



République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen
FACULTE DE LATECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DU GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Pour l'obtention du

DIPLOME DE MASTER

Spécialité : Génie énergétique

Présenté par

DALI abdessamed

**Simulation et optimisation de l'intégration de
matériaux à changement de phase dans les
bâtiments économes**

Soutenu publiquement le **26 juin 2013**,

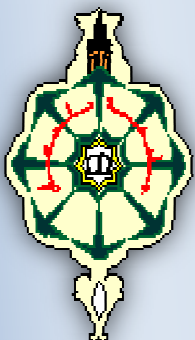
Devant le jury composé de:

Dr. SELADJI . CPrésident

Dr. KORTI . NEncadreur

Dr. GUEZZEN . SExamineur

Dr. SAIEM . RExamineur



Remerciement

Je remercie mon encadreur Monsieur KORTI Abdel Illah, maître de Conférences A à l'Université de Tlemcen, pour m'avoir suivi dans mon travail, pour m'avoir fait profiter de sa grande culture scientifique ainsi que pour les conseils qu'il m'a donnés. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur SELADJI .C, Maître de Conférences A à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie chaleureusement Monsieur GUEZZEN .S, Maître de Conférences A à l'Université de Tlemcen et Monsieur SAIEM .R Maître Assistant A à l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de participer au jury de ce mémoire.

Enfin, j'exprime mes sentiments les plus cordiaux à toutes personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à ma famille qui ma soutenue toute ces années

Dédicace

Je dédie ce modeste travail...

*À mon père et surtout à ma mère en sa mémoire je prie le
Tout-puissant de lui accordé sa Sainte Miséricorde.*

A mes frères et sœurs.

A tous mes amis.

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie peut être utilisée sous différentes formes telles que la chaleur, l'énergie mécanique ou encore la lumière. 2000 ans auparavant, les Romains avaient appris à recourir à des carrelages en céramique pour stocker la chaleur en tant que systèmes de chauffage au sol. De même, l'homme savait déjà comment garder la nourriture au frais avec la glace. Cependant, le stockage du chaud et du froid ne jouait pas encore un rôle déterminant dans la vie quotidienne. Cette notion a pris de l'ampleur lors de la révolution industrielle lorsque de réels besoins de confort dans l'habitat se sont fait ressentir. De nos jours, les réfrigérateurs, le chauffage et l'eau chaude sanitaire sont devenus une nécessité incontournable dans les foyers.

L'avantage du stockage de la chaleur consiste à répondre à l'offre et la demande même s'ils ne coïncident pas au même moment, en pouvant regrouper différentes énergies. L'énergie utilisée peut provenir de différentes sources qui peuvent être renouvelables ou non. L'énergie solaire n'est pas particulièrement continue, c'est pourquoi le stockage de la chaleur est nécessaire pour contrôler de manière fiable les besoins de chaud et de froid, et de réduire considérablement les consommations d'énergie dans le bâtiment ainsi que les émissions de gaz à effet de serre résultantes.

La méthode la plus connue du stockage de l'énergie thermique (TES) résulte dans le changement de température d'un matériau de stockage. Parce que nous ne ressentons pas les changements de température de par nos sens, nous appelons cette méthode : le stockage de la chaleur sensible. Une méthode alternative, celle que nous utilisons dans le

cadre de notre projet, consiste à changer la phase d'un matériau comme. Le changement de phase entre les aspects solide et liquide est particulièrement avantageux puisque la fusion et la solidification s'effectuent à température constante : la température de fusion. Ces matériaux sont appelés « matériaux à changement de phase » ou encore « MCP ». Puisque la température de fusion reste constante, le stockage de la chaleur ne peut être directement ressenti, d'où son appellation « stockage de la chaleur latente ». Cette dernière méthode de stockage de la chaleur possède une masse volumique de stockage plus importante que celle fournie par la méthode de stockage de la chaleur sensible, c'est pourquoi son utilisation est largement répandue aujourd'hui.

Dans un premier temps, les matériaux à changement de phase (MCP), dits aussi matériaux intelligents, sont apparus sur le marché de la construction pour réduire les besoins en climatisation durant les périodes estivales. Incorporés à l'intérieur des bâtiments, dans des produits à base de polymères, de plâtre, ou de béton, les MCP sont capables d'améliorer les performances énergétiques de l'enveloppe tout en augmentant l'inertie thermique. D'autre part, complémentaires d'une isolation, ils sont une réponse au durcissement de la réglementation thermique et à la prise en compte de la notion de confort d'été et de confort d'hiver.

Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les matériaux à changement de phase sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb. Ils fabriquent des maisons « passives » avec des systèmes dits à gains direct (matériaux de construction intégrant des paraffines dans les bétons) dans les années 1970. Dans la même année, en France, est réalisé le premier panneau plâtre à base de paraffine pour améliorer l'inertie des parois minces. Cependant l'inflammabilité et le suintement de cette paraffine sur ces deux matériaux ralentit le développement de l'intégration des MCP dans le secteur du bâtiment. La mise en place de la technique de « micro-encapsulation » qui élimine ces deux problèmes relance le regain de ces matériaux pour le bâtiment à partir des années 2000.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I

LE CONFORT THERMIQUE

Sommaire

INTRODUCTION	5
I.1. LA NOTION DE CONFORT THERMIQUE	5
I.2. LES PARAMETRES AFFECTANT LE CONFORT THERMIQUE	6
I.2.1. PARAMETRES LIES A L'AMBIANCE EXTERIEURE.....	7
<i>I.2.1.1. La température de l'air ambiant</i>	<i>7</i>
<i>I.2.1.2. La vitesse de l'air</i>	<i>8</i>
<i>I.2.1.3. L'humidité relative de l'air</i>	<i>8</i>
I.2.2. PARAMETRES LIES A L'INDIVIDU	8
<i>I.2.2.1. La v�ture.....</i>	<i>8</i>
<i>I.2.2.2. L'activité.....</i>	<i>9</i>
I.2.3. PARAMETRES LIES AUX GAINS THERMIQUES INTERNES	9
I.3. FACTEURS D'INCONFORT THERMIQUE.....	11
I.3.1. EFFET DES COURANTS D'AIR.....	11
I.3.2. EFFET DE L'ASYMETRIE D'UN RAYONNEMENT THERMIQUE.....	11
I.3.3. EFFET DE GRADIENT THERMIQUE VERTICAL DE L'AIR.....	12
I.3.4. EFFET DE LA TEMPERATURE DU SOL.....	12
I.4. ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE	12
I.4.1. INDICES POUR L'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE	13
<i>I.4.1.1. Les indices PMV et PPD</i>	<i>13</i>
<i>I.4.1.2. La température de l'air ambiant (Text).....</i>	<i>15</i>
<i>I.4.1.3. La température opérative (Top).....</i>	<i>15</i>
I.4.3. LES ECHELLES DES JUGEMENTS DU CONFORT THERMIQUE.....	16
<i>I.4.3.1. Les différentes échelles de jugement.....</i>	<i>17</i>
I.4.4. LES OUTILS GRAPHIQUES D'ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE.....	17
<i>I.4.4.1. Définition du diagramme bioclimatique</i>	<i>18</i>
<i>I.4.4.2. Diagramme de Givoni.....</i>	<i>20</i>
<i>I.4.4.3. Tables de Mahoney.....</i>	<i>22</i>
CONCLUSION	23

Introduction

Le confort peut être défini comme le degré de désagrément ou de bien-être produit par les caractéristiques de l'environnement intérieur d'un bâtiment. Une telle définition considère une interaction entre l'individu et l'espace qui l'entoure, c'est-à-dire, entre des conditions ambiantes physiquement mesurables et certaines conditions individuelles qui affectent notre perception [1]. La qualité de vie à l'intérieur de l'espace a été souvent rapprochée à une appréciation thermique en premier lieu.

Assurer une sensation de chaleur en hiver et se préserver des fortes chaleurs en été est depuis longtemps un souci majeur pour les concepteurs. D'ailleurs, un des objectifs de l'architecture réside dans la satisfaction des occupants par le bien être thermique.

I.1. La notion de confort thermique

La notion de confort thermique, désigne l'ensemble des multiples interactions entre l'occupant et son environnement où l'individu est considéré comme un élément du système thermique, pour le définir on lui associe plusieurs paramètres, notamment [2]:

Le paramètre physique : l'homme est représenté comme une machine thermique et on considère ses interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur.

Le paramètre psychologique: Il concerne les sensations de confort éprouvées par l'homme et la qualification des ambiances intérieures.

Une définition satisfaisante du confort thermique doit pouvoir intégrer tous ces paramètres, mais de nombreuses définitions avancées jusqu'à maintenant ne caractérisent le problème que sous la lumière d'un seul de ces paramètres, par exemple:

Aspect physiologique: « Les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont un niveau d'activité minimum » [3]

Aspect sensoriel: « État d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement.

L'individu ne peut pas dire s'il veut avoir plus froid ou plus chaud ».

Aspects psychologique et sensoriel: «Sensation de bien être physique et mental total »

En conséquence, le caractère subjectif de la notion de confort thermique est mis en avant par l'ensemble de ces définitions. Selon Hoffmann, J. B [4], la définition la plus classique du confort thermique n'est autre qu'une absence d'inconfort.

Pour approfondir cette notion de confort thermique, nous évoquerons dans ce qui suit, les paramètres affectant le confort thermique, l'approche statique du confort à travers les phénomènes de thermorégulation (base physiologique) et d'échanges thermiques (base physique) du corps humain avec son environnement extérieur. En dernier lieu, nous traiterons l'approche adaptative de l'homme avec son environnement.

I.2. Les paramètres affectant le confort thermique

La sensation de confort thermique est fonction de plusieurs paramètres (Tableau I.1) :

Les paramètres physiques d'ambiance, au nombre de quatre, sont la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse de l'air, et l'humidité relative de l'air;

Les paramètres liés à l'individu, ils sont multiples, on recense notamment deux paramètres principaux qui sont l'activité et la vêtue de l'individu ;

Les Paramètres liés aux gains thermiques internes, gains générés dans l'espace par des sources internes autres que le système de chauffage. (éclairage, appareils électriques, postes informatiques).

Tableau I. 1. Paramètres influents sur la sensation de confort thermique.

<i>Paramètres liés à l'individu</i>	<i>L'activité physique et l'habillement</i>
<i>Paramètres liés à l'environnement</i>	La température de l'air, les sources de rayonnement (radiateurs, soleil), la température des surfaces environnantes, la vitesse relative de l'air par rapport au sujet et l'humidité relative de l'air
<i>Autres influences</i>	Gains thermiques internes, Degré d'occupation des locaux, Couleur, Ambiance,etc.

I.2.1. Paramètres liés à l'ambiance extérieure

I.2.1.1. La température de l'air ambiant

La température de l'air, ou température ambiante (Text), est un paramètre essentiel du confort thermique. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires. Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe.

Ainsi par exemple la réglementation générale française pour la protection du travail (RGPT), impose des valeurs de référence pour les températures de l'air, données par le tableau I.2 ci-dessous [5].

Tableau I. 2. Valeurs de référence de température de l'air.

Type de local	Température de l'air
Locaux ou des gens habillés normalement sont au repos ou exercent une activité physique très légère. Par exemple : bureaux, salles de cours, salles d'attente, salles de réunion ou de conférence.	21°C
Locaux ou des gens peu ou pas habillés sont au repos ou exercent une activité physique très légère. Par exemple salles d'examens ou soins médicaux, vestiaires.	23 à 25°C
Locaux ou des gens habillés normalement exercent une activité physique très légère. Par exemple ateliers, laboratoires, cuisines.	17°C
Locaux ou des gens peu habillés exercent une grande activité physique Par exemple salles de gymnastique, salle de sport.	17°C
Locaux qui ne servent que de passage pour les gens habillés normalement. Par exemple corridors, cages d'escalier, vestiaires, sanitaire.	17°C
Locaux uniquement gardés à l'abri du gel. Par exemple garages, archives.	5°C

Ces températures sont calculées pour une valeur moyenne de surface des parois inférieure de 2°C à la température de l'air, elles sont acceptées dans certains cas comme température de confort dans le cadre d'une politique d'utilisation rationnelle de l'énergie.

I.2.1.2. La vitesse de l'air

La vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires, elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s [6]. Toutefois, à l'intérieur des bâtiments, ces vitesses demeurent limitées, ne dépassant pas généralement cette vitesse, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Elle peut, en revanche, être tenue pour responsable de l'apparition d'inconforts locaux, liés à la présence de courants d'air froids ou chauds localisés.

I.2.1.3. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air influence les échanges évaporatoires cutanés, elle détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur.

Selon Liébard A., entre 30% et 70%, l'humidité relative influence peu la sensation de confort thermique. Une humidité trop forte dérègle la thermorégulation de l'organisme car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration [7], le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort.

I.2.2. Paramètres liés à l'individu

I.2.2.1. La vêtue

Les vêtements permettent de créer un microclimat sous-vestimental, à travers leurs résistances thermiques, en modifiant les échanges de chaleur, entre la peau et l'environnement. Leur rôle essentiel est de maintenir le corps dans des conditions thermiques acceptables, été comme hiver.

La vêtue a un rôle primordial d'isolant thermique, notamment en période hivernale et dans toutes les ambiances froides, ce rôle est pris en compte à travers la définition d'un

indice de vture, exprimé en **Clo** , caractérisant la résistance thermique d'un vêtement (figure I-1).

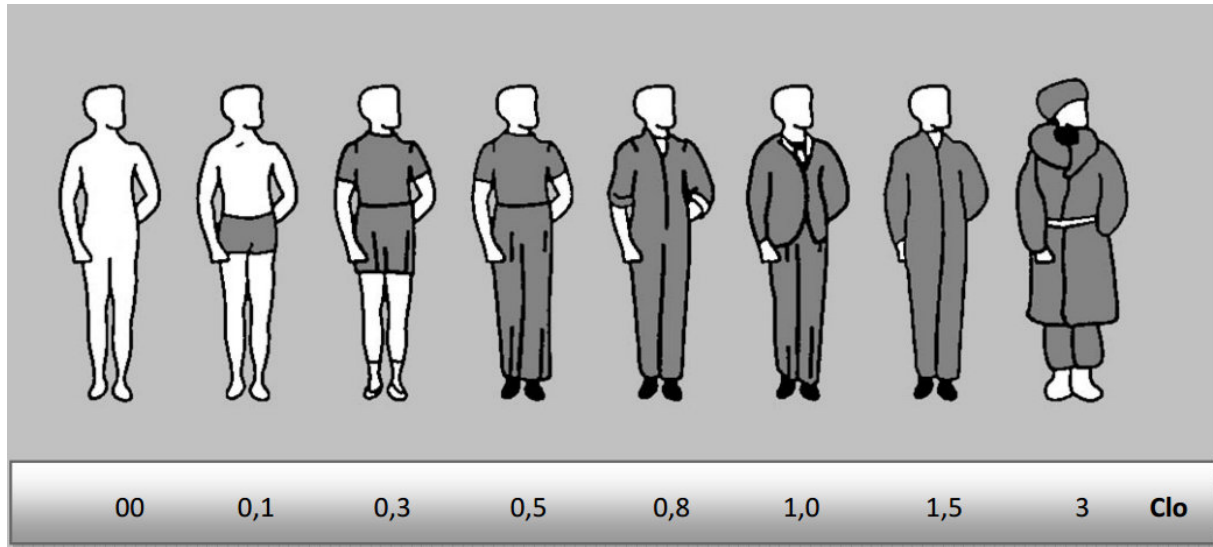


Figure I. 1. Valeurs exprimées en **Clo** des tenues vestimentaires.

La nature du tissu, la coupe des vêtements et l'activité du sujet influencent aussi ces échanges thermiques avec l'environnement [8].

I.2.2.2. L'activité

L'activité est un paramètre essentiel pour la sensation thermique de l'individu, définissant directement le métabolisme de l'individu, c'est à dire la quantité de chaleur produite par le corps humain. Dans le cas d'une très forte activité, elle peut être responsable de sensations d'inconfort chaud, même en présence de conditions météorologiques très favorables. Il est à noter toutefois que, dans le cas d'une activité classique de bureau, les plages de variation du métabolisme demeurent limitées.

I.2.3. Paramètres liés aux gains thermiques internes

Avec l'essor de la technologie et des besoins électriques (clairage, électroménager,...), les apports de chaleur internes ont fortement augmenté. Les appareils électriques transforment en effet quasiment toute l'énergie qu'ils consomment en chaleur, Les postes informatiques

sont également de vraies sources de chaleur et les occupants constituent eux aussi une autre source d'apports internes par leur métabolisme.

Les apports internes comprennent donc, toute quantité de chaleur générée dans l'espace par des sources internes autres que le système de chauffage.

Ces gains de chaleur dépendent du type du bâtiment, du nombre des utilisateurs et de son usage.

D'après Hugues Boivin, le confort de l'espace est directement influencé par le taux de ces gains internes (figure I.2), on peut dire que ces apports sont inévitables dès lors que les locaux sont habités. Il faut noter cependant que ces apports sont variables selon le comportement des occupants, et qu'ils constituent donc un facteur d'aggravation de l'inconfort chaud, sur lequel les moyens d'action architecturaux sont limités. Seuls, une bonne ventilation et un comportement adéquat de l'occupant peuvent réduire ces apports ou leur influence sur la température intérieure [9].

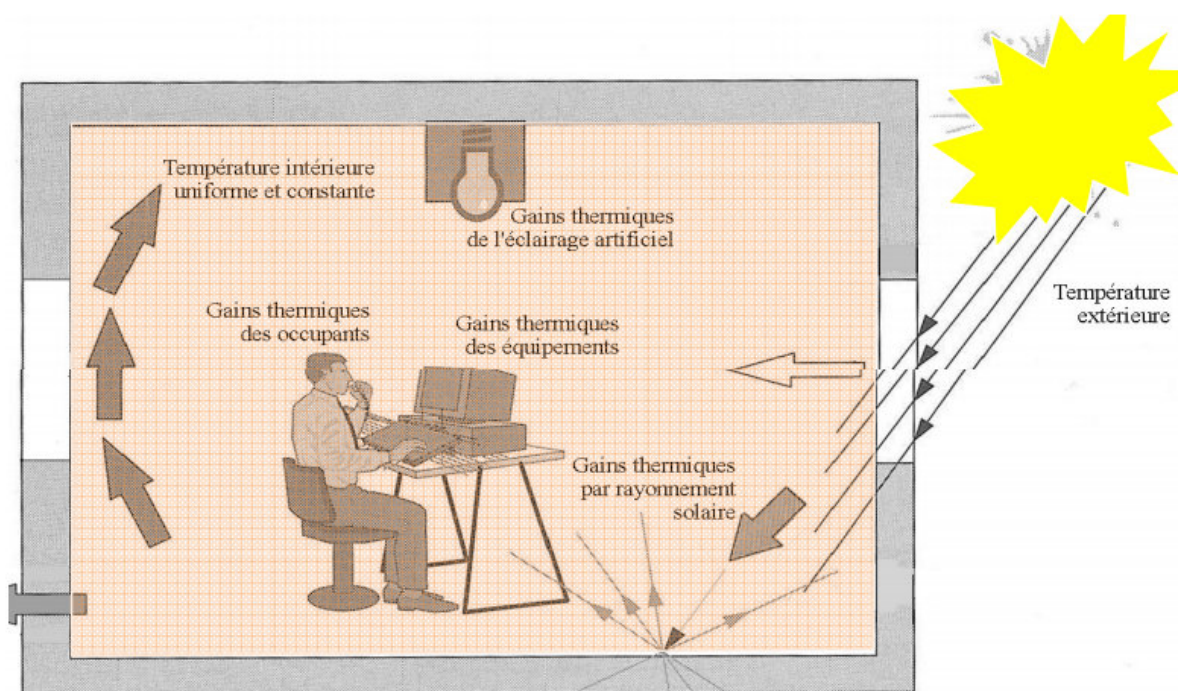


Figure I. 2. Gains thermiques internes d'un espace.

