

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



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique,
Option : Énergétique

Thème : Etude expérimental d'un mur trombe avec intégration d'un
matériau à changement de phase

Encadré par:

Pr. Mekhlouf Saïd

Réalisé par :

Mr. HESSAS Rachid

Mr. HAMDI Ahmed

Soutenu devant le jury composé de :

Président : Mr. S. BOUDAUD

Examineur: Mr. F. SALHI

Rapporteur : Pr. MEKHLOUF Saïd

Année universitaire 2019/2020

Remercîments

Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail.

*Nos remerciements les plus sincères et respectueux s'adressent à monsieur **S.MEKHLOUF** qui a veillé à l'élaboration de ce travail de recherche et qui a déployé tous ses efforts pour notre réussite, il n'a cessé de nous faire profiter de sa très haute compétence, de ses conseils faisant preuve de qualité noble peu commune, nous tenons à lui témoigner notre gratitude et notre profonde reconnaissance, et nous le remercions pour l'enseignement plein, et sagesse qui nous a toujours dispensé.*

A monsieur le président de jury, qui nous a fait l'honneur de présider le jury, nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance.

A monsieur l'examineur le membre de jury pour le grand honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail et assurer notre soutenance, nous les prions d'accepter tous nos remerciements et l'expression de notre haute considération.

Dédicaces

*Je dédie ce mémoire en premier lieu à mes chers parents :
Aucun mot si sacré soit-il ne suffira à apprécier à sa juste
valeur, le soutien matériel et spirituel, les sacrifices que vous ne
m'avez cessé de déployer.*

*Je vous offre en guise de reconnaissance, ce modeste travail en
vous souhaitant santé, bonheur, et longue vie.*

A toute ma famille

Qui m'ont soutenue et me soutiennent à ce jour.

*Je vous dédie ce travail, en témoignage des liens solides et
intimes qui nous unissent, et pour votre soutien, encouragement,
en vous souhaitant un avenir plein de succès
et de bonheur.*

*A tous mes collègues, et chers amis (es) que sans leur
encouragement ce travail n'aura
Jamais vu le jour.*

Rachid

Dédicaces

*Je dédie ce mémoire en premier lieu à mes chers parents :
Aucun mot si sacré soit-il ne suffira à apprécier à sa juste
valeur, le soutien matériel et spirituel, les sacrifices que vous ne
m'avez cessé de déployer.*

*Je vous offre en guise de reconnaissance, ce modeste travail en
vous souhaitant santé, bonheur, et longue vie.*

Mes frères et mes sœurs :

*Je vous dédie ce travail, en témoignage des liens solides et
intimes qui nous unissent, et pour votre soutien, encouragement,
en vous souhaitant un avenir plein de succès
et de bonheur.*

*A tous mes collègues, et chers amis (es) que sans leur
encouragement ce travail n'aura*

Jamais vu le jour.

*A toute ma famille paternelle soit-elle ou maternelle
qui m'ont soutenue et me soutiennent à ce jour.*

Ahmed

Résumé

Dans le contexte énergétique actuel, l'énergie solaire est l'alternative la plus intéressante et la plus avantageuse. Il importe également de constater qu'une grande partie de l'énergie primaire est consommée dans le secteur du bâtiment, En effet l'énergie solaire constitue une réponse pertinente dans ce secteur, soit pour la production d'électricité, de chaleur utile et même la climatisation.

Ce présent travail et l'évaluation expérimental du comportement thermique d'un mur trombe fabrique en composite argile-paille en lui intégrant un matériau a changement de phase sous forme stabilisé, pour but d'améliorer la masse thermique de ce dernier. Par ailleurs le stockage thermique du mur ce fait par vois sensible et surtout latente.

Nomenclature

Symboles	Signification	Unité
T	Température	K
λ	Longueur d'onde	nm
φ_{st}	flux de chaleur stocké	W
φ_g	flux de chaleur généré	W
φ_e	flux de chaleur entrant	W
φ_s	flux de chaleur sortant	W
Φ	Densité de flux de chaleur	W/m ²
φ	flux de chaleur	W
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
V	Volume	m ³
C _p	Chaleur spécifique	J/ (kg.°C)
t	Temps	S
λ	Conductivité thermique du milieu	W/ (m.°C)
X	Variable d'espace dans la direction du flux	m
S	Air de surface	m ²
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W / (m ² . °C).
σ	Constante de Stefan	W /(m ² .K ⁴)
ε_p	Facteur d'émission de la surface	
Δt	Différence de température entre l'intérieur et l'extérieur	°C
ρC	Chaleur volumique.	Wh/m ³ . °C
m	Débit massique	
a	La diffusivité thermique	m ² /s
b	L'effusivité thermique	J/ (m ⁻² .°C ^{-1/2} .s ^{-1/2})
e	Epaisseur de la paroi	m
Q	Quantité d'énergie stockée	J
m	Masse	kg
H	Enthalpie massique	KJ/kg
C _{sol}	Capacité thermique massique à l'état solide	J/ (kg.K)

C_{liq}	Capacité thermique massique à l'état liquide	J/ (kg.K)
L_f	Chaleur latente de changement de phase	J/ kg
H_{sol}	Enthalpie massique du solide à la température d'équilibre	J/ kg
H_{liq}	Enthalpie massique du liquide à la température d'équilibre	J/ kg
L_f	Variation enthalpie lors du changement de phase	J/ kg

LISTE DES FIGURES

Partie I

Figure I.1 : Vue d'ensemble des ondes électromagnétiques (longueur d'ondes en μm)

Figure I.3 : composantes du rayonnement solaire.

Figure I.4: Schématisation de la répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

Figure I.5: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet.

Figure II.1 : Système et bilan énergétique

Figure II.2 : Schéma du transfert de chaleur conductif

Figure II.3 : Schéma du transfert de chaleur convectif

Figure II.4 : Schéma du transfert de chaleur radiatif

Figure II. 5: Principe de l'expérience de William Herschel

Figure II.6 : Spectre des ondes électromagnétiques (λ en m)

Figure III.1 : Représentation des deux types d'inertie thermique

Figure III.2 : Les ponts thermiques les plus courants

Figure IV.1 : Stockage de chaleur dans un MCP en fonction de la température, cas de la fusion

Figure IV.2 : Évolution temporelle de la température et du flux de chaleur durant la solidification pour un corps pur soumis à une différence de température 1 : phase liquide ; 2 : solidification ; 3 : phase solide.

Figure IV.3 : Organigramme de classification des MCP solide/liquide

Figure IV.4 : MCP macro encapsulé dans un sachet en Polyéthylène (PE)

Figure IV.5 : Types de microcapsules Tiré de (Tyagi et al. 2011)

Figure IV.6: Image MEB de microcapsules de PE-LD - EVA contenant du RT27

Figure IV.7 : MCP sous forme stabilisée

Figure V.1 : Types de systèmes solaires classés selon différents besoins pour le bâtiment

Figure V.2 : Le solaire passif et actif (Reproduit et sous réserve de l'auteur : LIÉTARD et al. 1996)

Figure V.3 : Principes du chauffage solaire passif (Reproduit et sous réserve de l'auteur : Cofaigh et al. 1996)

Figure V.4 : Les différents murs solaires à effet de serre étudiés dans la littérature [V.2].

Figure V.5 : Schéma de principe d'un mur Trombe-Michel.

Partie II

Figure I.1 : réalisation des parois en bois

Figure I.2 : Découpe du contre-plaqué et cadres coupés à 45°

Figure I.3 : Mise en place des panneaux sandwichent

Figure I.4 : la toiture

Figure I.5 : schéma électrique équivalent du plancher et des parois latérales de la chambre

Figure I.6 : schémas électrique équivalent du toit

Figure I.7 : Préparation de la terre et la paille

Figure I.8 : Le mélange terre-paille

Figure I.9 : remplissage du moule

Figure I.10 : les fissures sur la paroi extérieure du mur argile

Figure I.11 : Préparation du mélange terre-bouse de vache

Figure I.12 : Etalage du mur

Figure I.13 : Peinture du mur argile et parois extérieures.

Figure I.14 : revêtement des parois intérieures avec des feuilles en aluminium

Fugue I.1 : Graisse végétal de température de fusion (38-40 °C).

Figure I.2 : Graisse végétal de température de fusion (35-37 °C).

Figure I.3 : Image représentative du graphite

Figure I.4 : Image représentative de la perlite expansée

Figure I.5 : Image représentative du moule

Figure I.6 : Test forme stabilise N° 01

Figure I.7 : Test forme stabilise N° 02

Figure I.8 : (A) tamisage de la perlite, (B) : tamisage du graphite

Figure I.9 : préparation du moule.

Figure I.10 : Préparation des matériaux.

Figure I.11 : Mélange Perlite-Graphite

Figure I.12 : Plaques de composite sous forme stabilisée après démoulage.

Figure I.13 : Encapsulation des plaques

Figure I.14 : Dimensions des plaques.

Figure I.15 : Plaques du composite dans le socle en bois.

Figure I.16 : revêtement du mur capteur stockeur.

Figure I.17 : Mise en place du vitrage

Figure II.1 : (A) Thermocouple type K. (B) appareil d'acquisition de données.

Figure II.2 : Lecture de températures sur micro-ordinateur

Figure II.3 : Installation des instruments de mesure.

Figure III.1: Variation des températures extérieures et intérieures.

Figure III.2: Variation des températures extérieure et intérieure du mur capteur-stockeur

Figure III.3: Variation des températures extérieure et intérieure

Figure III.4 : Variation des températures extérieure et intérieure du mur capteur-stockeur avec MCP

Figure III.5 : variations des températures intérieures et extérieures (cas du mur capteur-stockeur avec MCP et effet de serre)

Figure III.6 : variations de températures du mur capteur-stockeur avec MCP et effet de serre

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE I

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie

Tableau III.1: Propriétés thermo-physiques de matériaux de construction

Tableau III.2 : Capacité thermique de quelques matériaux usuels

Tableau III.3 : Matériaux utilisés dans le bâtiment dont l'épaisseur nécessaire pour obtenir une résistance thermique de $3 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$

Tableau III.4 : Matériaux communément rencontrés dans les bâtiments et contribuant au stockage de chaleur sensible

Tableau IV.1 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques paraffines

Tableau IV.2 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques non paraffines

Table IV.3 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques acides gras.

Tableau IV.4 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels hydratés

Tableau IV.5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques

Tableau IV. 6 : Avantages et inconvénients des MCP inorganiques.

Tableau IV.7 : Avantages et inconvénients des MCP organiques.

PARTIE II

Tableau I.1 dimensions de la différente partie de la chambre

Tableau I.2 : les caractéristiques des matériaux

Tableau I.3 : Dimensions du mur argile

Tableau I.4 : Caractéristiques thermo-physiques de l'argile

Tableau I.5 : Dimensions de la vitre

Tableau II.1 : Répartition des thermocouples

Tableau II.2 : emplacement des thermo couple

Tableau III.1 : Evolution de température (cas de mur capteur-stockeur sans MCP et effet de serre

Tableau III.2 : évolution de température (cas de mur capteur-stockeur avec MCP sans effet de serre

Tableau III.3 : évolution de température (cas de mur capteur-stockeur avec MCP ET effet de serre)

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

PARIE I : GENERALITES ET CADRE THEORIQUE

I. Généralités sur le rayonnement solaire	3
--	----------

<i>I.1 Origine du rayonnement solaire</i>	<i>3</i>
---	----------

<i>I.2 Le spectre électromagnétique.....</i>	<i>3</i>
--	----------

<i>I.3 La constante solaire</i>	<i>6</i>
---------------------------------------	----------

<i>I.4 Absorption et diffusion atmosphérique.....</i>	<i>7</i>
---	----------

<i>I.4.1 Absorption.....</i>	<i>7</i>
------------------------------	----------

<i>I.4.2 Diffusion</i>	<i>7</i>
------------------------------	----------

<i>I.4.3 L'effet de serre</i>	<i>8</i>
-------------------------------------	----------

<i>I.5 Les composantes diffuse et directe du rayonnement</i>	<i>8</i>
--	----------

<i>I.5.1 Le rayonnement diffus.....</i>	<i>8</i>
---	----------

<i>I.5.2 Le rayonnement direct</i>	<i>9</i>
--	----------

<i>I.5.3 Le rayonnement solaire total ou global G</i>	<i>9</i>
---	----------

<i>I.6 Processus de réception d'un rayonnement par un corps.....</i>	<i>10</i>
--	-----------

<i>I.7 Potentiel solaire en Algérie</i>	<i>11</i>
---	-----------

II. Rappels sur les transferts thermiques.....	13
---	-----------

<i>II.1 Définitions.....</i>	<i>13</i>
------------------------------	-----------

<i>II.2 Les mécanismes de transferts thermiques</i>	<i>14</i>
---	-----------

<i>II.2.1 Conduction</i>	<i>14</i>
--------------------------------	-----------

<i>II.2.2 Convection.....</i>	<i>15</i>
-------------------------------	-----------

<i>II.2.3 Rayonnement</i>	<i>16</i>
---------------------------------	-----------

<i>II.3 Flux de chaleur lié à un débit massique</i>	<i>16</i>
---	-----------

<i>II.4 Nature du rayonnement thermique.....</i>	<i>17</i>
--	-----------

III. Notions sur la thermique du bâtiment.....	19
---	-----------

<i>III.1 Notion du confort thermique</i>	<i>19</i>
--	-----------

<i>III.2 L'Inertie thermique</i>	<i>19</i>
--	-----------

III.2.1	Effets de l'inertie thermique :.....	20
III.2.2	Inertie de transmission et inertie par absorption :.....	20
III.2.3	Propriétés thermiques des matériaux	20
III.2.3.1	Diffusivité thermique	20
III.2.3.2	Effusivité thermique	21
III.3	<i>La déperdition thermique</i>	22
III.3.1	Définition.....	22
III.3.2	Ponts thermiques	23
III.4	<i>L'Isolation thermique</i>	23
III.4.1	Types d'isolants	24
III.4.1.1	Les isolants synthétiques.....	24
III.4.1.2	Les isolants minéraux.....	24
III.4.1.3	Les isolants naturels :.....	24
III.4.1.4	Les isolantes nouvelles générations :.....	25
III.4.2	Les différentes utilisations des isolants :	25
III.5	<i>Le Stockage thermique</i> :.....	26
III.5.1	Types de stockage de l'énergie thermique	27
III.5.1.1	Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible.....	27
III.5.1.2	Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente	28
III.5.1.3	Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique.....	29
III.6	<i>Regard sur l'habitat traditionnel kabyle</i>	30
IV.	Introduction aux matériaux à changement de phase	32
IV.1	<i>Introduction</i>	32
IV.2	<i>Classification des MCPs</i>	34
IV.2.1	Les MCPs organiques.....	35
IV.2.1.1	Les paraffines	36
IV.2.1.2	Les non-paraffines.....	36
IV.2.1.3	Les acides gras.....	37
IV.2.2	Les MCPs inorganiques	38
IV.2.2.1	Les sels hydratés.....	38
IV.2.2.2	Les métaux.....	38

<i>IV.3 Critères de choix d'un MCP.....</i>	<i>39</i>
IV.3.1 Propriétés des MCPs utilisés dans le bâtiment.....	39
IV.3.2 Avantages et inconvénients de chaque groupe de MCP	40
<i>IV.4 Conditionnement des MCPs</i>	<i>41</i>
IV.4.1 Macro-encapsulation	42
IV.4.2 Micro encapsulation.....	43
IV.4.3 Composite MCP Shape-stabilized (SS-PCM)	45
<i>IV.5 Les MCPs intégrés dans les murs.</i>	<i>46</i>
IV.5.1 L'immersion.....	46
IV.5.2 L'attachement.....	47
V. Intégration d'énergie solaire dans l'habitat.....	48
<i>V.1 Architecture solaire</i>	<i>48</i>
V.1.1 Production de chaleur utile	49
V.1.2 Le solaire thermique passif.....	50
<i>V.2 Les murs solaires à effet de serre</i>	<i>51</i>
<i>V.3 Le mur trombe.....</i>	<i>52</i>
V.3.1 Historique	52
V.3.2 Fonctionnement.....	53
V.3.2.1 Mur trombe en hiver.....	54
V.3.2.2 Mur trombe en été	54
 PARTIE II : ETUDE EXPEREMENTAL	
I. Introduction	56
II. Réalisation du dispositif	57
<i>II.1 Réalisation de la chambre.....</i>	<i>57</i>
II.1.1 Dimensions de la chambre et caractéristiques des matériaux utilisés	59
II.1.2 Résistances thermiques des parois de la chambre	60
<i>II.2 Réalisation du mur argile-paille.....</i>	<i>60</i>
II.2.1 Etape de la réalisation	61

II.2.2	Dimensions et caractéristiques du mur capteur-stockeur.....	65
II.3	<i>Préparation de l'unité de stockage latent (MCP).....</i>	<i>65</i>
II.3.1	Amélioration de la conductivité thermique.....	66
II.3.2	Recherche de la forme stabilisée.....	67
II.3.3	Réalisation des plaques.....	69
II.3.4	Dimensions et masse des plaques du composite	72
II.3.5	Revêtement du mur capteur-stockeur avec les plaques	73
II.4	<i>Mise en place du vitrage.....</i>	<i>74</i>
III.	Méthode et instrumentation.....	75
III.1	<i>Les instruments de mesure.....</i>	<i>75</i>
III.2	<i>Répartition des thermocouples sur le prototype.....</i>	<i>76</i>
IV.	Résultats et interprétations.....	78
IV.1	<i>Le mur capteur-stockeur sans MCP et sans effet de serre</i>	<i>78</i>
IV.2	<i>Le mur capteur-stockeur avec MCP sans effet de serre</i>	<i>80</i>
IV.3	<i>Le mur capteur-stockeur avec MCP Et effet de serre.....</i>	<i>84</i>
	Conclusion générale.....	88

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui le secteur du bâtiment nécessite et consomme une grande quantité d'énergie, et cela est l'une des causes de l'épuisement des différentes ressources d'énergie. Il est par conséquent urgent de trouver et d'élaborer des stratégies économiques et efficaces en limitant l'utilisation des énergies fossiles et de s'ouvrir beaucoup plus à l'exploitation des énergies renouvelables.

Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire se présente comme l'une des plus prometteuses pour l'avenir. En effet, l'énergie thermique produite par voie solaire est une forme d'énergie très écologique sans émission de CO₂ et des gaz à effet de serre.

La solution proposée tourne autour de l'ajout d'un système de chauffage solaire passif à un logement qui se base sur la limitation des pertes énergétiques avant toute chose. Cette dernière est une solution séduisante et très intéressante pour l'économie et l'utilisation rationnelle de l'énergie ainsi réduisant sans aucun doute les effets désastreux des systèmes énergétiques classiques.

Parmi ces nouveaux systèmes, celui développé par le professeur Trombe qui consiste à disposer un mur en maçonnerie lourde orienté sud derrière un vitrage et le munir de deux orifices qui consiste à chauffer l'air avec l'énergie solaire puis le diffuser dans un local. Un procédé technique en phase avec l'architecture bioclimatique, revisité aujourd'hui pour optimiser son efficacité.

L'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments en particulier au niveau de leurs murs fait l'objet depuis plus d'une dizaine d'années d'un intérêt croissant et d'un nombre important de travaux.

Notre travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude expérimentale du comportement thermique d'un mur Trombe fait avec un composite argile-paille en intégrant un matériau à changement de phase.

Le manuscrit est divisé en deux parties : la première est la partie théorique, qui présente des généralités sur le rayonnement solaire et la thermique du bâtiment, puis quelques notions sur les matériaux à changement de phase. Quant à la deuxième partie, c'est une description de l'étude expérimentale répartie comme suit :

- Réalisation du projet
- Méthodes et instrumentation
- Résultats et discussions

En fin, on termine par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des résultats essentiels de notre étude.

PARTIE I :
GENERALITES ET CADRE
THEORIQUE

I. Généralités sur le rayonnement solaire

I.1 Origine du rayonnement solaire

La source du rayonnement solaire est le soleil âgé de 4,5 milliards d'années. Cet astre est situé à environ $150 \cdot 10^6$ km de la terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène. Son rayon qui est de 696 000 km est 100 fois supérieur que celui de la terre et sa masse est 333 000 fois celle de notre planète. Le soleil est composé principalement d'hydrogène et d'hélium. Il tire son énergie des réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau, dont la température atteint $20 \cdot 10^6$ degrés, qui décroît vers l'extérieur jusqu'à un palier d'environ 5800 K à la surface du soleil. Les réactions thermonucléaires transforment l'hydrogène en hélium avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique se propageant à une vitesse de 300 000 km/s, dont le spectre couvre toutes les fréquences possibles et dont l'intensité est maximum dans la gamme du visible.

La puissance rayonnée à la surface du soleil est d'environ $3,85 \cdot 10^{26}$ W. Cependant, une infime partie qui est de $1,9 \cdot 10^{17}$ W est reçue par la terre. Il existe deux types de mesures pour déterminer le rayonnement solaire arrivant à la surface terrestre. Les mesures in-situ sont effectuées dans les stations météorologiques ou radiométriques. Par contre, les mesures indirectes utilisent les images prises par des satellites météorologiques. Pour utiliser cette deuxième voie, il est nécessaire d'extraire les composantes utiles du rayonnement solaire en traitant les images.

I.2 Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques couvrent un large domaine de fréquences ou de longueurs d'onde, et peuvent être classées d'après leur source principale. Cette classification n'a pas de limites très précises puisque les différentes sources peuvent produire des ondes dans des domaines de fréquence qui se recouvrent.

La classification usuelle du spectre électromagnétique est la suivante : [1]

Les ondes radio

Leurs longueurs d'onde vont de quelques kilomètres à 0,3 m. Leur domaine de fréquence s'étend de quelques Hz jusqu'à 10^9 Hz. L'énergie des photons va de pratiquement 0 à 10^{-5} eV.

Les micro-ondes

Les longueurs d'onde des micro-ondes vont de 0,3 m à 10^{-3} m. Leur domaine de fréquence s'étend de 10^9 Hz à 3×10^{11} Hz. L'énergie des photons va de 10^{-5} eV à 10^{-3} eV. Ces ondes sont utilisées dans les radars et d'autres systèmes de communication. La région des micro-ondes est également désignée par le sigle UHF (ultra-hautes fréquences par rapport aux fréquences radio) [1].

Le spectre infrarouge

Celui-ci couvre les longueurs d'onde de 10^{-3} m à $7,8 \times 10^{-7}$ m. Le domaine de fréquence s'étend de 3×10^{11} Hz à 4×10^{14} Hz et l'énergie des photons va de 10^{-3} eV à environ 1,6 eV. Ces ondes sont produites par les molécules et les corps chauds [1].

Le spectre visible ou lumière

C'est une bande étroite formée par les longueurs d'onde auxquelles notre rétine est sensible. Il s'étend en longueur d'onde de $7,8 \times 10^{-7}$ m à $3,8 \times 10^{-7}$ m et en fréquence de 4×10^{14} Hz à 8×10^{14} Hz. L'énergie des photons va de 1,6 eV à 3,2 eV. La lumière est produite par les atomes et les molécules par suite des réajustements internes des mouvements de leurs composants, principalement des électrons.

La sensibilité de l'œil dépend également de la longueur d'onde de la lumière, elle est maximum pour les longueurs d'onde voisines de $5,6 \times 10^{-7}$ m. En raison de la relation qui existe entre la couleur et la fréquence ou la longueur d'onde, une onde électromagnétique de longueur d'onde ou de fréquence bien définie est aussi appelée onde monochromatique (de mono: un; chromos: couleur) [1].

Les rayons ultra-violets

Ils vont de $3,8 \times 10^{-7}$ m à environ 6×10^{-10} m en longueur d'onde et de 8×10^{14} Hz à environ 3×10^{17} Hz en fréquence. L'énergie des photons correspondants va de 3 eV à 2×10^3 eV. Ces ondes sont produites par des atomes et des molécules dans des décharges électriques. Leur énergie est de l'ordre de grandeur de l'énergie mise en jeu dans de nombreuses réactions chimiques. Ce qui rend ainsi compte de beaucoup de leurs effets chimiques. Le soleil est une source très intense de rayonnement ultra-violet et c'est ce facteur qui est essentiellement responsable du brunissement de la peau au soleil.

Le rayonnement ultra-violet du soleil interagit également avec les atomes de la haute atmosphère, produisant ainsi de nombreux ions. Ceci explique pourquoi la haute

atmosphère à des altitudes supérieures à 80 km est fortement ionisée. On l'appelle pour cette raison l'ionosphère. (Quand certains micro-organismes absorbent des radiations ultra-violettes, ils peuvent être détruits à la suite des réactions chimiques produites par l'ionisation et la dissociation des molécules [1].

Les rayons X

Cette partie du spectre électromagnétique s'étend de 10^{-9} m à environ 6×10^{-12} m en longueur d'onde ou entre 3×10^{17} Hz et 5×10^{19} Hz en fréquence. L'énergie des photons va de $1,2 \times 10^3$ eV à $2,4 \times 10^5$ eV. Cette partie du spectre électromagnétique a été découverte en 1895 par le physicien allemand W. Roentgen au cours de l'étude des rayons cathodiques. Les rayons X sont produits par les électrons les plus fortement liés des couches internes des atomes. Une autre source de rayons X réside dans le rayonnement de freinage. Ceci représente en fait la méthode la plus commune de production de rayons X dans les tubes à rayons X commerciaux. Un faisceau d'électrons accéléré par un potentiel de plusieurs milliers de volts, tombe sur une cible métallique appelée anticathode (en fait c'est la manière dont les rayons X ont été produits dans l'expérience originale de Roentgen). Les rayons X, en raison de la plus grande énergie de leurs photons, produisent des effets plus profonds sur les atomes et les molécules constituant les substances à travers lesquelles ils se propagent, et ionisent ou dissocient ainsi les molécules.

