrated semitransparent photovoltaic thermal (BISPVT) system with air duct», Energy and Buildings, vol. 53, pp. 159-169, 2012.
- [47] U. Acar, O. Kaska, N. Tokgoz, « Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage for residential buildings in Turkey », Journal of building engineering, vol. 42, pp. 1-14, 2021.
- [48] C. Batier, « Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen», thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2016.
- [49] ASHRAE standard 55-2004, « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy ».

## Références bibliographiques

---

- [50] M. Bonte, « Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment », thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2014.
- [51] M. Mazari, « Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'Architecture de Tamda (Tizi-Ouzou) », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [52] P. Noël, « Évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de la température de consigne des thermostats en mode chauffage à l'aide de données mesurées in situ et de simulations », mémoire, Ecole de technologie supérieure, Montréal, 2018.
- [53] B. Moujalled, « Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés », thèse de doctorat, Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [54] S. Benharkat, D. Rouag-Saffidine, « Approche adaptative du confort thermique dans les espaces d'enseignement universitaire à Constantine (Algérie) », Nature & Technologie. A-Sciences fondamentales et Engineering, Vol. 14, PP.19 – 28, 2016.
- [55] Journal officiel de la république algérienne N° 51, loi 99-09 du 15 Rabie Ethani 1420 correspondant au 28 Juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie.
- [56] Journal officiel de la république algérienne N° 25, décret exécutif N°2000-99 du 19 Moharram 1421 correspondant au 24 Avril 2000 portant réglementation thermique des bâtiments neufs.
- [57] K. Imessad, R. Kharchi, S. Bouchaib, A. Chenak, S. Hakem, A. Hamidat, S. Larbiyoucef, S. Sami, F. Sahnoune, « Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 20, N°4, pp. 591 – 597, 2017.
- [58] L. Mohammed Cherif, « Modélisation du comportement thermique d'un bâtiment équipé de système combiné, capteur solaire et puits canadien », thèse de doctorat, Université Djilali Liabès, Sidi Bel Abbés, 2018.
- [59] Document Technique Réglementaire, D.T.R C3.2/4, « Réglementation Thermique du Bâtiments », Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment, 2016.
- [60] Arthur Ah-Nieme, « Étude du vitrage thermochrome soumis au rayonnement solaire en physique du bâtiment », thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2020.
- [61] C. Tian, T. Chen, H. Yang, T. Chung, « A generalized window energy rating system for typical office buildings », Solar Energy, vol. 84, pp. 1232–1243, 2010.

## Références bibliographiques

---

- [62] F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, S. Lassue, « Comparaison de deux modèles numériques d'une fenêtre pariéto-dynamique de type paziaud en vue d'une simulation en thermique du bâtiment », XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 Juin 2012.
- [63] F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, S. Lassue, « Modeling a triple-glazed supply-air window », *Building and Environment*, vol. 84, pp. 1-9, 2015.
- [64] T. Catalina, J. Virgone, J. Roux, E. Blanco, « Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation », Congrès IBPSA, Lyon, France, Novembre 2008.
- [65] M. Aburasa, V. Soebartoa, T. Williamsona, R. Liangc, H. Ebendorff-Heidepriemb, Y. Wu, « Thermochromic smart window technologies for building application: A review », *Applied Energy*, vol. 255, pp. 1-21, 2019.
- [66] M. L. Persson, A. Roos, M. Wall, « Influence of window size on the energy balance of low energy houses, *Energy and Buildings* », vol. 38, pp. 181–188, 2006.
- [67] K. A. R. Ismail, J. R. Henriquez, « Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 461–475, 2005.
- [68] C. Flory-Celini, « Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant », thèse de doctorat, Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
- [69] E. S. D. Rezaei, S. Shannigrahi, S. Ramakrishna, « A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment », *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 159, pp. 26–51, 2017.
- [70] F.A.F. Gloriant, « Caractérisation et modélisation d'une fenêtre pariéto-dynamique à trois vitrages », thèse de doctorat, Université d'Artois, 2014.
- [71] E. Cuce, S. B. Riffat, « A state-of-the-art review on innovative glazing technologies », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 695–714, 2015.
- [72] W.J. Hee, M.A. Alghoul, B. Bakhtyar, OmKalthum Elayeb, M.A. Shameri, M.S. Alrubaih, K. Sopian, « The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 323–343, 2015.
- [73] M.H. Shakouri, M.M. Tahmasebia, S. Banihashemib. « Assessment of the variation impacts of window on energy consumption and carbon footprint ». *The International Conference on Green buildings and sustainable cities, Procedia engineering*, pp. 820-828, 2011.