I.3. Facteurs d'inconfort thermique

Malgré la réalisation d'un confort thermique global, des zones d'inconforts sont susceptibles d'être observées dans les bâtiments. Un environnement thermique inégal peut être la source d'inconfort pour certaines parties du corps. L'insatisfaction thermique peut être causée par un inconfort, causée par un refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une partie du corps (tête, pieds, ou mains), par exemple, un courant d'air.

Un inconfort local peut également être dû à des différences de températures anormalement élevées entre la tête et la cheville, avec un sol trop chaud ou trop froid, ou à une asymétrie de rayonnement thermique. Ainsi, le confort thermique peut être affecté par plusieurs facteurs, citons [10]: Le courant d'air local, l'asymétrie de la température de rayonnement, la différence verticale de la température de l'air et la température des planchers.

I.3.1. Effet des courants d'air.

La perception d'un courant d'air localisé notamment au niveau de la nuque ou du visage est un élément d'inconfort. Cette perception du courant d'air dépend de la vitesse de l'air, de la température de l'air, de la zone du corps concernée. Les courants d'air provoquent aussi une sensation de froid due à une convection assez importante entre la peau et l'air ambiant. Des courants d'air excessifs en hiver conduisent souvent les occupants à augmenter la température intérieure pour contrecarrer la sensation de froid. La norme recommande une vitesse d'air moyenne inférieure à 0,15 m/s en hiver et à 0,25 m/s en été lors d'un travail sédentaire [11].

I.3.2. Effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique.

Les asymétries du rayonnement sont dues, à la présence d'une paroi chaude ou froide telle qu'un plafond ou un plancher chauffant, un vitrage chaud ou froid. En outre, le gradient vertical de température est aussi une source d'inconfort. S'il est suffisamment élevé, il peut apparaître une sensation de chaud au niveau de la tête ou de froid au niveau des pieds, même si le corps est en état d'équilibre thermique. Moujalled [12] conclut que l'asymétrie de température radiante doit être inférieure à 10°C pour une paroi verticale froide (baie vitrée en hiver), et 5°C pour un plafond chaud (plafond chauffant).

I.3.3. Effet de gradient thermique vertical de l'air.

En général, les températures sont plus élevées en hauteur donc au niveau de la tête, La norme admet une différence de température d'air maximum de 3°C entre 0,1 m du sol (niveau des chevilles) et 1,1 m du sol (niveau de la tête chez une personne assise) [13].

I.3.4. Effet de la température du sol.

Hoffman J B, précise qu'une température de plancher trop élevée ou trop basse entraîne un inconfort au niveau des pieds. Plusieurs auteurs ont effectué des recherches sur ce sujet et selon Olsen BW, les températures optimales de sol pour les personnes chaussées et à la neutralité thermique sont de 23 °c pour les personnes debout et de 25°C pour les personnes assises, avec un minimum de 6% d'insatisfaits.

D'autres éléments influençant le confort thermique ont été étudiés : l'âge, le sexe, la nourriture, la localisation géographique, la couleur des murs, le bruit, la lumière. Toutefois, il ne peut exister de règles de confort universelles du fait de grandes variations géographiques et intra-individuelles, sauf que Les médecins de l'habitat sain proposent les valeurs suivantes pour chaque facteur du confort [14]:

- ✓ Température des murs : $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- ✓ Humidité relative entre 30 et 70%
- ✓ Température du sol : 19 à 24°C
- ✓ Vitesse de l'air : inférieure à 0,20 m/s ;
- ✓ Différence de température entre deux murs d'une même pièce doit être inférieure à 10°C
- ✓ Différence de température entre le sol et le plafond doit être inférieure à 5°C

I.4. Évaluation du confort thermique

L'évaluation du confort thermique dans les espaces est un paramètre capital dans toute conception architecturale. Les premières recherches se sont basées sur les enquêtes de terrain avec des questionnaires en classifiant la sensation thermique (très chaud, neutre et très froid) ainsi que sur les essais de laboratoires sous des conditions climatiques artificielles.

Cette évaluation a conduit plusieurs chercheurs à développer et à élaborer des indices de prédiction des niveaux de confort à l'intérieur des bâtiments,

En plus des indices thermiques, des tentatives ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de prédire des zones de confort, connus sous le nom de diagrammes bioclimatiques, ils sont l'aboutissement direct de la connaissance du climat, ces outils sont également développés pour permettre d'obtenir des bâtiments confortables, adaptés aux variables climatiques.

I.4.1. Indices pour l'évaluation du confort thermique

De nombreux travaux de recherche, réalisés à l'intérieur des bâtiments ou dans des conditions expérimentales parfaitement contrôlées en laboratoire, ont recensé les principales causes d'inconfort et ont permis d'établir un certain nombre d'indices, nommés « indices de confort thermique », qui sont en général définis en fonction de la température et de la vitesse de l'air. Nous ne citerons ici que les indices les plus couramment utilisés dans l'ensemble des normes de confort.

I.4.1.1. Les indices PMV et PPD

À partir d'études réalisées en laboratoire sous des conditions stables, c'est-à-dire sans que l'individu ne change ni de vêtements, ni d'activité physique, Fanger a développé les indicateurs de confort thermique ; le PMV (Vote Moyen Prévisible) et le PPD (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits). Le premier prédit la sensation thermique moyenne d'un large groupe d'individus et le second, le pourcentage d'occupants insatisfaits de l'environnement thermique.

❖ Le PMV (Vote Moyen Prévisible)

Le PMV établi par Fanger permet de mesurer une sensation thermique globale du corps humain à partir du métabolisme et donne la moyenne des votes en référence à une échelle de sensation thermique. Les valeurs de l'indice PMV varient entre -3 et 3 comme l'indique le Tableau I.3

En constatant que les questionnaires utilisés pour évaluer le confort peuvent omettre certaines situations de confort, Fanger a avancé le postulat suivant : « Sont déclarées inconfortables toutes les personnes ayant des sensations supérieures à l'échelle 2 ou inférieures à l'échelle -2 ». Il a ensuite associé le PPD (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits) qui exprime le pourcentage des sujets «insatisfaits» de manière générale.

Tableau I. 3. Correspondances entre PMV et échelle des sensations thermiques.

VALEURS DE L'INDICE PMV	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
SENSATION THERMIQUE	Chaud	Tiède	Légèrement tiède	Neutre	Légèrement Frais	Frais	Froid

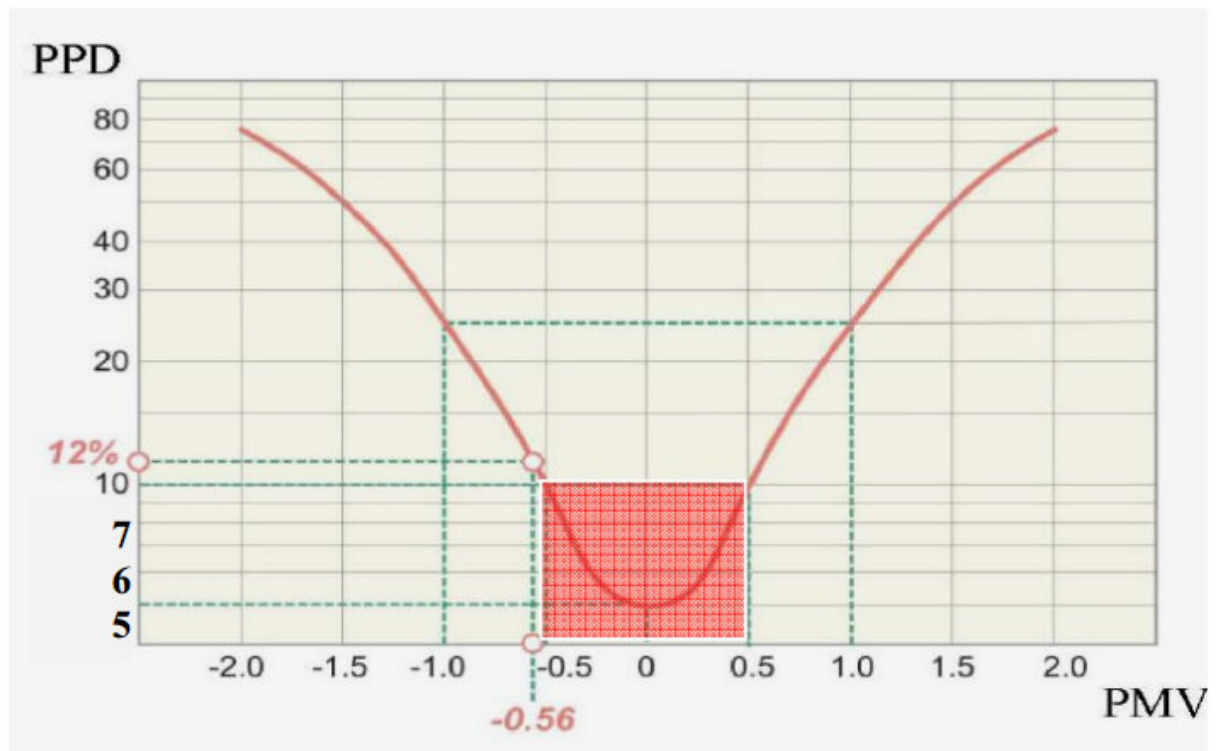
❖ Le PPD (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits)

À cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions "idéales", et Le PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits) exprime sous forme de pourcentage les sujets «insatisfaits» d'une ambiance thermique déterminée.

Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum, qui correspond aux conditions optimales de neutralité thermique du corps humain. Il reste néanmoins, en moyenne, 5 % d'insatisfaits lorsque le PMV est nul, comme le montre le tableau I.4 suivant

La norme ISO 7730 stipule que pour se situer dans la zone de confort thermique , il faut que :

$$-0,5 < PMV < 0,5 \text{ soit } PPD < 10 \%$$

Tableau I. 4. Correspondances entre PMV et PPD.

I.4.1.2. La température de l'air ambiant (Text)

Elle représente l'indice le plus utilisé pour le contrôle des ambiances en intérieur du fait de la simplicité de sa mesure. Ce paramètre ne présente pas de grosses difficultés de mesure et d'évaluation, mais revêt un caractère toutefois limité pour la caractérisation complète du confort. Indice connu de tous, la température de l'air sera donc largement utilisée comme indice de confort dans le cas d'un contrôle peu strict du confort thermique. Il est utilisé pour définir les consignes de température références pour les installations de chauffage en période hivernale et climatisation en période estivale.

I.4.1.3. La température opérative (Top)

La température opérative, T_{op} , est un indice de confort thermique intégrant deux paramètres physiques, la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante. Il s'agit donc d'un indice d'appréciation des effets convectifs et radiatifs sur le confort de

l'individu. La norme ISO 7730 fournit le calcul simple de cet indice par la formulation (Equation I.1) [15]:

$$T_{op} = \alpha T_{ext} + (1 - \alpha) T_{mrt} \quad \text{Eq I.1}$$

Avec :

- T_{op} : La température opérative. [°C]
- T_{ext} : La température d'air. [°C]
- T_{mrt} : La température moyenne radiante. [°C]
- α : Coefficient en fonction de la vitesse d'air.

Le tableau I.5 nous donne quelques valeurs de α en fonction de la vitesse de l'air

Tableau I. 5. Valeurs de α en fonction de la vitesse d'air.

Vitesse (m/s)	0 - 0,2	0,2 - 0.6	0,6 – 0,7
α : coefficient	0,5	0,6	0,7

Avec des vitesses de l'air inférieures à 0,2 m/s, la température opérative est égale avec une bonne approximation, à la moyenne arithmétique des températures citées, et pouvant être écrite de la façon suivante.

$$T_{op} = (T_{ext} + T_{mrt}) / 2 \quad \text{Eq I.2}$$

Pour des activités sédentaires ou légères exercées par des personnes portant une tenue vestimentaire estivale normale, la température opérative limite de confort est de 27°C pour un environnement avec 55% d'humidité relative, elle peut, par contre, être augmentée jusqu'à 29°C, si la vitesse de l'air est au-dessus de 0,2 m/s.

I.4.3. Les échelles des jugements du confort thermique

Le confort s'appréhende à partir de réponses à des questions relatives à la satisfaction ou l'agrément vis-à-vis de l'état thermique local et global de l'individu. Il apparaît donc très important de faire la part entre:

- ✓ L'état thermique du sujet qui l'amène à donner une expression de sa sensation personnelle ;
- ✓ L'état thermique de l'ambiance qui est jugée à travers la perception sensorielle du climat.

Le sentiment de confort ou d'inconfort, exprimé à partir de l'état thermique du sujet, peut être très influencé par des perceptions locales désagréables.

Pour juger le confort thermique, un regard s'impose sur les réponses aux trois questions suivantes :

- Comment vous sentez-vous (Froid- Chaud) ?
- Comment trouvez-vous cela (Agréable-Désagréable) ?
- Que préféreriez-vous (plus froid-plus chaud) ?

I.4.3.1. Les différentes échelles de jugement.

Pour évaluer la sensation thermique, différentes échelles ont été développées, selon le type de jugement recherché : jugement perceptif ou jugement de tolérance.

Cinq échelles sont proposées : trois échelles sont élaborées pour recueillir les jugements et deux supplémentaires pour exprimer l'acceptabilité personnelle [16].

Le principe consiste à différencier les jugements portés par les personnes sur leurs propres sensations thermiques, cette méthode d'évaluation présente plusieurs avantages:

- Une distinction est effectuée entre la perception, l'évaluation affective et la préférence de chaque individu ;
- L'individu exprime naturellement ses sensations thermiques ;
- La méthode permet d'estimer non seulement les ambiances confortables mais également les ambiances inconfortables.

I.4.4. Les outils graphiques d'évaluation du confort thermique

En plus des indices thermiques, diverses recherches ont été entamées pour connaître les limites du confort thermique sous forme diagrammes bioclimatiques. En 1953 le premier«

diagramme bioclimatique» a été proposé par V. Olgay. Il était le premier à mettre au point une procédure qui est basée sur un diagramme bioclimatique ou il détermine une zone de confort avec des plages d'été et d'hiver et les mesures de correction dans le cas où la combinaison entre l'humidité et la température se situe hors la zone de confort. Aussi les tables de Mahoney qui sont une série de tableaux de référence d'architecture, sont utilisées comme guide pour obtenir des bâtiments confortables, adaptés aux conditions climatiques.

I.4.4.1. Définition du diagramme bioclimatique

Le diagramme bioclimatique est un outil d'aide à la décision globale du projet permettant d'établir le degré de nécessité de mise en oeuvre de grandes options telles que l'inertie thermique, la ventilation généralisée, le refroidissement évaporatif, puis le chauffage ou la climatisation, il est construit sur un diagramme psychrométrique (appelé aussi diagramme de l'air humide)(figure I.3) [17].

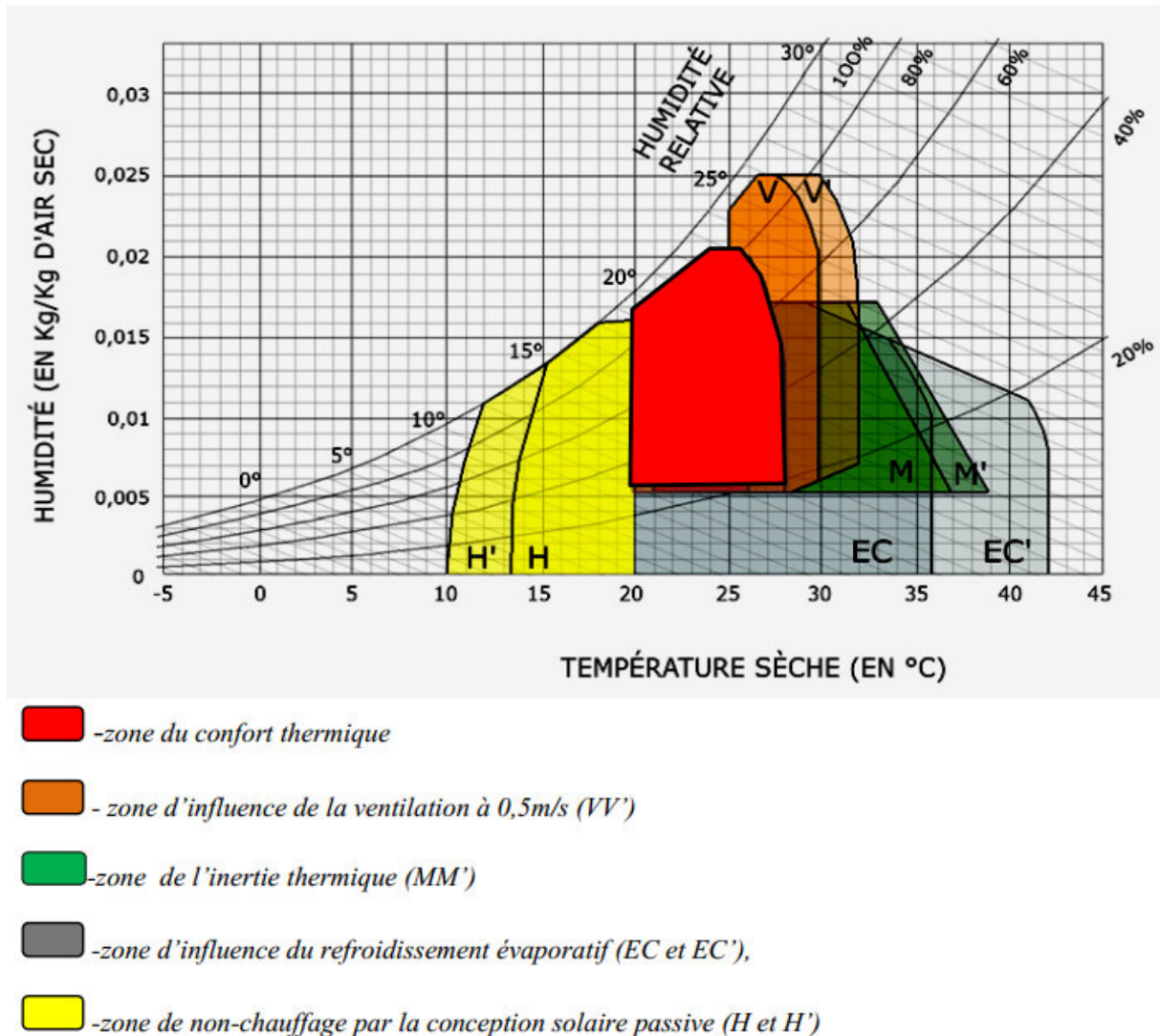


Figure I. 3. Diagramme bioclimatique.

Sur ce diagramme sont représentées:

- La zone de confort hygrothermique tracée pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (en général 0,1 m/s) et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été;

L'extension de la zone de confort hygrothermique due à la ventilation par augmentation de la vitesse d'air de 0,1 à 1,5m/s;

- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation;
- La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air

La zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment.

Le diagramme bioclimatique trouve son utilité dès que les conditions climatiques s'écartent du polygone de confort, la distance qui sépare ces conditions des limites du polygone suggère dans le diagramme bioclimatique les solutions constructives et fonctionnelles qu'il faut adopter pour concevoir un bâtiment adapté: ventilation, inertie thermique, protection solaire, utilisation des systèmes passifs.

Cette méthode graphique permet de bien se rendre compte de quelques techniques que l'on peut utiliser pour améliorer le confort dans le bâtiment. On peut voir par exemple que plus la vitesse de l'air est importante, plus la zone de confort est grande. Une ambiance peut donc être confortable avec une température de 30°C si la vitesse de l'air est de 0,5 m/s, de même, on se rend compte qu'à une température donnée, si l'on baisse l'humidité de l'air, on peut passer d'une zone d'inconfort à une zone de confort. C'est ce qui est utilisé dans les systèmes de climatisation, qui en même temps apportent de la fraîcheur à un local, diminuent son taux d'humidité [18].