Ils produisent également, par suite des processus chimiques qu'ils induisent, des dommages sérieux aux tissus et aux organismes vivants. C'est pour cette raison que les rayons X sont utilisés dans le traitement des cancers, dans la mesure où les rayons X semblent avoir tendance à détruire les tissus malades plus rapidement que les tissus sains. Il faut insister sur le fait que toute dose de rayons X détruit une fraction de tissu sain ; une exposition à une forte dose peut produire assez de destruction pour causer la maladie ou la mort [1].

Les rayons gamma

Ces ondes électromagnétiques sont d'origine nucléaire. Elles recouvrent la limite supérieure du spectre des rayons X. Leurs longueurs d'onde s'étendent de 10^{-10} m à en dessous de 10^{-14} m, ce qui correspond à un domaine de fréquence de 3×10^{18} Hz jusqu'à plus de 3×10^{22} Hz. Les énergies des photons vont de 10^4 eV jusqu'à environ 10^7 eV. Ces énergies sont du même ordre de grandeur que celles mises en jeu dans les processus nucléaires et l'absorption de rayons γ peut donc produire des modifications à l'intérieur

du noyau. Ces rayons sont produits par de nombreuses substances radioactives et sont présents en grande quantité dans les réacteurs nucléaires. Ils ne sont pas facilement absorbés par la plupart des substances mais leur absorption par les organismes vivants produit de très sérieux effets [1].

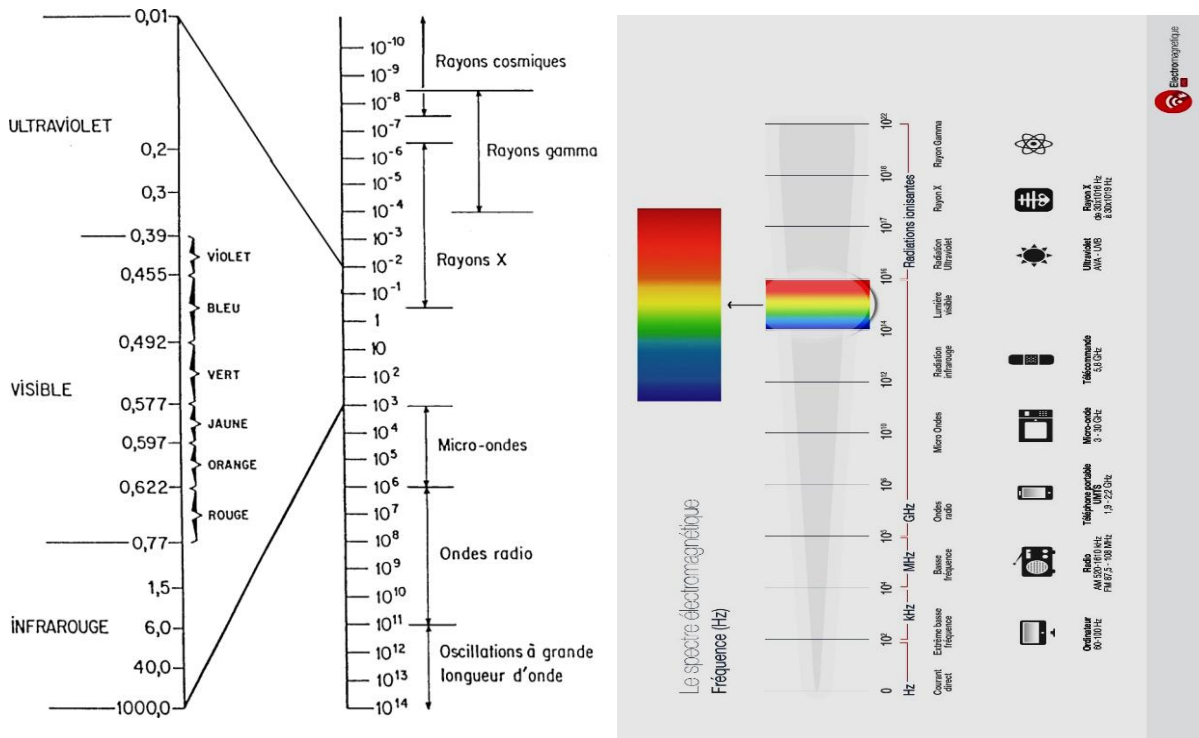


Figure I.1 : Vue d'ensemble des ondes électromagnétiques (longueur d'ondes en μm) [1]

I.3 La constante solaire

La terre reçoit pratiquement toute son énergie du soleil, sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Son contenu total de chaleur ne change significativement pas avec le temps, indiquant en général un équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le flux de rayonnement diffus émis par la planète. À l'extérieur de l'atmosphère terrestre il n'y a pas de composante diffuse du rayonnement solaire mais seulement la composante directe. Pour une distance moyenne entre la terre et le soleil, l'irradiation émise par le soleil à la terre aboutit à une intensité presque fixe dite constante solaire qui est de 1360 W/m^2 (Monteith 1962) [I.2].

La constante solaire est l'énergie solaire reçue par unité de temps et par unité de surface d'une superficie perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement solaire. Les mesures faites avec une variété d'instruments ont donné la valeur 1353 W/m^2

estimée avec une erreur de $\pm 1.5\%$. La commission des instruments et des méthodes d'observation (CI MO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a adopté en octobre 1981 la valeur 1367 W/m^2 avec une incertitude de 1%. À présent la meilleure valeur disponible de la constante solaire est 1360 W/m^2 [2].

I.4 Absorption et diffusion atmosphérique

I.4.1 Absorption

Au cours de la pénétration dans l'atmosphère les photons entrent en collisions avec les molécules. Suivant leurs états énergétiques les photons peuvent être absorbés, cette énergie sera transformée en énergie calorifique. Les rayons ultraviolets émis par le soleil sont presque totalement absorbés ; dans la mésosphère pour les plus énergétiques ($\lambda < 170 \text{ nm}$ absorbés par le N_2O et l'oxygène moléculaire), dans la stratosphère pour les moins énergétiques ($\lambda \sim 200 \text{ à } 300 \text{ nm}$ qui sont absorbés par l'ozone et l'oxygène moléculaire). La destruction de l'ozone stratosphérique diminue l'absorption des photons de 200 à 300 nm de longueur d'onde qui en arrivant sur la planète constituent un danger pour la santé humaine [3].

- Bilan

- Les rayonnements gamma, les rayons X et les rayonnements ultraviolets sont totalement absorbés par l'ozone.
- Les rayonnements visibles et proches infrarouges ne sont que très peu absorbés par l'atmosphère.
- Les rayonnements du moyen infrarouge et de l'infrarouge thermique sont majoritairement absorbés.
- Les rayonnements infrarouges lointains sont absorbés par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone de l'atmosphère.
- Les ondes radios ne sont pas absorbées.

I.4.2 Diffusion

Une partie du rayonnement solaire est diffusé par les molécules ou particules, constituants de l'atmosphère ; lors de la diffusion il n'y a pas de changement de longueur d'onde du rayon diffusé par rapport au rayon incident et, l'émission de lumière diffusée se fait dans toutes les directions mais pas avec la même intensité.

Suivant la taille de la cible on parlera de :

- Diffusion de Rayleigh (molécules 0.1 à 10 nm),

- Diffusion Mie (particules aérosols gouttelettes 100 nm à 10 μm)
- Diffusion suit les lois de géométrie optique (pour des particules plus grosses).[4]

I.4.3 L'effet de serre

Dans le domaine infrarouge, l'atmosphère absorbe le rayonnement électromagnétique de façon très efficace. Cela est dû à la présence dans l'atmosphère de gaz à effet de serre, qui absorbent le rayonnement infrarouge. Il s'agit principalement du dioxyde de carbone (CO_2), de la vapeur d'eau (H_2O), du méthane (CH_4), des chlorofluorocarbones (CFC) et de l'oxyde nitreux (N_2O).

Une grande partie du rayonnement thermique émis par la Terre est donc absorbé par l'atmosphère, qui, elle-même, émet un rayonnement thermique. Ce rayonnement est émis dans toutes les directions : une partie s'échappe vers l'espace et le reste est envoyé vers la Terre. À la surface terrestre, ce flux descendant s'ajoute au flux solaire incident.

En situation d'équilibre dynamique où la puissance émise par le sol est égale à celle qu'il reçoit, la surface terrestre doit émettre une puissance radiative plus élevée pour compenser le surplus associé au rayonnement envoyé par l'atmosphère. En conséquence la température terrestre est plus élevée que si l'atmosphère était absente : c'est l'effet de serre.

Une grande partie de l'effet de serre nous est nécessaire pour garder la terre à une température vivable : si cet effet de serre n'était pas créé, la température moyenne du globe serait de -18°C alors qu'elle est aujourd'hui de -15°C [4].

I.5 Les composantes diffuse et directe du rayonnement

Le rayonnement solaire exprime le flux instantané reçu, au niveau du sol, par unité de surface. Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement, la couverture nuageuse, la durée de jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, son degré de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon. La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et dans le temps du rayonnement solaire [5].

I.5.1 Le rayonnement diffus

C'est le rayonnement dispersé atteignant la surface terrestre et provenant de toutes les parties du ciel, indépendamment du soleil direct. Il doit être clairement distingué du

rayonnement thermique atmosphérique qui, bien qu'il soit également diffus en nature, se compose de longueurs d'onde beaucoup plus longues.

L'importance du rayonnement diffus dépend de l'altitude solaire, de la quantité et du type d'aérosols et des nuages. Il est également influencé par la fraction du rayonnement solaire réfléchi par la Terre « l'albédo », puisque le rayonnement réfléchi de la surface terrestre est par retour, et dans une certaine mesure, dispersé par l'atmosphère. La composante diffuse du rayonnement solaire est une part significative du rayonnement solaire total atteignant la surface terrestre, et ce rayonnement diffus est distribué de manière anisotrope par le ciel.

Par un jour nuageux, presque tout le rayonnement solaire arrivant sur Terre est diffus ; et par temps clair, environ 15-20% de tout le rayonnement solaire atteignant la Terre est diffus [6].

I.5.2 Le rayonnement direct

C'est le rayonnement atteignant la surface terrestre directement à partir du disque du soleil. L'importance du rayonnement direct dépend de l'atténuation par l'atmosphère due à la dispersion et à l'absorption. Par temps clair, environ 80% du rayonnement atteignant la Terre est du rayonnement direct. Ces distinctions sont importantes pour des applications d'énergie solaire, car les capteurs solaires à concentration utilisent seulement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires thermiques plans valorisent tout le rayonnement solaire.

Les nuages absorbent peu le rayonnement solaire, ce qui explique pourquoi ils ne s'évaporent pas au soleil. L'effet des nuages sur le rayonnement solaire est principalement de la dispersion et de la réflexion.

La pollution atmosphérique en particulier urbaine, la fumée des incendies de forêt et les cendres aéroportées résultant de l'activité volcanique réduisent le rayonnement solaire en augmentant la dispersion et l'absorption du rayonnement solaire. Ceci a une plus grande incidence sur le rayonnement direct que sur le rayonnement solaire total [6].

I.5.3 Le rayonnement solaire total ou global G

Le rayonnement global fait référence à l'ensemble du rayonnement à ondes courtes qui frappe la surface de la terre (horizontale).

La somme du rayonnement direct G_b et du rayonnement diffus G_d du ciel, sur une surface horizontale peut être écrit comme [6] :

$$G = G_b + G_d$$

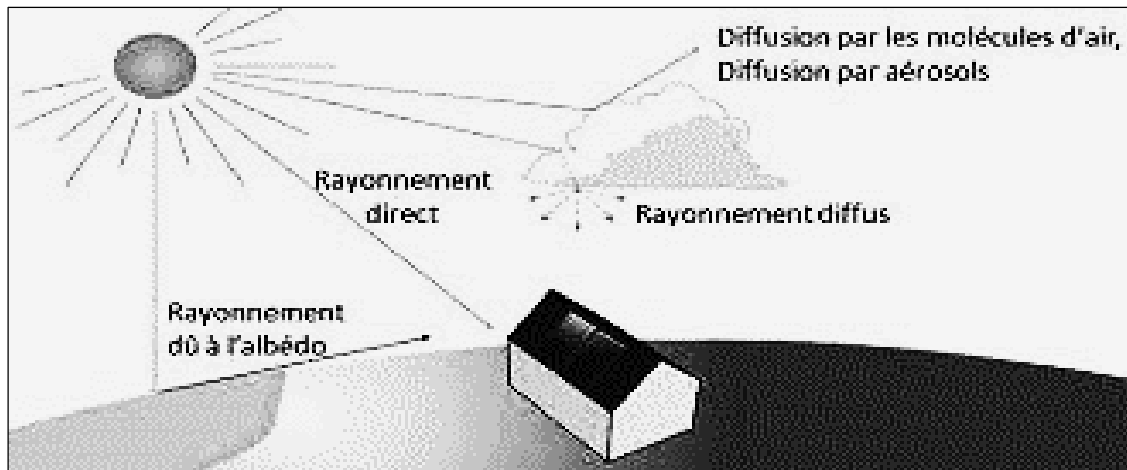


Figure I.3 : composantes du rayonnement solaire [6]

I.6 Processus de réception d'un rayonnement par un corps

Définitions

- *Emetteur* : s'il envoie un rayonnement lié à sa température (sauf s'il est parfaitement transparent);
- *Récepteur* : s'il reçoit des rayonnements émis ou réfléchis et diffusés par les corps qui l'entoure.
- *Corps opaque* : c'est un corps qui ne transmet aucun rayonnement à travers lui-même, il stoppe la propagation de tout rayonnement dès sa surface, il se réchauffe par l'absorption du rayonnement;
- *Corps transparent* : c'est un corps qui transmet tout le rayonnement incident;
- *Corps noir*: est celui qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit, il est caractérisé par un pouvoir absorbant ($\alpha_{\lambda T}=1$). Tous les corps noirs rayonnent de la même manière à la même température, le corps noir rayonne plus qu'un corps non noir.

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions

Situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie de cette énergie peut être réfléchie, une autre

transmise à travers le corps, et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur .Lorsque un rayonnement incident d'énergie (φ_λ) frappe un corps (C) à la température (T) (voir figure ci-contre), on remarque que [7]:

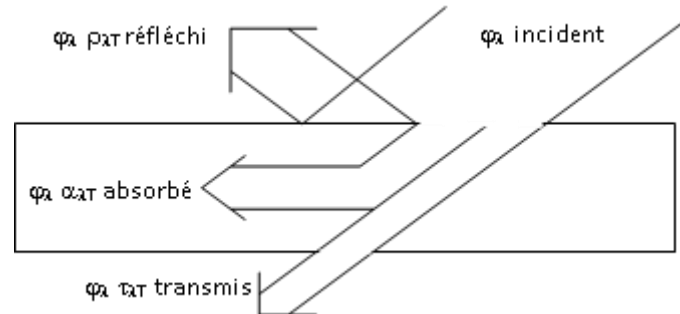


Figure I.4: Schématisation de la répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

- Une partie de l'énergie ($\varphi_\lambda \cdot \rho_{\lambda T}$) est réfléchiée par la surface (S) du corps ;
- Une partie de l'énergie ($\varphi_\lambda \cdot \alpha_{\lambda T}$) est absorbée par le corps en lui échauffant ;
- Le reste de l'énergie ($\varphi_\lambda \cdot \tau_{\lambda T}$) est transmise en continuant le chemin.

Tel que;

$$\varphi_\lambda = \varphi_\lambda \cdot \rho_{\lambda T} + \varphi_\lambda \cdot \alpha_{\lambda T} + \varphi_\lambda \cdot \tau_{\lambda T} \quad (I.1)$$

$$\text{D'où : } \rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} = 1$$

Qui représentent respectivement; le pouvoir monochromatique réfléchissant ($\rho_{\lambda T}$), le pouvoir Monochromatique absorbant ($\alpha_{\lambda T}$) et le pouvoir monochromatique de transmittance ($\tau_{\lambda T}$). Ces Pouvoirs sont fonctions de la nature du corps, son épaisseur, sa température (T), de la longueur D'onde (λ), du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

I.7 Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. Le tableau I.1 résume le potentiel solaire en Algérie [8].

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen.

Il est de 169,440 Tera-Watts.heure/an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque [8].

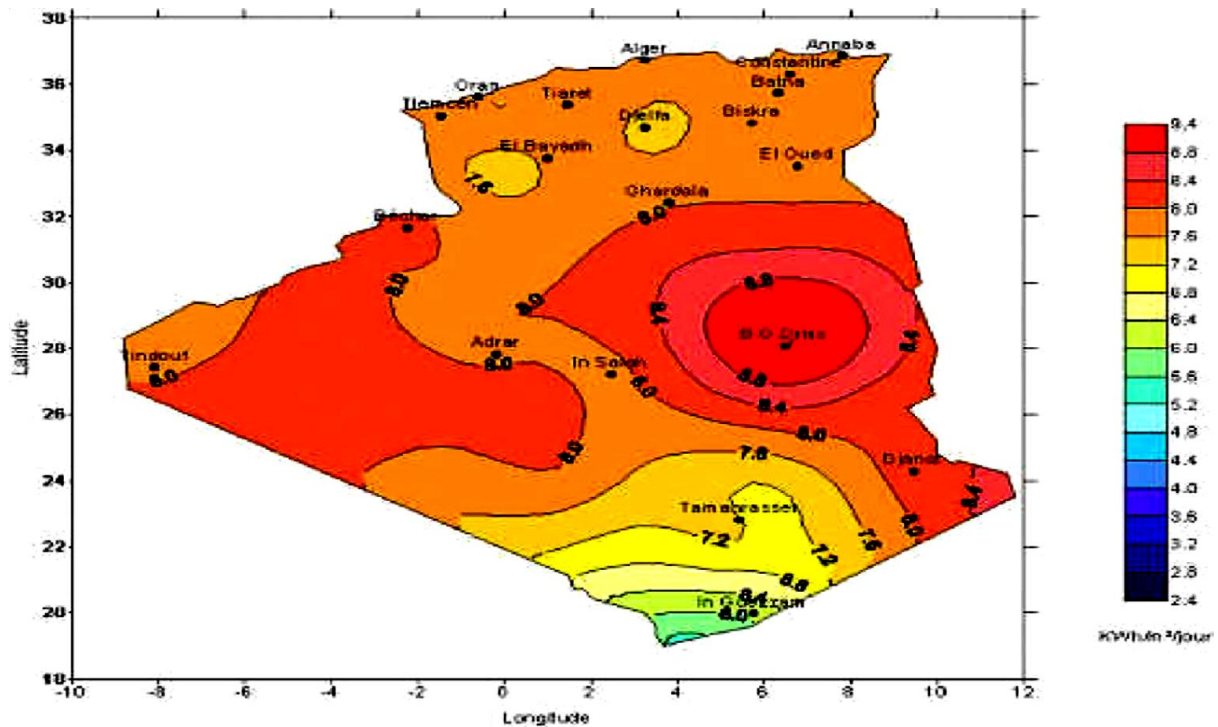


Figure [I.5]: Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien au mois de juillet [8].

II. Rappels sur les transferts thermiques

Le transfert de la chaleur est l'un des modes les plus communs d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température et cela quel que soit le milieu, même vide, qui les sépare. Les échanges naturels de chaleur se font des régions les plus chaudes vers les régions les plus froides. Les transferts thermiques jouent un rôle essentiel dans diverses applications technologiques, il devient même déterminant lorsqu'il est à l'origine des techniques utilisées (échangeurs, moteurs thermiques, calorifugeage, utilisation de l'énergie solaire...).

II.1 Définitions

- *Champ de température*

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.

- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire. [9]

- *Gradient de température*

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température [9] :

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n} \quad (II.1)$$

- *Le flux de chaleur*

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [II.1] :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Où S est l'aire de la surface (m²).

On appelle flux de chaleur, la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.3})$$

- *Formulation d'un problème de transfert de chaleur*

Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :

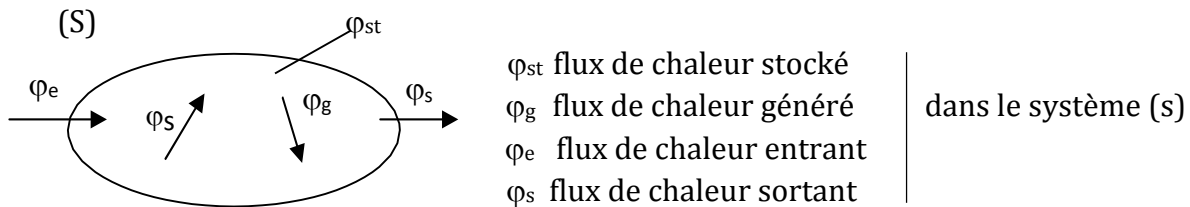


Figure II.1 : Système et bilan énergétique [1]

On applique alors le 1^{er} principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) [9] :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st} \quad (\text{II.4})$$

II.2 Les mécanismes de transferts thermiques

II.2.1 Conduction

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

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température [9] :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II.5})$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (II.6)$$

Avec : φ : flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu (W. m⁻¹. °C⁻¹)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

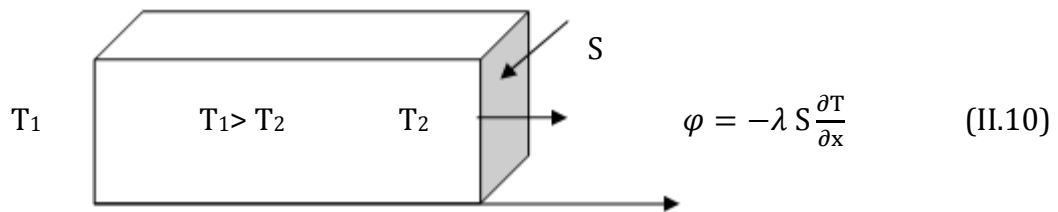


Figure II.2 : Schéma du transfert de chaleur conductif [9].

II.2.2 Convection

A l'intérieur d'un fluide ou à la surface fluide/paroi, les transferts de chaleur se font par convection. Contrairement aux échanges par conduction, les échanges par convection nécessitent un déplacement de matière.

On distingue deux types de convection :

- *La convection libre* pour laquelle le transfert de chaleur est induit par des variations de densité du fluide associées aux variations de température. La différence de densité crée un écoulement descendant du fluide le plus froid (plus lourd) et ascendant du fluide le plus chaud (plus léger).

- *La convection forcée* pour laquelle les mouvements du fluide sont imposés par une source externe de mouvement (exemple : ventilateur).

L'échange de chaleur par convection entre un fluide et une surface est régi par la **loi de Newton** [10].

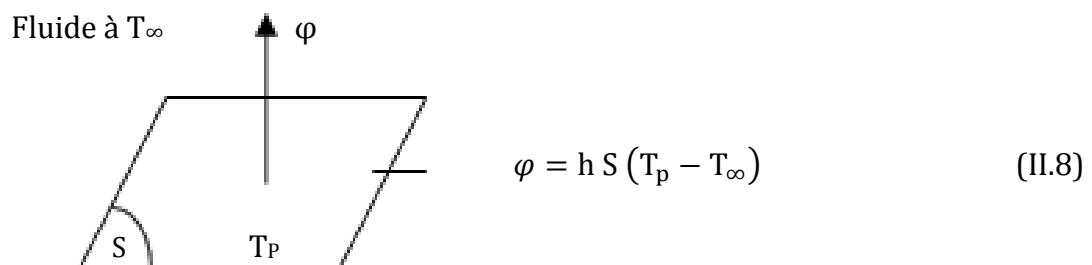


Figure II.3 : Schéma du transfert de chaleur convectif [1].

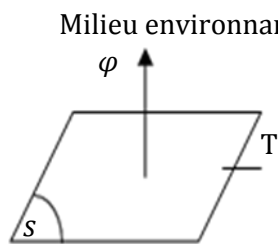
Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection	(W)
h : Coefficient de transfert de chaleur par convection	(W m ⁻² °C ⁻¹)
T_p : Température de surface du solide	(°C)
T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide	(°C)
S : Aire de la surface de contact solide/fluide	(m ²)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide [9].

II.2.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation [9]:



$$\varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (II.9)$$

Figure II.4 : Schéma du transfert de chaleur radiatif. [1]

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement	(W)
σ : Constante de Stefan	(5,67.10 ⁻⁸ W m ⁻² K ⁻⁴)
ε_p : Facteur d'émission de la surface	
T_p : Température de la surface	(K)
T_∞ : Température du milieu environnant la surface	(K)
S : Aire de la surface	(m ²)

II.3 Flux de chaleur lié à un débit massique

Lorsqu'un débit massique de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2 , on doit considérer dans le bilan un flux de chaleur entrant correspondant [9]:

$$\varphi_e = \dot{m}c_p(T_1 - T_2) \quad (\text{II.10})$$

Avec :

φ_e : Flux de chaleur entrant dans le système	(W)
$\dot{m}$: Débit massique	(kg.s ⁻¹)
C_p : Chaleur spécifique	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
T_1, T_2 : Températures d'entrée et de sortie	(K)

II.4 Nature du rayonnement thermique

Tous les corps, quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur.