## Références bibliographiques

---

- [74] O. Kaynakli, « A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness », *Renewable Energy*, Vol.33, pp.1164-1172, 2008.
- [75] K. Khaled, U. Berardi, « Current and future coating technologies for architectural glazing applications », *Energy & Buildings*, vol. 244, pp. 1–33, 2021.
- [76] M. Belalia, « Etude de systèmes macromoléculaires complexes par spectrométrie vibrationnelle », thèse de doctorat, Université d'Oran, 2007.
- [77] S. Park, J. W. Hong, « Polymer dispersed liquid crystal film for variable-transparency glazing », *Thin Solid Films*, vol. 517, pp. 3183–3186, 2009.
- [78] A. Hemaida, A. Ghosh, S. Sundaram, T. K. Mallick, « Evaluation of thermal performance for a smart switchable adaptive polymer dispersed liquid crystal (PDLC) glazing », *Solar Energy*, vol. 195, pp. 185–193, 2020.
- [79] A. Ghosh, B. Norton, A. Duffy, « Measured overall heat transfer coefficient of a suspended particle device switchable glazing », *Applied Energy*, vol. 159, pp. 362–369, 2015.
- [80] J. Abreu, J. M. Soon, « electrochromic glazing », *L'actualité chimique*, vol. 369, pp. 63-64, 2012.
- [81] C. Brigouleix, « Elaboration et étude de couches minces électrochromes déposées par pulvérisation cathodique Mise en œuvre de démonstrateurs sur substrat flexible », thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2003.
- [82] B. Cormary, « Photocommutation à l'état solide dans les complexes de ruthénium à ligand nitrosyle. Vers la réalisation de matériaux composites photochromes », thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [83] V. Wittwer, M. Datz, J. Ell, A. Georg, W. Graf, G. Walze, « Gasochromic windows », *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 84, pp. 305–314, 2004.
- [84] M. Casini, « Active dynamic windows for buildings: A review », *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 923-934, 2018.
- [85] W. Feng, Li. Zou, G. Gao, G. Wu, J. Shen, W. Li, « Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis », *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol.144, pp. 316–323, 2016.
- [86] M. Arulprakasajothi, B. Susanth, K. Naveen Kumar, A. Madan Mohan Reddy, « Thermal management on external surfaces by thermochromic materials », *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 4666-4670, 2021.

## Références bibliographiques

---

- [87] Y. Sun, R. Wilson, H. Liu, Y. Wu, « Numerical investigation of a smart window system with thermotropic Parallel Slat Transparent Insulation Material for building energy conservation and daylight autonomy », *Building and Environment*, vol. 203, pp. 1-18, 2021.
- [88] K. Resch, G. M. Wallner, R. Hausner, « Phase separated thermotropic layers based on UV cured acrylate resins – Effect of material formulation on overheating protection properties and application in a solar collector », *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1689–1697, 2009.
- [89] F. Goiaa, M. Perinoa, M. Haaseb, « A numerical model to evaluate the thermal behaviour of PCM glazing system configurations », *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 141–153, 2012.
- [90] S. Li, K. Zhong, Y. Zhou, X. Zhang, « Comparative study on the dynamic heat transfer characteristics of PCM-filled glass window and hollow glass window », *Energy and buildings*, Vol. 85, PP. 483 – 492, 2014.
- [91] G. Gorgolis, D. Karamanis, « Solar energy materials for glazing technologies », *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 144, pp. 559–578, 2016.
- [92] B. Nghana, F. Tariku, « Phase change material's (PCM) impacts on the energy performance and thermal comfort of buildings in a mild climate », *Building and Environment*, vol. 99, pp. 221-238, 2016.
- [93] Y. Sun, R. Wilson, Y. Wu, « A Review of Transparent Insulation Material (TIM) for building energy saving and daylight comfort », *Applied Energy*, vol. 226, pp. 713-729, 2018.
- [94] Y. Sun, Y. Wu, R. Wilson, S. Sun, « Thermal evaluation of a double glazing façade system with integrated Parallel Slat Transparent Insulation Material (PS-TIM) », *Building and Environment*, vol. 105, pp. 69-81, 2016.
- [95] <https://www.isofen-68.fr/a-quoi-sert-gaz-argon-fenetre/>.
- [96] E. Cuce, P. M. Cuce, « Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 1345–1357, 2016.
- [97] A. K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, « Exergetic analysis of building integrated semitransparent photovoltaic module in clear sky condition at Bhopal India », *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 8, pp. 142–151, 2016.
- [98] Tady Y.Y. Fung, H. Yang, « Study on thermal performance of semi-transparent building-integrated photovoltaic glazings », *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 341–350, 2008.