Le diagramme bioclimatique n'est pas un outil de dimensionnement précis du projet, mais il constitue bien un guide pour aider l'architecte à prendre les bonnes décisions en phase esquisse.

I.4.4.2. Diagramme de Givoni

Se basant sur les études antérieures d'Olgyay, Givoni a élaboré une méthode expérimentale où il représente les limites des ambiances confortables sur un diagramme psychométrique courant. Il présente une méthode plus performante que celle de V. Olgyay, dans l'évaluation des exigences physiologiques du confort.

Givoni définit le confort en considérant la personne en état d'activité, Par l'intermédiaire de son diagramme bioclimatique, il a prouvé qu'avec l'application des concepts de l'architecture, l'effet de variation climatique de l'environnement extérieur peut être réduit au minimum [19]. Il a alors mis au point un outil synthétisant les zones thermo-hygrométriques et les moyens d'intervention par des dispositifs architecturaux ou techniques qui peuvent être utilisés pour remédier aux sollicitations du climat.

Ceci est exprimé sur un diagramme psychométrique ou bioclimatique (figure I.4), présenté dans son ouvrage « L'homme, l'architecture, le climat ».

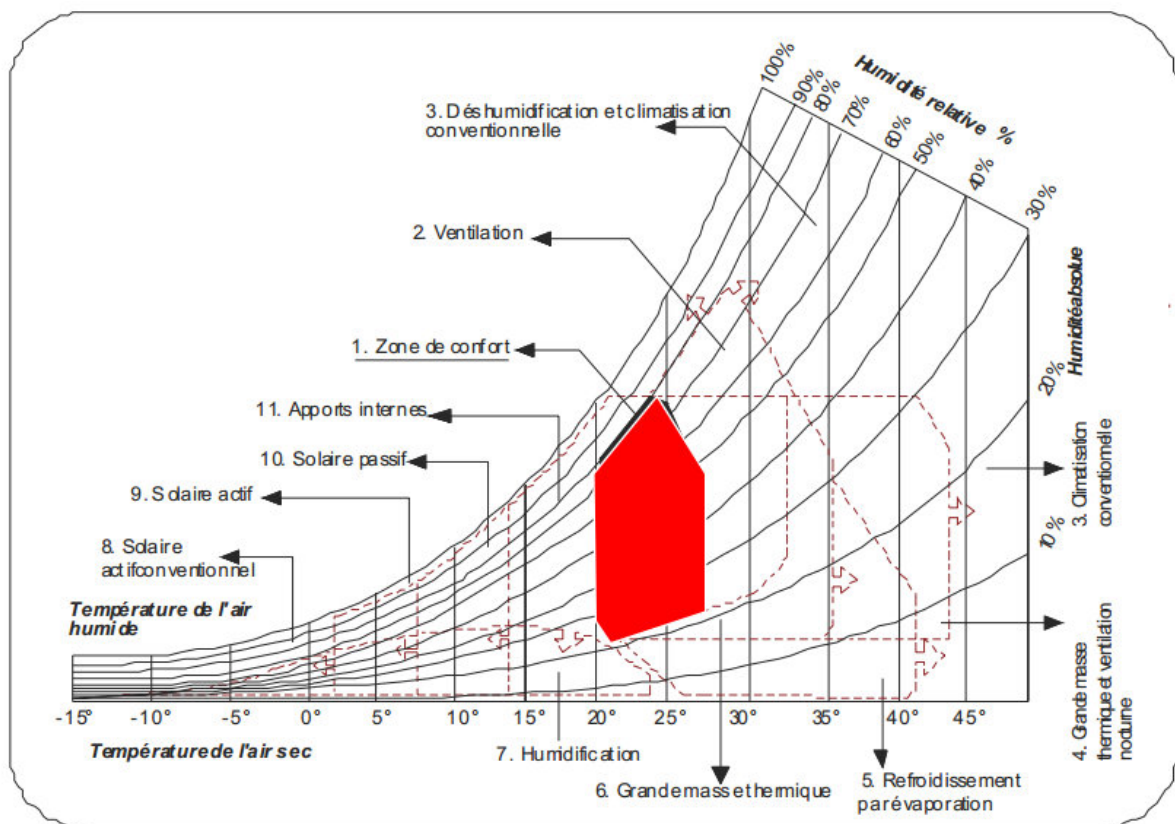


Figure I. 4. Zones de confort selon le diagramme bioclimatique de Givoni.

La zone de confort est positionnée au centre, l'aire extérieure à cette zone est subdivisée en zones secondaires, où l'auteur propose différentes procédures permettant de réintégrer les conditions de confort. Givoni a procédé dans l'élaboration de ses zones climatiques à des exigences de confort universelles. Sa zone de confort se situe entre les températures 20 et 27°C, C'est à dire qu'il considère que toutes les personnes, quelque soit la latitude à laquelle ils se trouvent, réagissent de la même manière au confort.

I.4.4.3. Tables de Mahoney

Carl Mahoney a développé une méthode de traitement des données climatiques très simple, constituée d'une suite de tableaux.

Les tables de Mahoney sont une série de tableaux de référence d'architecture utilisées comme guide pour obtenir des bâtiments confortables, adapté aux conditions climatiques. Ces tables qui tirent leur nom de l'architecte Carl Mahoney qui les a créées, sont constituées d'une suite de 6 tableaux [20]. Quatre sont utilisées pour entrer les données climatiques :

- 1 - Températures : moyennes mensuelles des températures maximales et minimales ;
- 2 - Humidité, précipitations et vent ;
- 3 - Comparaison des limites de confort et du climat ;
- 4 - Indicateurs : par combinaison des données des tables précédentes, classification de l'humidité ou de l'aridité pour chaque mois.

Les deux autres tableaux indiquent les recommandations architecturales à respecter telles que la forme et l'orientation du bâtiment, la position, la dimension ou l'exposition des ouvertures.....etc. (Voir chapitre IV).

En fonction des données climatiques (Températures, Humidités relatives, Précipitations, du site d'intervention, la méthode de Mahoney va aider l'architecte à prendre les meilleurs décisions en phase esquisse.

Conclusion

Exposé à un environnement thermique, le corps humain réagit par une interaction dynamique mobilisant un ensemble de réactions rétroactives, volontaires et involontaires, qui permettent de contrôler les échanges thermiques avec cet environnement afin de satisfaire son confort thermique. L'environnement thermique est caractérisé par quatre grandeurs physiques (la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air). Ces variables réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent ensemble les six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement. Mais au delà de ces variables, la perception thermique d'un environnement peut être influencée par des variables physiologiques, psychologiques et sociologiques.

Deux approches ont été définies dans cet état de l'art sur le confort thermique, l'approche analytique et l'approche adaptative. L'approche analytique représente l'homme comme une machine thermique et considère les interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur. La deuxième approche considère le confort thermique à travers les réactions comportementales qui caractérisent la capacité adaptative de l'occupant dans son environnement, elle considère que les personnes jouent un rôle actif dans le maintien de leur confort thermique, c'est-à-dire que l'homme peut agir sur son environnement en fonction de ses besoins et de sa perception du climat.

L'étude et l'évaluation du confort thermique ont d'abord été abordés à travers des indices de confort déterminés par les expérimentation et des mesures in situ, Suite aux indices thermiques, des tentatives ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de prédire des zones de confort, connus sous le nom de diagrammes bioclimatiques considéré lui aussi comme une techniques universelle d'évaluation du confort thermique, applicable pour tous les cas de types de bâtiment; de zones climatiques et des populations différentes. Ce diagramme ainsi que les tables de Mahoney, ne sont pas des outils de dimensionnement précis du projet, mais ils constituent bien des guide pour aider l'architecte à prendre les bonnes décisions en phase esquisse pour assurer un meilleur confort thermique.

Sommaire

LE CONFORT THERMIQUE.....	3
INTRODUCTION.....	5
I.1. LA NOTION DE CONFORT THERMIQUE	5
I.2. LES PARAMETRES AFFECTANT LE CONFORT THERMIQUE	6
I.2.1. PARAMETRES LIES A L'AMBIANCE EXTERIEURE	7
I.2.1.1. <i>La température de l'air ambiant</i>	7
I.2.1.2. <i>La vitesse de l'air</i>	8
I.2.1.3. <i>L'humidité relative de l'air</i>	8
I.2.2. PARAMETRES LIES A L'INDIVIDU.....	8
I.2.2.1. <i>La vêtture</i>	8
I.2.2.2. <i>L'activité</i>	9
I.2.3. PARAMETRES LIES AUX GAINS THERMIQUES INTERNES	9
I.3. FACTEURS D'INCONFORT THERMIQUE	11
I.3.1. EFFET DES COURANTS D'AIR.....	11
I.3.2. EFFET DE L'ASYMETRIE D'UN RAYONNEMENT THERMIQUE.....	11
I.3.3. EFFET DE GRADIENT THERMIQUE VERTICAL DE L'AIR.....	12
I.3.4. EFFET DE LA TEMPERATURE DU SOL.....	12
I.4. ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE.....	12
I.4.1. INDICES POUR L'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE.....	13
I.4.1.1. <i>Les indices PMV et PPD</i>	13
I.4.1.2. <i>La température de l'air ambiant (Text)</i>	15
I.4.1.3. <i>La température opérative (Top)</i>	15
I.4.3. LES ECHELLES DES JUGEMENTS DU CONFORT THERMIQUE	16
I.4.3.1. <i>Les différentes échelles de jugement</i>	17
I.4.4. LES OUTILS GRAPHIQUES D'ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE	17
I.4.4.1. <i>Définition du diagramme bioclimatique</i>	18
I.4.4.2. <i>Diagramme de Givoni</i>	20
I.4.4.3. <i>Tables de Mahoney</i>	22
CONCLUSION.....	23

CHAPITRE II

L'ISOLATION THERMIQUE DES BATIMENTS

Sommaire

II.1. INTRODUCTION.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.2. LE PONT THERMIQUE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.3. L'INERTIE THERMIQUE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.4. NECESSITE DE L'ISOLATION THERMIQUE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.4.1. PRINCIPE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.5. ISOLATION DES PAROIS	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.5.1. ISOLATION INTERIEURE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.5.2. ISOLATION EXTERIEURE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6. LES ISOLANTS THERMIQUES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.1. LA LAINE DE VERRE MINERALE (MW).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.2. LE POLYSTYRENE EXPANSE (EPS).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.3. LE VERRE CELLULAIRE (CG).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.4. LE POLYSTYRENE EXTRUDE (XPS).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.5. POLYURETHANNE (PUR) ET POLYISOCYANURATE (PIR).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.6. LA LAINE DE BOIS	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.7. PHENOL (PF).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.6.8. PERLITE EXPANSEE (EPB).....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.7. UTILISATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP) EN TANT QUE MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.7.1. DES MATERIAUX DITS « INTELLIGENTS ».....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.7.2. METHODE DE STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.7.3. MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP)	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.7.4. CLASSIFICATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP)	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
II.7.4.1. Les MCP inorganiques.....	Erreur ! Signet non défini.
II.7.4.2. Les MCP organiques.....	Erreur ! Signet non défini.
II.7.4.3. Les MCP eutectiques.....	Erreur ! Signet non défini.
II.7.4.4. MCP à base de paraffine et de sels hydratés	Erreur ! Signet non défini.
II.7.5. CRITERES DE SELECTION D'UN MCP	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

II.1. Introduction

Pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment et économiser de l'énergie, il est nécessaire de mettre en œuvre des matériaux particulièrement performants, apportant une bonne isolation thermique. En effet, une bonne isolation thermique entraîne le choix d'équipements de climatisation moins puissants donc plus économiques.

Dans la plupart des cas, l'isolation est obtenue par l'emploi de matériaux spécifiques, qui, outre une bonne résistance à la transmission de la chaleur, doivent présenter d'autres qualités qui sont fonction des impératifs de mise en œuvre comme :

- la légèreté et la non hygroscopicité afin de conserver dans le temps ses qualités isolantes,

- une bonne résistance mécanique,

- une bonne tenue aux températures d'emploi,

- une absence d'effets nuisibles sur les matériaux en contact avec l'isolant.

On peut par exemple, au cas où il y a nécessité d'isolation complémentaire, opter pour la mise en œuvre d'isolants pour habiller la construction tant par l'intérieur que par l'extérieur, mais dans ce cas il faudrait traiter les ponts avec soin. Une autre solution consiste à faire appel à des matériaux qui, en raison de leurs propriétés isolantes, se suffisent à eux-mêmes et ne nécessitent pas la mise en œuvre d'une isolation complémentaire.

Les matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments ont pour but de stocker et de déstocker de l'énergie en fonction des besoins de chauffage et/ou de refroidissement. Par exemple, l'utilisation de MCP par intégration de ceux-ci dans les enveloppes légères permet d'attribuer à celles-ci une inertie identique à celle des parois lourdes.

II.2. Le pont thermique.

C'est un point faible dans l'isolation, qui implique une fuite de calories (unité de mesure de la quantité de chaleur). En effet, l'énergie suit toujours le chemin le plus facile. S'il y a une faille dans l'isolation, la différence de température intérieur/extérieur va créer un flux important de chaleur au niveau de ce point faible. Un mur bien isolé représente un obstacle

pour la chaleur ; un pont thermique permet à la chaleur de franchir cet obstacle. En général, les ponts thermiques se situent [21] :

– au niveau des ouvertures : une fenêtre simple vitrage est 100 fois plus conductrice qu'un mur en béton sans isolant. Ce type de fenêtre représente un obstacle tellement faible qu'il est quasi inexistant pour la chaleur. La majeure partie des déperditions se fait donc à ce niveau. Par ailleurs, le matériau des menuiseries est très important. En effet, si l'encadrement des fenêtres (ou portes) est très conducteur thermiquement, l'énergie s'évacuera via ce « pont » situé entre un mur bien isolé et un double vitrage. Par exemple, il faut retenir que l'aluminium est 200 fois moins isolant que le verre, et 10 000 fois moins isolant que l'air sec et immobile.

– au niveau des planchers, lorsque l'isolation est faite à l'intérieur : la dalle en béton est en effet à la température intérieure, et en contact direct avec l'extérieur. Le béton étant un très bon conducteur thermique, il va permettre l'évacuation, donc la perte de la chaleur. Il existe des « rupteurs de ponts thermiques » pour éviter ce phénomène. Ces systèmes doivent être prévus dès la conception du bâtiment.

II.3. I 'inertie thermique

Prenons l'exemple d'une boule, grosse et lourde. A l'inverse d'une petite bille, elle sera difficile à faire mettre en mouvement ; mais une fois lancée, elle sera difficile à arrêter. C'est le principe même de l'inertie.

L'inertie thermique, de la même manière, est liée à la « masse thermique » des matériaux. La pierre par exemple est plus difficile à monter en température que le métal, mais une fois chauffée, elle mettra plus de temps à se refroidir.

Ce phénomène est très intéressant dans l'habitat :

– les murs épais et massifs permettent de réguler la température, sur un cycle de 24h, mais aussi à l'échelle des saisons, de vivre toute l'année dans une ambiance thermique confortable, et relativement constante (de la même manière que dans une cave). Lors des pics de chaleur (ou de froid), la température intérieure ne varie pas, ou très peu. A titre d'exemple, il a parfois fallu attendre plus d'une semaine pour que la canicule de 2003 se fasse sentir à l'intérieur de vieilles bâtisses : les murs sont restés frais.

– en plaçant des matériaux lourds à l'intérieur d'une pièce (murs avec isolation extérieure, sols, cloisons, etc), il sera possible de stocker de la chaleur le jour (un mur « arrosé » par le soleil, derrière une baie vitrée, par exemple) et le soir (grâce au chauffage) pour la restituer tout au long de la nuit. Pendant que vous dormez, le chauffage est donc naturel et gratuit. Le léger surcoût à la construction est vite compensé par les économies d'énergie réalisées.

II.4. Nécessité de l'isolation thermique.

Les deux critères nécessaires de la conception thermique des bâtiments sont la protection des occupants d'une manière automatique et passive, des facteurs climatiques pluies, vent, rayonnement, chaud ou froid de diverses parois, et l'optimisation de la consommation énergétique. Le concepteur doit faire en sorte que cette consommation (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par la réglementation et les possibilités financières des occupants, tout en assurant un niveau de confort défini par le maître d'ouvrage. L'isolation thermique introduite par les différents éléments de l'enveloppe de bâtiment constitue un important critère de performance énergétique. Elle permet de réduire les déperditions de chaleur, de réaliser des économies de chauffage, de limiter les émissions de gaz à effet de serre, et de bénéficier d'un meilleur confort de vie [22].

II.4.1. Principe

Dés que deux éléments en contact possèdent des températures différentes, il se produit un échange de chaleur entre eux jusqu'à ce que leurs températures deviennent identiques. Le but de l'isolation est de freiner cet échange de thermique, et de permettre ainsi de garder les parois de l'habitation à une température la plus proche possible de celle de l'air intérieur. La répartition des déperditions dans une habitation non isolée est illustrée par la *Fig. II-1*. On compte approximativement des valeurs de déperditions thermiques de l'ordre de :

- Toits : 30 %,
- Murs : 25 %,
- Renouvellement d'air : 20 %,
- Portes fenêtres : 13 %,
- Sols : 7 %,

- Ponts thermiques : 5 %.

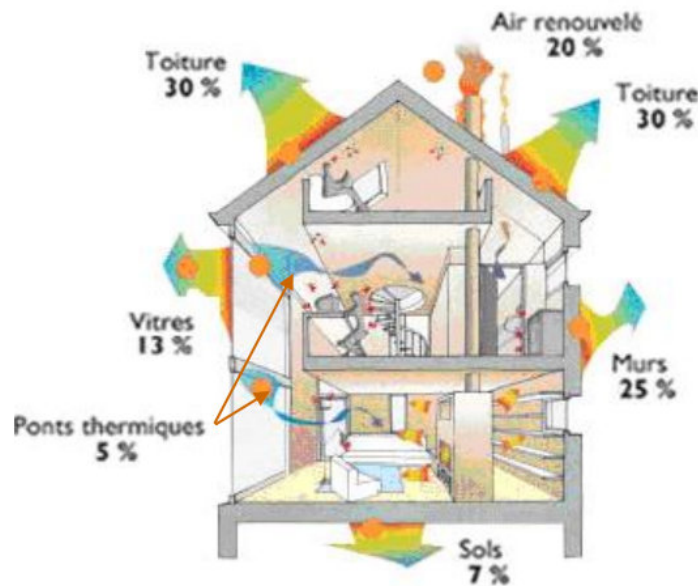


Figure II. 1. Répartition des déperditions thermiques dans une habitation

Une grande partie de déperdition de chaleur se faisant par les toits et les murs, par conséquent une bonne isolation thermique des parois permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60%.

II.5. Isolation des parois

Il existe deux types d'isolation des parois :

II.5. 1. Isolation intérieure

Ce type d'isolation est le plus répandu, il est facile à mettre en œuvre, et nécessite des travaux directement dans l'espace intérieur du logement en mettant l'isolant sur la face intérieure du mur. L'isolation intérieure laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire, par contre elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter.

II.5.2. Isolation extérieure

Cette technique nécessite généralement une épaisseur de l'isolant plus faible. Elle consiste à mettre un isolant sur le mur de l'habitation, côté extérieur. Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation, de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse, et moins intéressante du point de vue énergétique.