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde comme l'a démontré l'expérience de William Herschel [9]:

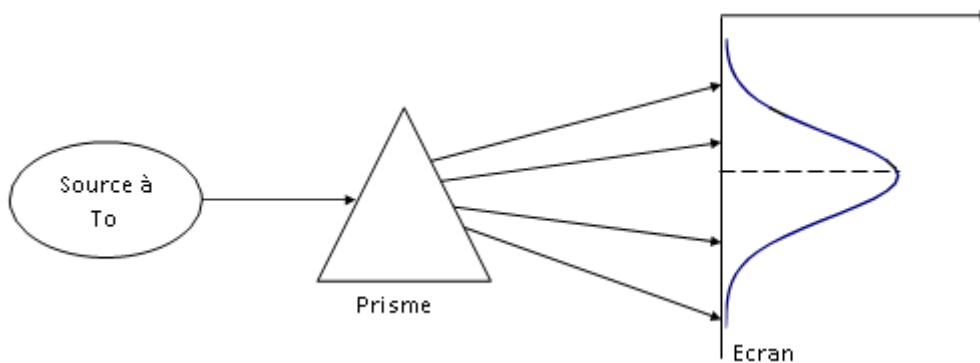


Figure II. 5: Principe de l'expérience de William Herschel [9]

En passant à travers un prisme, les radiations sont plus ou moins déviées selon leur longueur d'onde. On envoie donc les radiations émises par une source à la température T_0 sur un prisme et on projette le faisceau dévié sur un écran absorbant (noirci), on obtient ainsi la décomposition du rayonnement total incident en un spectre de radiations monochromatiques.

Si l'on déplace le long de l'écran un thermomètre, on mesure la température T_e caractérisant l'énergie reçue par l'écran dans chaque longueur d'onde. En construisant la courbe $T_e = f(\lambda)$, on obtient la répartition spectrale de l'énergie rayonnée pour la température T_0 de la source. On constate alors que :

-L'énergie émise est maximale pour une certaine longueur d'onde λ_m variable avec T_0 .

-L'énergie n'est émise que sur un intervalle $[\lambda_1, \lambda_2]$ de longueur d'onde caractérisant le rayonnement thermique.

On trouvera représentés sur la figure II.6. Les différents types d'ondes électromagnétiques et leurs longueurs d'ondes correspondantes. On retiendra que le rayonnement thermique émis par les corps se situe entre 0,1 et 100 μm . On notera par ailleurs que le rayonnement est perçu par l'homme [9]:

- Par l'œil : pour $0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ rayonnement visible.
- Par la peau : pour $0,78 \mu\text{m} < \lambda < 314 \mu\text{m}$ rayonnement IR.

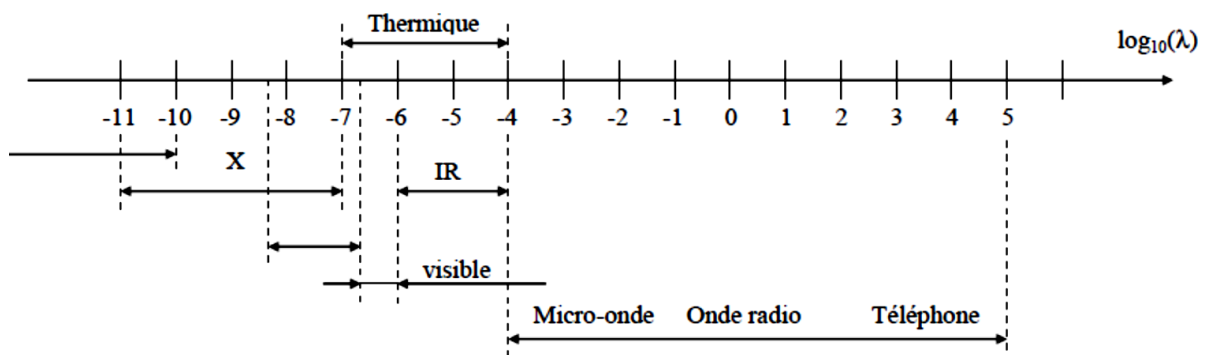


Figure II.6 : Spectre des ondes électromagnétiques (l en m) [9].

III. Notions sur la thermique du bâtiment

La thermique du bâtiment est l'ensemble des sciences et techniques visant à étudier les besoins énergétiques des bâtiments. Elle aborde principalement les notions d'isolation thermique afin d'offrir le meilleur confort thermique aux occupants.

La thermique du bâtiment décrit les échanges thermiques qui se réalisent entre un bâtiment et son environnement [10].

III.1 Notion du confort thermique

La température, la vitesse de l'air et l'humidité sont les principaux paramètres physiques qui régissent la sensation de confort thermique.

Ne pas avoir trop froid, ne pas avoir trop chaud, ne pas sentir de courants d'air gênant : ainsi pourrait-on essayer de définir le confort thermique. Il est plus aisé d'essayer de le définir en précisant ce qui crée de l'inconfort qu'en voulant définir des critères de confort. Dans une même ambiance, quelqu'un pourra se sentir à l'aise (sensation de confort) alors que quelqu'un d'autre pourra être gêné (sensation d'inconfort).

Le corps échange en permanence de la chaleur avec son environnement immédiat. L'habillement joue un rôle très important dans la manière dont sont ressentis les effets de ces échanges qui se font suivant les trois mécanismes de transfert thermique (conduction convection et rayonnement) [11].

La recherche d'une ambiance de confort d'un point de vue thermique consiste à trouver un équilibre entre tous ces processus d'échange thermique de manière à ce que les occupants des pièces du logement n'aient ni trop chaud, ni trop froid.

Cette recherche doit également se faire en ménageant les consommations d'énergie [11].

III.2 L'Inertie thermique

L'inertie thermique (ou la masse thermique) est le potentiel de stockage thermique d'un local ou d'une maison. L'ensemble des masses réparties à l'intérieur de l'enveloppe isolante d'une construction constitue l'inertie thermique intérieure : les parois en maçonnerie pleine, les dalles de plancher...

La propriété des constructions à forte inertie thermique est de conserver une température stable et de se réchauffer ou de se refroidir très lentement, alors que les constructions à faible inertie suivent sans amortissement ni retard les fluctuations de la température extérieure.

III.2.1 Effets de l'inertie thermique :

Le principal effet de l'inertie thermique est de réduire l'amplitude intérieure des températures A_i par rapport à l'amplitude extérieure A_e . On peut par conséquent considérer le rapport d'amplitudes A_i/A_e comme un indicateur des effets de l'inertie thermique du bâtiment [12].

III.2.2 Inertie de transmission et inertie par absorption :

Il y a deux types de variations de température :

- *La variation extérieure*, due aux amplitudes thermiques du climat et aux effets du rayonnement solaire sur les parois d'enveloppe externe. En face de cette variation, l'inertie thermique agissante sera l'inertie thermique de transmission, celle qui s'oppose au transfert du flux à travers la paroi et ce sont les parois d'enveloppe qui sont exclusivement concernées.
- *La variation intérieure*, due à l'intermittence des sources de chaleur interne et à la pénétration solaire par les baies (systèmes passifs à apports directs) face à laquelle on invoquera l'inertie par absorption et où les parois concernées sont toutes les parois internes y compris les planchers et le cloisonnement [13].

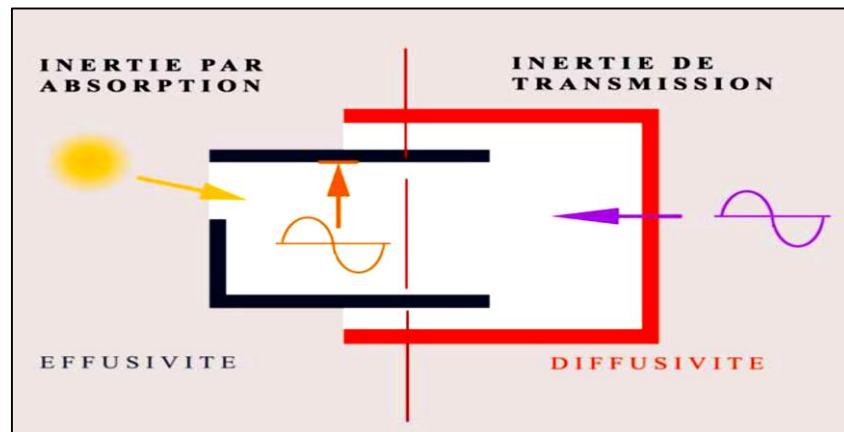


Figure III.1 : Représentation des deux types d'inertie thermique [14]

III.2.3 Propriétés thermiques des matériaux

III.2.3.1 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique α , exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température. La propagation de la chaleur dans un matériau dépend de sa diffusivité thermique, qui est le rapport de la conductivité thermique λ en $W/(m.K)$ sur la capacité calorifique volumique :

$$\alpha = \lambda / \rho C \quad (\text{III.1})$$

Avec ρ la masse volumique en kg/m^3 et C la capacité calorifique en $\text{J}/(\text{kg.K})$.

La capacité calorifique volumique est le produit ρC exprimée en $\text{J}/(\text{m}^3.\text{K})$. La diffusivité se mesure en m^2/s et détermine la vitesse avec laquelle la chaleur se propage dans le matériau. Plus le matériau a une conductivité élevée et une faible capacité calorifique, plus la diffusivité est élevée.

La relation entre l'épaisseur sollicitée et le temps de diffusion de la chaleur à l'intérieur d'un composant de bâtiment homogène se formule en faisant le produit de la capacité calorifique par la résistance thermique de ce composant [13].

$$t = Q \cdot R = (e \cdot \rho C) \frac{e}{\lambda} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Soit } t = \frac{e^2}{\alpha}$$

Tableau III.1: Propriétés thermo-physiques de matériaux de construction [III.4]

Matériaux de construction	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C (J/kg.K)	α (m ² /s)
Béton lourd	1.7	2200	1000	7.72×10^{-7}
Béton léger	1.0	1500	1000	6.77×10^{-7}
Bloc pierre	1.4	1895	1000	7.38×10^{-7}
Brique pleine	1.0	1850	1000	5.4×10^{-7}
Bois lourd (hêtre, chêne)	0.2	800	2700	9.25×10^{-8}
Bois léger (sapin, épicéa)	0.14	540	2400	1.08×10^{-7}
Granite	2.8	2600	1000	1.07×10^{-6}

La diffusivité α évolue donc dans le même sens que le rapport de la conductivité thermique et de la chaleur volumique.

La diffusivité thermique est très liée au phénomène de déphasage à travers les parois. Ce déphasage est inversement proportionnel à la diffusivité thermique [13].

III.2.3.2 Effusivité thermique

L'effusivité thermique b exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou restituer) une puissance thermique.

Elle évolue en fonction de la conductivité thermique et de la capacité calorifique et s'exprime en $W.s^{(1/2)} / (m^2.K)$. Elle est calculée par la relation :

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (III.3)$$

Le comportement ou la réaction des couches superficielles des parois, en particulier au niveau des surfaces à l'intérieur de la pièce est caractérisé par l'effusivité du matériau qui les constitue.

L'effusivité thermique rend compte de la capacité de stockage thermique d'une paroi : un matériau absorbe d'autant plus la puissance thermique que la chaleur peut plus facilement l'atteindre (conductivité élevée), b évolue dans le même sens que la conductivité thermique λ . Mais il absorbe d'autant plus facilement la puissance thermique que sa température s'élève peu sous l'effet de la chaleur (chaleur volumique élevée), b évolue dans le même sens que de la chaleur volumique.

L'effusivité thermique évolue donc dans le même sens que le produit de la conductivité thermique par la chaleur volumique [14].

Tableau III.2 : Capacité thermique de quelques matériaux usuels [III.6]

Matériau	Capacité thermique kJ / K
Bois de structure	960
béton	2400-2610
Maçonnerie en brique	930-1800
pierre	2520-2790

III.3 La déperdition thermique

III.3.1 Définition

La déperdition thermique désigne la perte de chaleur d'un bâtiment. Due aux interactions entre l'intérieur et l'extérieur et aux échanges de fluide d'air, elle altère directement l'efficacité thermique de votre logement. Concrètement, les calories fournies par le système de chauffage filent vers l'extérieur au lieu de chauffer l'intérieur comme le devraient.

- Concrètement, la déperdition thermique peut s'effectuer de plusieurs manières :
 Au travers des parois qui séparent le milieu intérieur et extérieur : un mur, une fenêtre, une porte...

- Par l'intermédiaire des ponts thermiques, c'est à dire des points de construction où la barrière isolante est interrompue : entre deux étages, entre deux panneaux isolants, entre deux éléments de la construction...
- Par la ventilation mécanique contrôlée (VMC) et les grilles d'aération qui assurent l'indispensable renouvellement de l'air intérieur [15].

III.3.2 Ponts thermiques

Les ponts thermiques provoquent d'importantes dépenses énergétiques, génèrent également un inconfort, et causent aussi la forte détérioration des matériaux.

Il existe trois grandes catégories de ponts thermiques :

- Les ponts thermiques linéaires qui sont les plus importants puisqu'ils se situent à la jonction entre le plancher bas, haut ou intermédiaire et le mur extérieur ;
- Les ponts thermiques ponctuels qui se situent à la jonction de trois parois, comme à l'angle entre le plancher et deux murs.
- Les ponts thermiques structurels qui sont directement liés à la technique de mise en œuvre d'un isolant [15].

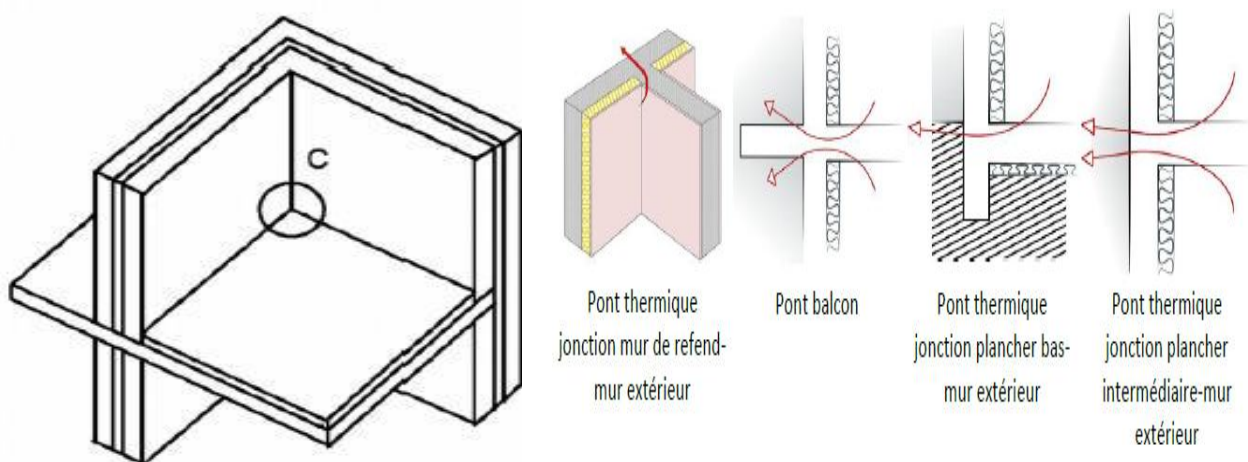


Figure III.2 : Les ponts thermiques les plus courants [15]

III.4 L'Isolation thermique

L'isolation thermique est constituée des matériaux ou dispositifs destinés à empêcher les déperditions ou les apports thermiques.

Contrairement aux métaux, les isolants thermiques ne conduisent pas la chaleur mais lui opposent une résistance. Et par conséquent, plus la résistance exercée par l'isolant est importante, alors plus l'isolation thermique est efficace.

La performance thermique d'un isolant est liée à la conductivité thermique λ du matériau et la résistance thermique R qui lui est associée.

La résistance thermique (R) s'exprime en $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Elle correspond au rapport de l'épaisseur (en mètre) sur la conductivité thermique ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) du matériau considéré [15].

III.4.1 Types d'isolants

Les isolants thermiques sont regroupés dans quatre grandes catégories selon leur origine. Les quatre types d'isolants sont : isolants naturels, isolants minéraux, isolants synthétiques et isolants nouvelle génération. Chaque famille d'isolants a des propriétés particulières en fonction de leur utilisation pour l'isolation d'un bâtiment [15].

III.4.1.1 Les isolants synthétiques

Les isolants synthétiques sont issus de la chimie du pétrole et du chlore, ils sont produits à partir de matières non renouvelables, selon des procédés de fabrication très consommateurs d'énergie. Ces isolants sont très nocifs à l'environnement puisqu'en effet, ils contiennent des substances qui appauvrissent la couche d'ozone et libèrent des gaz toxiques et mortels en cas d'incendie. Par conséquent, des substituts commencent à être développés et commercialisés, ceux-ci étant constitués de matériaux recyclés. Malgré leurs propriétés peu écologiques, les isolants synthétiques sont les plus utilisés pour isoler les bâtiments puisque ce sont d'excellents isolants thermiques [15].

Quelques exemples : mousse de polyuréthane, polystyrène expansé ou encore polystyrène extrudé

III.4.1.2 Les isolants minéraux

Les isolants minéraux sont issus de matières naturelles abondantes telles que les roches volcaniques, le sable ou encore le verre recyclé. La plupart de ces isolants sont composés de matériaux recyclés. Leur élimination se fait en décharge, ces isolants sont entièrement recyclés, étant considérés comme de la matière inerte. Toutefois, leur fabrication est également très consommatrice d'énergie. Ces isolants sont réputés pour leur résistance au feu et leur longue durée de vie [15] :

Quelques exemples : laine de verre, laine de roche ou encore perlite

III.4.1.3 Les isolants naturels :

Les isolants naturels sont issus de matières bio-renouvelables, aussi bien animales que végétales, et produits selon des procédés peu énergivores. Contrairement aux isolants minéraux, la matière première des isolants naturels n'est parfois pas très abondante et

elle ne se trouve que dans certaines régions du globe. La majorité de ces isolants peuvent être détruits de manière écologique et sans danger, uniquement par compostage. Pour autant, certains de ces matériaux peuvent contenir du polyester, auquel cas, il faut tout de même faire attention au mode de fabrication avant de les détruire [15] :

Quelques exemples : chanvre, laine de mouton, paille, plumes de canard, laine de coton, liège ou encore laine de bois

III.4.1.4 Les isolantes nouvelles générations :

Les isolants « nouvelle génération » utilisés dans le neuf, sont pour le moment très peu utilisés. Certains sont très performants et d'autres peu fiables. Ils ont pour objectifs d'être des isolants minces pour être utilisés notamment dans les combles, ou bien beaucoup plus imposants comme le béton cellulaire qui lui sert à la fois de mur portant et d'isolant [15] :

Quelques exemples : brique ou encore béton cellulaire.

III.4.2 Les différentes utilisations des isolants :

Les isolants ont tous des propriétés et un rendement qui leur sont propres. Ainsi, ils n'ont donc pas la même utilisation dans l'isolation d'un bâtiment.

Pour une isolation efficace, il faut compter environ 30 cm d'épaisseur d'isolants pour les combles, 20 cm pour les murs et 10 cm pour le sol. Bien évidemment, l'épaisseur est directement liée aux isolants utilisés, à leur performance énergétique, et à leur conductivité thermique. Aussi, il ne s'agit pas d'isoler un mur, par exemple, avec une seule couche de 20 cm d'épaisseur, mais plutôt de faire au minimum deux couches croisées pour plus d'efficacité [15].

Ci-dessous sont comparés plusieurs matériaux fréquemment utilisés dans le bâtiment et dont les conductivités thermiques varient. Pour chaque matériau on indique l'épaisseur nécessaire pour obtenir une résistance thermique de $3 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Tableau III.3 : Matériaux utilisés dans le bâtiment dont l'épaisseur nécessaire pour obtenir une résistance thermique de $3 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$

Matériaux	Epaisseur (en cm) pour $R = 3 \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$
Isolant sous vide	2.4
Aérogel	3.6
Polyuréthane	7 – 9
Polyisocyanurate	7
Laine de verre	9- 12
Polystyrène expansé	9 – 12
Polystyrène extrudé	10 – 12
Laine de roche	10 – 12
Ouate de cellulose	11 – 12.5
Laine de lin	11 – 12.5

III.5 Le Stockage thermique :

Le stockage d'énergie thermique est une technologie utilisée avec succès à travers le monde, et ce depuis plusieurs milliers d'années. Aujourd'hui, des systèmes de stockage et d'utilisation des énergies renouvelables sont commercialisés, mais de nombreux développements sont encore en cours, couvrant une large variété de technologies telles que : [16]

- L'activation de la masse thermique du bâtiment, et l'amélioration du contrôle de la restitution de chaleur ;

- Le stockage d'énergie thermique sous forme latente, grâce aux matériaux à changement de phase (MCP) ;

- Le stockage géothermique ;

- Les réservoirs de stockage thermique.

L'énergie thermique peut être stockée sous forme sensible et/ou latente. Le stockage sensible est quantifié par la chaleur spécifique, C_p ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), qui caractérise l'énergie nécessaire à l'élévation de 1K de 1kg du matériau considéré, sans changement de phase. Le stockage latent est caractérisé par la chaleur latente, L (J/kg), qui représente la quantité d'énergie nécessaire au changement de phase de 1kg du matériau considéré. La capacité de stockage peut être exprimée sous forme volumique, soit ρC en sensible et ρL en latent, ρ étant la masse volumique du matériau.

III.5.1 Types de stockage de l'énergie thermique

III.5.1.1 Stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est réalisé par un apport thermique augmentant la température du milieu récepteur « monophasé » (liquide ou solide). Le déstockage (ou soutirage) de la chaleur entraînera une diminution de la température de ce milieu. Considérons le réchauffement d'un corps à haute température qu'on place ensuite dans un système d'utilisation dont la température est plus basse. À pression constante, pour l'élévation de la température T_1 à T_2 d'un corps de masse m et de capacité thermique massique $c(T)$, l'énergie stockée est donnée par la variation d'enthalpie :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} mC_p(T)dT \quad (\text{III.4})$$

Afin de simplifier le problème, on suppose que la capacité thermique massique ne dépend pas de la température : $C(T) = \text{constante} = C$. L'équation (III.4) devient :

$$H_2 - H_1 = mC_p(T_2 - T_1) \quad (\text{III.5})$$

Remarque 1: La quantité d'énergie qui est stockée est proportionnelle à la différence de température. Ainsi, le choix de ce stockage est intéressant lorsque l'écart de température est grand. Par la suite, on met le corps préalablement chauffé en présence d'un système utilisateur tel que sa température T_1' soit inférieure à T_2 dans le but qu'il récupère d'une quantité d'énergie égale à :

$$m C_p = (T_2 - T_1') - |Q_{\text{perte}}| \quad (\text{III.6})$$

Où, $|Q_{\text{perte}}|$ désigne la perte de chaleur au cours du maintien à la température T_2 , ou lors de l'échange que l'on essaie de minimiser [Dumas, 2002], un stockage par chaleur sensible est ainsi réalisé.

Au cours du processus de stockage, si nous rencontrons les cas suivants :

1. Si $T_2 > T_1$ alors il s'agit du stockage chaud.
2. Si $T_2 < T_1$ alors il s'agit du stockage froid.

Selon le cas considéré, l'effet inverse sera un déstockage soit du chaud ou du froid.

Les principaux constituants employés pour le stockage par chaleur sensible sont des liquides (eau) ou des solides (pierres) possédant des chaleurs spécifiques importantes (18).

Le Tableau 4 donne les propriétés thermo physiques de matériaux communément rencontrés dans le bâtiment [17].

Tableau III.4 : Matériaux communément rencontrés dans les bâtiments et contribuant au stockage de chaleur sensible [17].

Matériaux de construction	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Capacité calorifique volumique (kJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Acier	7800	502	3916	50
Aluminium	2700	880	2376	210
Amiante	2500	1050	2625	0,16
Argile	1900	837	1590	0,85
Asphalte	2300	1700	3910	1,2
Béton	1400	1000	1400	0,51
Bois	800	2093	1674	0,16
Brique	1800	840	1512	0,62
Ciment	700	1050	735	0,36
Panneaux de formaldéhyde	30	1674	50	0,03
Granite	2650	900	2385	2,9
Grès	2200	712	1566	1,83
Liège	160	1888	302	0,04
Marbre blanc	2500	880	2200	2
Plastique	1050	837	879	0,5
Plâtre	1200	837	1004	0,42
Polyuréthane	30	837	25	0,03
P.V.C.	1379	1004	1385	0,16
Siporex	550	1004	552	0,12
Thermalite	753	837	630	0,19

III.5.1.2 Stockage de l'énergie thermique par chaleur latente

Le stockage par chaleur latente consiste à emmagasiner de l'énergie, qui par la suite va provoquer une variation de température et un changement de phase du matériau. Lors de la restitution de l'énergie, on observera le phénomène du changement de phase inverse. La chaleur Q , absorbée ou cédée, durant le processus de changement de phase est régie par :

$$Q = mL_F \quad (\text{III.7})$$

Dans la pratique, il se peut que la chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans les processus thermiques. En effet, si on considère qu'un constituant

servant de stockage est initialement à la température T_1 , qui est inférieure à la température de fusion T_F et que T_F soit inférieure à la température finale T_2 ($T_1 < T_F < T_2$), le stockage se fera sous forme sensible et sous forme latente. A pression constante, le stockage de l'énergie est donné par la variation d'enthalpie [Dumas, 2002] :

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_F} mc_{sol}(T)dT + mL_F(T_F) + \int_{T_F}^{T_2} mc_{liq}(T)dT \quad (III.8)$$

Avec :

C_{sl} : capacité thermique massique à l'état solide [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

C_{liq} : capacité thermique massique à l'état liquide [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]

L_F : chaleur latente de changement de phase [$J.kg^{-1}$]

En supposant que les capacités thermiques massiques des corps sont indépendantes de la température, l'équation (18) devient :

$$H_2 - H_1 = mc_{sol}(T_F - T_1) + mL_F(T_F) + mc_{liq}(T_2 - T_F) \quad (III.9)$$

Et

$$L_F(T_F) = H_{liq}(T_F) - H_{sol}(T_F) > 0 \quad (III.10)$$

Avec :

$H_{sol}(T_F)$: enthalpie massique du solide à la température d'équilibre T_F [$J.kg^{-1}$]

$H_{liq}(T_F)$: enthalpie massique du liquide à la température d'équilibre T_F [$J.kg^{-1}$]

$L_F(T_F)$: variation enthalpie lors du changement de phase [$J.kg^{-1}$]

Dans l'équation (III.9), le terme mL_F est très grand comparé aux autres termes de l'équation. Cela vient du fait que l'énergie stockée par chaleur latente est beaucoup plus importante que celle du stockage par chaleur sensible [Dumas, 2002].