## Références bibliographiques

---

- [99] S. Dautin, « Réduction de modèles thermiques de bâtiments : amélioration des techniques par modélisation de sollicitations météorologiques », thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1997.
- [100] Y. Boukhris, L. Gharbi, N. Ghrab-Morcos, « Coupling the building simulation tool ZAER with a sunspot model. Case study in Tunis », *Energy and Buildings*, vol. 70, 2014, pp. 1–14.
- [101] A. Rodler, J. Virgone, J. J. Roux, « Sun Patch Impact for the Evaluation of Operative Temperatures Distributions », *Study of Civil Engineering and Architecture*, vol. 3, pp. 1-5, 2014.
- [102] P. Tittlein, « Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation », thèse de doctorat, Université de Savoie, 2008.
- [103] D. Li , Y. Zheng, C. Liu, H. Qi, X. Liu, « Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters », *Sustainable Cities and Society*, vol. 22, pp. 86–93, 2016.
- [104] S. B. Sadineni, S. Madala, R. F. Boehm, « Passive building energy savings: A review of building envelope components », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3617–3631, 2011.
- [105] J. Kosny, K. Biswas, W. Miller, S. Kriner, « Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink », *Solar Energy*, vol. 86, pp. 2504–2514, 2012.
- [106] M. Hadavand, M. Yaghoubi, H. Emdad, « Thermal analysis of vaulted roofs », *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 265–275, 2008.
- [107] K. A. Faghih, M. N. Bahadori, « Solar radiation on domed roofs », *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 1238–1245, 2009.
- [108] I. Ali, G.M. Shafiullah, T. Urmee, « A preliminary feasibility of roof-mounted solar PV systems in the Maldives », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 83, pp. 18-32, 2018.
- [109] J. Schardt, H. T. Heesen, « Performance of roof-top PV systems in selected European countries from 2012 to 2019 », *Solar Energy*, Vol. 217, pp. 235-244, 2021.

## Références bibliographiques

---

- [110] J. Kocí, J. Fort, R. Cerný, « Energy efficiency of latent heat storage systems in residential buildings: Coupled effects of wall assembly and climatic conditions », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 132, 2020.
- [111] D. Medjelekh, « Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 13 N°2, pp. 265 – 273, 2010.
- [112] S.M.A. Bekkouche , T. Benouaz, A. Cheknane , « Etude par simulation de l'effet d'isolation thermique d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10 N°2, pp. 281 – 292, 2007.
- [113] S. Bellara, « Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective. Cas de la nouvelle ville Ali Mendjeli Constantine », mémoire de magister, Université de Constantine 1, 2005.
- [114] F.H. Abanda, L. Byers, « An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling) », *Energy*, vol. 97, pp. 517-527, 2016.
- [115] <https://sites.google.com/site/maisonaenergiepositive/conception-bioclimatique/forme-et-orientation-du-batiment>
- [116] I. Andrića, A. Pinaa, P. Ferrãoa, J. Fournierb., B. Lacarrièrec, O. Le Corr, « The Significance of the Orientation on the Overall buildings Thermal Performance-Case Study in Australia », *CEU 2018 Applied Energy Symposium and Forum 2018: Low carbon cities and urban energy systems*, Shanghai, China, 5–7 June 2018.
- [117] S. Bellara, S. Abdou, « Optimal orientation for housing with low energy profile in a semi arid climate », *2<sup>nd</sup> PALENC Conference and 28<sup>th</sup> AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21<sup>st</sup> Century*, Crete island, Greece, Septembre 2007.
- [118] [file:///coefficient forme batiment Izard V1.pdf](file:///coefficient%20forme%20batiment%20Izard%20V1.pdf)
- [119] A. Zhang, R. Bokel, A. v. den Dobbelsteen, Y. Sun, Q. Huang, Q. Zhang, « The Effect of Geometry Parameters on Energy and Thermal Performance of School Buildings in Cold Climates of China », *MDPI, Sustainability*, vol. 10, pp. 1-19, 2017.
- [120] J. Li, B. Zheng, K. B. Bedra, Z. Li, X. Chen, « Evaluating the Effect of Window-to-Wall Ratios on Cooling-Energy Demand on a Typical Summer Day », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, pp. 1-13, 2021.