✓ **Avantage :**

- Résout les problèmes de ponts thermiques par le plancher.
- Permet de profiter de l'inertie thermique des murs.
- Cette isolation peut être réalisée à l'occasion d'un ravalement de façade.
- L'aspect intérieur des murs reste intact (intéressant lorsqu'il s'agit d'un mur en pierre apparente).
- Conserve la surface habitable

✓ **Inconvénients:**

- L'aspect extérieur de la façade est modifié.
- Obligation de faire une déclaration de travaux.
- Il est nécessaire de monter un échafaudage.
- Dans le cas d'une copropriété, il faut que le projet soit retenu par l'assemblée générale des copropriétaires. Le projet est donc plus lourd à monter.

II.6. Les isolants thermiques

Les isolants thermiques diffèrent les uns des autres par de nombreux paramètres. Nous présentons ci-après un aperçu des principales caractéristiques par type d'isolant (Busschaert, 1996).

II.6.1. La laine de verre minérale (MW)

La laine de verre minérale se présente sous différentes formes (matelas ou panneaux). Les produits sont fabriqués par un mélange de matières premières en fusion (pour la laine de roche il s'agit essentiellement de diabase et de calcaire, pour la laine de verre essentiellement de sable et de débris de verre) jusqu'à l'obtention de fibres de consistance laineuse.

II.6.2. Le polystyrène expansé (EPS)

On distingue le polystyrène expansé modifié non résistant au feu et le polystyrène expansé modifié résistant au feu. La masse volumique et, donc les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours de fabrication. En effet, la conductivité thermique par exemple est liée à la masse volumique. La masse volumique est fonction de la taille des billes, de leur vitesse d'introduction et du débit de vapeur.

II.6.3. Le verre cellulaire (CG)

Les isolants en verre cellulaire se présentent sous forme de panneaux à bords ou de pièces découpées dans les panneaux. La masse volumique ou les propriétés spécifiques d'isolation thermiques sont adaptées en cours de fabrication. Le produit est obtenu par fusion pure et d'additifs, puis passé dans une étireuse, vitrifié et broyé.

II.6.4. Le polystyrène extrudé (XPS)

Le polystyrène extrudé se présente sous forme de panneaux à bords droits, à rainure et languettes ou à butée. Les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours de fabrication. Le produit est obtenu par mélange de granulats de polystyrène et d'additifs (agents expansifs notamment) jusqu'à l'obtention d'une pâte que l'on introduit dans une extrudeuse pour produire l'épaisseur désirée. Le produit doit ses propriétés isolantes spécifiques au type d'agent expansif utilisé ainsi qu'à la vitesse de montée en température et à la vitesse d'intrusion. L'adjonction de l'agent expansif engendre une migration air/agent expansif qui se stabilise avec le temps.

II.6.5. Polyuréthane (PUR) et Polyisocyanurate (PIR)

Les produits se présentent sous forme de panneaux à bords droits pourvus éventuellement de rainures et de languettes. Les panneaux sont constitués d'une âme de mousse rigide en PUR/PIR et sont dotés d'un parement sur les deux faces. Les parements conditionnent en partie les propriétés isolantes. La mousse rigide de PUR/PIR résulte d'une réaction chimique exothermique de polyisocyanurates et de polyol sous l'effet d'agents expansifs.

II.6.6. La laine de bois

Les panneaux de laine de bois sont élaborés à partir de fibres de bois, le liant étant la lignine de bois. Ce matériau naturel possède un coefficient de conductivité thermique identique aux autres laines isolantes, une structure rigide à assemblage rainuré garantissant une très grande longévité.

II.6.7. Phénol (PF)

Ce produit se présente sous forme de panneaux à bords droits pourvus éventuellement de rainures et languettes. Les panneaux sont constitués d'une âme en mousse phénolique et sont dotés d'un parement sur les deux faces qui conditionne en partie les propriétés isolantes. Le produit doit ses propriétés isolantes spécifiques au type d'agent expansif et à la formulation adoptée.

II.6.8. Perlite expansée (EPB)

Le processus de fabrication consiste à poser sur un tapis roulant un mélange composé d'eau de perlite expansée, de fibres de verre, de cellulose et d'un liant bitumeux. Le mélange est comprimé jusqu'à l'obtention de l'épaisseur voulue.

Les matériaux comme les granulats de verre, le chanvre, la terre cuite sont utilisés dans la confection des briques spécifiques qui entrent dans la composition d'éléments particulièrement isolants. Avec le granulats de verre, on confectionne un béton isolant. C'est aussi le cas du chanvre qui est un bon isolant biologique sur les plans thermique et phonique, et difficilement inflammable. On rencontre également sur le marché du bâtiment des briques

alvéolées en quinconce qui offrent un bon pouvoir isolant. Les masses volumiques et les conductivités thermiques des isolants présentés ci-dessus sont regroupées dans le *tabl II.1*.

Tableau II. 1. Masses volumiques et conductivités thermiques de quelques isolants

Matériau	Masse volumique ρ (kg/m³)	Conductivité thermique λ (W/m. °C)
Laine de verre minérale	18	0,034 - 0,056
Polystyrène expansé	18	0,040 - 0,046
Verre cellulaire		0,050
Poliuréthane	35	
Polystyrène extrudé	35	0,031 - 0,034
Laine de bois	150	0,052 - 0,065
Perlite expansée	90	0,060

II.7. Utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en tant que matériaux de construction

II.7.1. Des matériaux dits « intelligents »

A l'heure actuelle, nous pouvons distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- Matériaux de structure.
- Matériaux « dits intelligents ».

Un matériau intelligent est sensible, adaptatif, et évolutif. Il peut être à la fois :

- Un capteur : détecter des signaux.
- Un actionneur : effectuer une action sur son environnement.
- Un processeur : traiter, comparer, stocker des informations.

Nous pouvons dénombrer 3 grandes familles pour ce type de matériau :

- Les alliages à mémoire de forme (AMF).
- Les matériaux piézoélectriques, électrostrictifs et magnétostrictifs.
- **Les matériaux à changement de phase (MCP) qui sont l'objet de notre étude ici**

II.7.2. Méthode de stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie thermique, appelé plus communément « stockage du chaud et du froid », permet le stockage du chaud ou du froid pour être utilisé plus tard. Afin de pouvoir restituer le chaud ou le froid après quelques temps, cette méthode de stockage nécessite une réversibilité. La figure 2 montre les différentes méthodes possibles qui peuvent être divisées en procédés physiques ou chimiques.

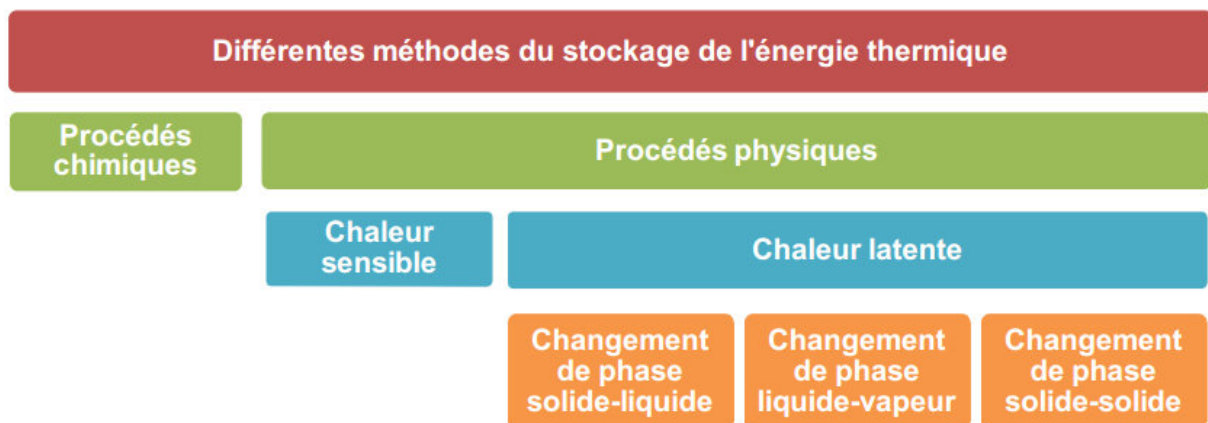


Figure II. 2. Différentes méthodes possibles du stockage du chaud et du froid [23].

II.7.3. Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Il s'agit de matériaux ayant la particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Dans le cadre du bâtiment, les matériaux à changement de phase (MCP) absorbent et libèrent la chaleur en fonction des variations de température, dues aux apports ou pertes énergétiques en provenance du milieu ambiant, qui font réagir le composé en provoquant « un changement de phase ». Le milieu localisé de l'autre côté de la paroi où est intégré le MCP ne ressent pas l'effet de la variation de température.

L'utilisation des MCP s'articule principalement autour de 3 fonctionnalités :

- Capacité de garder au froid.
- Capacité de garder au chaud.
- Capacité de stocker la chaleur.

D'après le fabricant de MCP, BASF, une paroi contenant 2 cm du produit Micronal a la même performance en terme d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm ou un mur en béton d'épaisseur de 24 cm ou encore du bois massif d'épaisseur 38 cm (*fig.II.3*).

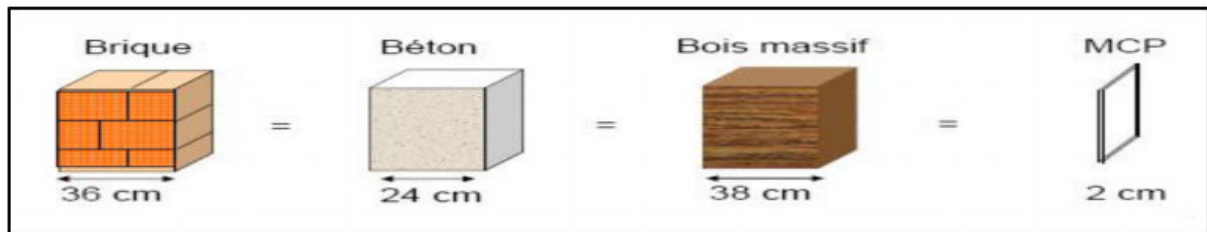


Figure II. 3. Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et de la nature du matériau [24].

Le *tabl.II.2* ci-dessous décrit les points forts et faibles relatifs à l'emploi des MCP dans le bâtiment.

Tableau II. 2. Distinction des points forts et faibles de l'emploi des MCP dans le bâtiment.

POINTS FORTS	POINTS FAIBLES
<ul style="list-style-type: none"> - Capacité relative à emmagasiner des calories, puis à les restituer. - Enthalpies de changement de phase élevées et expansions volumiques réduites (<10%) lors de la fusion. - Apport d'inertie à un bâtiment avec faible encombrement. - Amélioration du confort (seulement possible dans le cas où le MCP est accouplé à une surventilation nocturne, une régulation précise et une bonne isolation) due à : <ul style="list-style-type: none"> - Une réduction de la température maximale à l'air, - Une température de surface du mur plus basse. - Utilisation sous diverses formes : microcapsules intégrées dans des plaques de plâtre, des enduits, du béton ou mélange avec un polymère laminé de chaque côté par deux feuilles d'aluminium. 	<ul style="list-style-type: none"> - Importante énergie grise requise pour la fabrication du produit. - Diffusion dans les bâtiments encore limitée, peu de retour d'expériences et peu de produits concrets existent sur le marché. - Il faudrait un produit spécifique en fonction du lieu géographique et du climat. - D'un point de vue sanitaire et environnement, aucune ACV n'est connue à ce jour.

II.7.4. Classification des Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Parmi les MCP disponibles utilisés dans le bâtiment, ce sont les plus populaires. Ils se déclinent en trois groupes : les composés organiques, inorganiques et eutectiques.

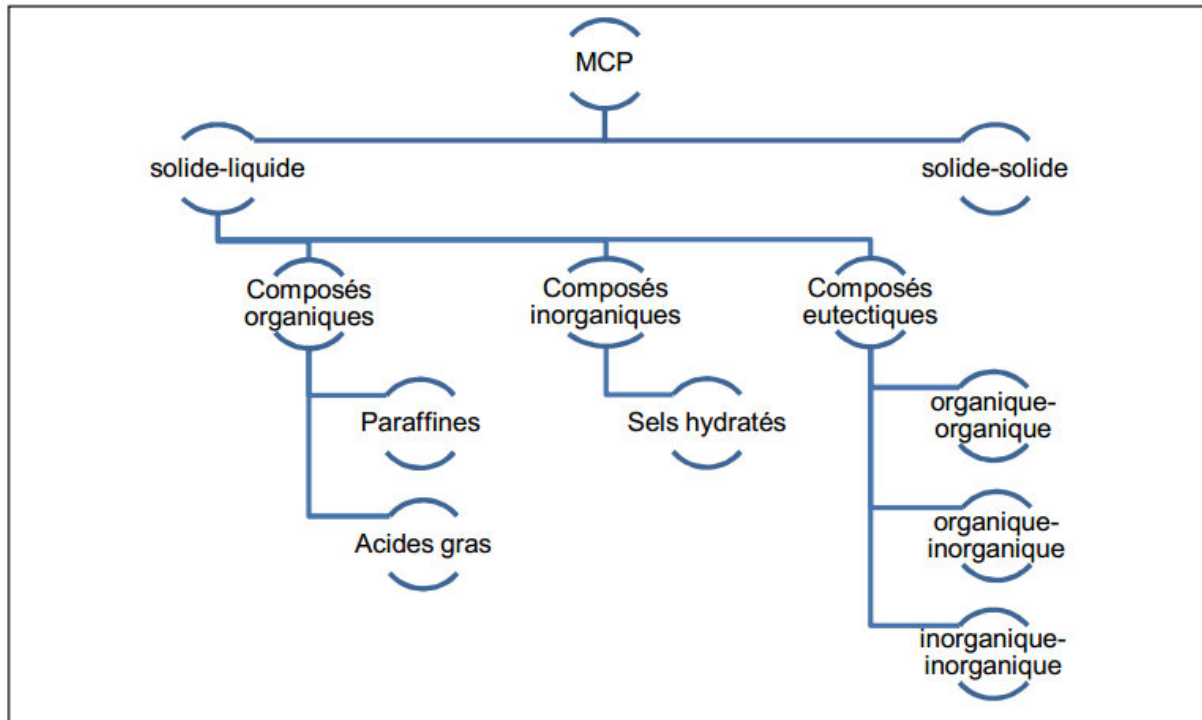


Figure II. 4. Famille de matériaux des MCP

II.7.4.1. Les MCP inorganiques

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et $+1000\text{ °C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0 °C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0 °C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5 °C et 130 °C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieure à 150 °C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables (Farid et al., 2004 et Vineet Veet, 2005) [26].

Tableau II. 3. Distinction des points forts et faibles des composés inorganiques.

POINTS FORTS	POINTS FAIBLES
<ul style="list-style-type: none"> - Importante enthalpie de transition (équivalente à environ deux fois la valeur de celle des composés organiques). - Haute conductivité thermique. - Plage de fusion étroite. - Faible coût et facilement disponible. - Non-inflammable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosion. - Phénomène de surfusion important nécessitant l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables. - Manque de stabilité thermique.

II.7.4.2. Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables (Farid et al., 2004 ; Vineet Veer et BUDDHI, 2005).

Tableau II. 4. Distinction des points forts et faibles des composés organiques.

POINTS FORTS	POINTS FAIBLES
<ul style="list-style-type: none"> • Pas de corrosion. • Pas de problème de surfusion. • Stabilité thermique et chimique. • Compatibilité avec les matériaux conventionnels de construction. • Faible coût. • Recyclable 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible enthalpie de transition. • Faibles conductivités thermiques à l'état solide et à l'état liquide. • Inflammabilité. • Exigent un large rapport surface/volume.

II.7.4.3. Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels (Vineet Veer et BUDDHI, 2005).

Tableau II. 5. Distinction des points forts et faibles des composés eutectiques.

POINTS FORTS	POINTS FAIBLES
<ul style="list-style-type: none"> Point de fusion nette et similaire à une substance pure. Chaleur latente volumétrique légèrement supérieure à celle des composés organiques purs 	<ul style="list-style-type: none"> Peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux. Encore peu utilisés au niveau des applications industrielles.

Le *Tableau II. 6* représente certaines propriétés thermiques de certains MCP.

Tableau II. 6. Certaines propriétés thermiques de certains MCP [25].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
PCMs Organiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique-laurique	21	143
PCMs Inorganiques	KF.4H ₂ O	18,5	231
	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25,8	125,9
	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	251
PCMs Eutectiques	66,6%CaCl ₂ .6H ₂ O+33,3% MgCl ₂ .6H ₂ O	25	127
	48%CaCl ₂ +4,3% NaCl+47,3%H ₂ O	26,8	188
	47%Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+53% Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	30	136

II.7.4.4. MCP à base de paraffine et de sels hydratés

Dans les bâtiments, Les MCP les plus utilisés sont à base de paraffines et de sels hydratés. Les paraffines sont en général des molécules linéaires d'hydrocarbures saturés (C_nH_{2n+2}). Leurs cristallisations libèrent une grande quantité de chaleur latente. Ils sont disponibles dans une large gamme de températures et on peut les obtenir facilement. Ils sont chimiquement inertes et montrent peu de changements de volume sur la fusion. Ils sont fiables, prévisibles, peu coûteux et non-corrosif. Ils montrent quelques propriétés indésirables tel que : une faible conductivité thermique, la non compatibilité avec les supports en plastique. Ils sont aussi modérément inflammables.

Le sel hydraté le plus utilisé est le sulfate sodium plus particulièrement le sel de Glauber en forme déca hydratée ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$). Il est très stable chimiquement. Il ne se décompose pas même sous l'effet de la chaleur, et il ne réagit pas aux températures courantes avec des agents oxydants ou réducteurs. A des températures élevées, il peut être réduit en sulfure de sodium. On l'utilise pour les systèmes de stockage d'énergie dans les bâtiments à cause de ses propriétés de solubilité inhabituelle, ainsi que de sa chaleur de cristallisation élevée (Vineet Veer et BUDDHI, 2005).

Le *Tabl.II.7* donne à titre d'exemples les propriétés thermiques de quelques MCP à base de paraffines et de sels.

Tableau II. 7. Propriétés thermiques de MCP à base de paraffine et de sels hydratés.

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/mk)	Masse volumique (kg/m ³)
MCP à base de paraffine	Hexadecane	18	236	0,17 à 0,26	780
	Heptadecane	22	214		
	Octadecane	28	244		
MCP à base de sels hydratés	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 60%	32	251	/	/
	$Na(CH_3COO) \cdot 3H_2O + 40\% CO(NH_2)_2$	30	200,5		
	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29	171	0,540 (liquide 61,2°C)	1562 (liquide 32°C)

II.7.5. Critères de sélection d'un MCP

L'ensemble des critères (ou propriétés souhaitables) qui doivent intervenir ou être recherchés lors du choix du MCP pour une application donnée dans le bâtiment sont énumérés dans le *tabl.II.8* ci-dessous.

Tableau II. 8. Différents critères à respecter lors du choix d'un MCP pour une application donnée dans un bâtiment.

CRITERES	PROPRIETES
Physiques	<ul style="list-style-type: none"> • Température de changement de phase adaptée aux besoins de l'application. • Enthalpie de fusion élevée pour assurer la compacité des dispositifs de stockage. • Bonne conductivité thermique. • Stabilité lors de cycles de fusion/solidification. • Surfusion la plus réduite possible
Technologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Expansion volumique faible lors de la fusion afin de minimiser les contraintes mécaniques dans le support de stockage. • Stabilité physico-chimique, longue durée de vie. • Compatibilité avec les matériaux du support de stockage
Autres	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement réduit. • Disponibilité. • Faible dangerosité (toxicité, inflammabilité,...). • Recyclabilité.