Le stockage par chaleur latente est ainsi performant pour stocker de grandes quantités d'énergie lorsque les masses et l'écart de température sont faibles. Cependant, ce type de stockage oblige à recourir à des technologies très élaborées [17].

III.5.1.3 Stockage d'énergie thermique par voie thermochimique

Le stockage thermochimique met en jeu l'énergie absorbée au cours d'une réaction chimique endothermique. Lors d'un réchauffement, l'équilibre chimique est perturbé et celui-ci se déplace vers la droite (sens de réaction). Lorsqu'il y a contact avec une source dont la température est plus basse que celle au départ, le déplacement de l'équilibre chimique est observé dans le sens inverse. Dans le premier cas, l'énergie est stockée et

dans le second elle est déstockée. D'après [Dumas, 2002], le déplacement de l'équilibre est généralement insuffisant et le gain d'énergie est inférieur à 10 % de l'énergie de type sensible. Selon [El Omari, 2001], une étude menée par [Ehmimed, 1983] a démontré que ce type de stockage est très limité.

Parmi les trois types de stockages présentés précédemment, le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique. Les matériaux utilisant ce type de stockage sont qualifiés de « Matériaux à Changement de Phase (MCP) » [17].

III.6 Regard sur l'habitat traditionnel kabyle

L'architecture traditionnelle kabyle, telle que construite par nos ancêtres, répondait à une certaine logique constructive, mais aussi aux besoins d'antan. C'était une architecture évolutive, elle se transformait lentement au fur et à mesure des besoins des occupants ; elle présentait notamment l'avantage de ne pas dénaturer le paysage.

Le patrimoine est un champ très large diversifié et l'habitat traditionnel y est un composant incontestable. Loin d'être une composante d'ancienneté et d'archaïsme, l'habitat traditionnel se trouve conforme avec les nouveaux concepts contemporains et peut répondre à nos besoins actuels [18].

Les matériaux de construction :

Pour l'exécution des différentes parties de la construction, la maison Kabyle est édifiée avec des matériaux naturels et locaux qui sont composés essentiellement de la pierre, la terre et du bois [18].

La terre

La terre est un matériau très utilisé dans la construction de la maison Kabyle. Il est employé pour la liaison des pierres composant les murs de la maison, mais également pour enduire et pour revêtir les murs et le sol de la maison traditionnelle. La terre est aussi utilisée pour la confection d'un certain mobilier indispensable dans la maison traditionnelle qui sont les différentes silos et jarres existant au sein de cette dernière, à savoir les silos à grains, les jarres à l'huile et les jarres à eau. La terre est le matériau naturel par excellence, présent dans la nature, il est facile à extraire et ne présente aucune difficulté quant à son extraction, à son transport et à sa manipulation. La couleur de la terre dépend de la quantité d'oxyde métallique et du calcaire qu'elle peut contenir.

La qualité de la terre devra souvent être améliorée pour obtenir une composition optimale.

Dans le cas où elle est trop grasse, une quantité de sable, de gravier, de paille ou de bois morcelé doit être ajouté pour diminuer sa quantité en argile. Ensuite pour l'aider à durcir, un liant doit lui être incorporé.

Si au contraire elle est maigre et friteuse, alors une quantité d'argile doit lui être additionnée pour l'améliorer.

Il est l'un des plus anciens matériaux qui a toujours servi pour la construction de l'habitation de l'homme dans le monde entier. Les murs épais en terre présentent l'avantage d'accumuler de la fraîcheur dans les périodes de fortes chaleurs et de se transformer en accumulateur de chaleur dans les périodes les plus froides.

En Kabylie, la technique utilisée pour la construction de certains murs en terre, est celle du coffrage en place ou le pisé [18].

La paille

Ce matériau dans la maison Kabyle est utilisé mélangé avec la terre pour préparer l'enduit qui est utilisé pour les murs et les sols de cette dernière. La paille, matériau végétal, présente l'avantage d'être économique, durable et biodégradable.

Mélangé à de la terre, la paille constitue un enduit d'une très bonne isolation phonique [18].

IV. Introduction aux matériaux à changement de phase

IV.1 Introduction

Les MCPs sont utilisés pour leur capacité de stockage de chaleur latente. Par comparaison aux matériaux de stockage de chaleur sensible, ils ont l'avantage de stocker une quantité d'énergie supérieure à volume égal et dans une plage de température plus réduite. Pour des applications dans le bâtiment, le stockage latent est réalisé avec des MCPs ayant une température de fusion comprise entre 20° et 60 °C .

Pour un MCP idéal, le changement de phase (de liquide à solide ou de solide à liquide) a lieu à température constante, T_f (température de fusion). Lorsque la température est inférieure à T_f , le matériau est solide, et lorsque la température est supérieure à T_f , le matériau est liquide (Figure 1). Pour une évolution de température constante dans le temps d'un matériau, le flux de chaleur est plus important durant le changement de phase que dans son état liquide ou solide (Figure 2, droite).

On parle de comportement thermique idéal (ou de MCP idéal) lorsque la fusion se déroule à température constante sans hystérésis entre la solidification et la liquéfaction. Pour les matériaux réels, le changement de phase intervient sur une plage de température de fusion $[T_{f1}; T_{f2}]$. Par ailleurs, la plupart des matériaux présente un phénomène d'hystérésis entre leurs plages de fusion et de solidification. De la même façon, on définit aussi une plage de solidification $[T_{f1}; T_{f2}]$. [19]

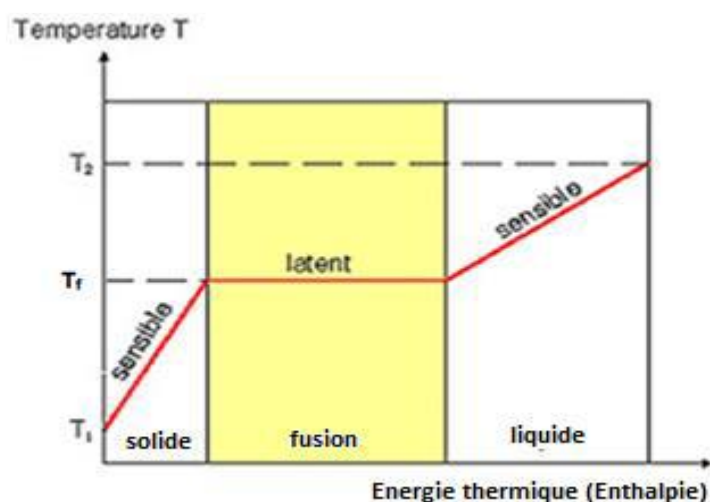


Figure IV.1 : Stockage de chaleur dans un MCP en fonction de la température, cas de la fusion [19]

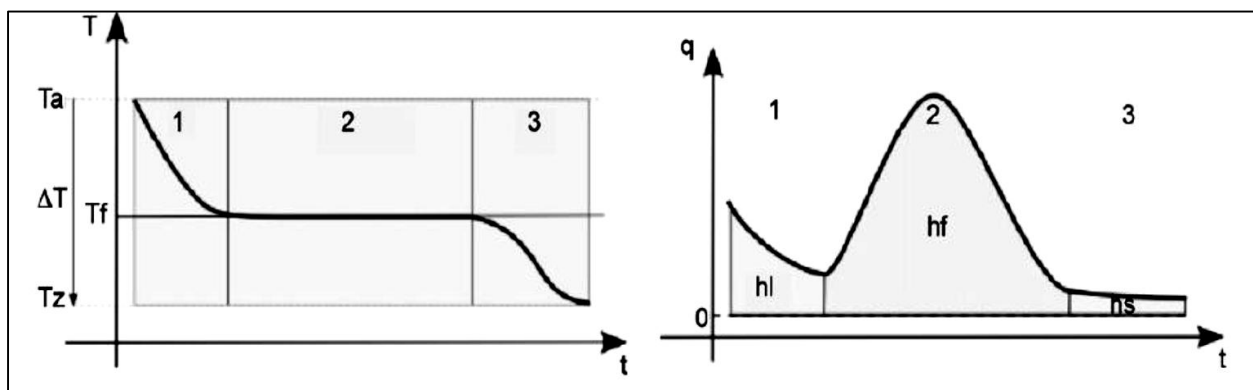


Figure IV.2 : Évolution temporelle de la température et du flux de chaleur durant la solidification pour un corps pur soumis à une différence de température 1 : phase liquide ; 2 : solidification ; 3 : phase solide. [19]

La surfusion

Pour certains MCPs tels que les sels hydratés, la solidification s’amorce à une température inférieure à la température de solidification. Le MCP atteint donc ainsi une température inférieure à la température de solidification sans que celle-ci soit amorcée, puis remonte à la température de solidification (sans apport d’énergie thermique externe). La Figure 5 illustre ce phénomène.

L’explication est structurelle : la solidification nécessite la formation de cristaux et la propagation de ceux-ci. Pour ces MCP, l’énergie nécessaire au démarrage du processus de solidification ne compense pas celle nécessaire à la création de l’interface solide/liquide. De ce fait, la température d’amorce de la solidification est inférieure à T_f . Ce phénomène est appelé la surfusion [19].

La ségrégation

Ce phénomène concerne les sels hydratés. La fusion est congruente, ce qui induit l’apparition de cristaux dit « inférieurs ». La conséquence directe est la dégradation des propriétés thermiques et des performances de stockage suite à des cycles répétés de fusion et de solidification. Ce problème peut être évité par l’ajout de matériaux tels que les polymères. Une autre solution consiste à ajouter des matériaux aux sels hydratés afin d’en augmenter la viscosité et donc la cohésion [19].

Le cycle de vie thermique

Il s’agit du nombre de cycles fusion/solidification au bout duquel les performances thermiques du MCP se dégradent. Les paraffines ont des cycles de vie thermique élevés (Hadjieva et al. 1992). La plupart des MCPs commercialisés et pouvant être utilisés dans le bâtiment ont une durée de vie comprise entre 3000 et 10000 cycles thermiques [IV.1].

L'inflammabilité

L'introduction de MCP dans le bâtiment doit tenir compte du risque d'incendie. Récemment, Cai et al. (2006, 2007 et 2008) ont étudié les propriétés de divers MCPs et se sont intéressés aux propriétés d'inflammabilité de ceux-ci. Ils exploitent essentiellement le « Heat Release Rate » (HRR) qui est un paramètre qui caractérise la vitesse de combustion d'un matériau. Celui-ci est déterminé par des tests de calorimétrie et de perte de masse. Les valeurs obtenues pour les différents matériaux, et en particulier l'allure du pic du HRR durant la combustion, permet de comparer l'inflammabilité des différents MCPs.

Par ailleurs, de nombreuses études ont été réalisées dans l'objectif de réduire l'inflammabilité des MCPs en incorporant des matériaux intumescents et des métaux . Ceux-ci permettent de retarder l'inflammabilité, en relevant les températures d'inflammabilité. En contre partie, les MCPs n'étant plus purs, à masse égale, la capacité latente s'en trouve réduite. Par exemple, Zhang démontre que par rapport à un MCP pur, le matériau conçu pour réduire le risque d'incendie a une capacité latente réduite de moitié.

Enfin, certains MCPs, telles les paraffines, ont un point éclair, température limite au-delà de laquelle le matériau devient inflammable au contact de l'oxygène [19].

La corrosion des matériaux

La plupart des sels hydratés présentent un risque de corrosion avec le métal utilisé pour leur conditionnement (encapsulation). Coen Porsini (1988) et l'IEA (IEA-SHC, Task32, 2005) se sont intéressés au problème de la corrosion pour plusieurs sels hydratés du commerce. Cabeza et al. (2001) ont étudié la résistance à la corrosion de cinq métaux communs exposés à des sels hydratés [19].

La dilatation

Certains MCPs, telles que les paraffines, présentent une différence de densité élevée entre la phase solide et la phase liquide. Ce phénomène de dilatation doit être pris en compte lors du dimensionnement de la structure d'accueil du MCP [19].

IV.2 Classification des MCPs

Les matériaux à changements sont nombreux et disponibles dans n'importe quelle gamme de température souhaitée. Les MCPs peuvent être classés selon leur nature chimique, en trois catégories (organiques, inorganiques et eutectiques). Un grand nombre de matières

chimiques organiques et inorganiques peuvent être identifiées comme MCP d'un point de vue température et chaleur latente de changement de phase. En revanche, le point de transition de phase dans une plage de fonctionnement pour la majorité d'entre eux, ne permet pas de répondre aux critères requis pour un support de stockage adéquat.

Afin de pallier à ces inconvénients, des solutions seront proposées après avoir passé en revue les différentes familles de matériaux à changements de phase [20].

Abhat a établi, en 1983, la classification des matériaux utilisés pour le stockage thermique de l'énergie. Cette classification faisant office de référence dans le domaine est développée dans la figure 5 pour le stockage thermique par chaleur latente solide/liquide [21].

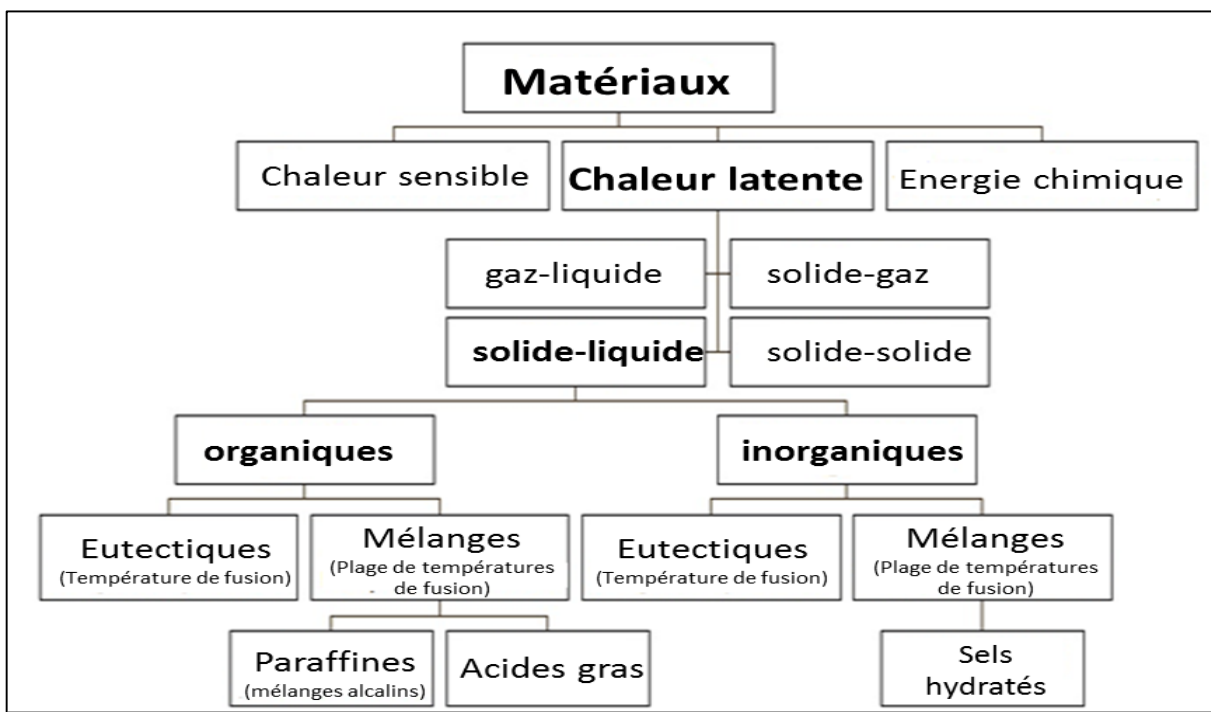


Figure IV.3 : Organigramme de classification des MCP solide/liquide [19]

IV.2.1 Les MCPs organiques.

Dans les matières organiques, on distingue les paraffines et les non-paraffines [Sharma et al. 2009a]. Les matières organiques ont des mélanges congruents, c'est-à-dire qu'elles peuvent être solides et liquides à plusieurs reprises sans entraîner la ségrégation des phases et la dégradation de leur chaleur latente. La cristallisation se fait avec une surfusion quasi-nulle, et dans la majeure partie des cas, elle est non corrosive [20].

IV.2.1.1 Les paraffines

Les paraffines normales de type C_nH_{2n+2} sont une famille d'hydrocarbures saturés dont les propriétés physiques sont assez semblables. Les paraffines possédant un nombre d'atomes de carbone situé entre 5 et 15 sont caractérisés de liquides, et les autres de solides cireux. La cire de paraffine est un mélange issu des chaînes n-alcanes $CH_3 - (CH_2) - CH_3$. Lors de la cristallisation de la chaîne (CH_2) , une quantité importante de chaleur latente est libérée. Plus la longueur de cette chaîne sera grande, plus la température et la chaleur latente de fusion seront élevées. La paraffine est très utilisée car elle est sûre, fiable et non réactive [Hasnain, 1998]. Elle possède un long cycle de fusion, non-corrosive, chimiquement inerte et stable ($< 500^\circ C$) [Lane, 1983]. Elle est compatible avec tous les conteneurs en métal et s'incorpore facilement dans les systèmes de stockage de l'énergie thermique [Lane, 1983]. Lors du changement de phase, sa variation en volume et sa pression en vapeur sont faibles. En revanche, elle possède également des propriétés non désirables à son utilisation. En effet, la paraffine est inflammable, possède une faible conductivité thermique et n'est pas compatible avec les conteneurs en plastiques (elle infiltre et adoucit ces derniers [Lane, 1983]). Néanmoins, ces inconvénients peuvent être réduits en modifiant légèrement ses propriétés thermo physiques et l'unité de stockage [Veraj et al, 1999]. D'après [Sharma et al, 2009a], les plus prometteuses sont résumées dans le tableau I.1 : [20]

Tableau IV.1 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques paraffines

Les paraffines		
Nombre d'atomes de carbone	Température de mélange ($^\circ C$)	Chaleur latente de fusion ($kJ \cdot kg^{-1}$)
16	16.7	237,1
18	28	244
20	36.7	246

IV.2.1.2 Les non-paraffines.

Il s'agit de la plus grande famille de matériaux à changement de phase dont les propriétés sont très différentes. Elles sont considérées comme la plus grande catégorie pouvant servir de stockage de l'énergie thermique. Des études ont été menées par [Abhat, 1978; Abhat et al, 1981], [Buddhi & Sawhney, 1994], [Lane, 1983, 1989] pour identifier les candidats potentiels pour le stockage de l'énergie thermique. Ces recherches portent

principalement sur un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols. Elles ont conclu que ces matières sont extrêmement inflammables et ne doivent en aucun cas être exposées à une forte température, à des flammes ou à des agents oxydants. Ces matières organiques peuvent être divisées en sous-groupes : les acides gras et autres non-paraffines organiques. Pour le sous-groupe « autres non paraffines organiques », les caractéristiques de ces matériaux sont les suivantes :

- Chaleur de fusion élevée
- Inflammabilité
- Faible conductivité thermique
- Niveau de toxicité variable

Selon [Sharma et al. 2009a], les meilleurs candidats sont donnés par le tableau I.2) : stabilité en hautes températures. [20]

Table IV.2 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques non paraffines.

<i>Les non-paraffines</i>		
Matériau	<i>Température de mélange (°C)</i>	<i>Chaleur latente de fusion (kJ·kg⁻¹)</i>
acide D-Lactique	26	284
Trimyristine	33-57	201-213

IV.2.1.3 Les acides gras.

Le sous-groupe « acides gras » possède des chaleurs de fusion comparables avec celles des paraffines. De plus, ils sont peu ou pas concernés par la surfusion [Lane & Glew, 1975] et ils présentent une faible corrosion. Les acides gras peuvent être considérés comme matériaux de stockage de l'énergie thermique. A basse température, le tableau I.3 indique quelques acides gras les plus prometteurs [Sharma et al. 2009] : [20]

Table IV.3 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques acides gras.

<i>Les acides gras</i>		
Matériau	<i>Température de mélange (°C)</i>	<i>Chaleur latente de fusion (kJ·kg⁻¹)</i>
Acide acétique	16,7	184
Polyéthylène glycol	20-25	146
Acétamide	81	241

IV.2.2 Les MCPs inorganiques

Dans cette catégorie, on distingue les sels hydratés et les métaux.

IV.2.2.1 Les sels hydratés.

Ils peuvent être considérés comme des alliages de sels inorganiques et de l'eau formant un solide cristallin. Les sels hydratés sont le groupe qui a été largement étudié pour leur utilisation en tant que MCP dans les systèmes thermiques de stockage de la chaleur car ils présentent de nombreux avantages tels que :

- une forte chaleur latente de fusion par unité de volume (diminution de la taille du système de stockage);
- une conductivité thermique élevée (augmentation du transfert de chaleur) ;
- faible variation de volume lors du changement de phase;
- faible pouvoir corrosif;
- compatibilité avec les conteneurs en plastique;
- faible coût [20].

Tableau IV.4 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels hydratés

<i>les sels hydratés</i>		
Matériau	<i>Température de mélange (°C)</i>	<i>Chaleur latente de fusion (kJ·kg⁻¹)</i>
CaCl₂.12H₂O	29,8	174
LiNO₃.2H₂O	30	296
LiNO₃.2H₂O	30	189
FeCl₃.6H₂O	37	223

IV.2.2.2 Les métaux

Il s'agit essentiellement des métaux à fusion basse et des métaux eutectiques. Cette catégorie n'a pour l'instant pas été envisagée pour la technologie des MCPs en raison de leur poids. Leurs caractéristiques principales sont : une faible chaleur de fusion par unité de poids, une forte chaleur de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée, une chaleur spécifique faible et une pression en vapeur relativement élevée. Les plus prometteurs des métalliques [Sharma et al. 2009a] sont donnés par le tableau I.5 : [20]

Tableau IV.5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métalliques.

Les métalliques		
Matériau	<i>Température de mélange (°C)</i>	<i>Chaleur latente de fusion (kJ·kg⁻¹)</i>
Gallium	30	80,3
Cerrobend eutectique	70	32,6

IV.3 Critères de choix d'un MCP

IV.3.1 Propriétés des MCPs utilisés dans le bâtiment

Quatre critères sont communément considérés dans la littérature pour identifier les MCPs les plus adéquats à une utilisation dans le bâtiment. Il s'agit de leurs propriétés thermiques, physiques, cinétiques et chimiques. À ces dernières peuvent être ajoutés le coût des MCPs et leur impact environnemental [19].

Propriétés thermiques

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie [20].

Propriétés physiques

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc, un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCP aqueux).
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur [20].

Propriétés cinétiques

- La surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additifs est nécessaire.
- Un taux de cristallisation important [20].

Propriétés chimiques

- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- La compatibilité avec les matériaux de construction.
- L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) passe par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée [20].

IV.3.2 Avantages et inconvénients de chaque groupe de MCP

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux avantages et inconvénients des MCPs. Une synthèse de ces études est présentée par le Tableau 6 et le Tableau 7 pour les MCPs inorganiques et organiques, respectivement [19].

Tableau IV.6 : Avantages et inconvénients des MCP inorganiques. [19]

Composés chimiques	Sels hydratés, sels fondus, métaux, et alliages
Avantages	Capacité de stockage latent élevée (pour les sels hydratés autour de 240 kJ.kg-1) Densité élevée. Conductivité thermique relativement élevée (0,5 W.m-1.K-1). Non-inflammable. Plage de changement de phase peu étendue Économique.
Inconvénients	Surfusion Séparation de phases Corrosif Ségrégation de phase Fusion irréversible (fusion congruente et formation de sels de plus faibles qualités, et donc dégradation des propriétés thermo-physiques)
Méthodes d'amélioration	Pour les problèmes de dégradation des propriétés : mélange à des agents de nucléation et à des épaississants.