## Références bibliographiques

---

- [121] B. Filliard, « Étude de la possibilité de récupération de chaleur par voie thermodynamique pour la réhabilitation des maisons individuelles », thèse de doctorat, Université de Paris, 2009.
- [122] M. Fekih-Ali, « Faisceaux matriciels appliqués à la modélisation de l'habitat bioclimatique », thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1986.
- [123] M. Woloszyn. Vallon, « Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones- proposition d'une stratégie de résolution du système couplé », thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1999.
- [124] H. Barhoun, « Influence des transferts aérauliques dans les parois sur leurs performances thermiques », thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2006.
- [125] A. Malya, « Contribution à l'étude du transfert des polluants gazeux entre le sol et les environnements intérieurs des bâtiments », thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 2011.
- [126] A. D. Tran Le, « Étude des transferts hygrothermiques dans le béton de chaux et leur application au bâtiment », thèse de doctorat, l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010.
- [127] M. Trocmé, « Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie », thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009.
- [128] H. Bouia, J.J. Roux, C. Teodosiu, « Modélisation de la tache solaire dans une pièce équipée d'un vitrage utilisant un maillage en surface de Delaunay, Proceedings of IBPSA, France, pp. 15–19, 2002.
- [129] A. Trombe, L. Serres, M. Moisson, « Solar Radiation Modelling Solar Radiation Modelling in a Complex Enclosure », *Solar Energy*, pp. 297–307, 1999.
- [130] A. Rodler, « Modélisation dynamique tridimensionnelle avec tache solaire pour la simulation du comportement thermique d'un bâtiment basse consommation », thèse de doctorat, Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL - UMR 5008), 2014.
- [131] A. P. de Almeida Rocha, N. Mendes, R. C. L. F. Oliveira, « Domus method for predicting sunlit areas on interior surfaces », *Ambiente Construído*, Porto Alegre, vol. 18, n. 3, pp. 83-95, 2018.
- [132] A. Kabore, « Modélisation hygrothermique de l'enveloppe du bâtiment avec le matériau de chaux », mémoire, Ecole de technologie supérieure de Montréal, 2020.

## Références bibliographiques

---

- [133] H. Boyer, « Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles », thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 1993.
- [134] N. Lajimi, N. Boukadida, « Numerical study of the thermal behavior of bi-zone buildings», *Comptes rendus physique*, vol.16, pp. 708–720, 2015.
- [135] C. Peng, Z. Wu, « Thermoelectricity analogy method for computing the periodic heat transfer in external building envelopes», *Applied energy*, vol.85, pp. 735–754, 2008.
- [136] F. Munaretto, « Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments », thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014.
- [137] I. Beausoleil-Morrison, « The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces», *Building and Environment*, vol. 37, pp. 791–806, 2002.
- [138] J. J. Roux, « Comportement thermique des bâtiments en régime», Cours 4<sup>ème</sup> année, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, 1999-2000.
- [139] J. J. Bézian, «Thermique des enceintes habitables et énergies solaires», Synthèse des activités de recherche, Université Claude Bernard Lyon 1, 2007.
- [140] T. Defraeye, B. Blocken, J. Carmeliet «Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling», *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 512–522, 2011.
- [141] J.A. Duffie, W.A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes », 4<sup>ème</sup> édition Wiley, New York, 2013.
- [142] X. Faure, « Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique», thèse de doctorat, Université de Joseph Fourier, 2007.
- [143] H. Boyer, J. P. Chabriat, B. Grondion-Perez, C. Tourrand, J. Brauf. « Thermal building simulation and computer generation of nodal models ». *Building and Environment*, vol.31, pp. 207-214, 1996.
- [144] A. Kumar Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, «Exergetic analysis of building integrated Semi transparent photovoltaic module in clear sky condition at Bhopal India», *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 8, pp 142–151, 2016.
- [145] Z. Hu, W. H , J. Ji, D. Hu, S. Lv, H. Chen, Z. Shen. « Comparative study on the annual performance of three types of building integrated photovoltaic (BIPV) Trombe wall system», *Applied Energy*, vol. 194, pp. 81–93, 2017.