Sommaire

SOMMAIRE.....	25
II.1. INTRODUCTION.....	26
II.2. LE PONT THERMIQUE.....	26
II.3. I 'INERTIE THERMIQUE.....	27
II.4. NECESSITE DE L'ISOLATION THERMIQUE.....	28
II.4.1. PRINCIPE.....	28
II.5. ISOLATION DES PAROIS.....	29
II.5. 1. ISOLATION INTERIEURE.....	29
II.5. 2. ISOLATION EXTERIEURE.....	30
II.6. LES ISOLANTS THERMIQUES.....	30
II.6.1. LA LAINE DE VERRE MINERALE (MW).....	31
II.6.2. LE POLYSTYRENE EXPANSE (EPS).....	31
II.6.3. LE VERRE CELLULAIRE (CG).....	31
II.6.4. LE POLYSTYRENE EXTRUDE (XPS).....	31
II.6.5. POLYURETHANNE (PUR) ET POLYISOCYANURATE (PIR).....	32
II.6.6. LA LAINE DE BOIS.....	32
II.6.7. PHENOL (PF).....	32
II.6.8. PERLITE EXPANSEE (EPB).....	32
II.7. UTILISATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP) EN TANT QUE MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....	33
II.7.1. DES MATERIAUX DITS « INTELLIGENTS ».....	33
II.7.2. METHODE DE STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE.....	34
II.7.3. MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP).....	34
II.7.4. CLASSIFICATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP).....	36
II.7.4.1. Les MCP inorganiques.....	36
II.7.4.2. Les MCP organiques.....	37
II.7.4.3. Les MCP eutectiques.....	38
II.7.4.4. MCP à base de paraffine et de sels hydratés.....	39
II.7.5. CRITERES DE SELECTION D'UN MCP.....	40

CHAPITRE III

POSITION DU PROBLEME ET MODÉLISATION NUMERIQUE

POSITION DU PROBLEME ET MODÉLISATION NUMERIQUE	Erreur ! Signet non défini.
Sommaire	Erreur ! Signet non défini.
III.1. Description générale de problème.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2. 1 ^{er} Matériau à changement de phase (MCP) type1	Erreur ! Signet non défini.
III.3. 2 ^{ème} Matériau à changement de phase (MCP) type 2	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Les caractéristiques physiques des matériaux utilisés.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5. Position du problème.....	Erreur ! Signet non défini.
III.6. l'analyse mathématique	Erreur ! Signet non défini.
III.6.1. Les équations de différence finie et les conditions aux limites..	Erreur ! Signet non défini.
III.6.2. Estimation des conditions initiales	Erreur ! Signet non défini.

III.1. Description générale de problème

Un système de mur multicouches intégrant des matériaux à changement de phase (MCP) a été utilisé pour l'isolation thermique d'une chambre contenant une masse d'air dont les dimensions sont 3m de largeur, 4m de longueur et 3m de hauteur en climat d'été. Un calcul numérique à l'aide du langage matlab a été élaboré pour étudier l'effet de la présence du MCP dans la structure pendant une période de sept jours.

III.2. 1^{er} Matériau à changement de phase (MCP) type1

L'isolant testé a été réalisé par la société DuPont de Nemours. Il est constitué de 60% de micro-encapsulée de MCP, dont la température de fusion est de 22,6 °C. La forme finale du matériau MCP est des feuilles souples de 5 mm d'épaisseur dont la masse volumique $\rho_{MCP} = 1019 \text{ kg/m}^3$.

La capacité thermique du MCP a été mesurée en utilisant un calorimètre à balayage différentiel [27]. L'analyse thermique a été réalisée dans une gamme de température de 0 à 34 °C avec un taux de chauffage de 2° C / min. L'expression analytique de l'évolution de la capacité calorifique peut être exprimé en tant que :

$$C_p = \begin{cases} 4250 + 10750 \cdot e^{-((22,6-T)/4)^2}, & T < 22,6^\circ\text{C} \\ 4250 + 10750 \cdot e^{-((22,6-T)/4)^2}, & T \geq 22,6^\circ\text{C} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

La Fig III.1. montre la comparaison entre les valeurs mesurées et les valeur analytique de la capacité calorifique. Cette distribution est de type gaussienne correspond à un intervalle de changement de phase étroit.

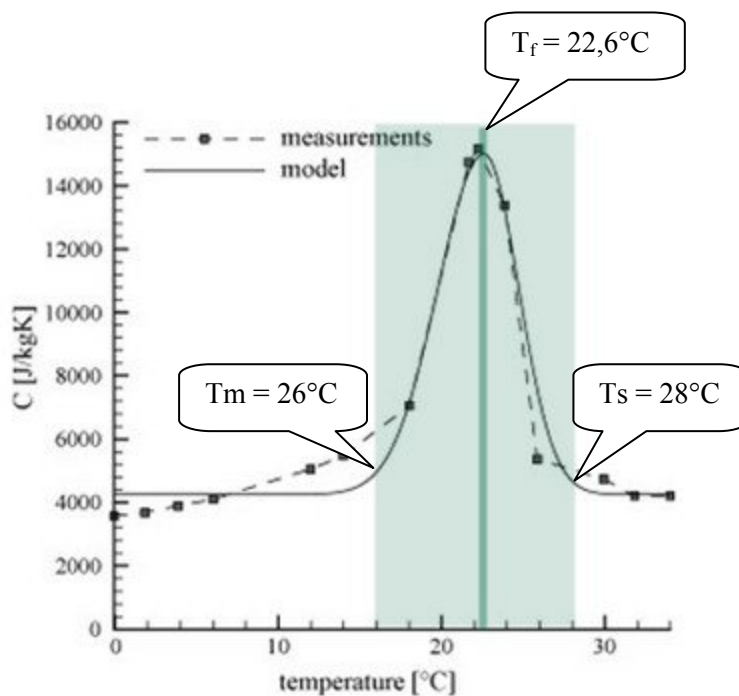


Figure III. 1. Modèle expérimental et analytique de la capacité calorifique du matériau MCP.

La conductivité thermique du matériau MCP a été mesurée en utilisant un appareil de plaque chaude [28]. *Fig III.2* montre, qu'au-dessous de la température de fusion, la conductivité thermique est d'environ $0,22 \text{ W / m K}$ et qu'au-dessus de la température de fusion elle est d'environ $0,18 \text{ W / m K}$.

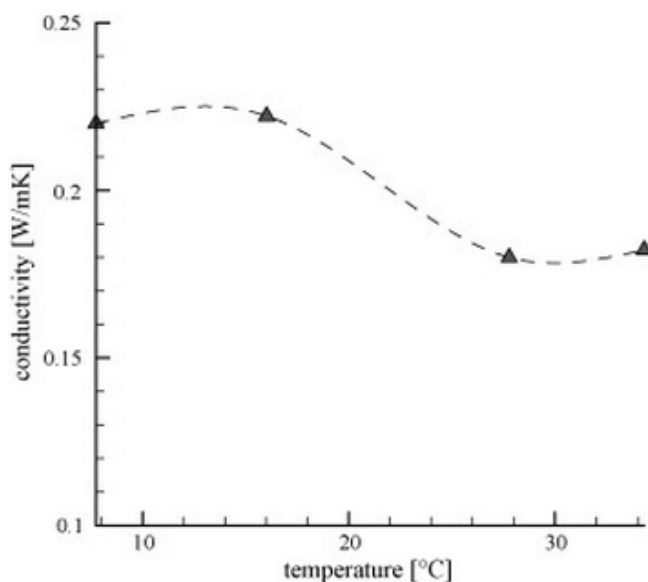


Figure III. 2. Mesure expérimentale de la conductivité thermique du MCP.

III.3. 2^{ème} Matériau à changement de phase (MCP) type 2

La courbe au-dessous correspondant au 2^{ème} MCP utilisé, la *fig III.3* montre l'évolution de la capacité thermique C_p en fonction de la température. Comme on peut l'observer, le processus de fusion commence à $T_\ell = 22^\circ\text{C}$ et se termine à $T_s = 28,5^\circ\text{C}$, la température de pic est $T_p = 27,6^\circ\text{C}$ après quoi la fusion est achevée très rapidement. L'expression analytique de l'évolution de la capacité calorifique peut être exprimée en tant que [28]:

$$C_p = \begin{cases} 1200 + 18800 \cdot e^{-\frac{(T_p-T)}{1,5}}, & T < T_p \\ 1300 + 18700 \cdot e^{-4 \cdot (T_p-T)^2}, & T \geq T_p \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

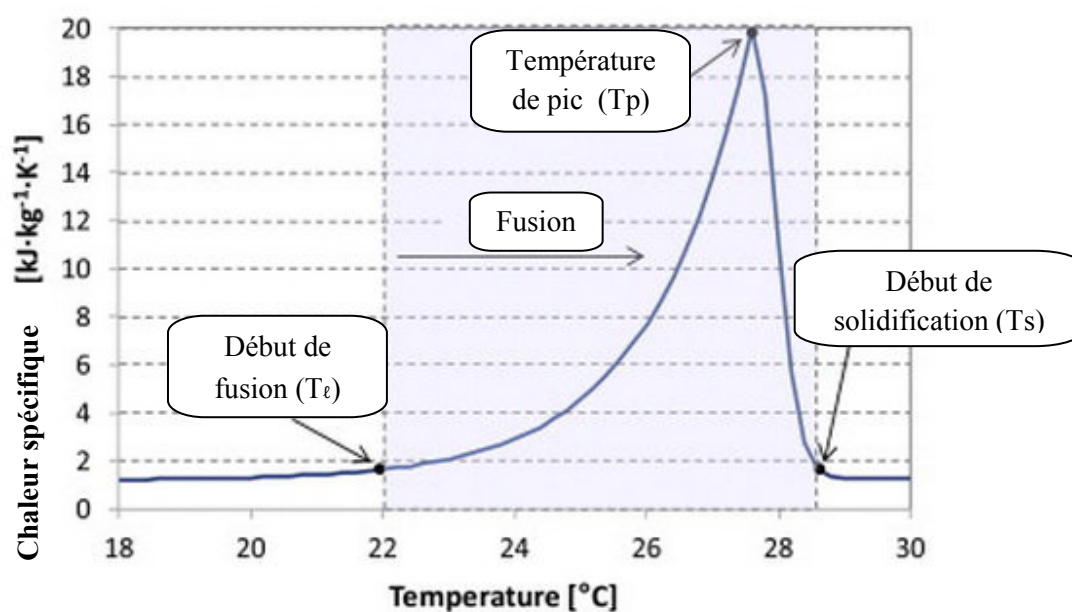


Figure III. 3. Capacité thermique spécifique équivalent du MCP panneaux en nid d'abeille.

La conductivité thermique effective mesurée est assez élevée, $2,7 \text{ W/m.K}$. Cette valeur est remarquablement élevée, si on la compare à celle de Micronal ($\lambda = 0,193 \text{ W/m.K}$) ou d'autres produits disponibles sur le marché composés d'un mélange de polymère à base d'éthylène (40%) et de la cire de paraffine (60%) laminée qui ont une conductivité thermique qui varie entre $0,18$ et $0,22 \text{ W/m.k}$. Enfin, la masse volumique du PCM est de 545 kg/ m^3 .

III.4. Les caractéristiques physiques des matériaux utilisés

Les caractéristiques physiques des matériaux utilisés sont résumées dans le tableau si dessous :

Tableau III. 1. Les caractéristiques physiques des matériaux utilisés.

/	Masse volumique (kg / m ³)	Capacité calorifique (J/kg.K)		Conductivité thermique (W/m.K)	
		solide	liquide	solide	liquide
Brique	1820	880	/	0.811	/
Polystyrène	16	1340	/	0,038	/
Plâtre	800	830	/	0,35	/
MCP 1	1019	4250	4250	0,22	0,18
MCP 2	545	1200	1300	0,22	0,18
L'air	1.225	/	1004	/	0.0234

III.5. Position du problème

Le mur de la chambre étudiée comporte jusqu'à cinq couches notées de 1 à m couches *Fig III.4.*

Les couches externes se composent d'un matériau de construction (brique ou bien plâtre) pour assuré les différents modèles proposé dans l'étude, et les couches intermédiaire se composent d'une isolation thermique classique ou bien une combinaison avec de MCP.

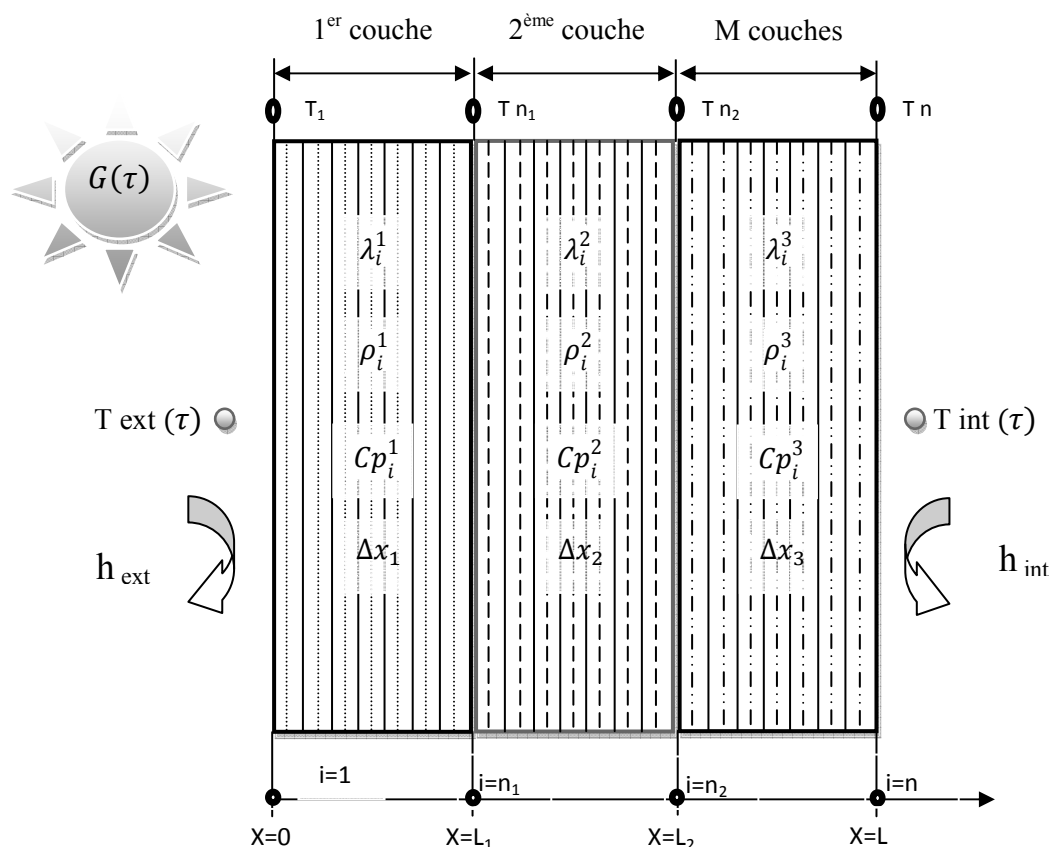


Figure III. 4. Géométrie du problème

III.6. l'analyse mathématique

La méthode des différences finies a été utilisée pour la modélisation numérique du processus de transfert thermique à travers les couches de la paroi. Les équations de conduction tenant compte de la variation de capacité thermique spécifique des panneaux en MCP couplées aux conditions aux limites (la convection et le rayonnement) sont développées dans le paragraphe suivant.

III.6.1. Les équations de différence finie et les conditions aux limites

Les équations de différence finie pour les parois et les conditions aux limites sont :

- Conditions aux limites $i=1$ (côté extérieur de mur, convection et rayonnement):

$$\lambda_1^1 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} + h_{ext} (T_{ext} - T|_{x=0}) + G(t) = m_1^1 C_{p_1}^1 \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\lambda_1^1 \left(\frac{T_2^{k+1} - T_1^{k+1}}{\Delta x} \right) + h_{ext} (T_{ext} - T_1^{k+1}) + G^{k+1} = \rho_1^1 \frac{\Delta x_1}{2} C_p^1 \left(\frac{T_1^{k+1} - T_1^k}{\Delta t} \right)$$

$$\frac{2 \lambda_1^m}{\Delta x_1^2} (T_2^{k+1} - T_1^{k+1}) + \frac{2 h_{ext}}{\Delta x_1} (T_{ext} - T_1^{k+1}) + \frac{2 G^{k+1}}{\Delta x_1} = \frac{\rho_1^1 C_p^1}{\Delta t} (T_1^{k+1} - T_1^k)$$

$$2 F_{O_{ext}} T_2^{k+1} - 2 F_O \left(1 + B_i + \frac{1}{2 F_{O_{ext}}} \right) T_1^{k+1}$$

$$= -T_1^k - 2 F_{O_{ext}} B_{i_{ext}} T_{ext} - 2 F_{O_{ext}} \frac{\Delta x_1 G^{k+1}}{\lambda_1^1}$$

L'indice 1 désigne le premier nœud (i) et l'exposant 1 désigne la première couche (m).

Avec :

$$a_{ext} = \frac{\lambda_1^1}{\rho C_p^1}; \quad F_{O_{ext}} = \frac{a_{ext} \Delta t}{\Delta x^2}; \quad B_{i_{ext}} = \frac{h_{ext} \Delta x}{\lambda_1^1} .$$

- Conduction à travers les parois :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^m \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho^m C_p^m \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\lambda_{i+\frac{1}{2}}^m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2}} - \lambda_{i-\frac{1}{2}}^m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2}} = \Delta x \rho_i^m C_{p_i}^m \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$- \left(\frac{\lambda_i^m + \lambda_{i-1}^m}{2 \Delta x^2} \right) T_{i-1}^{k+1} + \left(\frac{\lambda_{i+1}^m + \lambda_{i-1}^m + 2\lambda_i^m}{2 \Delta x^2} + \frac{\rho_i^m C_{p_i}^m}{\Delta t} \right) T_i^{k+1} - \left(\frac{\lambda_{i+1}^m + \lambda_i^m}{2 \Delta x^2} \right) T_{i+1}^{k+1}$$

$$= \left(\frac{\rho_i^m C_{p_i}^m}{\Delta t} \right) T_i^k$$

Avec :

$$m = 1 \dots \dots 5.$$

- Equation de continuité du flux (exemple : première interface) :

$$-\lambda^1 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L_1} - \lambda^2 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L_1} = 0$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\lambda^1}{\Delta x_1} (T_{n_i}^{k+1} - T_{n-1}^{k+1}) - \frac{\lambda^2}{\Delta x_2} (T_n^{k+1} - T_{n+1}^{k+1}) = 0 \\
 & + \frac{\lambda^1}{\Delta x_1} T_{n-1}^{k+1} - \left(\frac{\lambda^1}{\Delta x_1} + \frac{\lambda^2}{\Delta x_2} \right) T_n^{k+1} + \frac{\lambda^2}{\Delta x_2} T_{n+1}^{k+1} = 0
 \end{aligned}$$

- Conditions aux limites (côté intérieur de mur, la convection) :

$$\lambda_n^m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} + h_{int} (T_{int} - T|_{x=L}) = m^m C_p^m \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

$$\lambda_n^m \left(\frac{T_{n-1}^{k+1} - T_n^{k+1}}{\Delta x} \right) + h_{int} (T_{int} - T_n^{k+1}) = \rho \frac{\Delta x}{2} C_p^m \left(\frac{T_n^{k+1} - T_n^k}{\Delta t} \right)$$

$$\frac{2 \lambda_n^m}{\Delta x^2} (T_{n-1}^{k+1} - T_n^{k+1}) + \frac{2 h_{int}}{\Delta x} (T_{int} - T_n^{k+1}) = \frac{\rho C_p^m}{\Delta t} (T_n^{k+1} - T_n^k)$$

$$2 F_{O_{int}} T_{n-1}^{k+1} - 2 F_{O_{int}} \left(1 + B_{i_{int}} + \frac{1}{2 F_{O_{int}}} \right) T_n^{k+1} = -T_n^k - 2 F_{O_{int}} B_{i_{int}} T_{int}$$

Avec :

$$a_{int} = \frac{\lambda_n^m}{\rho C_p^m}; \quad F_{F_{O_{int}}} = \frac{a_{int} \Delta t}{\Delta x^2}; \quad B_{i_{int}} = \frac{h_{int} \Delta x}{\lambda_n^m}; \quad m = 1 \dots \dots \dots 5.$$

III.6.2. Estimation des conditions initiales

La température extérieure estimée et la variation de l'irradiation solaire sont données par les équations suivantes [29]:

$$T_{ext}(\tau) = T_M + T_{ar} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 14)\right) + \left| T_{moy} \cos\left(\frac{\pi}{12}(\tau - 14)\right) \right|$$

$$G(\tau) = G_A \sin\left(\frac{\tau - a}{b - a} \pi\right) + G_B \sin\left(\frac{\tau - a}{b - a} \frac{\pi}{12}\right), \quad a < \tau < b$$

τ : temps en heure.