Tableau 7 : Avantages et inconvénients des MCP organiques. [19]

Composés chimiques	Paraffines $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$	Organiques non-paraffinées : Acides gras, esters, alcools, glycols
Avantages	Économique Bonne capacité latente : de 120 à 210 kJ/kg Inerte chimiquement (pas de corrosion, compatibilité chimique avec les matériaux usuels du bâtiment).	Plage de fusion réduite par rapport aux paraffines
	Disponible dans une large gamme de températures de changement de phase Pas de ségrégation Cycle de vie long Recyclable	
Inconvénients	Conductivité thermique faible (0,2 W.m-1.K-1)	Coûteux
	Dilatation importante Plages de fusion étendues Point éclair (devient inflammable au contact de l'oxygène passé une certaine température) Densité faible Inflammable	
Méthodes d'amélioration	Ajout d'additifs augmentant la conductivité thermique Ajout de matériaux ignifuges et/ou utilisation de contenants permettant de limiter le risque d'incendie 1.5 Méthodes d'incorporation	

IV.4 Conditionnement des MCPs

Un conditionnement du MCP est nécessaire afin de prévenir les fuites quand celui-ci est en phase liquide mais également afin de le protéger de son environnement. En outre, le conditionnement peut avoir d'autres fonctions, comme augmenter les caractéristiques thermiques de l'ensemble, servir de barrière ignifuge, ou nuancer les caractéristiques radiatives. Diverses techniques de conditionnement sont détaillées dans les paragraphes ci-après [22].

IV.4.1 Macro-encapsulation

Des tubes, des parallélépipèdes, des poches et des sphères de différentes tailles permettent de conditionner des MCPs. Cette voie est appelée la macro encapsulation. Un exemple de MCP macro-encapsulé dans une poche en plastique est visible en figure 6.



Figure IV.4 : MCP macro encapsulé dans un sachet en Polyéthylène (PE) [19]

Le plus souvent, l'utilisation de matières plastiques est privilégiée (Kośny, 2015), en raison du faible coût et de la facilité de mise en œuvre. Barba et Spiga ont démontré en 2003 que le temps de transformation de changement de phase s'accroît proportionnellement au carré du rayon de la capsule (Barba and Spiga, 2003). C'est pourquoi il est préférable de macro encapsulé en poches de faibles épaisseurs ou en billes de faibles diamètres. Dans cette optique, l'enfilage est une voie efficace.

En effet, il est possible d'envelopper le matériau à changement de phase avec un film plastique ou métallique et d'aboutir à une poche de faible épaisseur pour une grande surface. Cette technique peut se révéler économique tant elle est maîtrisée dans l'industrie alimentaire et de la santé. Il faut considérer que lors de la transition solide vers liquide, le matériau à changement de phase gagne en volume, ce qui peut poser problème avec un enfilage sous vide. Avec la macro encapsulation, des problèmes de corrosion peuvent survenir, notamment au contact de certains métaux.

Des études existent sur ce sujet et ont montré que les mélanges eutectiques d'acides gras corrodent le cuivre tandis que les sels hydratés peuvent corroder l'aluminium (Ferrer et al. 2015, Oro et al. 2013). Des intégrations directes de MCPs macro encapsulés au sein de

bâtiments ont été réalisées pour des murs et des plafonds (Muruganantham et al. 2010b) mais aussi pour des greniers et des toits (Kosny et al. 2012).

Il est également possible d'utiliser de plus gros containers. Historiquement, la première utilisation documentée d'un matériau à changement de phase avait été faite en 1948 au Massachusetts Institute of Technology par Dr. Maria Telkes. Son idée avait été d'intégrer dans une maison des fûts métalliques contenant un MCP inorganique : le sel de Glauber, du sulfate de sodium déca hydraté de formule $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Telkes, 1978). Elle avait rencontré un problème avec cette technique : une fuite de MCP quand les fûts montaient en température. Ce dysfonctionnement était dû à la corrosion des fûts. L'utilisation de gros containers est de nos jours privilégiée pour des systèmes actifs qui embarquent un mécanisme permettant un bon échange thermique entre le MCP et un fluide convecteur [22].

IV.4.2 Micro encapsulation

La micro encapsulation consiste à protéger un composé en l'enrobant d'une barrière. Si ces microparticules sont creuses, on parle de microcapsules et si elles sont pleines on parle de microsphères. La taille des particules ainsi formées varie entre 1 μm et 1 mm. Selon leur composition interne, les microcapsules peuvent être définies comme mononucléaires, polynucléaires ou matricielles, comme visible en figure 5 (Tyagi et al. 2011b).

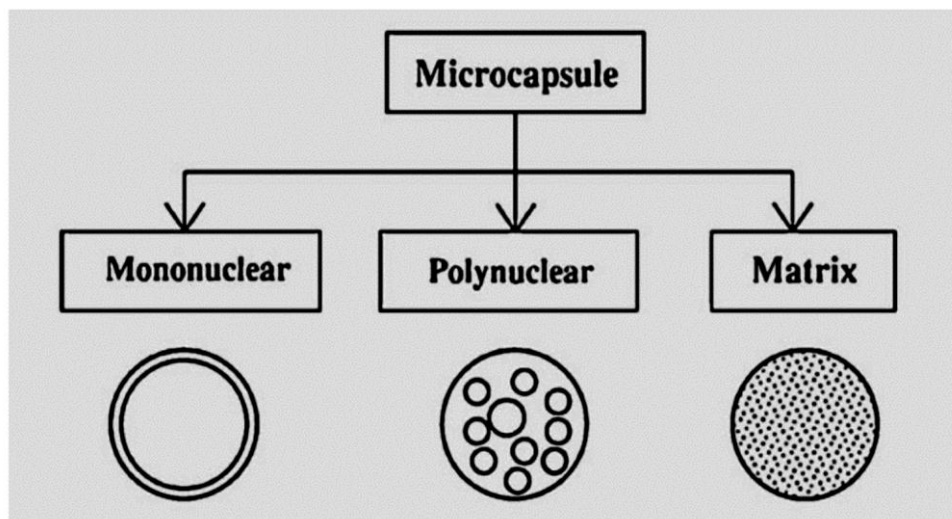


Figure IV.5 : Types de microcapsules Tiré de (Tyagi et al. 2011) [19]

Il existe des procédés de micro encapsulation physiques, chimiques, physico chimiques et physico-mécaniques (Giro-Paloma et al, 2016). La micro encapsulation peut par exemple

être réalisée par spray-drying (Hawladar et al. 2003), via un procédé de revêtement (Kaygusuz et al, 2008), par coacervation (Saihi et al, 2005) ou par polymérisation interfaciale (Cho et al, 2002). La coquille peut être composée de différents types de matériaux. Dans le cas de la méthode sol-gel par exemple, la coquille sera faite de silice. Pour des MCPs, outre la protection, un avantage supplémentaire est l'augmentation de la surface d'échange du transfert thermique (Tyagi et al. 2011). Toutefois, la coquille ne contribuant pas à la chaleur latente des particules, la micro encapsulation est un procédé qui réduit le stockage latent de chaleur d'un composé. Un fort taux de chargement des microcapsules est primordial pour maintenir une forte chaleur latente et la rentabilité de la solution.

Dans le domaine des MCPs, cette technique présente plusieurs avantages. Elle permet que la fonte du MCP se fasse à l'intérieur de la microcapsule et au MCP de changer faiblement de volume lors de la transition de phase (Tyagi et al, 2011). La microcapsule ainsi formée protège le MCP de son environnement. Ces microcapsules peuvent ainsi être ajoutées dans la masse d'un matériau que l'on veut mettre en forme, sans risque de fuite. En revanche, ajouter des microcapsules dans la masse du matériau peut détériorer ses propriétés mécaniques (Guo et al. 2016). Elles peuvent également être directement ajoutées dans un isolant classique, comme la cellulose. D'autre part, la micro encapsulation permet d'obtenir des petites particules, ce qui favorise l'échange thermique. Pour les MCPs, le taux d'encapsulation est dépendant des espèces chimiques considérées mais également de la méthode de synthèse. Le taux d'encapsulation peut par exemple atteindre 88% par polymérisation interfaciale. (Konuklu et al. 2015). Il est possible d'inclure une fonction d'ignifugation à la micro encapsulation (Kośny et al. 2009). La figure 8 présente à titre d'exemple des microcapsules contenant du Rubitherm®27 (RT27) qui ont été synthétisées par spray-drying en 2011 par Borreguero et al. (Borreguero et al. 2011). La coquille est composée de polyéthylène basse densité et d'un copolymère d'éthylène-acétate de vinyle (EVA).[22]

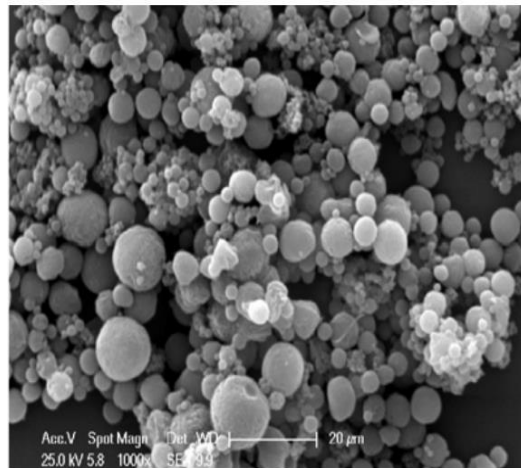


*Figure IV.6: Image MEB de microcapsules de PE-LD - EVA contenant du RT27
Tiré de (Borreguero et al. 2011)[19]*

La micro encapsulation est une technique efficace mais elle est coûteuse. D'autre part, elle est difficile à mettre en place dans le cadre de sels hydratés du fait de leurs hydrophiles : la barrière créée doit être une barrière hydrique pour ne pas modifier l'hydratation des sels au sein de la capsule (Hessbrugge and Vaidya, 1997). Elle est également complexe à mettre en œuvre dans le cas des mélanges eutectiques tant ceux-ci sont un mélange d'espèces chimiques. Cela dit, en 2017, Alva et al. ont réussi à micro-encapsuler un mélange eutectique d'acides myristique et palmitique avec une méthode sol-gel. Ils ont obtenu des microcapsules dotées d'une importante chaleur latente de fusion : 169.69 kJ/kg (Alva et al, 2017). C'est un excellent résultat mais dans leur méthodologie ils ne décrivent pas d'étape de rinçage après synthèse. Si le rinçage a été omis, la forte chaleur latente pourrait être due aux acides gras résiduels présents dans leurs composés à la fin de leur synthèse [22].

IV.4.3 Composite MCP Shape-stabilized (SS-PCM)

Une autre technique consiste à mettre en forme un matériau doté d'une microstructure qui permet au MCP de changer de phase sans qu'il n'y ait de soucis de fuite ou de corrosion. La structure du matériau suffit à créer un conditionnement efficace en permettant la transition solide/liquide sans avoir recours à la micro encapsulation. Un tel matériau est couramment appelé SS-PCM. Par exemple, de la paraffine microscopique peut être incorporée à une matrice PEHD (Li et al. 2009). Cela dit dans cette étude l'impact environnemental du matériau ne semble pas être une question de premier plan.

Dans un autre projet, Yipinga et al. ont réussi à préparer un SS-PCM qui contenait 80 % de MCP également dans du PEHD (Yipinga et al. 2006). C'est un résultat prometteur tant la quantité de MCP intégrée est élevée. En 2018, Ma et al., ont imprégné de la farine de

bois avec un mélange eutectique d'acides laurique et myristique (Ma et al., 2018). Ils ont ajouté un sel complexe afin d'assurer la stabilité du matériau. Le résultat est un SS-PCM, sur lequel ils ont réalisé des tests de fuite en montée de température. Aucune fuite n'est survenue. C'est un bon résultat mais le composé qu'ils ont mis en forme est sous forme de poudre. Afin d'intégrer leur matériau dans un bâtiment, il conviendrait de mettre en forme des composites, par exemple sous forme de panneaux et de s'assurer de leur bonne tenue mécanique. Mettre en forme un SS-PCM de conditionnement peut permettre un conditionnement efficace du matériau mais il convient dès lors de s'assurer de sa durabilité, notamment qu'il n'y aura pas de fuite de MCP [22].

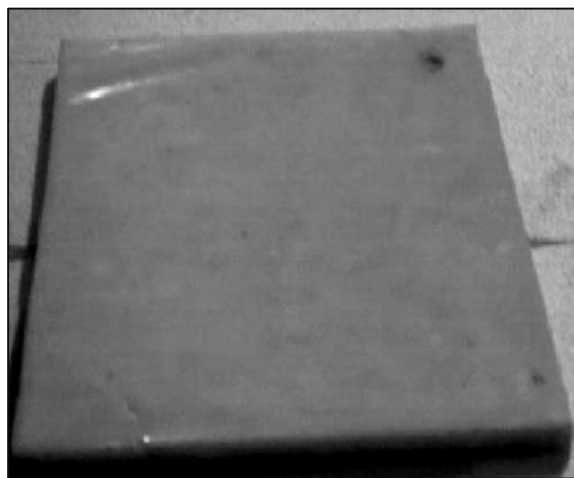


Figure IV.7 : MCP sous forme stabilisée [19]

IV.5 Les MCPs intégrés dans les murs.

Parmi l'ensemble des applications existantes, l'intégration des MCPs dans les murs est la plus utilisée car la zone d'échange de chaleur est grande et efficace, mais également sa mise en œuvre est pratique et simple. Les deux méthodes d'intégration des MCPs dans les murs sont « l'immersion » et « l'attachement » [Suliyang, 2010] [20].

IV.5.1 L'immersion

La méthode de « l'immersion » consiste à intégrer les matériaux à changement de phase dans les matériaux de construction de l'enveloppe du bâtiment, tels que le béton, les briques et le plâtre. Cette intégration peut se faire par l'immersion directe, la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. Selon l'état de l'art fait par [Sharma et al. 2009], la méthode de la micro encapsulation du MCP est la mieux adaptée car le MCP est encapsulé dans des polymères et la dimension de la capsule étant de l'ordre du

micromètre ne permet pas de la briser, assurant ainsi un taux d'écoulement du MCP quasi nul lors de la phase liquide [20].

IV.5.2 L'attachement

La méthode d'« attachement » consiste à attacher une ou plusieurs couches de MCP à une paroi. La différence entre les deux méthodes est que le MCP est intégré directement dans un panneau mural au lieu d'être présent dans le mur de construction principal. Outre son efficacité et la réduction du coût global, cette méthode permet de rendre esthétique l'enveloppe du bâtiment lors de sa finalisation. C'est dans de tels objectifs que la méthode d'« attachement » est plus répandue et utilisée que la méthode d'« immersion ». À titre d'exemple, nous pouvons citer les panneaux produits par DuPont TM Energain R [20].

V. Intégration d'énergie solaire dans l'habitat

L'intégration de l'énergie solaire à l'architecture sous-tend des dimensions environnementales, économiques, sociales et d'autres plus proprement architecturales, relatives aux ambiances physiques.

Sur le plan environnemental, l'intégration est durable, efficace et propre, puisque l'énergie solaire est utilisée directement sur place (ne nécessite aucun transport, donc aucun pétrole) et est renouvelable (Suzuki et Boyd, 2008).

Sur le plan économique, l'intégration peut grandement réduire le coût opérationnel (d'exploitation) et le coût capital (système de stockage, de distribution et d'entretien) relatifs aux besoins des bâtiments [22].

V.1 Architecture solaire

L'architecture solaire de haute qualité est une architecture qui intègre au mieux l'exploitation de l'énergie solaire dans le bâtiment afin d'y accroître le confort des occupants ainsi que les performances environnementales, (énergétiques... etc), économiques, sociales et des ambiances physiques architecturales (thermiques, visuelles...etc.), (Fernandez & Lavigne, 2009; Liebard, 2007). La qualité d'intégration architecturale dépend, entre autres, du contrôle et de la cohérence des systèmes solaires des points de vue fonctionnel, constructif et formel (esthétique) (Munari Probst et al., 2012). Pour y arriver, la variable solaire doit être manipulée avec soin lors de la conception d'un espace (Heschong, 1981) et doit être appréhendée comme un élément à part entière de la conception, au même titre que les différentes variables physiques, architecturales, urbanistiques et économiques. Andresen (2000)n' ajoute que la variable solaire doit faire partie des objectifs de conception et non seulement être liée aux objectifs de performance énergétique. Enfin, la variable solaire peut être intégrée architecturalement aux bâtiments pour différentes intentions, soit pour l'éclairage naturel, pour la production de chaleur utile et/ou pour la production d'électricité [22]

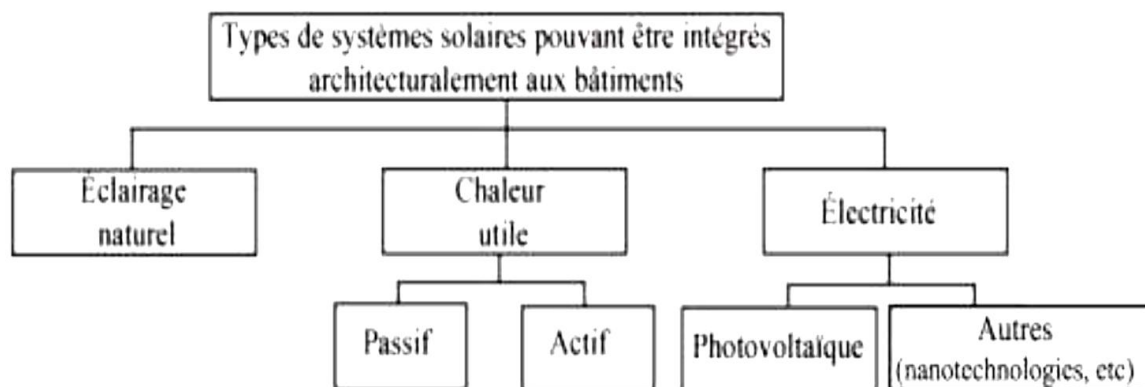


Figure V.1 : Types de systèmes solaires classés selon différents besoins pour le bâtiment

V.1.1 Production de chaleur utile

Plusieurs systèmes solaires peuvent être intégrés architecturalement aux bâtiments pour produire de la chaleur utile. Ces systèmes peuvent être catégorisés en deux groupes distincts, soit passifs ou actifs (figure 2). Le solaire thermique passif ou "chauffage solaire passif" consiste à utiliser l'énergie solaire le plus simplement possible, sans avoir recours à une mécanique particulière, pour chauffer le bâtiment par "effet de serre". Le solaire thermique actif consiste à utiliser l'énergie solaire en ayant recours à des systèmes actifs (mécaniques) qui convertissent l'énergie solaire en énergie thermique pour produire de la chaleur utile. Le solaire thermique passif et actif demeurent des volets particulièrement importants pour les architectes, puisqu'ils sont directement liés à la conception architecturale et donc au travail qui les concerne en propre, notamment aux premières phases de conception [22].

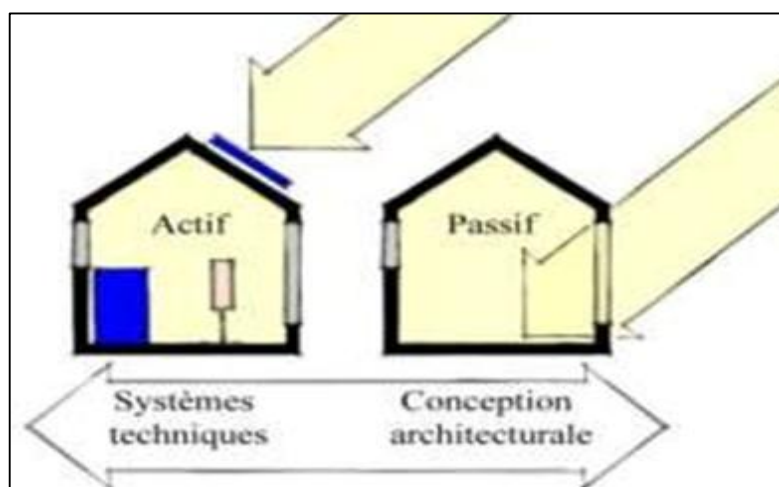


Figure V.2 : Le solaire passif et actif (Reproduit et sous réserve de l'auteur : LIÉTARD et al. 1996) [22].

V.1.2 Le solaire thermique passif

Le solaire thermique passif ou chauffage solaire passif est l'utilisation des gains solaires passifs pour chauffer le bâtiment en saison froide. En plus de réduire la consommation énergétique du chauffage, les avantages du chauffage solaire passif sont nombreux. Selon Heschong (1981), il permet entre autres :

- d'améliorer la sensation de bien-être thermique
- de créer un microclimat favorable
- d'assurer une ambiance chaleureuse et confortable.

Toutefois, les gains solaires qui traversent la fenestration augmentent le risque de pertes de chaleur importantes lorsque les fenêtres sont surdimensionnées ou mal isolées, particulièrement pendant la nuit en hiver, et augmentent le risque de surchauffe en été. Pour contrer les pertes de chaleur, il existe, entre autres, les fenêtres à double et triple vitrage offrant des performances accrues. Pour contrer la surchauffe, il existe plusieurs solutions architecturales, comme les avancées de toit (avant-couvertures), les fenêtres en retrait, les marquises, l'intégration d'arbres à feuilles caduques, les occultations solaires, etc. Rheault et Bilgen (1987a, 1987b) ont d'ailleurs soulevé que des occultations solaires à Montréal peuvent réduire les charges de chauffage entre 30% et 70 % et les charges de refroidissement jusqu'à 90%.

Le chauffage solaire passif s'opère naturellement grâce à trois modes de transfert d'énergie que sont la conduction, la convection et le rayonnement. Les quatre principes du chauffage solaire passif sont le captage, le stockage, la distribution et la conservation.

[22]

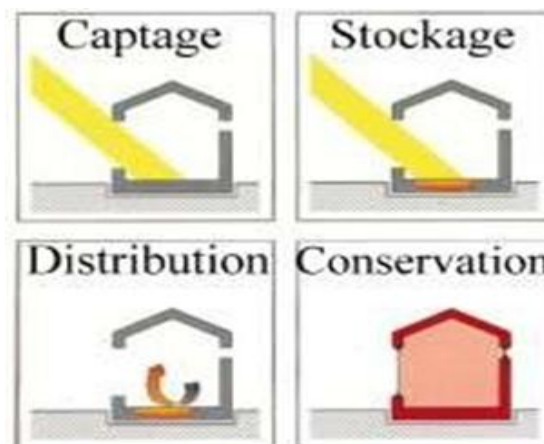


Figure V.3 : Principes du chauffage solaire passif (Reproduit et sous réserve de l'auteur : Cofaigh et al. 1996) [22].

Mazria (1981) présente trois façons de capter et stocker l'énergie solaire, soit directement, indirectement ou séparément (par le phénomène de thermo circulation). Le captage direct est la façon la plus simple et la plus efficace. Il implique essentiellement d'avoir une fenestration importante bien orientée ($\pm$ sud) et une masse thermique suffisante à l'intérieur, alors que le captage indirect requiert d'avoir une masse thermique positionnée directement derrière la fenestration. Le mur capteur et le mur trombe sont des exemples de dispositifs qui mettent à profit la convection naturelle pour transférer et accumuler de la chaleur à l'intérieur des bâtiments [22].

V.2 Les murs solaires à effet de serre

Le mur à effet de serre est composé d'une vitre, d'une lame d'air et d'une surface captatrice, en général à absorptivité élevée dans le spectre solaire. La plupart de ces murs stockent l'énergie grâce à une masse thermique qui est derrière la surface captatrice. La Figure 4 reprend une liste exhaustive de ces murs décrits dans la littérature, et présente leurs principes de fonctionnement, et les vecteurs de restitution de l'énergie. La restitution d'énergie se fait soit par convection naturelle ou forcée de l'air qui échange avec la surface captatrice ou la masse thermique, soit par convection avec l'air intérieur et par rayonnement avec les surfaces intérieures.

Les architectures choisies visent à obtenir une restitution d'énergie immédiate ou répartie dans le temps, et avec un degré de contrôle plus ou moins important. Les études sur le sujet ont porté sur l'optimisation de l'effet de serre, avec notamment des améliorations sur le vitrage et sur la surface captatrice.

Par ailleurs l'ensemble de ces murs a une fonctionnalité durant la période de chauffe mais ne doivent pas chauffer hors de cette période. De ce fait, une occultation est à prévoir. Se pose alors la problématique d'impliquer l'utilisateur dans le pilotage de cette occultation ou d'avoir un système automatisé [23].