## Références bibliographiques

---

- [146] J. Jie, Y. Hua, P. Gang, L. Jianping. « Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage », *Applied Thermal Engineering*, vol.27, pp. 1507–1515, 2007.
- [147] A. Ghosha, N. Sarmahb, S. Sundarama, T.K. Mallicka, « Numerical studies of thermal comfort for semi-transparent building integrated photovoltaic (BIPV)-vacuum glazing system», *Solar Energy*, vol. 190, pp. 608–616, 2019.

# دمج الطاقات المتجددة في المباني

## ملخص

يعتبر استغلال الطاقة الشمسية لتزويد المباني طاقيا طريقة ناجعة من اجل تقليل استهلاك الأحفوري. يندرج العمل المنجز في الأطروحة في هذا السياق.

الهدف من هذا العمل, هو أولا, دراسة مفصلة للبقعة الشمسية مع تفصيل مدى أخذها بعين الاعتبار للنموذج الحراري لنوعين من الأبنية, يمتلك أحدهما عتالة حرارية مرتفعة و الآخر عتالة منخفضة.

قمنا ثانيا باقتراح نموذجين جديدين لنظام التسخين الشمسي بارا-قسطونيني من أجل تحسين فعاليته الطاقوية. قمنا في النموذج الأول باستبدال الغلاف الزجاجي بأخر كهروضوئي شبه شفاف مزجج. أما في النموذج الثاني قمنا باستعمال غلاف كهروضوئي شبه شفاف غير مزجج.

للتأكد من فعالية النظامين المقترحين قمنا بمقارنتهما مع نظام بارا-قسطونيني التقليدي من حيث الفعالية الطاقوية. من اجل الخمس أنظمة المذكورة أعلاه, قمنا بوضع النماذج الرياضية باستعمال طريقتي العقد و التشابه الحراري-الكهربائي كما قمنا بإدماج نموذج البقعة الضوئية في النماذج المقترحة.

للقيام بالحسابات المطلوبة, قمنا بإدخال, في البرامج الموضوعية, كلا من الخصائص الهندسية للأنظمة, الخصائص الفيزيائية-الحرارية لمواد البناء و كذلك الخصائص الجوية لقصر الشلالة (35.10 شمال, 2.19 شرق, 800 م ارتفاع) في الجزائر من أجل خمس أيام متتالية من 19 إلى 23 من شهر مارس, جوان و ديسمبر 2017.

من اجل حل جمل المعادلات المقترحة, اعتمدنا على طريقة غوص-صيدل.

تظهر النتائج التي تحصلنا عليها إن مساحة البقعة الشمسية, زمن تواجدها على الجدران الداخلية و الأرضية و كذلك الطاقة الشمسية المكتسبة من خلال النافذة تتعلق كلها بأبعاد المساحات الزجاجية و كذلك باتجاه المبنى.

وجدنا أيضا انه في المباني التي تمتاز بعتالة حرارية مرتفعة, لا يوجد تأثير كبير لاحتساب مساحة البقعة الشمسية في النموذج الرياضي على عكس المباني ذات العتالة الحرارية المنخفضة.

من خلال النتائج المتعلقة بالنظام ب-ق التقليدي و النظامين المقترحين وجدنا أن درجة حرارة الغرفة المزودة بنظام ب-ق مع لوح كهروضوئي مزجج تساوي تقريبا درجة حرارة الغرفة المسخنة بنظام ب-ق تقليدي ( مع فارق 0.3 م فقط). ومنه يمكننا اعتبار هذا النظام الجديد تحسين فعلي لنظام ب-ق.

و منه نستنتج ان استعمال لوح كهروضوئي شبه شفاف (مزجج أو لا) في نظام ب-ق يسمح لهذا النظام الهجين بتسخين المباني مع إنتاج الكهرباء في ان واحد.

**الكلمات المفتاحية:** نظام بارا- قسطونيني, لوح كهروضوئي, بقعة شمسية, فعالية حرارية, مردد كهربائي

# INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGIES IN BUILDINGS

## Abstract

The use of solar energy to reduce the consumption of fossil fuels in buildings is an interesting solution. This thesis is part of this context.