Où T_m est la température extérieure moyenne de 15°C, T_{ar} amplitude est de 6°C, G_A + est l'irradiation solaire maximale de 550 W/m², G_B amplitude de l'irradiation solaire

maximale, a est l'heure de lever de soleil 6 heure du matin, b est l'heure du coucher du soleil à 18 heure de l'après-midi, τ le temps en heure.

La Fig III.5 représente le profil de température extérieure estimée (T_{ext}), elle varie entre 3°C comme valeur minimum et 41°C comme maximum.

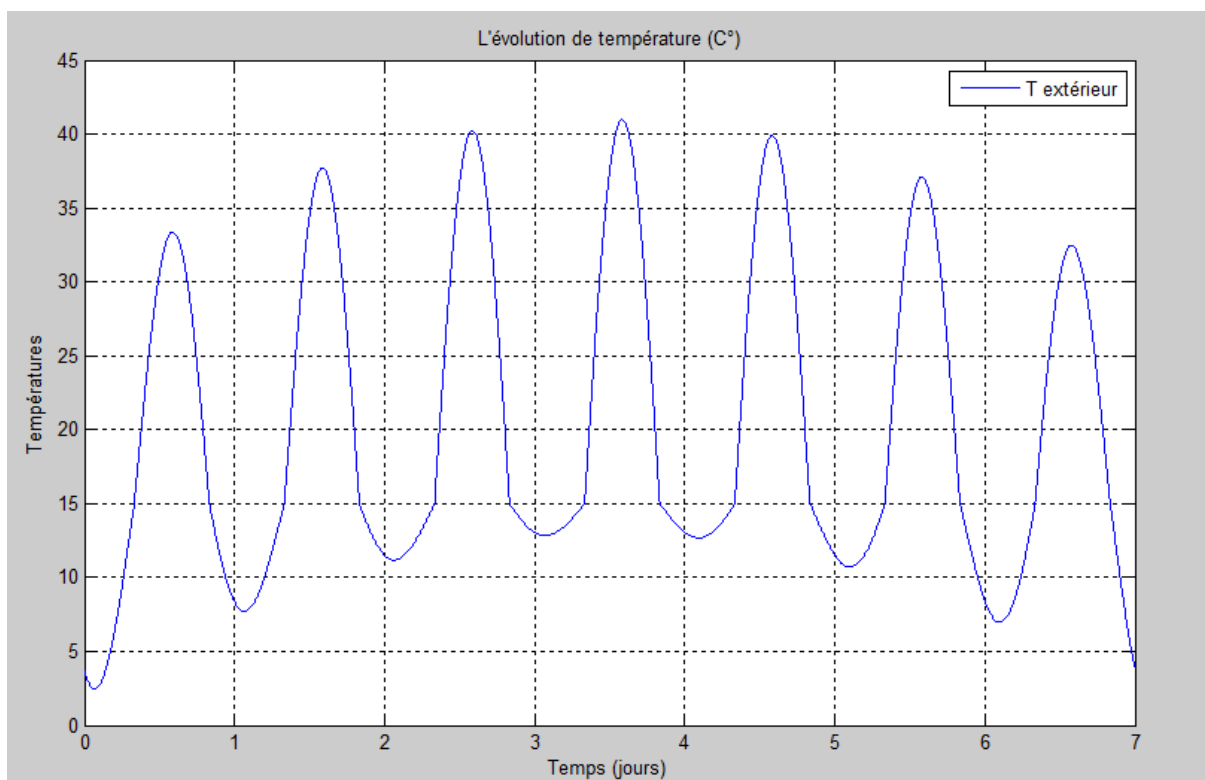


Figure III. 5. L'évolution de la température au cours de semaine ($^{\circ}\text{C}$).

La Fig III.6 représente le profil de l'irradiation (G). Pour l'été, le 1^{er} jour commence avec une valeur de $G=419 \text{ W/m}^2$, cette valeur commence à augmenter progressivement au cours de la semaine jusqu'à atteindre le maximum de 550 W/m^2 . Le 4^{ème} jour, l'irradiation solaire atteint une valeur minimale de 390 W/m^2 . Pour l'hiver, l'irradiation solaire maximale est pris 400 W/m^2

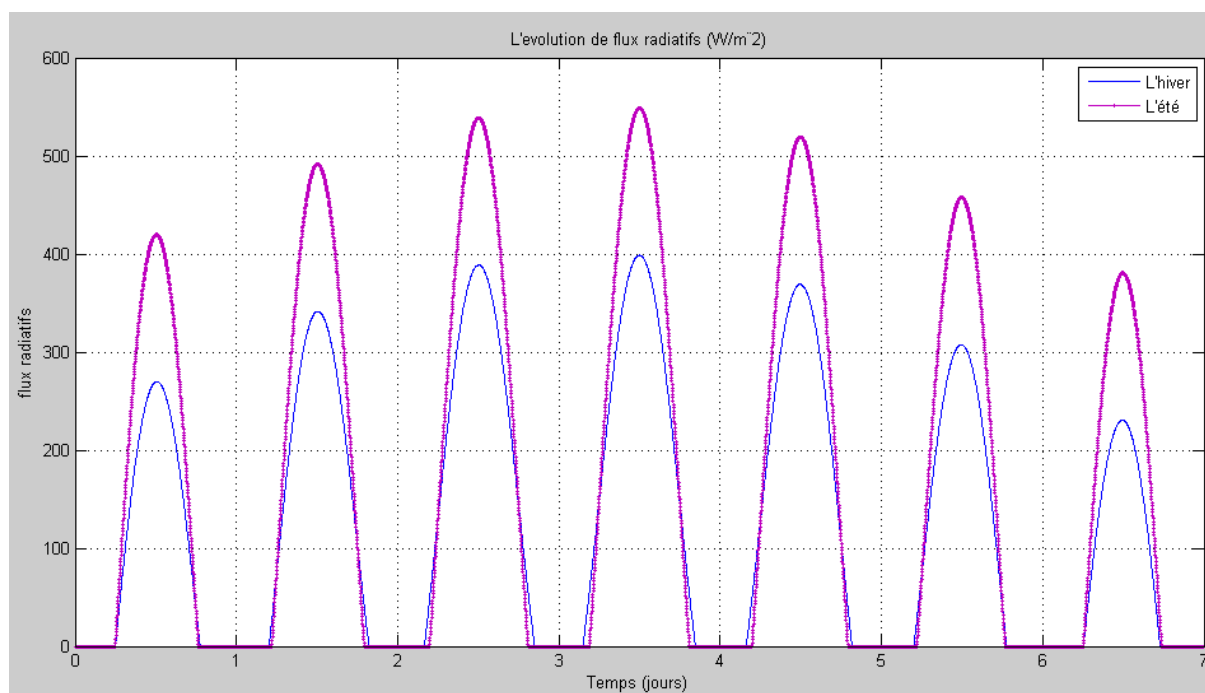


Figure III. 6. L'évolution de flux radiatifs au cours de semaine (W/m²).

Sommaire

POSITION DU PROBLEME ET MODÉLISATION NUMERIQUE	41
III.1. Description générale de problème.....	43
III.2. 1 ^{er} Matériau à changement de phase (MCP) type1	43
III.3. 2 ^{ème} Matériau à changement de phase (MCP) type 2.....	45
III.4. Les caractéristiques physiques des matériaux utilisés.....	46
III.5. Position du problème	46
III.6. l'analyse mathématique.....	47
III.6.1. Les équations de différence finie et les conditions aux limites.....	47
III.6.2. Estimation des conditions initiales	49

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

Sommaire

IV.1. DESCRIPTION GENERALE DES PROBLEMES :.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.2. PAROI UNE SEULE COUCHE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
<input type="checkbox"/> PAROI EN BRIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.3. PAROI TROIS COUCHES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.3.1. PAROI EN BRIQUE / AIR / BRIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.3.2. PAROI EN BRIQUE / POLYSTYRENE / BRIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.3.3. PAROI EN BRIQUE / MCP1 / BRIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.3.4. PAROI EN BRIQUE / MCP2 / BRIQUE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
V.4. COMPARAISON DES CINQ MODELES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.5. L'INTEGRATION DE MCP DANS UNE PAROI ISOLEE.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.5.1. MODELE SANS MCP	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
IV.5.2. LE MCP EN 1^{ERE} POSITION	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
<input type="checkbox"/> <i>Evaluation de modèle dans les conditions estimées de la saison d'hiver</i>	<i>Erreur !</i>
<i>Signet non défini.</i>	
IV.5.3. LE MCP EN 2^{EME} POSITION	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
<input type="checkbox"/> <i>Evaluation de modèle dans les conditions estimées de la saison d'hiver</i>	<i>Erreur !</i>
<i>Signet non défini.</i>	
V.5.4. INTERPRETATION DES TROIS MODELES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
V.6. CONFIGURATION FINALE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

IV.1. description générale des problèmes :

Le système matriciel formé par les équations gouvernantes et les conditions aux limites est résolu numériquement à l'aide de la méthode des différences finies et écrit en langage Matlab. La résolution matricielle est assurée par la méthode itérative implicite en utilisant l'algorithme TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm). Après test de maillage, le nombre de maillage adopté est de 60 nœuds pour paroi simple, 100 nœuds pour paroi à trois couches et 150 nœuds pour paroi à cinq couches. Le pas de temps utilisé est $\Delta t = 45$ s. h_{ext} est de $17\text{W/m}^2\text{K}$, h_{int} est de $8,3\text{W/m}^2\text{K}$.

IV.2. Paroi une seule couche

- **Paroi en brique**

Pour le 1^{er} cas, on utilise une paroi simple en brique d'épaisseur 15 cm soumise à un transfert convectif des deux côtés avec une irradiation solaire coté sud (*Fig.IV.1*).

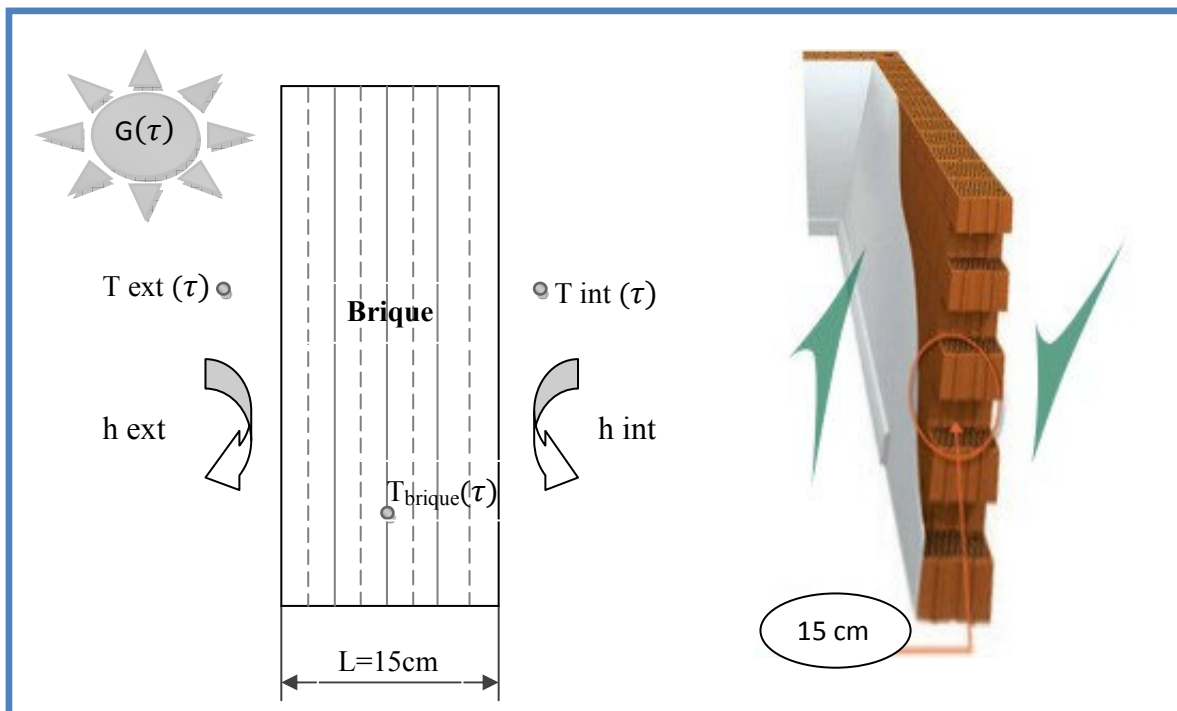


Figure IV. 1. Schéma paroi brique simple.

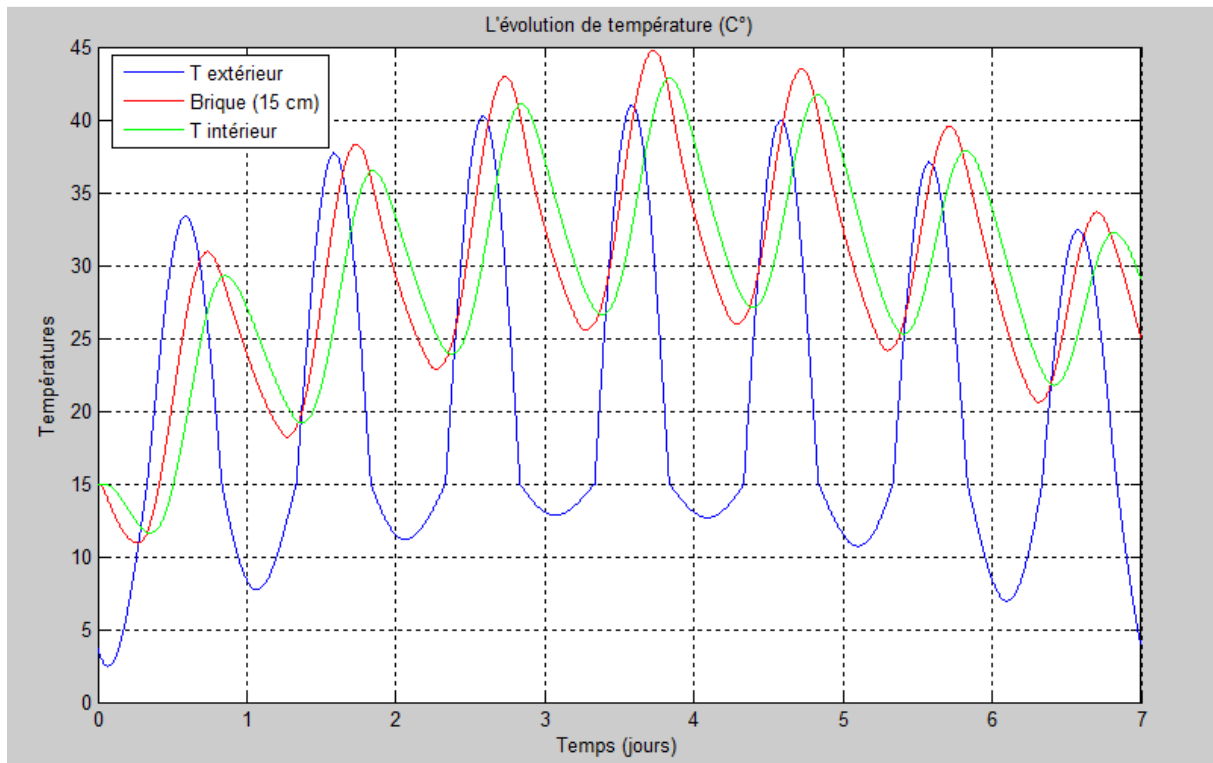


Figure IV. 2. Evolution des températures extérieure, intérieure et au milieu de la brique.

La *fig IV.1.* montre l'évolution des températures extérieure, intérieure et au milieu de la brique en fonction du temps. On peut constater que durant la période d'ensoleillement, la brique a une température plus élevée que la température ambiante, en raison des flux radiatifs. L'énergie solaire absorbée par la brique provoque l'augmentation de la température dans la chambre.

En revanche, quand l'ensoleillement est réduit, la température de la brique reste élevée pendant un certain temps, on parle donc de temps de réponse. Ceci entraîne un déphasage temporel des trois courbes avec des amplitudes différentes.

Tableau IV. 1. Valeurs des déphasages extérieur /brique, brique / intérieur et ETM entre l'extérieur et l'intérieur.

/	Jours	1	2	3	4	5	6	7
Déphasage (h)	Ext / briq	3,36	3,84	3,6	3,36	3,36	3,36	3,12
	Briq / int	3,12	2,88	3,12	2,4	2,64	2,64	2,64
Ecart température maximale (ETM) (°C) Ext / int	Durant la journée	4,1	1,2	-0,8	-0,86	-1,7	-1	0,24
	Durant la nuit	9,1	11,5	13	13,8	14,4	14,6	14,7
ETM Total (°C)		13,2	13,7	12,2	14,66	12,7	13,6	14,46

On peut remarquer une moyenne de 3,48 h de déphasage entre l'extérieur et la brique. Par contre, une valeur moyenne moins importante de 2,76 h est enregistrée entre la brique et l'extérieur de pièce. Ce phénomène est dû aux différents comportements thermiques entre l'extérieur (espace ouvert) et l'intérieur (espace confiné).

Sur la semaine observée, le sens d'évolution des ETM (différence entre les températures intérieurs et extérieurs) est considérablement variable. Au cours des deux premiers jours, on constate une température intérieure plus basse en moyenne de 2,65°C de gain. Par contre, on note des surchauffes jusqu'à 1,7°C durant les quatre jours suivants, pour revenir à un faible gain de 0.24°C le septième jour.

Grace au stockage de la chaleur par la brique durant la nuit, on enregistre un gain presque constant au profil de la température intérieure (13°C en moyenne).

IV.3. Paroi trois couches

IV.3.1. Paroi en brique / air / brique

Le 2^{ème} cas consiste à placer une paroi composée de deux couches en brique avec une lame l'air intermédiaire jouant le rôle d'un isolant thermique. Les paramètres géométriques sont données dans la *Fig.IV.3*.