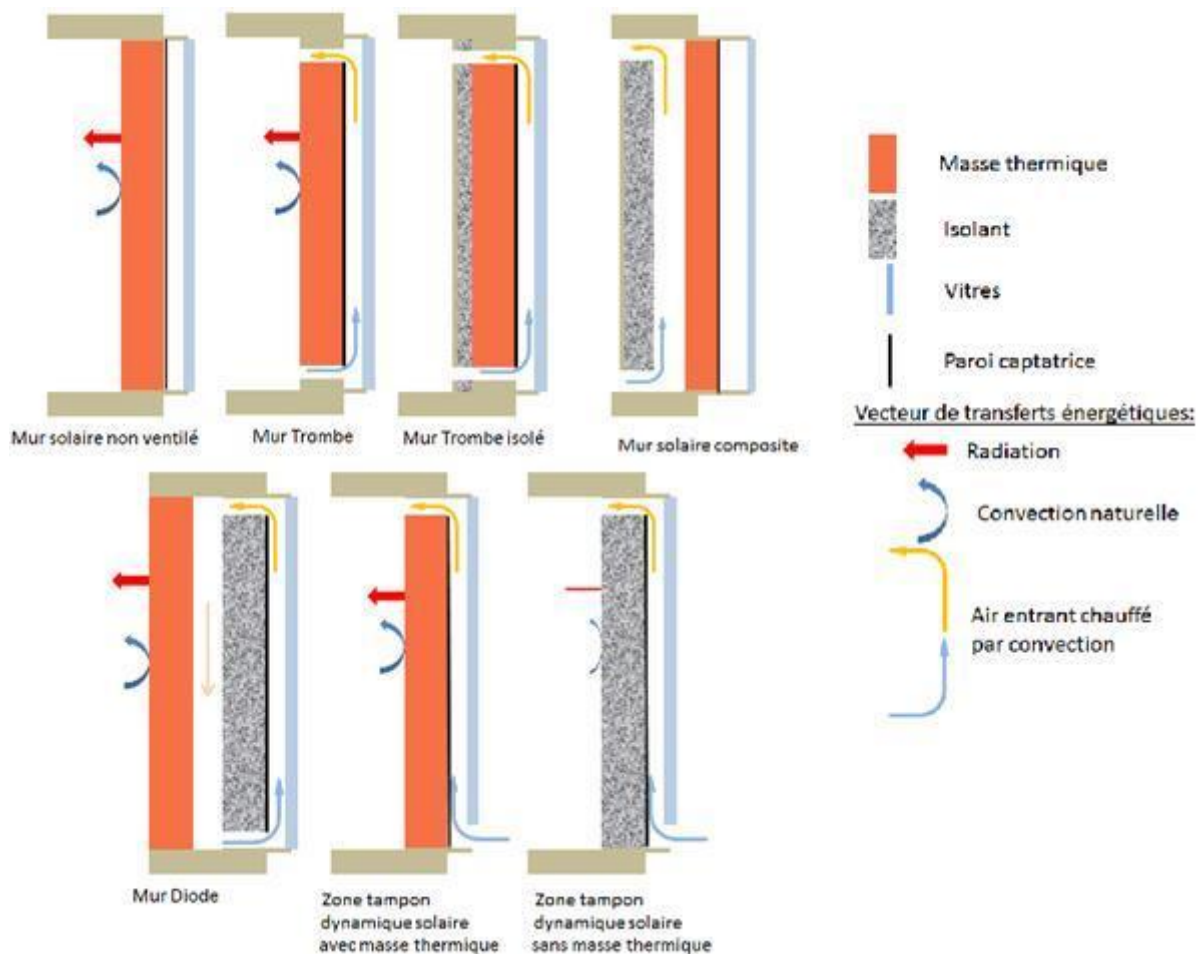


Figure V.4 : Les différents murs solaires à effet de serre étudiés dans la littérature [23].

V.3 Le mur trombe

V.3.1 Historique

Considéré comme le premier mur solaire, le mur Trombe a été développé par l'ingénieur français Félix Trombe, d'où son nom. L'idée originale est néanmoins le fruit des recherches d'Edward S. Morse, un naturaliste américain qui la breveta en 1881. Oublié jusqu'à la fin des années 50, le concept sera repris par l'ingénieur français. Après quelques années de travaux, une première version du procédé est utilisée une première fois en 1962 sur la propre maison de l'ingénieur à Odeillo dans les Pyrénées-Orientales. Cette première « maison passive » est équipée de baies rayonnantes en aluminium et d'écrans en polyéthylène. Ce premier essai permit de climatiser passivement une pièce de 3 mètres sur 3 et d'obtenir des températures inférieures de 10 à 20 °C à celles régnant à l'extérieur. Sur la base de cette première tentative, Félix Trombe continuera ensuite à faire évoluer le concept.

Au milieu des années 70, avec l'aide de l'architecte Jacques Michel, le concept est testé sur une résidence hôtelière située à Font-Romeu-Odeillo-Via dans les Pyrénées-Orientales. La façade et la toiture de « l'Immeuble des maisons solaires Trombe-Michel » sont d'ailleurs inscrites aux Monuments historiques depuis mai 2011.

V.3.2 Fonctionnement

Un mur Trombe, c'est un vitrage extérieur installé sur un mur en béton, en brique ou en pierre à forte inertie. Certaines déclinaisons du mur Trombe utilisent quant à elles le bois ou encore le métal. Pendant la journée, les rayons du soleil viennent chauffer une lame d'air située dans l'espace qui réside entre les deux. En haut et en bas de la paroi, des ouvertures rendent possible la circulation de l'air. Durant la nuit, l'air chaud est distribué dans le bâti par les ouvertures placées en haut. Une fois rafraîchi, l'air ressort par les orifices inférieurs. Si une période sans soleil est observée, les échanges d'air peuvent s'inverser et ainsi refroidir la pièce. Pour éviter ce problème, des clapets sont installés sur les ouvertures pour interrompre la circulation de l'air en cas de besoin. [24]

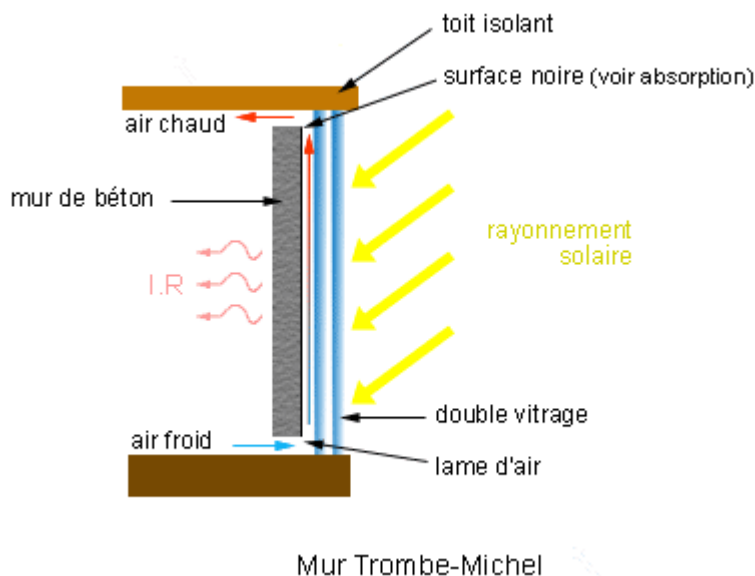


Figure V.5 : Schéma de principe d'un mur Trombe-Michel.

L'efficacité d'un mur trombe tient au respect d'un certain nombre de normes de conception. Il est composé de la manière suivante en partant de l'extérieur vers l'intérieur [24] :

- **Le vitrage**, premier élément constitutif du mur Trombe, la vitre doit permettre le passage de la chaleur du soleil sans en freiner la circulation.
- **L'espace entre le mur et le vitrage**, est aussi déterminant. C'est dans cet espace que l'air chauffe et que le phénomène d'effet de serre se crée. Une distance minimum de 10

cm doit être observée pour un système efficace et la moyenne tourne autour d'une quinzaine de centimètres.

-**Le mur**, sa fonction étant d'emmagasiner le plus de chaleur possible pour ensuite en restituer le plus possible, il est de préférence plein et sombre. La pierre et le béton sont privilégiés, mais on évite l'utilisation de parpaings creux. L'épaisseur du mur doit être envisagée en fonction du matériau utilisé et du temps d'ensoleillement dont il est possible de bénéficier en hiver. Un mur trop épais risquerait de ne pas se réchauffer suffisamment en profondeur et rediffuserait ainsi peu de chaleur. La construction d'un mur trop fin entraînerait, quant à elle, des déperditions thermiques trop importantes qui ne seraient pas compensées par l'apport solaire. L'épaisseur correcte pour un mur fabriqué dans un matériau comme le béton se situe entre 20 à 30 cm [24].

V.3.2.1 Mur trombe en hiver

L'hiver, le mur Trombe a pour fonction de chauffer l'air extérieur. Le concept utilise pour cela le principe du thermosiphon, ou thermo circulation. L'air emprisonné entre la surface vitrée et la paroi maçonnée va grimper en température par effet de serre. L'air chaud moins dense et donc plus léger va alors monter provoquant de fait l'aspiration, au niveau des ouvertures présentes en bas de paroi, d'air plus frais venant de l'intérieur. L'air chaud sera quant à lui diffusé au sein de la maison par une ouverture située en haut de la paroi.

Pour passer d'une technique de chauffage passive, c'est-à-dire sans utilisation d'équipement de chauffage, à une technique « active », il est possible d'associer à ce système une ventilation motorisée silencieuse. Les clapets peuvent ainsi en fonction des besoins en chauffage, du niveau d'ensoleillement, du moment de la journée, être ouverts ou fermés de façon mécanique voir automatique si ces derniers sont reliés à des capteurs [24].

V.3.2.2 Mur trombe en été

Si le mur Trombe permet de chauffer l'intérieur en hiver, il peut également rafraîchir l'atmosphère d'un bâtiment en été lorsqu'il est équipé de vannes de circulation d'air. Pour cela, l'entrée d'air située en bas du capteur doit être branchée à une prise d'air placée en haut de la maison. L'air chaud sera ensuite immédiatement évacué à l'extérieur et l'air frais cumulé la nuit pourra, toujours grâce au phénomène de thermosiphon, entrer dans le logement.

Il peut être aussi envisagé d'introduire de l'air frais grâce à un puits canadien, un conduit enterré dans lequel circule l'air extérieur avant d'être diffusé dans la maison. En été le sol rafraîchit l'air entrant, en hiver il le réchauffe. L'utilisation d'un ventilateur ne serait alors pas nécessaire puisque le volume d'air frais aspiré serait égal au chauffage du capteur Trombe [24].

PARTIE II :
ETUDE EXPERIMENTALE

I. Introduction

Cette étude expérimentale est une évaluation de températures d'un mur trombe, fabriqué en argile-paille, avec ajout d'un composite à matériau à changement de phase. Ainsi la chaleur en provenance le d'ensoleillement captée par le mur capteur est stockée sous forme de chaleur sensible et surtout de chaleur latente.

Nous avons construit un prototype mur Trombe à échelle réduite en bois avec un mur stockeur en argile auquel on a ajouté un vitrage pour créer l'effet de serre, et une masse de stockage thermique latent constitué d'un composite MCP sous forme stabilisée.

Cette partie décrit en premier les étapes de construction et le dimensionnement de la chambre et le mur capteur-stockeur, ensuite les étapes de préparation et du conditionnement du MCP. On décrit ensuite l'instrumentation utilisée pour les mesures de températures et enfin l'interprétation des résultats obtenus.

Schéma général final du dispositif



II. Réalisation du dispositif

II.1 Réalisation de la chambre

- Les parois en bois



Figure I.1 : réalisation des parois en bois

1-Dans un premier temps, nous avons fabriqué des cadres avec des chevrons de 4 cm d'épaisseur coupés à 45° afin de réduire les ponts thermiques, par conséquent minimiser les déperditions thermiques linéiques.

2- Ensuite, nous avons découpé des plaques en contre-plaqué pour les assembler avec la structure à chevrons de manière à réaliser les parois intérieures et extérieures et créer des lames d'air entre ces dernières (cf. figure I.2)



Figure I.2 : Découpe du contre-plaqué et cadres coupés à 45°

3- A fin de garantir une bonne isolation de la chambre, nous avons utilisé des panneaux sandwichs PVC composés de polystyrène extrudé et des faces en PVC. Et pour couvrir les joints intérieurs et extérieurs, nous avons utilisé une colle en silicone (cf. : figure I.3).

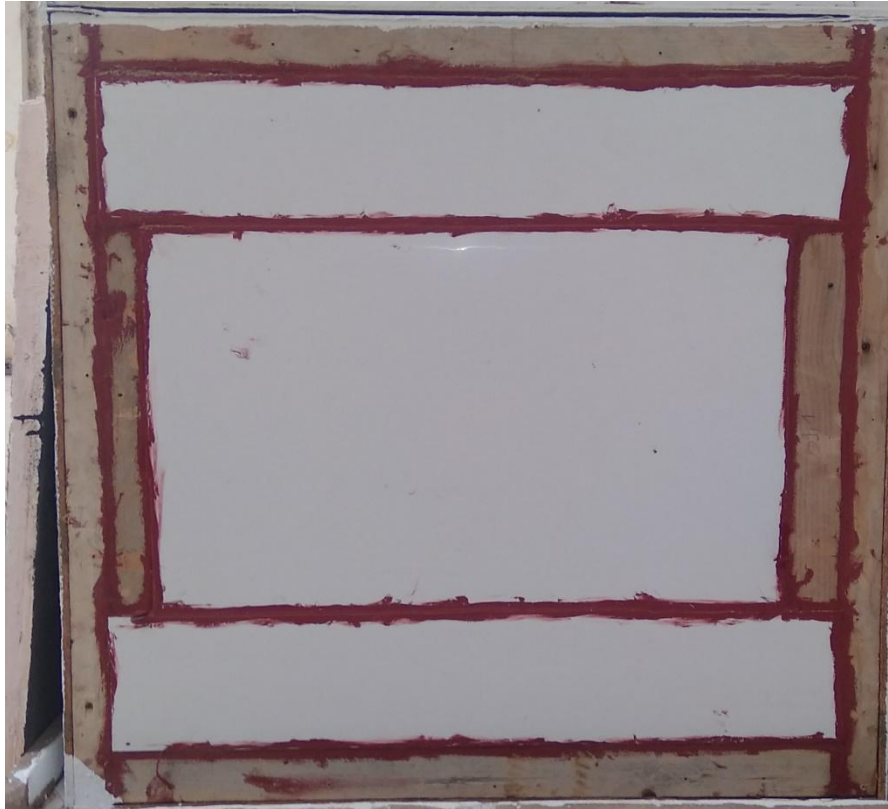


Figure I.3 : Mise en place des panneaux sandwichent

- *La toiture*

Nous avons opté pour un toit mobile en forme de porte pour avoir accès à la pièce. Ce qui permet également de placer des thermocouples et de mesurer la température au niveau des parois intérieures de la chambre.

C'est une structure rectangulaire à chevrons, les deux faces sont recouvertes de contre-plaqué, et l'intérieur est en polystyrène expansé, ce qui assure l'isolation du toit.



Figure 1.4 : la toiture

II.1.1 Dimensions de la chambre et caractéristiques des matériaux utilisés

Le tableau I.1 et I.2 donnent successivement les dimensions de la chambre, les caractéristiques des matériaux utilisés.

Tableau I.1 dimensions de la différente partie de la chambre

	<i>Longueur (m)</i>	<i>Largeur(m)</i>	<i>Surface (m²)</i>
<i>Murs gauche et droite</i>	1.20	0.80	0.96
<i>Le plancher</i>	1.20	0.80	0.96
<i>Mur arrière</i>	0.80	0.80	0.64
<i>Le toit</i>	1.20	0.80	0.96

Le tableau I.2 : les caractéristiques des matériaux

<i>Matériau</i>	<i>Epaisseur (m)</i>	<i>Conductivité thermique λ (W.m⁻¹. °C⁻¹)</i>	<i>La masse volumique (Kg m⁻³)</i>	<i>Capacité calorifique massique « C_P » (J kg⁻¹ k⁻¹)</i>
<i>Contreplaqué</i>	0.005	0.13	450-600	1600
<i>Panneau sandwichs Pvc</i>	0.02	0.041	10-30	1200-1400
<i>Polystyrène expansé</i>	0.04	0.032 -0.038	10-20	1200-1400

II.1.2 Résistances thermiques des parois de la chambre

- Mur gauche, droite, arrière et le plancher

Ces murs sont composés de deux plaques en contre-plaqué (parois intérieure et extérieure). Entre ces plaques, nous avons mis deux panneaux sandwich PVC de 2 cm chacun.

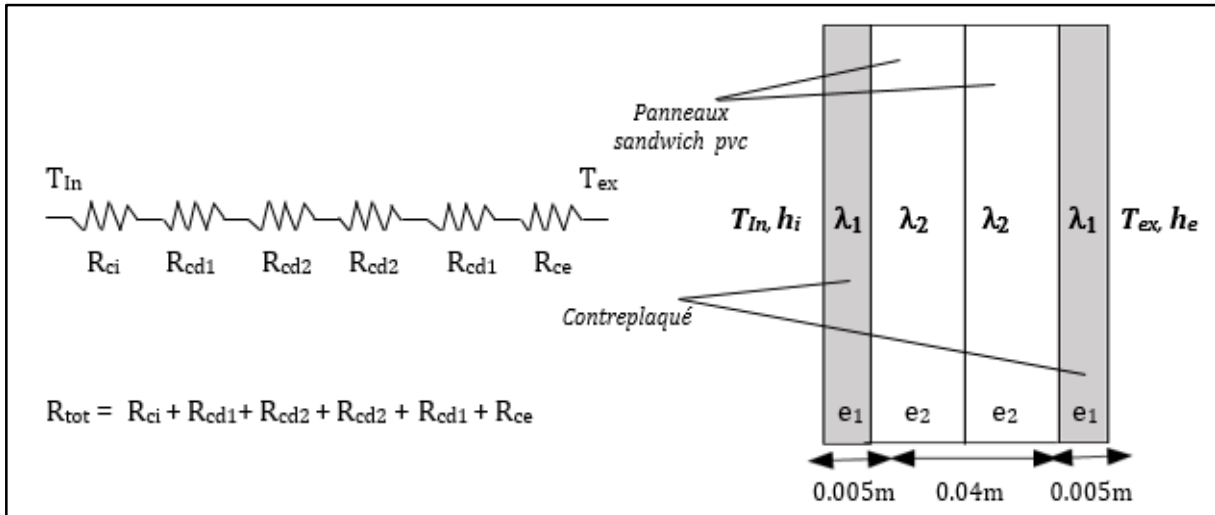


Figure 1.5 : schéma électrique équivalent du plancher et des parois latérales de la chambre.

- Le toit

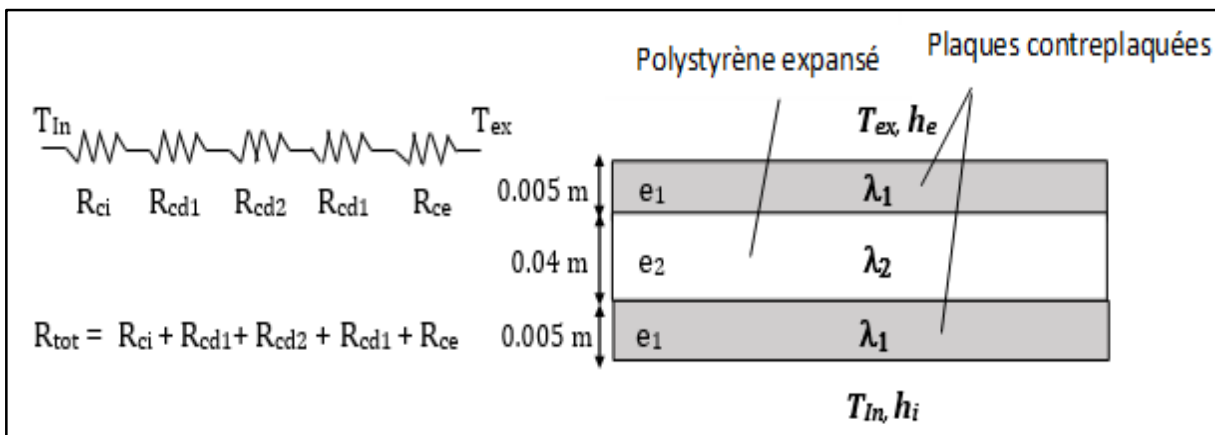


Figure 1.6 : schémas électrique équivalent du toit.

II.2 Réalisation du mur argile-paille

Le mur capteur stockeur (stockage sensible) est un matériau composite argile-paille. Nous avons choisi ce matériau composite en raison des propriétés thermiques intéressantes de la terre, à savoir une bonne inertie thermique, et la paille qui est tendue pour maintenir la structure.

II.2.1 Etape de la réalisation

1 -Tout d'abord, nous préparons l'argile et la paille avant de mélanger, c'est-à-dire que nous trions les bottes de paille, gardons les plus fines, et tamisons l'argile pour éliminer les grosses pierres.



Figure 1.7 : Préparation de la terre et la paille

2 – Nous avons préparé un moule fixé entre les parois latérales de la chambre. Nous avons mis deux tuyaux en PVC de 5 cm de diamètre pour obtenir les orifices supérieur et inférieur, puis nous avons mélangé la terre et la paille avec de l'eau. Chaque mélange contient $\frac{2}{3}$ de terre et $\frac{1}{3}$ de paille.



Figure 1.8 : Le mélange terre-paille

3- Remplissage du moule

Pour avoir une structure bien compacte, à chaque fois que nous ajoutons une quantité nous l'entassons manuellement.



Figure I.9 : remplissage du moule

L'inconvénient du composite argile-paille est le temps de séchage. Dans notre cas, nous avons attendu environ trois semaines pour retirer le coffrage, même après cela, nous avons constaté que le mur était encore humide. L'exposition directe au soleil nous a causé un autre problème, il y avait des fissures évidentes sur la paroi extérieure qui correspond au retrait rapide de l'eau.



Figure I.10 : les fissures sur la paroi extérieure du mur argile

Nous avons pu résoudre ce problème à l'aide d'enduit préparé à partir de terre et de bouse de vache, une technique largement utilisée dans les maisons traditionnelles kabyles. Cette technique consiste d'abord à tamiser la terre, puis à la mélanger avec de la bouse de vache, puis à ajouter de l'eau. L'idéal est de mettre les deux tiers d'argile et un tiers de bouse de vache.



Figure I.11 : Préparation du mélange terre-bouse de vache

Après avoir préparé le mélange, nous avons procédé à l'étalage. Il est préférable de mettre une couche de faible épaisseur juste pour remplir les fissures.



Figure I.12 : Etalage du mur

- *Etape de peinture de la chambre*

1- Les parois extérieures du mur capteur-stockeur. Une peinture noire pour améliorer l'absorption du rayonnement du soleil par le mur-Trombe.

2- Une peinture blanche pour les autres parois extérieures. Dans ce cas, il s'agit d'améliorer la réflexion du rayonnement.



Figure I.13 : Peinture du mur argile et parois extérieures.

3- Finalement pour les parois intérieures, il fallait mettre une peinture à faible émissivité. Dans le but d'avoir un échange par rayonnement entre ces parois, par conséquent avoir un équilibre entre les températures internes de la chambre.

Dans notre cas nous avons réalisé cela à l'aide des feuilles en aluminium que nous avons collées sur les parois intérieures.



Figure I.14 : revêtement des parois intérieures avec des feuilles en aluminium

II.2.2 Dimensions et caractéristiques du mur capteur-stockeur

Les tableaux I.3 et I.4 donnent respectivement les dimensions du mur et les caractéristiques thermo-physiques de l'argile.

Tableau I.3 : Dimensions du mur argile

Hauteur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (m)
0.75	0.75	0.15

Tableau I.4 : Caractéristiques thermo-physiques de l'argile

Masse volumique (kg.m^{-3})	Capacité calorifique volumique ($\text{kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$)	Capacité calorifique massique « C_p » ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
1900	1590	837	0,85

II.3 Préparation de l'unité de stockage latent (MCP)

Nous avons effectué des recherches sur la disponibilité des MCPs dans la région de Tizi-Ouzou et ses environs. Ainsi nous avons sollicité plusieurs entreprises spécialisées dans les produits alimentaires (CEVITAL, GENIE, NUTLY TONNER et ROCHE PLUS), et réuni deux types de graisses végétales de plages de températures de fusion différentes.

La température de fusion du premier est entre 38 et 40 °C, utilisé dans la production des crèmes glaces, des biscuits et boulangerie. Pour la deuxième, elle est entre 35 et 37 °C qui est utilisée pour la production du chocolat.



Fugue I.1 : Graisse végétal de température de fusion (38-40 °C).



Figure I.2 : Graisse végétal de température de fusion (35-37 °C).

Cette partie de notre travail est devisée en deux : la première est consacrée à la recherche de la forme stabilisée (composite MCP- graphite-perlite). Et la deuxième partie est consacrée à la réalisation et encapsulation des plaques.

II.3.1 Amélioration de la conductivité thermique

L'inconvénient avec les graisses végétales est leur faible conductivité, ce qui ne favorise pas les transferts thermiques du MCP. Par conséquent, la réduction de la cinétique de stockage et la libération de chaleur.

L'ajout d'un matériau bon conducteur thermique est parmi les solutions pratiques pour remédier à cet inconvénient. Nous avons à cet effet opté pour le graphite qui est connu pour sa haute conductivité thermique qui varie de 24 à 470 (W/m.K).



Figure I.3 : Image représentative du graphite.

Après avoir élaboré le matériau composite MCP-graphite, nous avons dû faire face à un problème. Nous avons remarqué que le graphite se sépare du MCP en phase liquide, et reste au fond sous forme solide. Cela signifie que le graphite étant plus lourd que le MCP se décante.

Afin de résoudre ce problème, il est nécessaire de tamiser le graphite pour obtenir des particules plus fines et ajouter un matériau absorbant doté d'une microstructure, qui permettra l'inclusion du MCP et du graphite sans avoir des fuites.

La perlite expansée est un matériau qui a cette capacité. C'est une roche volcanique qui, une fois expansée, se présente sous forme de microbilles blanches plus ou moins petites, aérées et très légères.



Figure I.4 : Image représentative de la perlite expansée

II.3.2 Recherche de la forme stabilisée

Il s'agit de chercher la matrice solide du composite MCP-graphite-perlite.

Nous avons effectué plusieurs tests avec de petites quantités pour réaliser des pastilles à l'aide d'un moule 4 X 4 cm de dimension. Ensuite nous les avons exposées au soleil.



Figure I.5 : Image représentative du moule

La figure I.6 représente deux essais sur deux pastilles graisse végétale de température de fusion (35-37°C) après avoir exposé les pastilles au soleil.