The objective of this work is, first of all, the detailed study of the sunspot and the estimation of the impact of its taking into account in the modelling of two buildings with weak and strong, thermal inertia. Then, secondly, two modifications which could be made to the Barra-Costantini (B-C) system, to improve its energy performance, can be made. For one, the ordinary glass of the B-C system is substituted by a semi-transparent PV glass and for the other it is replaced by a glassed PV glass.

A comparison between the energy performance of systems, classic B-C, PV/B-C and B-C with a glassed PV glass is carried out.

The mathematical models of the five aforementioned systems are established using the nodal method and the thermoelectric analogy. The sunspot model is included in thermal balances.

To carry out the calculations, the input parameters of the computing codes include, the geometric characteristics of the systems, the thermophysical properties of the building materials and the climatic conditions of the Ksar Challala site (35.10N, 2.19E, altitude 800m) in Algeria, for five successive days of 19-23 of months, March, June and December 2017. The resolution of equations systems is carried out by the iterative method of Gauss-Seidel.

The obtained results show that the sunspot area, its stay time on the walls and internal solar gains are in proportional relation with the dimensions of the window and the orientation of the building. In addition, its consideration in the building model with high thermal inertia is not very significant unlike the weakly inertial building.

In addition, the analysis of the numerical results of the classic B-C system and the two new configurations proposed, leads to note that the air temperature of the B-C system and that of the B-C system with glassed semi-transparent PV glass are almost equal (with a very slight difference of 0.3 ° C). It can therefore be considered that the use of the glassed PV glass is an effective improvement in the performance of the Barra-Costantini system. The introduction of a semi-transparent PV glass (glassed or not) to the B-C system has allowed this hybrid system to be able to heat the interior space while simultaneously producing electricity.

**Keywords:** Barra-Costantini system, PV glass, sunspot, thermal performance, electrical efficiency

## Résumé

Le recours à l'énergie solaire pour réduire la dépendance de la consommation énergétique du bâtiment, des énergies fossiles, est une voie à privilégier. Cette thèse s'inscrit dans ce contexte.

L'objectif de ce travail est, en premier lieu, l'étude détaillée de la tache solaire et l'estimation de l'impact de sa prise en compte dans la modélisation de deux bâtiments à faible et à forte, inerties thermiques. Puis, en second lieu, il s'agira d'examiner deux possibles modifications qui pourraient être apportées au système Barra-Costantini (B-C), pour améliorer ses performances énergétiques. Pour l'une, la vitre ordinaire du système Barra-Costantini est substituée par une vitre PV semi transparente et pour l'autre elle est remplacée par une vitre PV vitrée.

Une comparaison des performances énergétiques des systèmes, B-C classique, PV/B-C et B-C avec une vitre PV vitrée est menée.

Les modèles mathématiques des cinq systèmes susmentionnés sont établis en utilisant la méthode nodale et l'analogie thermoélectrique. Le modèle de la tache solaire est inclus dans les bilans thermiques.

Pour effectuer les calculs, les paramètres d'entrée des codes de calcul incluent, les caractéristiques géométriques des systèmes, les propriétés thermophysiques des matériaux de construction et les conditions climatiques du site de Ksar Challala (35.10N, 2.19E, altitude 800m) en Algérie, pour cinq jours successifs du 19-23 des mois, de Mars, Juin et Décembre 2017. La résolution des systèmes d'équations est réalisée par la méthode itérative de Gauss-Seidel.

Les résultats obtenus montrent que la surface de la tache solaire, son temps de séjour sur les parois et les apports internes sont en relation proportionnelle avec les dimensions de la surface vitrée et l'orientation du bâtiment. De plus sa prise en compte dans le modèle du bâtiment à forte inertie thermique est peu significative contrairement au bâtiment faiblement inertiel.

Par ailleurs, l'analyse des résultats numériques du système B-C classique et des deux nouvelles configurations proposées, conduit à noter que non seulement la température de l'air de la cellule du système B-C doté d'une vitre PV vitrée est quasiment égale (avec seulement un très léger écart de l'ordre de 0.3°C), à celle dans le cas du système B-C, mais que cette configuration est de plus, également génératrice d'électricité. Elle peut donc être considérée comme une amélioration effective des performances du système Barra-Costantini.

L'introduction d'une vitre PV semi transparente (vitrée ou non) au système B-C a ainsi permis à ce système hybride d'être capable de chauffer l'espace intérieur tout en produisant simultanément de l'électricité.

**Mots clés :** système Barra-Costantini, vitre PV, tache solaire, performances thermiques, rendement électrique