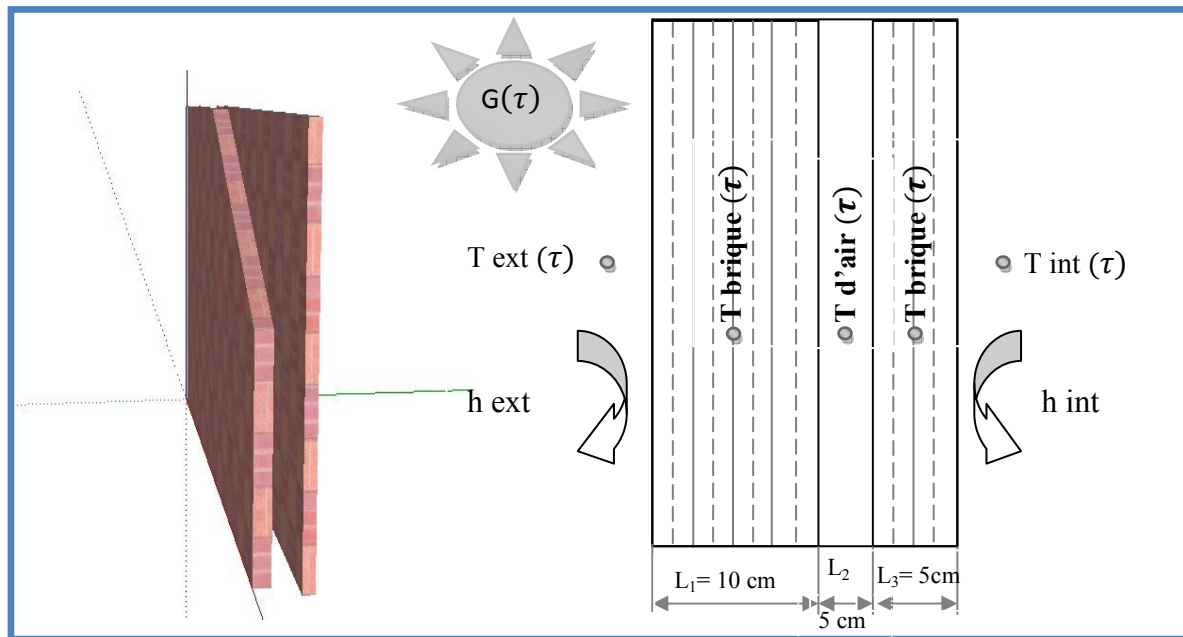


Figure IV. 3. Schéma Paroi en brique / air / brique.

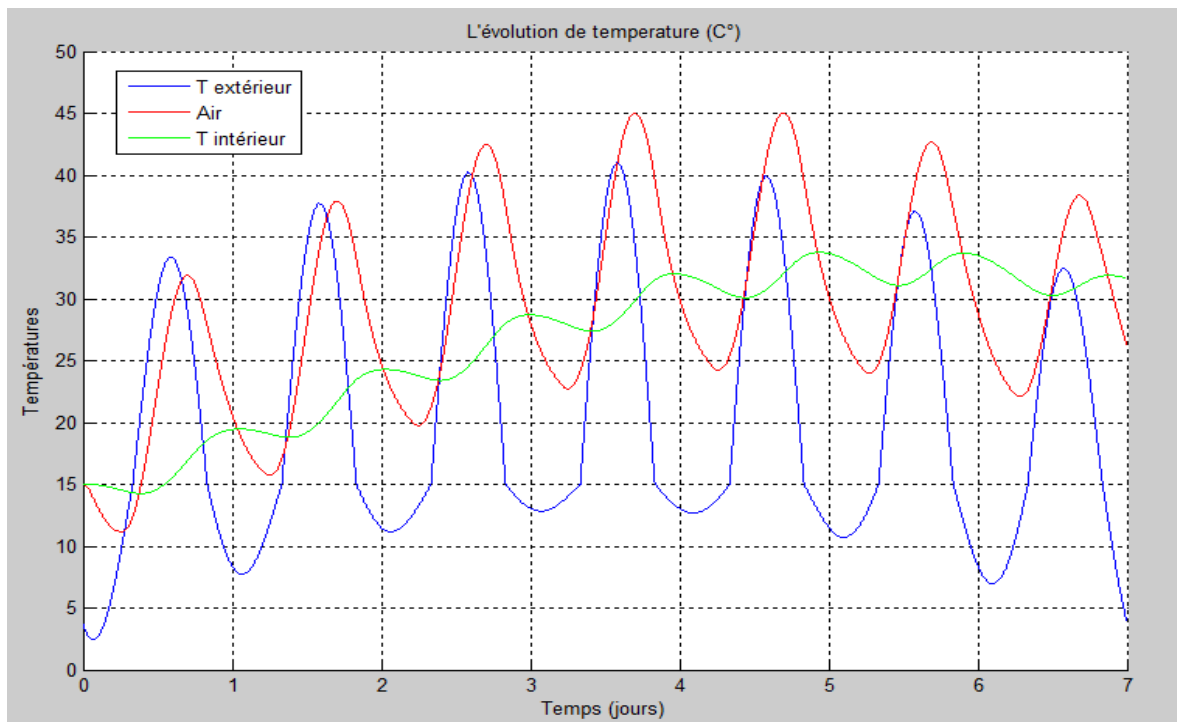


Figure IV. 4. Valeurs des températures extérieure, intérieure et la température au milieu d'espace d'air.

Tableau IV. 2. Valeurs des déphasages extérieur / lame d’air, lame d’air / intérieur et ETM entre l’extérieur et l’intérieur ainsi le Gain total.

/	Jours	1	2	3	4	5	6	7
Déphasage (h)	Ext / lame d’air	2,64	2,9	2,88	2,88	2,88	2,64	2,85
	lame d’air / int	11	9,8	9,8	9,4	8,4	7,6	6,9
Ecart température maximale (ETM) (°C) Ext / int	Durant la journée	13,9	13,4	11,53	9	6,23	3,4	0,58
	Durant la nuit	11,26	11,05	12,23	14,55	17,31	21	23,27
ETM Total (°C)		25,16	24,45	23,76	23,55	23,54	24,4	23,85

La FigIV.4. montre l’évolution des températures extérieure, intérieure et au milieu d’espace d’air. L’air joue bien son rôle d’isolant thermique. En effet, c’est la lame d’air qui absorbe l’excès de chaleur permettant à la température intérieure de maintenir une certaine stabilité du confort thermique. On peut dire que la lame d’air entre les deux murs en brique a un effet tampon (absorbeur d’énergie). Il est clair que la première couche en brique influe sur la lame d’air ce qui donne un déphasage presque constant d’une moyenne de 2.81 h entre les deux courbes. Par contre, le déphasage entre l’intérieur et la lame d’air est plus importante, avec une moyenne de 8,9h. Durant la journée, l’amplitude de l’augmentation de la température au sein de la lame d’air peut atteindre 22.5°C. Par contre, le milieu intérieur subit une légère augmentation de température de 4.6°C. Ces constats nous amènent à apprécier un certain confort thermique.

Si on revient au cas précédant, le changement de température de l’air dans la chambre était le même que la surface interne de la brique. On remarque un comportement différent dans ce modèle, l’air réduit les ETM à l’intérieur de la chambre d’une façon considérable et nettement plus stable avec une ETM total moyen de 24,1°C.

Le 1^{er} jour commence avec un ETM assez important de 13,9°C durant la journée. Cet ETM subit une diminution de 2 jusqu'à 3°C au cours de la semaine, pour atteindre un faible ETM de 0,58°C le septième jour. Le phénomène inverse est observé durant la nuit où l'ETM commence avec une valeur de 11,26°C pour atteindre une valeur importante de 23,27°C le septième jour. De ce fait, on obtient un ETM assez constant de 24,1°C durant toute la semaine.

Finalement, la température intérieure dans la chambre augmente par 2 jusqu'à 3°C par jour. Cela assure un confort meilleur par rapport à un mur simple en brique.

IV.3.2. Paroi en brique / polystyrène / brique

Le 3^{ème} cas met en œuvre une double paroi en briques (comme au test précédant) avec couche en polystyrène comme isolant intermédiaire.

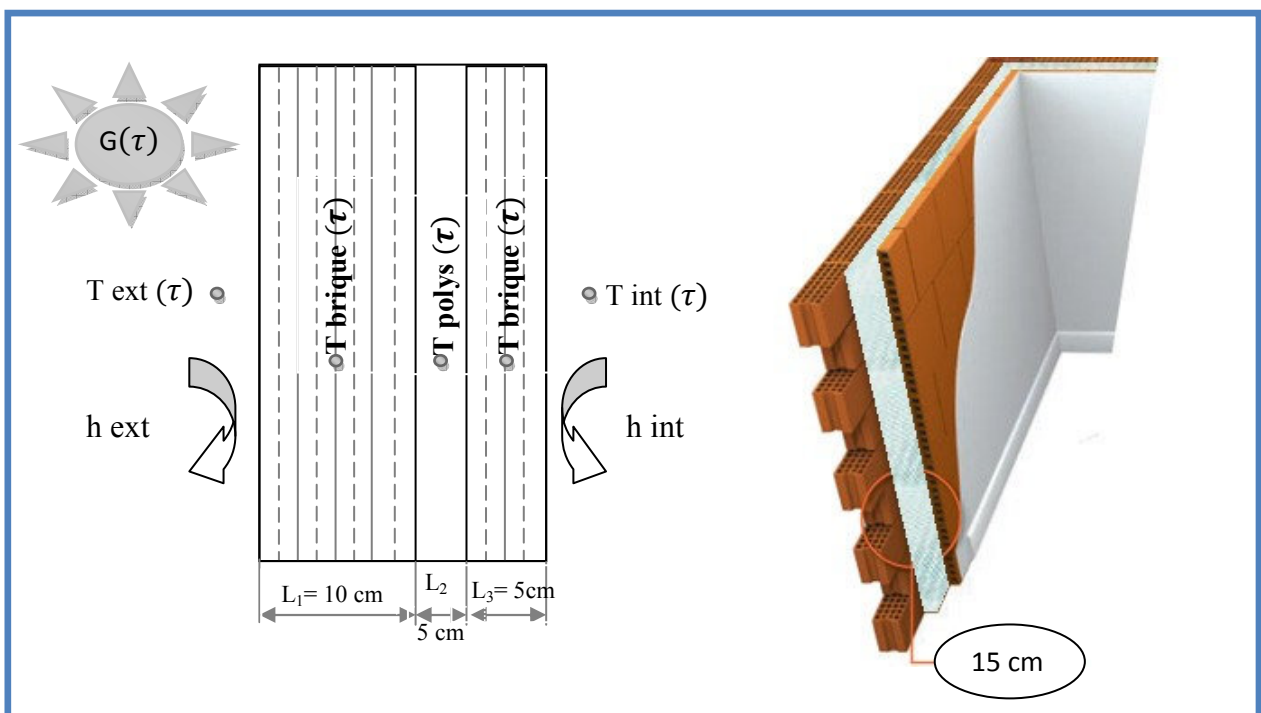


Figure IV. 5. Schéma paroi avec brique / polystyrène / brique.

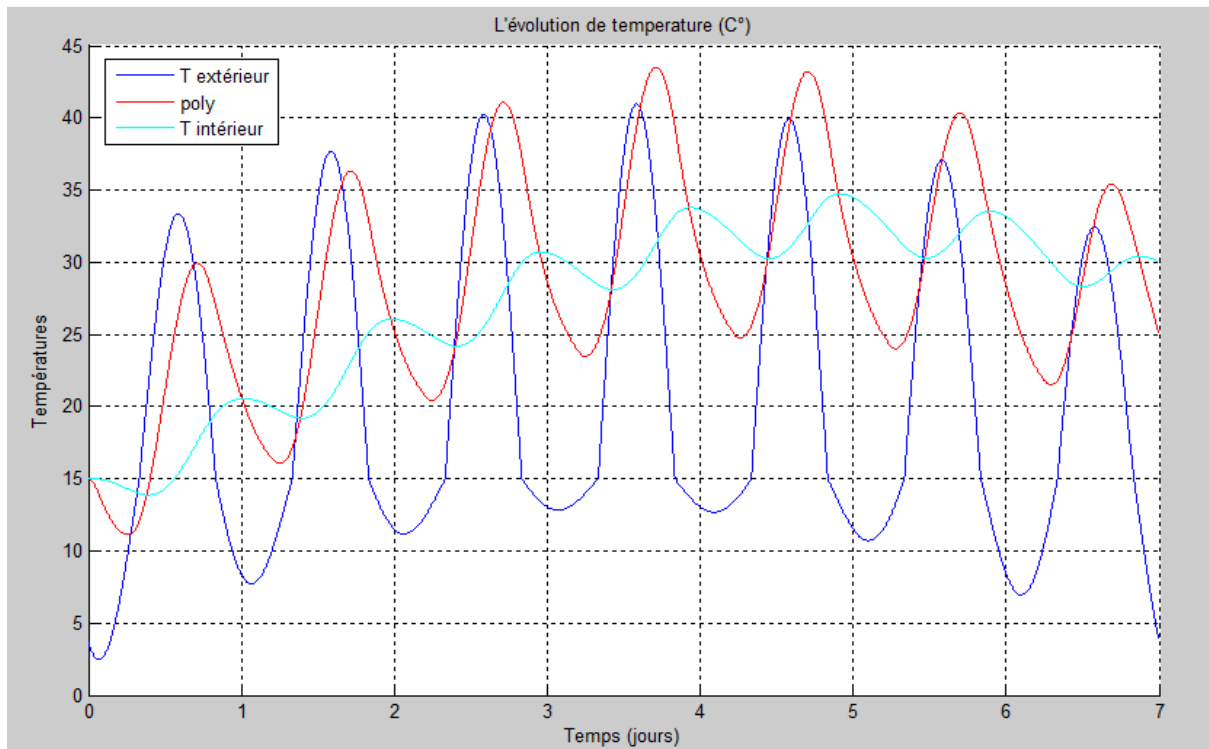


Figure IV. 6. Valeurs des températures extérieure, intérieure et au milieu de la couche en polystyrène.

La Figure IV. 6. Montre l'évolution des températures extérieure, intérieure et au milieu de la couche en polystyrène en fonction du temps. Le polystyrène assure le même travail que l'air ; les résultats sont assez similaires à ceux du 2ème cas. Étant donné sa faible masse volumique située généralement, suivant les applications, entre 10 et 30 kg/m³, son pouvoir d'isolant thermique, ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs), son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, etc.). On peut dire que le polystyrène est plus pratique que la couche d'air.

IV.3.3. Paroi en brique / MCP1 / brique

Le 4^{ème} cas porte sur un mur double couches en brique avec une couche intermédiaire en MCP (Type 1).

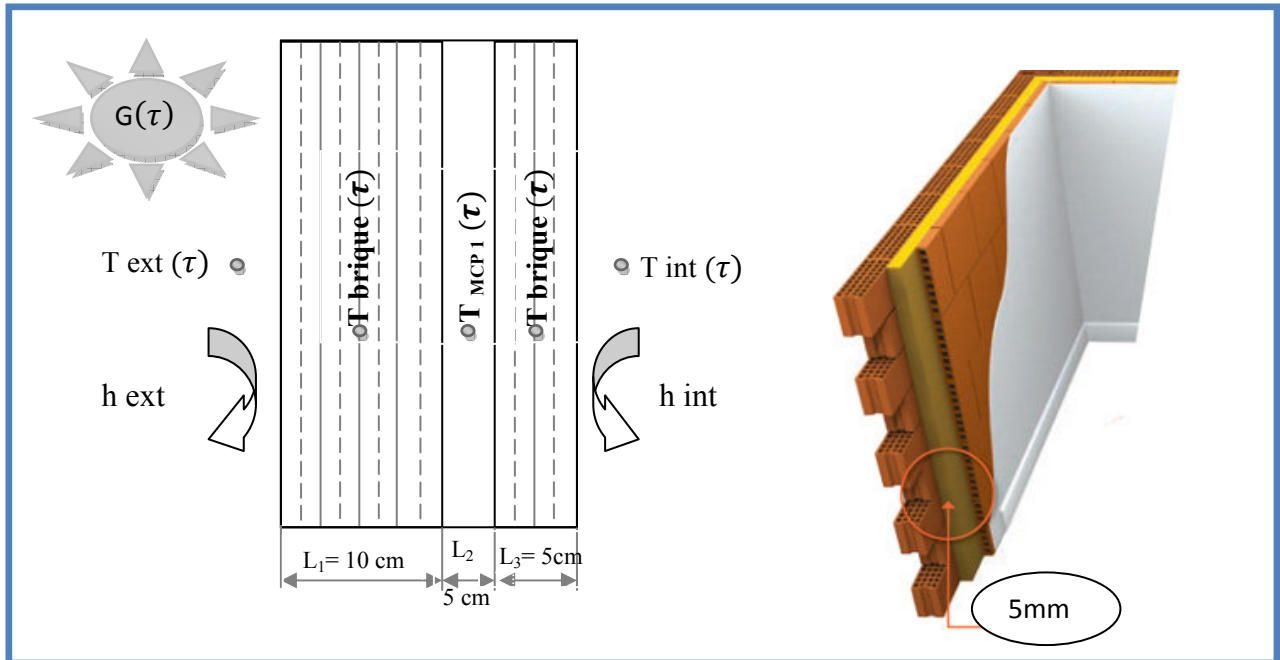


Figure IV. 7. Schéma double paroi avec MCP1 (brique / MCP1 / brique).

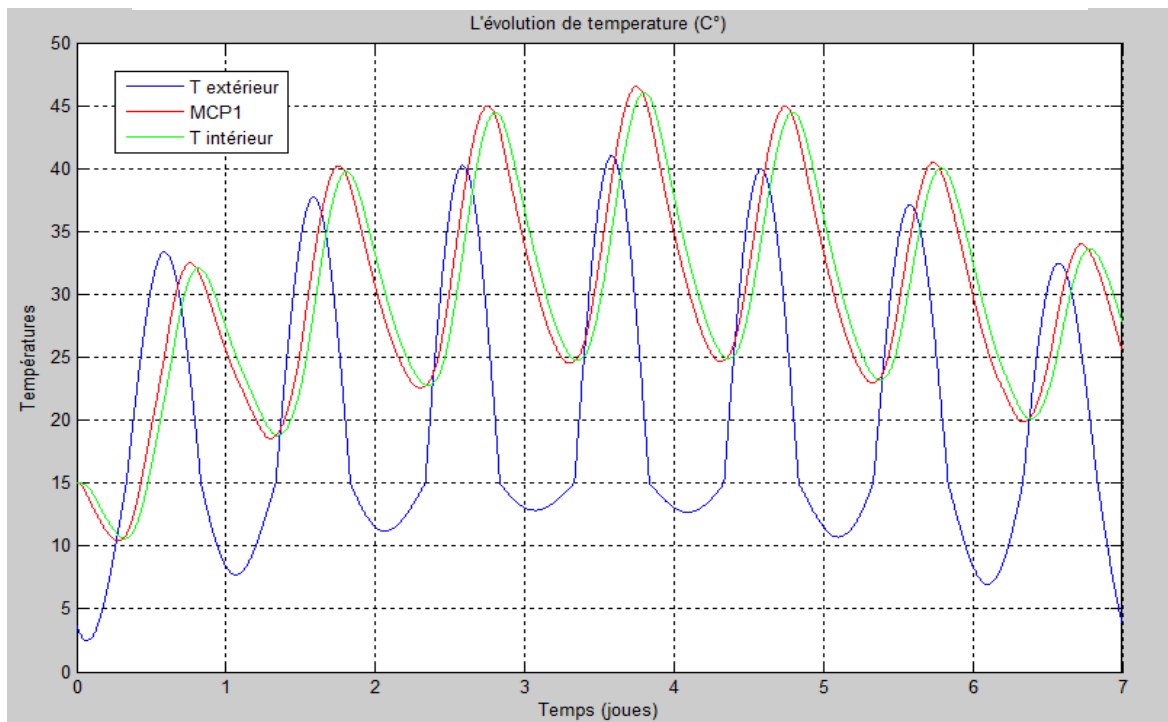


Figure IV. 8. Evolution des températures extérieure, intérieure et au milieu de la paroi MCP1.

La Fig IV. 2. montre l'évolution des températures extérieure, intérieure et au milieu la de paroi MCP1. Contrairement aux deux configurations précédentes, le comportement des trois courbes est le même sauf qu'il y a une différence de déphasage entre l'extérieur et le MCP et entre le MCP et l'intérieur.

On a des valeurs entre 3,6 et 4,08 h de déphasage entre l'extérieur et le MCP1, et des valeurs assez faibles entre le MCP1 et l'intérieur autour de 1,2 h. La chaleur stockée par le MCP1 influe sur ce dernier. Lorsque le MCP1 décharge sa chaleur, il fournit plus de chaleur à l'intérieur qu'à l'extérieur, cela est du à la différence d'épaisseur des deux parois en brique.