Figure I.6 : Test forme stabilise N° 01

La remarque que nous pouvons faire dans ce cas, c'est qu'avec 70 % de MCP la pastille a pratiquement perdu toute sa forme, contrairement au deuxième cas, avec 60 % de MCP la pastille est plus au moins restée sous sa forme initiale.

La figure I. représente un essai avec 60 % de graisse végétale qui a la température de fusion (38-40°C).

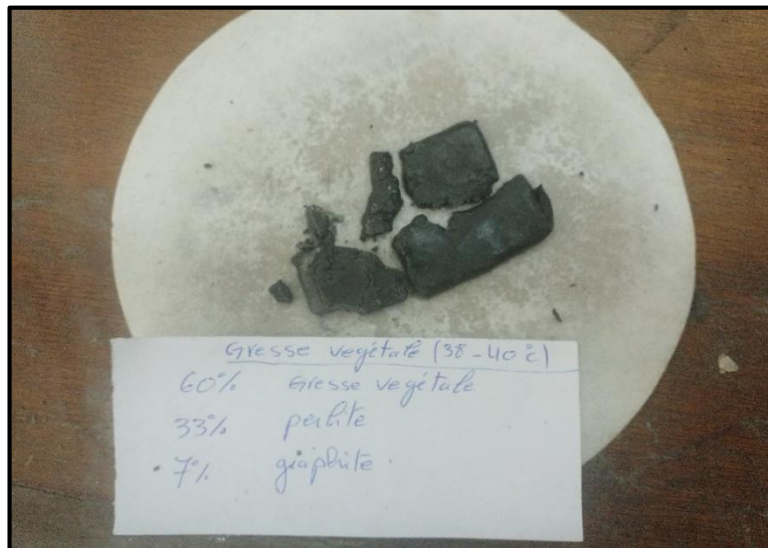


Figure I.7 : Test forme stabilise N° 02

La pastille dans ce cas a totalement perdu sa forme initiale.

C'est en nous basant sur ces résultats obtenus dans cette expérience que nous avons fait le choix d'utiliser la graisse végétale de température de fusion (35-37°C).

II.3.3 Réalisation des plaques

Étape de préparation des matériaux

- En premier, nous avons séché et broyé la perlite.
- Ensuite, nous avons procédé au tamisage du graphite et la perlite.



Figure I.8 : (A) tamisage de la perlite, (B) : tamisage du graphite

- *Etape de préparation des moules*

Avant de procéder au mélange du composite, nous avons préparé des moules de 22 x 18 x 1 cm de dimension, avec des planches que nous avons collé sur une vitre, nous avons revêtit le moule avec du papier aluminium pour faciliter le démoulage des plaques.



Figure I.9 : préparation du moule.

- *Etape de préparation des plaques*

Chaque plaque a une masse totale de 500 g, pour la réalisation, nous avons procédé comme suit :

- 1- Préparation des pesées.
- 2- Fusion de la graisse végétale à l'aide d'un bain marie (voir figure I. 10 droite).



Figure I.10 : Préparation des matériaux.

3- Mélange des composants poudreux (perlite, graphite) au préalable.

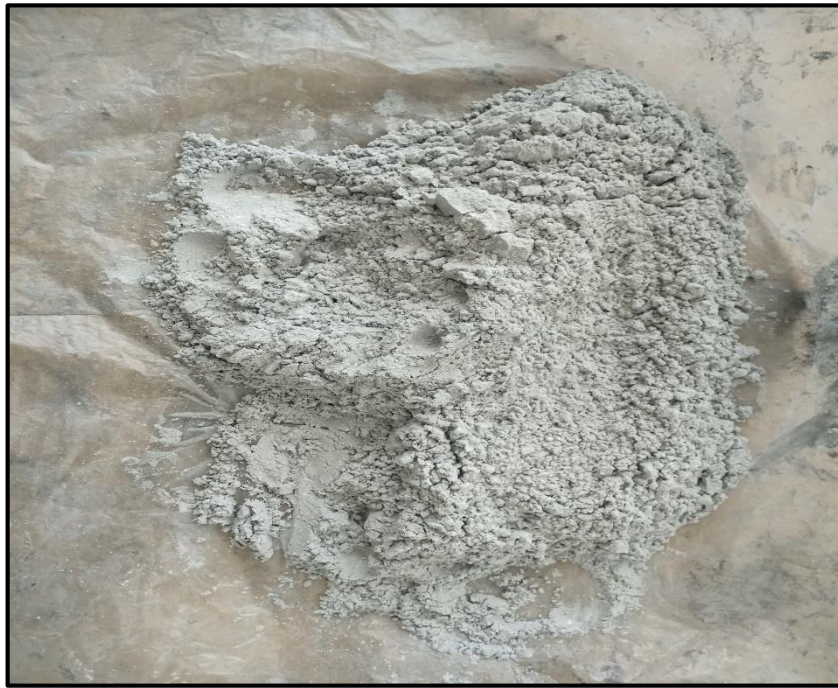


Figure I.11 : Mélange Perlite-Graphite

4- Réalisation des plaques du composite de dimensions (20x15x1 cm)

Après la fusion du MCP, nous ajoutons les poudres, et nous mélangeons jusqu'à ce que le MCP soit totalement absorbé, et avoir une pâte que nous plaçons dans les moules.



Figure I.12 : Plaques de composite sous forme stabilisée après démoulage.

- *Etapes d'encapsulation des plaques*

- 1- Insertion des plaques dans un sac en aluminium.
- 2- Plombage des sacs à l'aide d'un appareil de plastification.



Figure I.13 : Encapsulation des plaques.

II.3.4 Dimensions et masse des plaques du composite

Nous avons réalisé 12 plaques de dimensions décrites sur la figure ci-dessous.



Figure I.14 : Dimensions des plaques.

II.3.5 Revêtement du mur capteur-stockeur avec les plaques

- 1- Mise en place des plaques sur un quadrillage dimensionné selon les plaques et le mur. fait avec des planches en bois.



Figure I.15 : Plaques du composite dans le socle en bois.

- 2- Plaquage du cadre (figure ci-dessus) sur le mur capteur-stockeur.



Figure I.16 : revêtement du mur capteur stockeur.

II.4 Mise en place du vitrage

Pour faire l'effet de serre, nous avons utilisé deux vitres collées devant le mur capteur-stockeur en laissant une lame d'air de 4 cm.



Figure I.17 : Mise en place du vitrage.

- *Dimension du vitrage.*

Tableau I.5 : Dimensions de la vitre

Largeur (m)	Longueur (m)	Surface (m)	Epaisseur (m)
0.8	0.8	0.64	0.004

III. Méthode et instrumentation

Après avoir finalisé la réalisation du prototype, exposé dans la partie précédente. Nous avons procédé aux mesures de températures faites sur trois tests. Au niveau des laboratoires de génie mécanique.

- En premier test, le mur capteur-stockeur sans MCP et sans effet de serre.
- En deuxième test, le mur capteur-stockeur avec MCP sans effet de serre.
- Pour le troisième et dernier test, avec MCP et effet de serre.

III.1 Les instruments de mesure

Il s'agit de mesurer l'évolution des températures des parois externes et internes du prototype, à l'aide des thermocouples de type K (figure II.1.A), placés dans des différentes zones. Ces derniers ont été reliés à un appareil d'acquisition de données (figure II.1.B) relié à un micro-ordinateur (sortie USB).

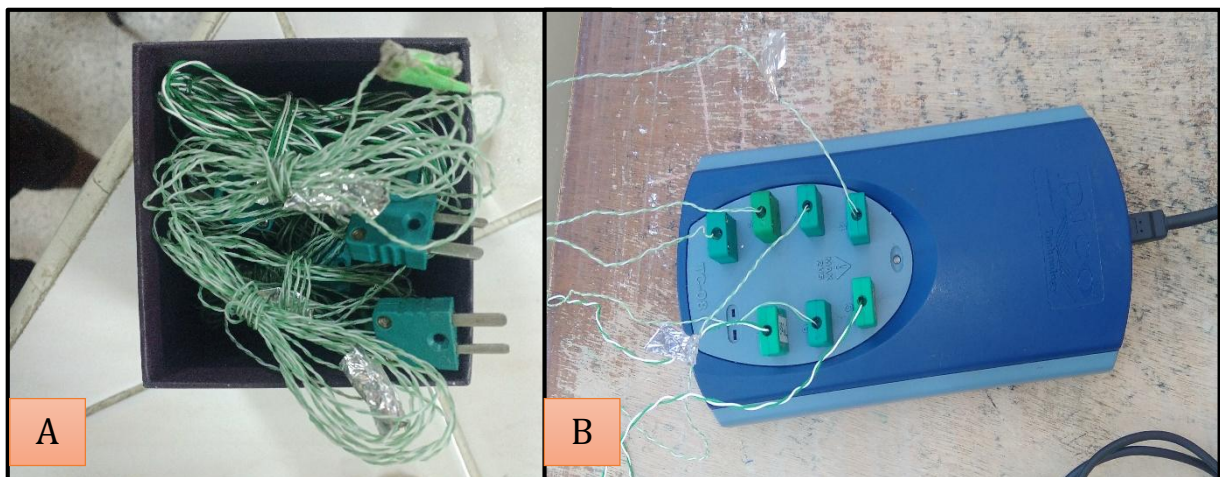


Figure II.1 : (A) Thermocouple type K. (B) appareil d'acquisition de données.

L'enregistrement des températures se fait automatiquement sur l'ordinateur. Nous pouvons lire directement sur l'écran, l'évolution de chaque température sous forme de courbe, et tableau (Voire Figure II.2).

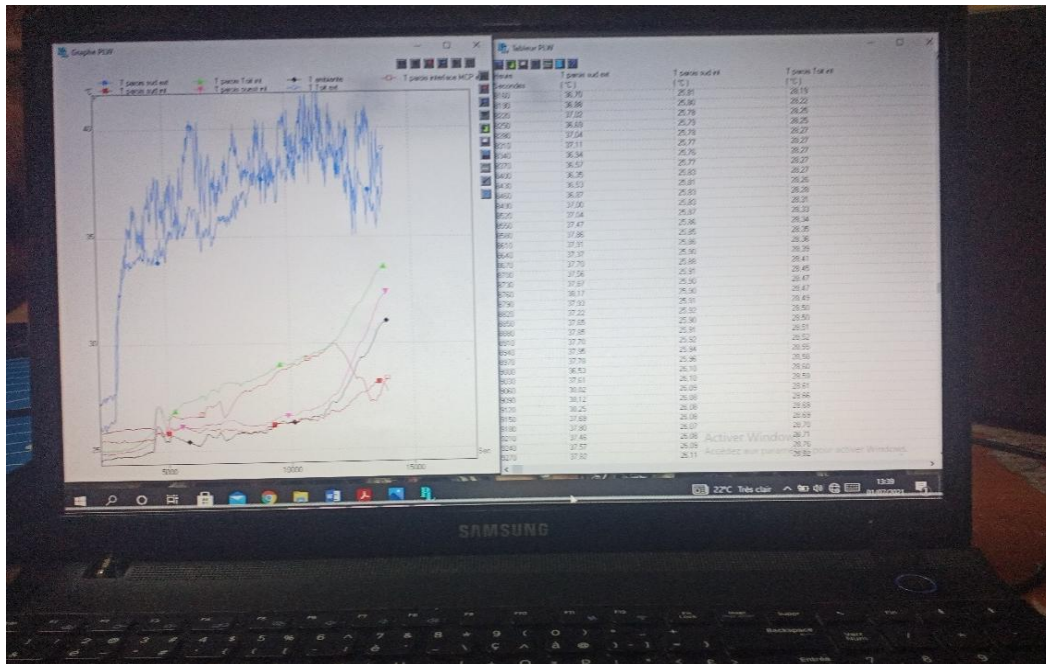


Figure II.2 : Lecture de températures sur micro-ordinateur



Figure II.3 : Installation des instruments de mesure.

III.2 Répartition des thermocouples sur le prototype

Pour les deux premiers cas (mur sans MCP et effet de serre, mur avec MCP sans effet de serre), nous avons utilisé 07 thermocouples. L'emplacement de ces derniers est représenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1 : Répartition des thermocouples

Premier cas		Deuxième cas	
T.C 01	La paroi mur capteur-stockeur intérieur	T.C 01	La paroi mur capteur-stockeur extérieur
T.C 02	L'ambiance de la chambre	T.C 02	paroi mur capteur-stockeur intérieur
T.C 03	La paroi mur ouest intérieur	T.C 03	la paroi toit intérieur
T.C 04	La paroi toit extérieur	T.C 04	la paroi mur ouest intérieur
T.C 05	La paroi mur ouest extérieur	T.C 05	L'ambiance de la chambre
T.C 06	La paroi toit extérieur	T.C 06	La paroi toit extérieur
T.C 07	paroi mur capteur-stockeur intérieur	T.C 07	L'interface MCP intérieur

Pour le troisième cas (le mur avec MCP et effet de serre) nous avons mis en place 08 thermocouples selon le tableau ci-dessous.

T.C 01	La paroi intérieure mur capteur-stockeur
T.C 02	L'ambiance intérieure de la chambre
T.C 03	La paroi intérieure toit
T.C 04	Lame d'air entre le vitrage et le mur capteur-stockeur
T.C 05	La paroi extérieure mur capteur-stockeur
T.C 06	Vitrage extérieur
T.C 07	La paroi extérieure mur ouest
T.C 08	La paroi extérieure toit

Tableau II.2 : emplacement des thermo couple.

IV. Résultats et interprétations

Nous présentons dans cette partie les résultats des relevés de températures lors de nos trois tests cités précédemment, pendant les journées du 22, 23 et 30/06/2021. Que nous avons lancé à 10H 30Min qui correspond à l'arrive du soleil a l'endroit où nous avons effectué les tests.

IV.1 Le mur capteur-stockeur sans MCP et sans effet de serre

Le tableau ci-dessous représente l'évolution des températures des parois intérieures et extérieures du prototype en fonction de l'heure locale de la ville de Tizi-Ouzou.

Tableau III.1 : Evolution de température (cas de mur capteur-stockeur sans MCP et effet de serre)

Température °C Temps H	T1 paroi sud intérieur	T2 ambiante de la chambre	T3 paroi ouest intérieur	T4 paroi toit extérieur	T5 paroi ouest extérieur	T6 paroi toit intérieur	T7 paroi sud extérieur
10:30	24,9	23,88	23,63	25,03	27,24	25,01	27,91
10:45	24,99	23,93	23,75	25,49	28,38	25	28,6
11:00	25,28	24,15	23,99	26,33	29,37	25,15	29,44
11:15	25,39	24,46	24,43	26,73	30,31	25,39	30,35
11:30	25,33	24,37	24,25	34,98	30,77	25,38	31,75
11:45	25,38	24,79	24,81	37,6	31,58	26,1	33,26
12:00	24,89	24,99	25,61	38,64	32,6	27,43	34,32
12:15	25,67	25,53	29,25	38,55	32,39	28,13	35,03
12:30	25,63	25,47	25,75	39,91	33,02	28,91	36,35
12:45	25,9	26,14	26,54	39,97	33,08	29,88	37,23
13:00	26,11	26,63	24,44	40,12	35,89	30,97	38,21
13:15	26,51	27,13	27,37	39,2	36,34	31,44	38,35
13:30	26,73	27,55	27,88	40,65	36,81	31,56	39,02
13:45	27	27,85	28,09	38,82	36,68	31,93	39
14:00	27,39	28,22	28,39	38,81	37,14	31,93	38,86
14:15	27,64	28,61	29,02	39,61	37,77	32,08	38,87
14:30	27,9	28,84	29,08	38,4	37,75	32,3	39,32
14:45	27,49	29,24	35,28	37,19	37,1	33,05	38,4

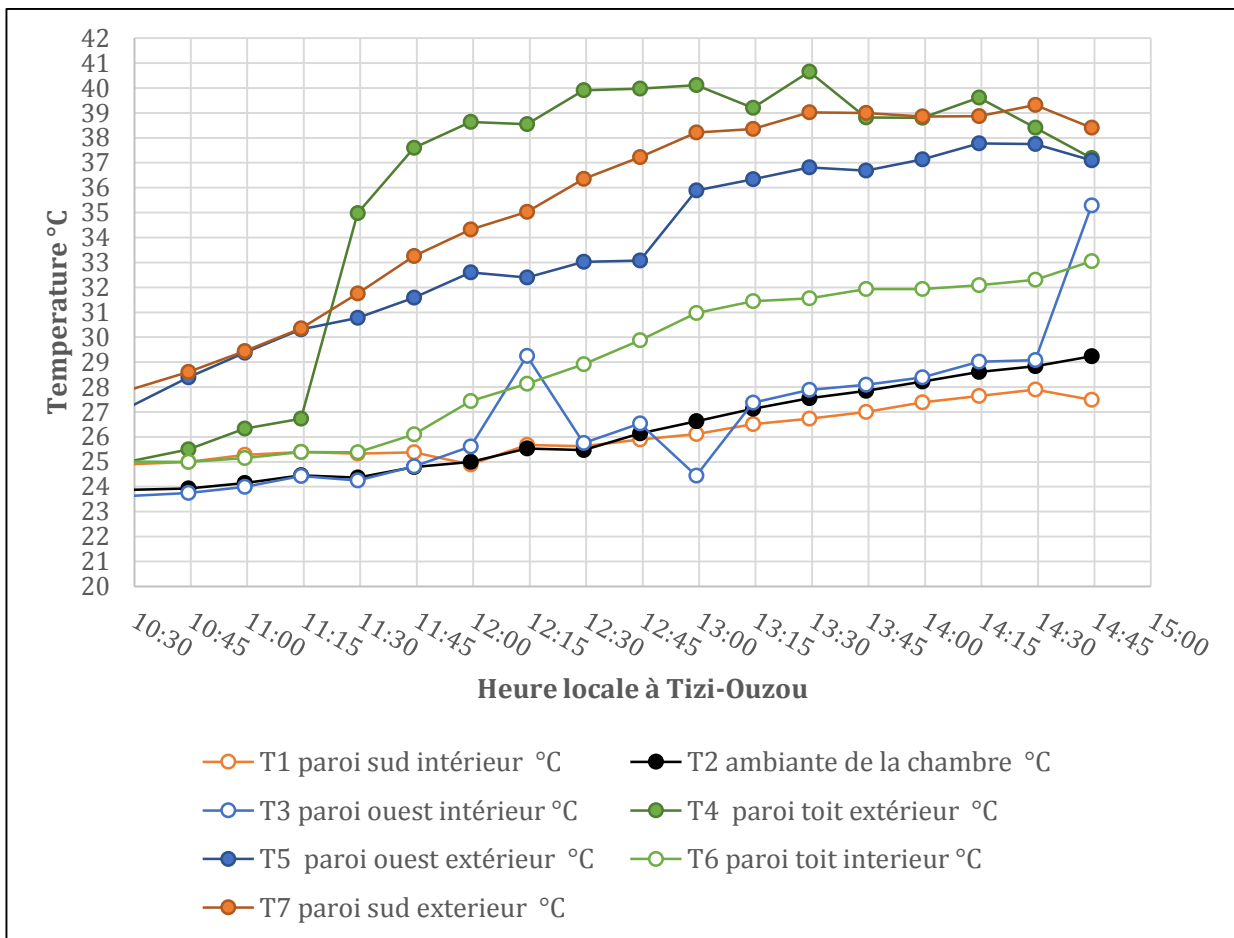


Figure III.1: Variation des températures extérieures et intérieures.

La figure ci-dessus représente l'évolution des températures internes et externes du prototype en fonction de l'heure locale à Tizi-Ouzou. On peut remarquer un écart de température entre les parois interne et externe plus au moins important.

- A 11:15, nous avons remarqué une augmentation significative de la température de la paroi extérieure du toit (27 à 35 °C), ce qui correspond à l'arrivée du soleil Et continue à augmenter jusqu'à ce qu'il atteigne son pic (40 °C) à 13 : 30. Et pour l'intérieur, elle est de 25 à 33 °C. Ce qui donne une idée sur l'effet de l'isolation de la paroi.

- On peut faire la même observation sur le mur ouest, la seule différence est que leurs valeurs de température sont différentes, ce qui peut s'expliquer par la position du soleil, c'est-à-dire que le toit est plus exposé au rayonnement solaire.

- Pour la température ambiante de la chambre on remarque une augmentation de 24 A 29° C.

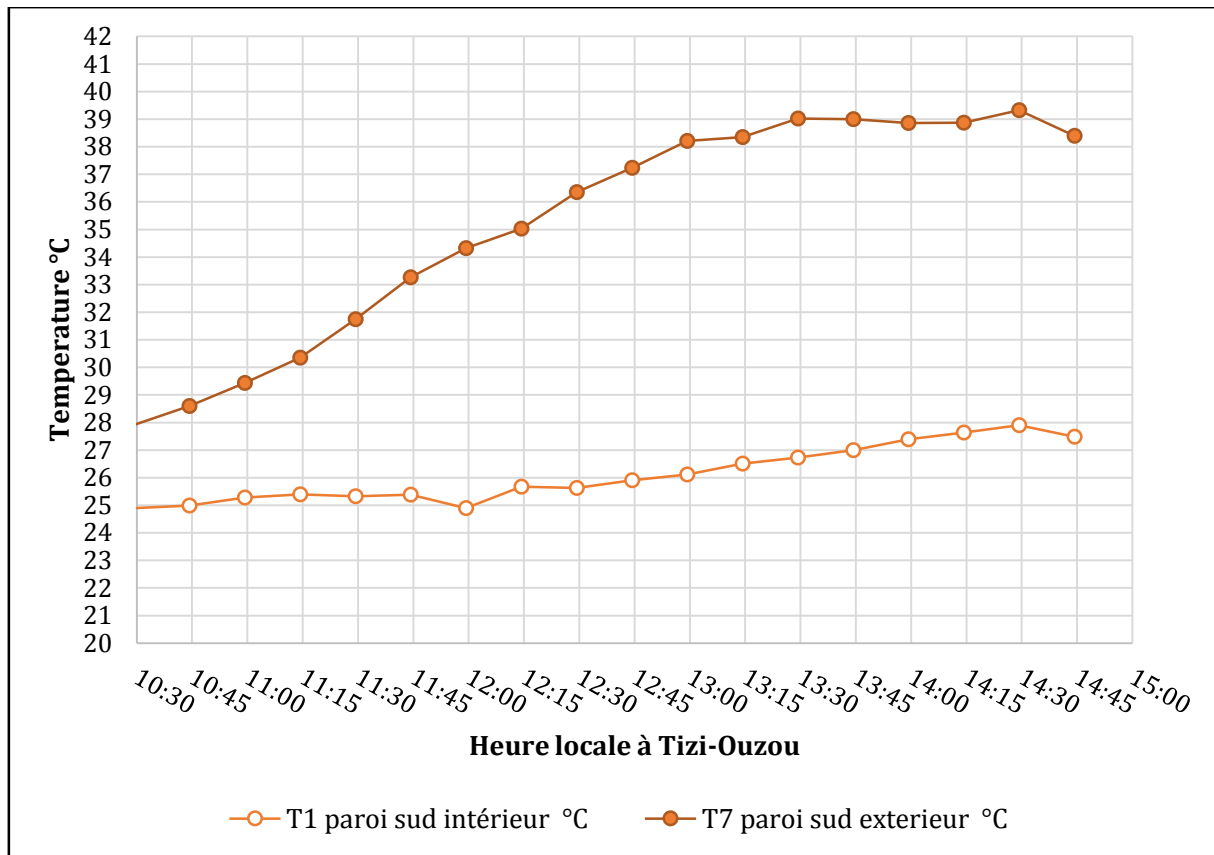


Figure III.2: Variation des températures extérieure et intérieure du mur capteur-stockeur

La figure ci-dessus montre qu'il existe une différence importante de température entre la paroi extérieure et intérieure du mur capteur-stockeur.

Nous avons constaté une augmentation significative de la température extérieure (de 28 °C à 39 °C), alors que la température intérieure n'augmentait que de 2 °C (de 25 °C à 27 °C). Ceci montre l'importance de l'inertie du mur argile-paille.

IV.2 Le mur capteur-stockeur avec MCP sans effet de serre

Le tableau ci-dessous représente l'évolution des températures des parois intérieures et extérieures du prototype en fonction de l'heure locale de la ville de Tizi-Ouzou.

Tableau III.1 : évolution de température (cas de mur capteur-stockeur avec MCP sans effet de serre

	T1 paroi sud extérieur	T2 paroi sud intérieur	T3 paroi toit intérieur	T4 paroi ouest intérieur	T5 ambiante de la chambre	T6 paroi Toit extérieur	T7 paroi interface MCP intérieur
10:30	26,44	25,46	24,85	24,62	24,44	25,52	25,69
10:45	27,01	25,4	24,86	24,69	24,43	25,97	25,71
11:00	27,23	25,58	25,07	24,93	24,61	26,07	25,79
11:15	27,69	25,49	25,06	24,93	24,7	26,45	25,97
11:30	33,69	25,76	26,72	26,39	25,86	36,43	25,98
11:45	35,5	26,07	27,03	26,11	25,63	37,45	26,59
12:00	36,31	25,87	27,49	26,09	25,26	40,04	26,59
12:15	35,62	25,94	28	26,28	25,76	36,16	27,07
12:30	36,18	25,88	28,15	26,21	25,84	38,31	27,73
12:45	36,53	26,1	28,6	26,26	25,86	37,01	28,09
13:00	37,95	26,29	28,99	26,59	26,27	40,48	28,84
13:15	38,76	26,38	29,43	26,83	26,38	37,85	29,3
13:30	38,12	26,84	29,9	27,53	27,27	39,05	30,01
13:45	37,86	27,38	31,56	29,43	28,74	37,42	28,45
14:00	36,12	28,1	33,14	31,59	30,46	37,38	27,4
14:15	37,51	27,7	33,72	32,42	31,08	39,04	28,34

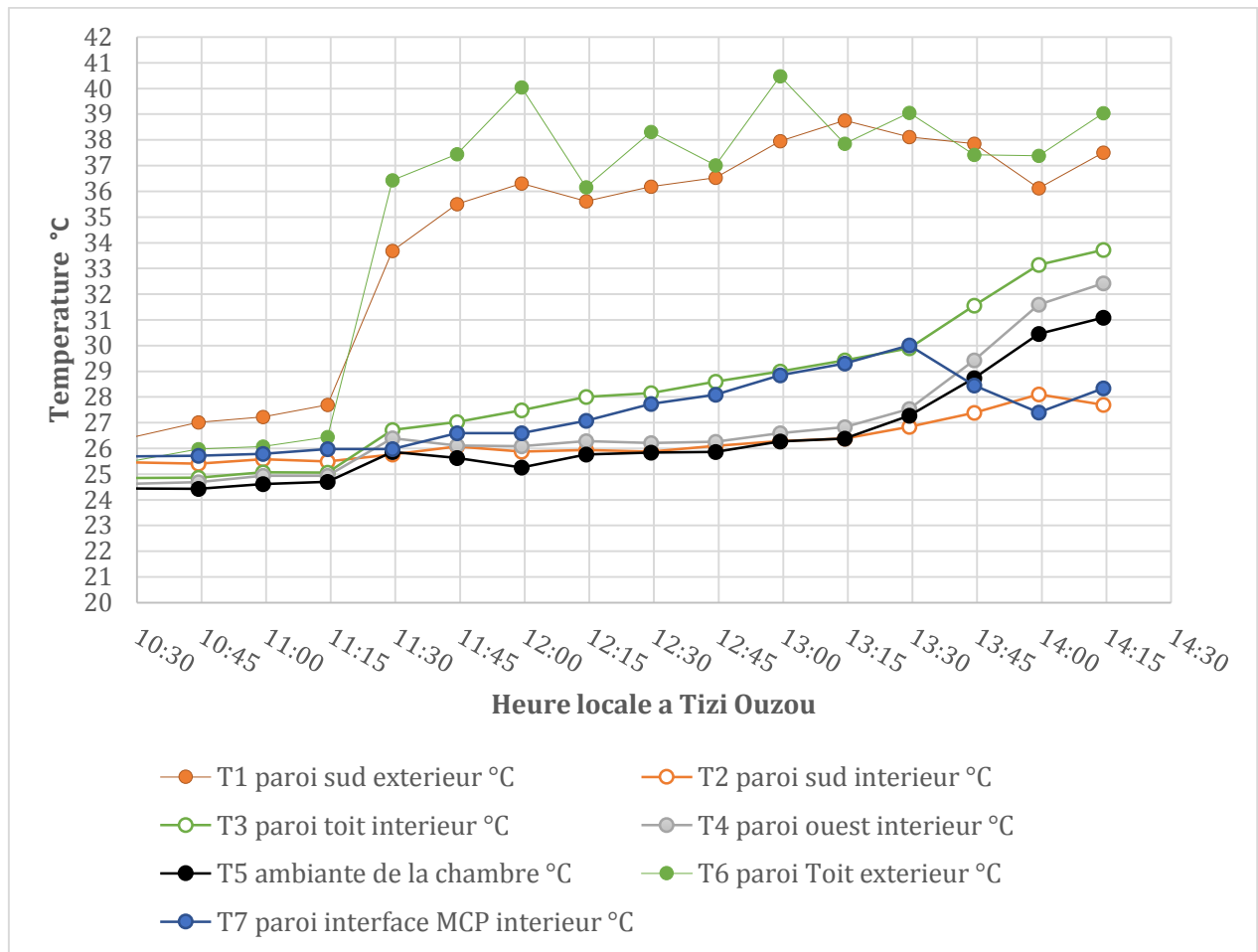


Figure III.3: Variation des températures extérieure et intérieure

La remarque qu'on peut faire pour ce cas de figure, c'est que les températures internes de la chambre sont plus au moins en équilibre, et pour les températures extérieures on constate une augmentation importante à l'arrivée du soleil à 11 : 15.

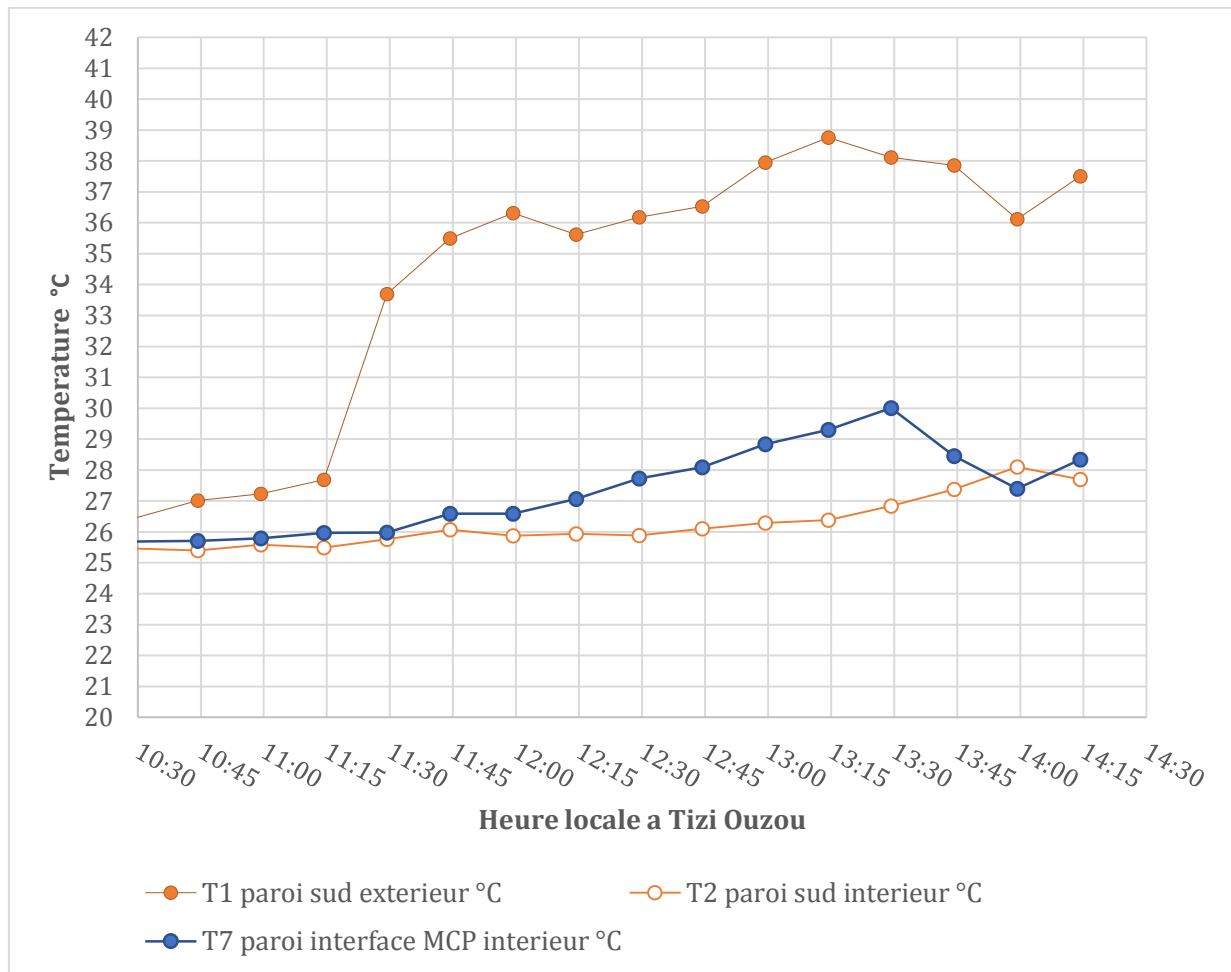


Figure III.4 : Variation des températures extérieure et intérieure du mur capteur-stockeur avec MCP

Nous avons remarqué que la température de l'interface interne du MCP a augmenté jusqu'à atteindre 30 °C à 13 :30, puis a chuté.

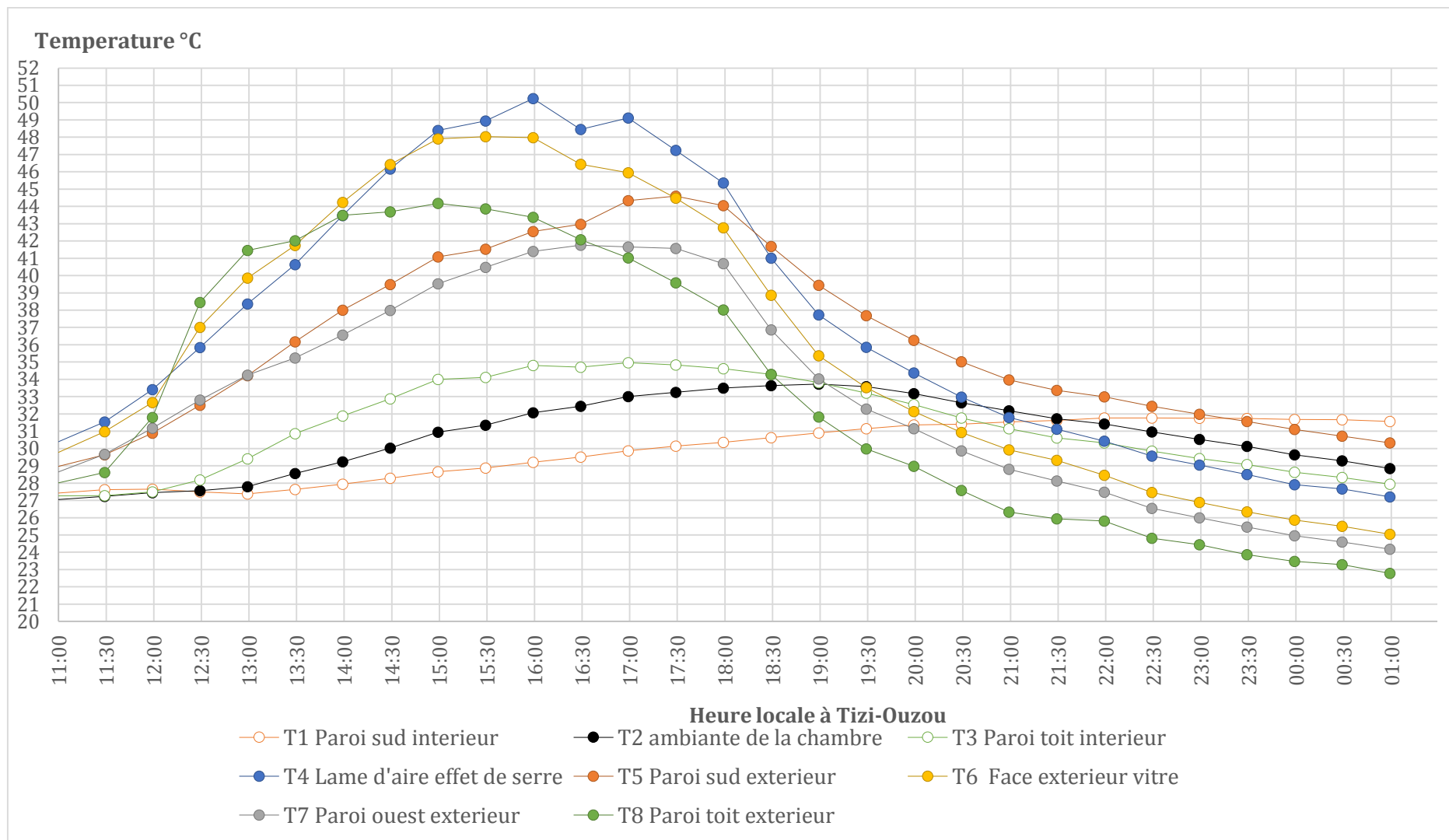
Avec cette température nous pouvons constater que le MCP n'a pas atteint la fusion totale.

L'évolution de la température extérieure du mur capteur-stockeur est plus au moins la même comparé au premier cas (sans MCP). Contrairement à la paroi intérieure ce qu'on peut remarquer sur la figure III.4. Sa température est restée plus au moins constante comparé au premier cas.

IV.3 Le mur capteur-stockeur avec MCP Et effet de serre

Tableau III.3 : évolution de température (cas de mur capteur-stockeur avec MCP ET effet de serre)

Heur e	T1 Paroi sud intérieu r	T2 ambiant e de la chambre	T3 Paroi toit intérieu r	T4 Lame d'air e effet de serre	T5 Paroi sud extérieu r	T6 Face extérieu r vitre	T7 Paroi ouest extérieu r	T8 Paroi toit extérieu r
11:00	27,42	27,04	27,26	30,36	28,95	29,74	28,61	28
11:30	27,62	27,23	27,28	31,53	29,64	30,98	29,66	28,62
12:00	27,65	27,45	27,49	33,41	30,89	32,66	31,18	31,79
12:30	27,49	27,56	28,18	35,84	32,5	37,01	32,81	38,45
13:00	27,37	27,8	29,4	38,36	34,22	39,86	34,24	41,46
13:30	27,64	28,56	30,86	40,63	36,17	41,74	35,24	42,02
14:00	27,94	29,23	31,88	43,47	38	44,24	36,56	43,48
14:30	28,28	30,03	32,88	46,16	39,49	46,42	37,98	43,69
15:00	28,66	30,95	34	48,4	41,08	47,9	39,52	44,18
15:30	28,88	31,35	34,12	48,94	41,52	48,03	40,48	43,86
16:00	29,21	32,07	34,8	50,24	42,55	47,97	41,4	43,37
16:30	29,51	32,45	34,7	48,45	42,96	46,43	41,76	42,08
17:00	29,87	33,01	34,96	49,12	44,33	45,95	41,66	41,03
17:30	30,14	33,25	34,83	47,24	44,59	44,48	41,57	39,59
18:00	30,35	33,5	34,62	45,36	44,04	42,77	40,69	38,01
18:30	30,63	33,64	34,28	41,01	41,69	38,86	36,86	34,28
19:00	30,9	33,72	33,81	37,73	39,44	35,36	34,02	31,82
19:30	31,15	33,58	33,21	35,85	37,69	33,52	32,28	29,98
20:00	31,36	33,18	32,54	34,37	36,26	32,14	31,15	28,97
20:30	31,4	32,64	31,77	32,97	35,02	30,93	29,87	27,57
21:00	31,54	32,19	31,15	31,8	33,97	29,92	28,8	26,32
21:30	31,62	31,72	30,62	31,12	33,36	29,32	28,12	25,93
22:00	31,77	31,42	30,32	30,43	32,99	28,46	27,48	25,8
22:30	31,76	30,96	29,85	29,57	32,45	27,46	26,54	24,82
23:00	31,75	30,53	29,42	29,04	31,98	26,89	25,99	24,44
23:30	31,74	30,13	29,07	28,5	31,57	26,34	25,46	23,87
00:00	31,68	29,64	28,63	27,91	31,1	25,87	24,95	23,48
00:30	31,67	29,29	28,32	27,67	30,72	25,51	24,6	23,29
01:00	31,57	28,85	27,93	27,21	30,33	25,05	24,18	22,79



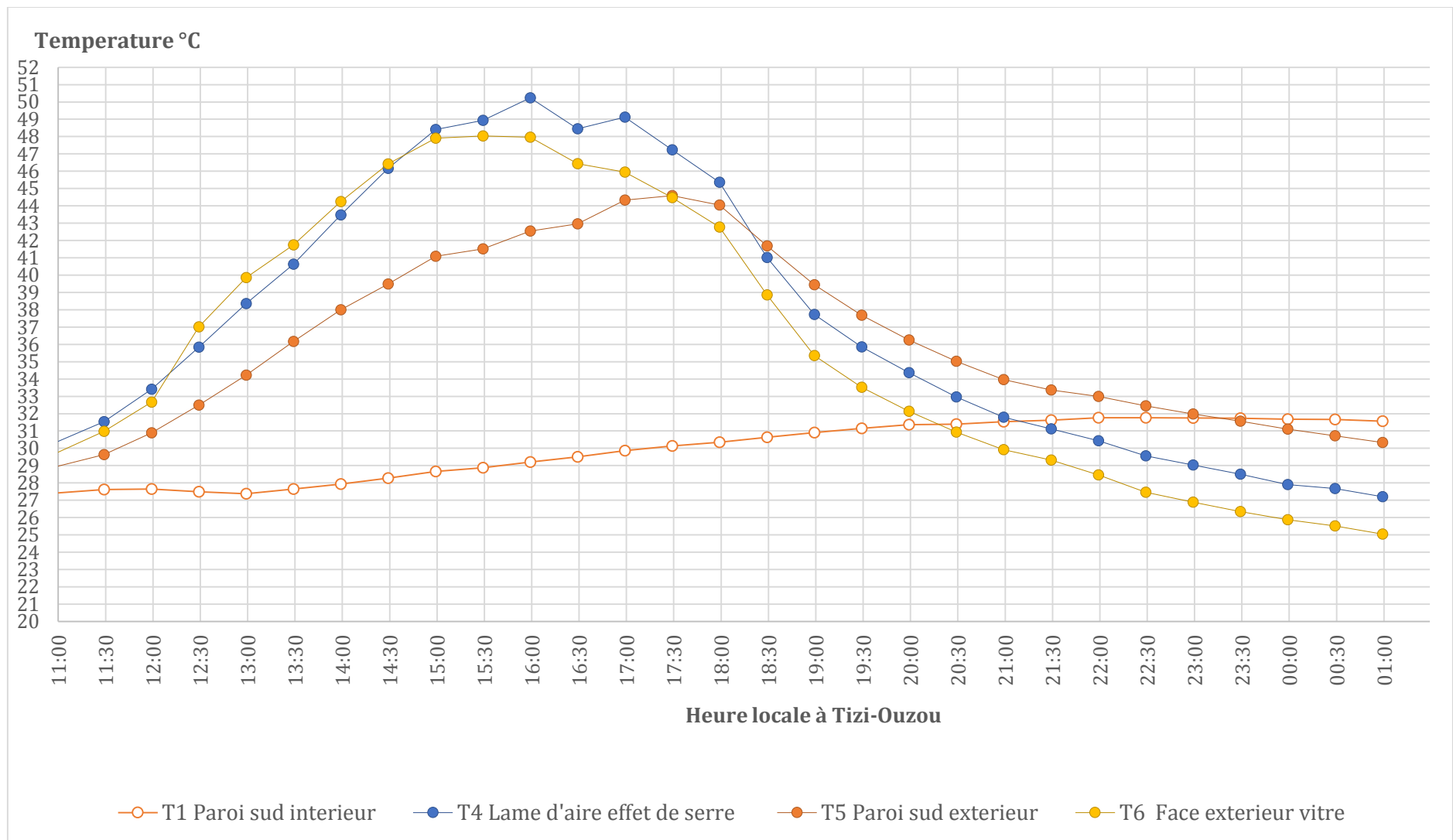


Figure III.6 : variations de températures du mur capteur-stockeur avec MCP et effet de serre

La figure III.4 montre l'évolution des différentes températures pendant la journée et la nuit (de 11:00 du matin jusqu'à 01:00 du matin). La première remarque à faire c'est que la température du toit extérieur et de la paroi extérieure sud commence à baisser (15:30) avant celles de la vitre extérieure et la lame d'air. Ce qui peut s'expliquer par l'influence de l'effet de serre sur ces deux dernières températures

Conte aux températures intérieure elle commence a baissé à partir de 19 :00 sauf celle de la paroi sud qui continue à augmenter.

La figure III.5 montre l'évolution des températures du mur capteur-stockeur avec MCP et effet de serre. On remarque la température de la vitre face extérieur a atteint son pic (48 °C) a 16 : 30 et celle de lame d'air et 50 °C.

À 17:30 la température paroi sud extérieur a atteint son pic (42°) et celle de l'intérieur et de 30 °C. Donc un amortissement important (13 °C)

La température maximale intérieure de la paroi sud (31 °C) est atteinte à 22:00, donc un déphasage important.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le mur Trombe, également appelé mur Trombe-Michel est particulièrement adapté aux Constructions bioclimatiques dont le but est de limiter les besoins en chauffage et d'utiliser de manière optimale les ressources énergétiques propres.

Dans ce travail nous avons présenté le résultat d'une étude expérimentale sur un dispositif à échelle réduite fabriqué en bois avec un mur trombe en argile-paille placé à la face sud, auquel nous avons intégré une unité de stockage thermique latent constitué d'un MCP sous forme stabilisée. Cette expérience a été faite avec des conditions climatiques réelles.

En regard aux résultats obtenus, nous pourrions tirer les conclusions suivantes :

- Pendant la journée les températures internes sont plus ou moins stables, elles varient entre 24 et 30 °C. En revanche les températures externes varient entre 24 et 42 °C. On peut voir l'efficacité thermique des matériaux utilisés.
- Le composite argile-paille présente de nombreux avantages.

L'argile est facile à utiliser et réversible. Contrairement aux autres liants, on peut retravailler l'argile en la mouillant, même après séchage. L'argile est écologique, elle est disponible partout localement. Elle est aussi renouvelable et recyclable.

Parce qu'il est lourd et massif, le mur d'argile emmagasine de la chaleur (bonne inertie thermique) et contribue au confort thermique de l'habitat. L'argile est un matériau respirant. Au contraire du plâtre ou du ciment, ce qui peut réguler l'humidité ambiante. Il capte l'humidité quand elle est disponible puis la relâche quand l'air devient plus sec.

- L'intégration des matériaux à changement de phase à la paroi sud a augmenté l'amortissement du flux de chaleur de cette dernière, qui a atteint les 13 °C. et on a remarqué un déphasage important qui est d'environ 5 heures

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jean-François Chen. Cours de physique de la section DTS IMRT Du lycée Guy mollet d'Arras.
- [2] ; ZEKAI ,Sen. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Springer 2008
- [3] Andrée TUZET, rapporteur Dominique Flura; Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge; 2008.
- [4] Le bilan énergétique terrestre Albédo, Effet de serre ; Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse - Décembre 2019.
<https://eduscol.education.fr/>
- [5] F. LANTRI, N.I. BACHARI et H. BELBACHIR ; Estimation et cartographie des différentes composantes de rayonnement solaire au sol à partir des données météorologiques ; Vol. 20 N°1 111 - 130(2017).
- [6] Petros AXAOPOULOS. Le soleil et son rayonnement ; TEI d'Athènes, Grèce. (Année de parution ?).
- [7] Yves JEANNOT, Christian MOYEN. Cours de transferts thermiques. Ecole des Mines Nancy ,2012
- [8] M. SALMI. «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012).
- [9] Yves JEANNOT, Christian MOYEN. Cours de transferts thermiques. Ecole des Mines Nancy ,2012.
- [10] Mathilde LARGET, thèse de doctorat, contribution à l'évaluation de la dégradation du béton : thermographie infrarouge et couplage de techniques, l'université de bordeaux, septembre 2011.
- [10] Malek JEDIDI ; Omrane BENJEDDOU. La thermique du bâtiment. Du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation ; 2016.
- [11] Fiche technique ; Confort thermique. Agence national de l'habitat. France.
www.anah.fr Année ???
- [12] Jean-Louis IZARD. L'inertie thermique dans le bâtiment ; ENVIROBAT-Méditerranée ; Juillet 2006.
- [13] Layal CHAHWANE. Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Grenoble, 2011.
- [14] P. AUBIN ; V. D'AURA ; U. FAGET ; Th. PHAN . Isolation thermique et efficacité énergétique ; projet de physique. 2017.

[15] Vincent BASECQ. Développement d'un mur capteur stockeur solaire pour le chauffage des bâtiments à très basse consommation d'énergie .Université de La Rochelle, 2015.Français.

[16] Pierre PARDO .Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, INP Toulouse, décembre 2013.

[17] F. MEZIANI; Z.MESSAOUDI. La maison kabyle, art et organisation spatiale et conception (cas village AIT EL KAID) ; Octobre 2016.

[18] Vincent BASECQ ; Développement d'un mur capteur/stockeur solaire pour le chauffage des bâtiments à très basse consommation d'énergie ; UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE ; septembre 2015.

[19] Stéphane GUICHARD. Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale.

Physique Générale [physics.gen-ph]. Université de La Réunion, 2013. Français.

[20] Fabien ROUAULT. Système intégré de rafraîchissement d'air pour le bâtiment à base de matériaux à changement de phase. l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2014.

[21] Damien MATHIS. Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois et matériaux à changement de phase bio sources. 2019

[22] Émilie BOUFFARD. Mémoire, conception de bâtiments solaires : méthodes et outils des architectes dans les phases initiales de conception, UNIVERSITE DE LAVAL ,2013.

[23] Vincent BASECQ. Développement d'un mur capteur/stockeur solaire pour le chauffage des bâtiments à très basse consommation d'énergie ; UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE ; septembre 2015.

[24] POUR SE CHAUFFER : LE MUR TROMBE ?, Article publié le 15/01/2021 par Bénédicte CHASSANITE, <https://www.choisir.com/>