Finalement, l'extérieur influe lentement sur le MCP1 à travers une brique de 10cm d'épaisseur. Par la suite, le MCP qui est devenue une source de chaleur influe plus rapidement sur l'intérieur à travers une brique d'épaisseur 5 cm. Le déphasage total (ext / int) est de 5h en moyenne.

Tableau IV. 3. Valeurs des déphasages extérieur / MCP, MCP / intérieur et ETM entre l'extérieur et l'intérieur.

/	Jours	1	2	3	4	5	6	7
Déphasage (h)	Ext / MCP	3,84	4,08	3,84	4,08	3,84	3,6	3,62
	MCP / int	1,58	1,44	1,2	1,44	1,44	1,68	1,2
(ETM) (°C) Ext / int	Durant la journée	1,35	-2,4	-4,25	-5	-4,5	-3	1,2
	Durant la nuit	8,1	11	11,5	11,9	12,3	12,5	13,3

Concernant l'ETM, la plupart des valeurs de plein jour sont des valeurs négatives. On a jusqu'à 5°C de perte, ce qui explique le fonctionnement principale du MCP qui est le stockage de chaleur.

Contrairement aux ETM de plein jour, on a des gains plus importants en pleine nuit. Le 1^{er} jour a un gain de 8,1°C qui augment jusqu'à 13,3°C le dernier jour. Cette augmentation de gain au cours de la semaine devient plus claire si on suit le changement de la capacité calorifique du MCP.

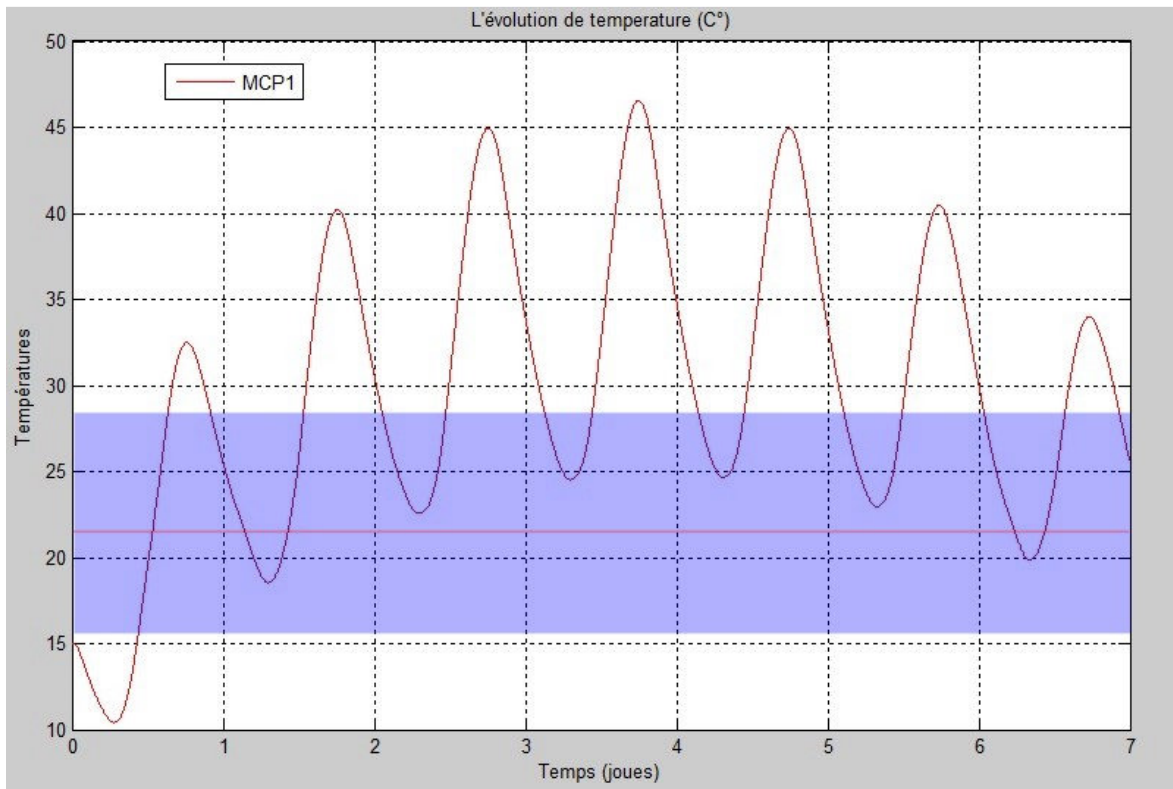


Figure IV. 9. Valeur des température au milieu de paroi MCP1.

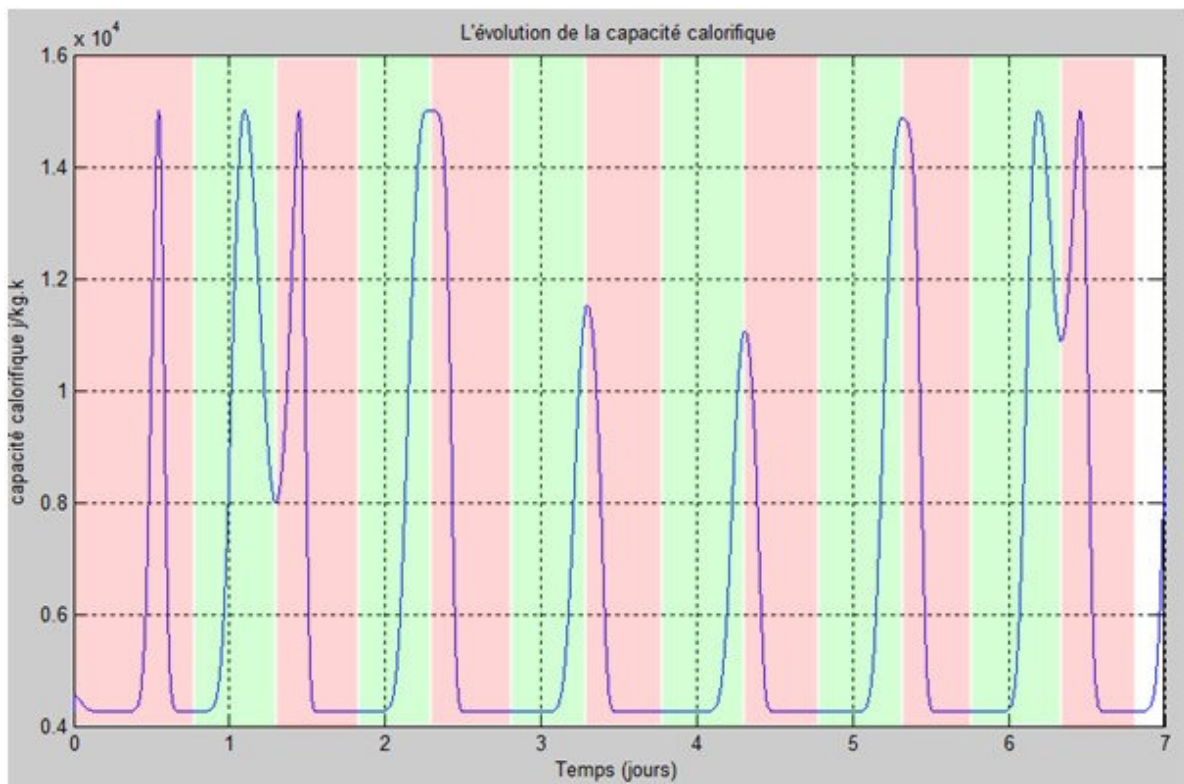


Figure IV. 10. Variation de la capacité calorifique de MCP1.

Traçons dans la figure IV.10 l'historique de la capacité calorifique du MCP1 pendant les périodes de transition. La zone en bleu (Fig. IV.9) désigne la région de changement de phase du MCP1 (16°C à 28°C, avec $T_f = 22,6^\circ\text{C}$). Au cours de la première journée où l'irradiation solaire est positive, l'énergie solaire est stockée dans le MCP1 (phase de fusion). La chaleur est libérée au cours de la nuit et la température de du MPC1 devient inférieure à la température de solidification (phase de solidification).

Les températures en dessous de 16°C indique un MCP solide à 100%. Au delà de 28°C, on obtient un MCP liquide à 100%. Entre les deux, on observe un mélange solide/liquide.

Le processus commence avec une fusion (zones en rouge) lorsque le MCP passe par la température de pic $T_f = 22,6^\circ\text{C}$ (le premier jour). On note un pic maximum correspondant à un stockage maximum de chaleur (15 kJ/kg.K). On observe en suite un abaissement de température à la fin de la 1^{ère} journée et au début de la 2^{ème}. Le MCP franchit alors 22,6°C une deuxième fois et donne un pic maximal correspondant à un processus de solidification (zone en vert), la solidification est incomplète parce que le MCP n'atteint pas les 15°C.

Durant le 2^{ème} jour, et avec une irradiation positive, le MCP reprend la fusion, pour cela il franchit les 22,6°C une troisième fois et il devient liquide.

Il est remarquable de noter que le MCP garde sa forme liquide le 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème} et le 6^{ème} jour. Malgré l'abaissement de la température en dessous de 28°C, le MCP ne revient plus à la température de pic, ce qui donne des pics de déstockage ces jours là comme le montre la Fig. III.10 (zone en vert). Ces décharges sont récupérées par le MCP quand l'ensoleillement augmente (zone en rouge). Le MCP joue à nouveau son rôle correctement en faisant un cycle charge/décharge et en passant par la température de pic deux fois (1^{er} et dernier jour).

Finalement, ce type de MCP sort de la zone de changement de phase la plupart du temps, en raison d'une température de pic faible et dans des conditions extérieures difficiles (température maximale importante de 41°C avec une irradiation importante).

IV.3.4. Paroi en brique / MCP2 / brique

Le 5^{ème} cas porte sur un mur double couches en brique avec une couche intermédiaire en MCP (Type 2).

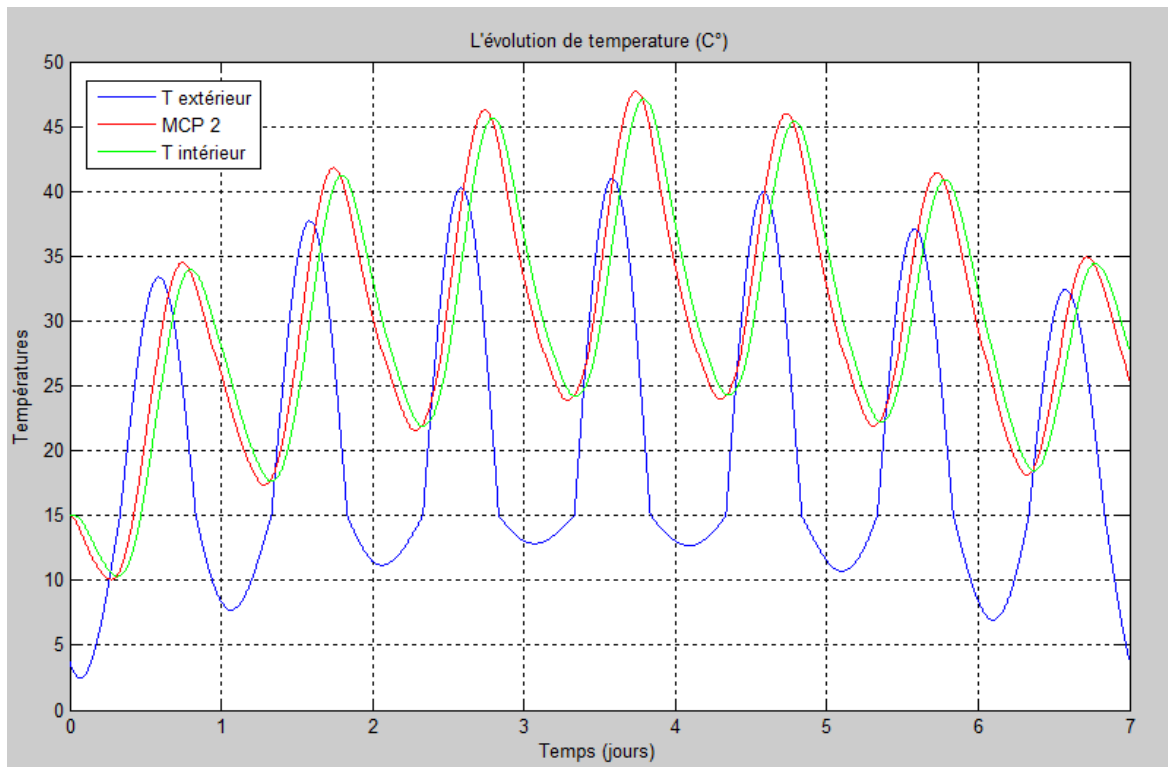
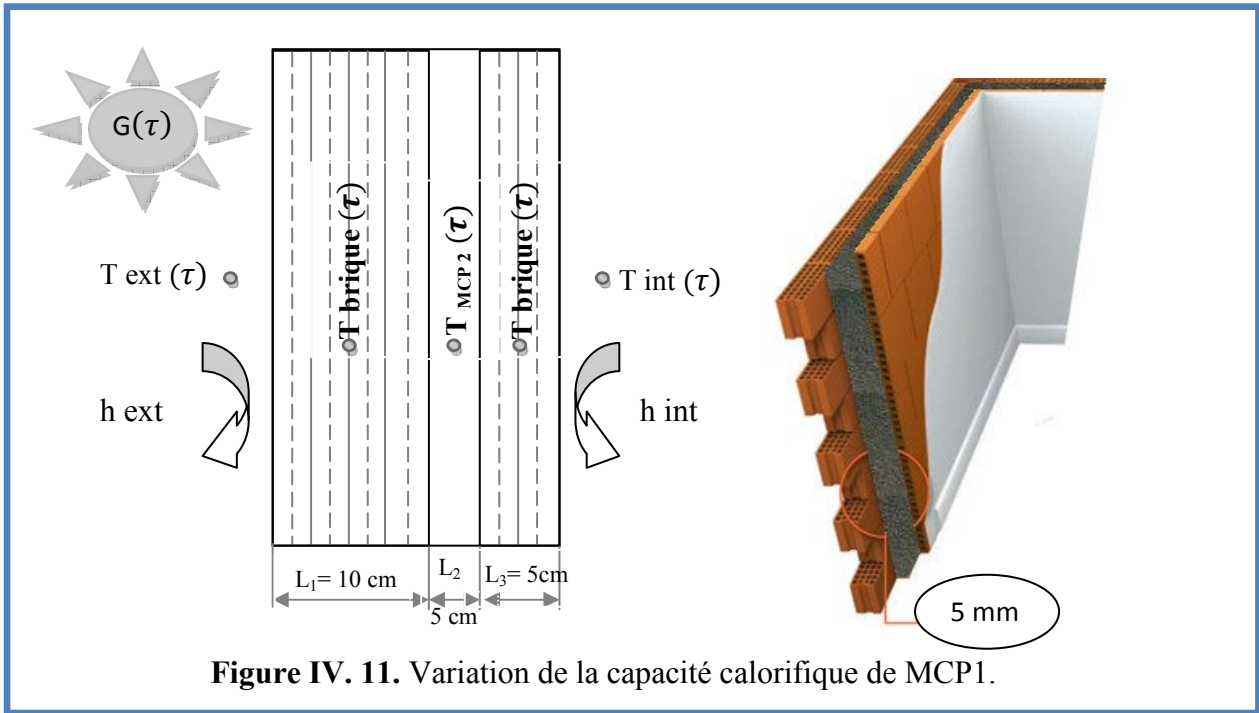


Figure IV. 12. Evolution des températures extérieure, intérieure et au milieu de paroi MCP2.

La figure IV.3. montre l'évolution des températures extérieure, intérieure et la au milieu de paroi MCP2. Globalement, ce type de MCP2 donne les mêmes résultats que dans le précédent cas avec des déphasages et des fluctuations presque similaire.

La différence entre les deux MCP réside dans le domaine dans lequel ils travaillent, le MCP1 travaille sur une bande de transition de 12°C contrairement au MCP2 qui travaille sur une bande assez courte de 6,5°C. Le processus de fusion commence à $T_i = 22^\circ\text{C}$ et se termine à $T_s = 28,5^\circ\text{C}$ avec une température de pic est de $T_p = 27,6^\circ\text{C}$.

La fig IV.13 représente les températures de la paroi MCP au cours de temps et la fig IV.14 représente le changement de Cp du MPC2 en fonction du temps.

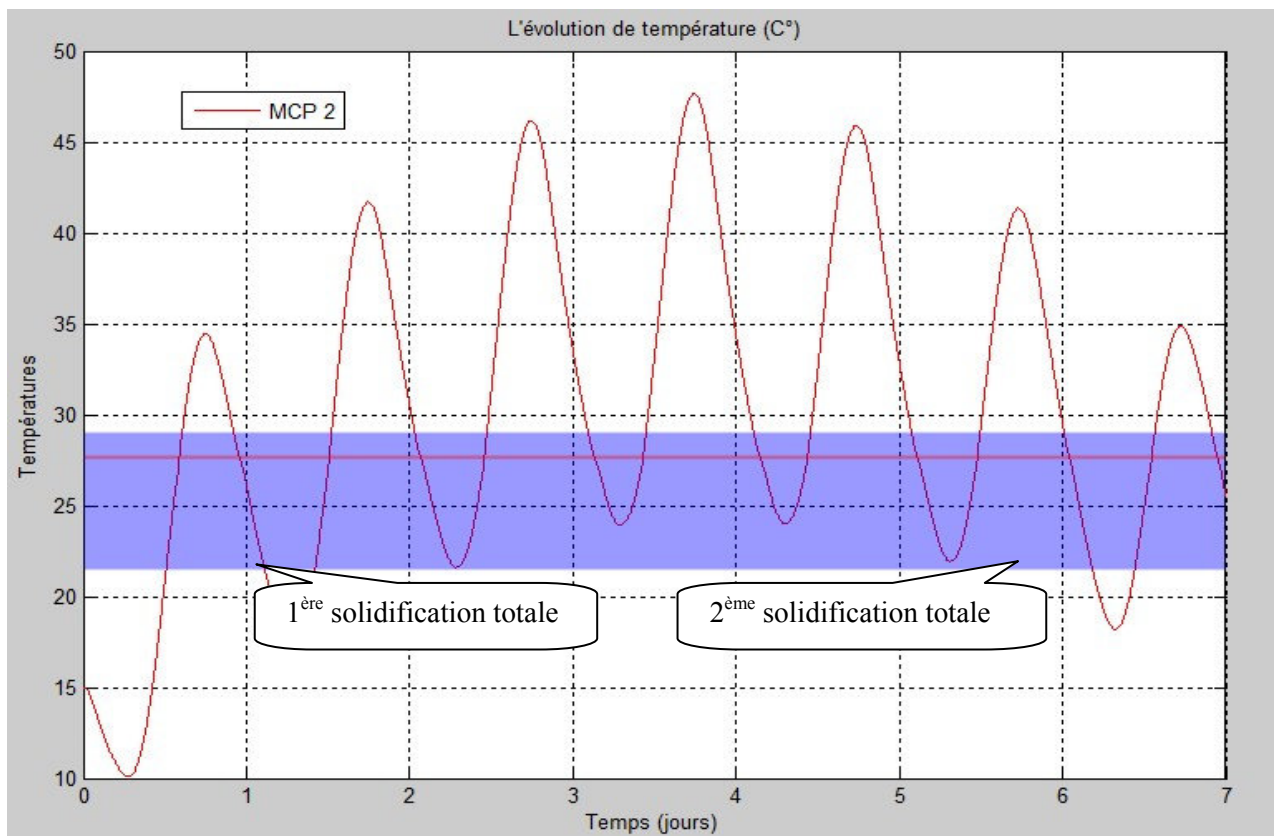


Figure IV. 13. Valeur des températures au milieu de paroi MCP2.

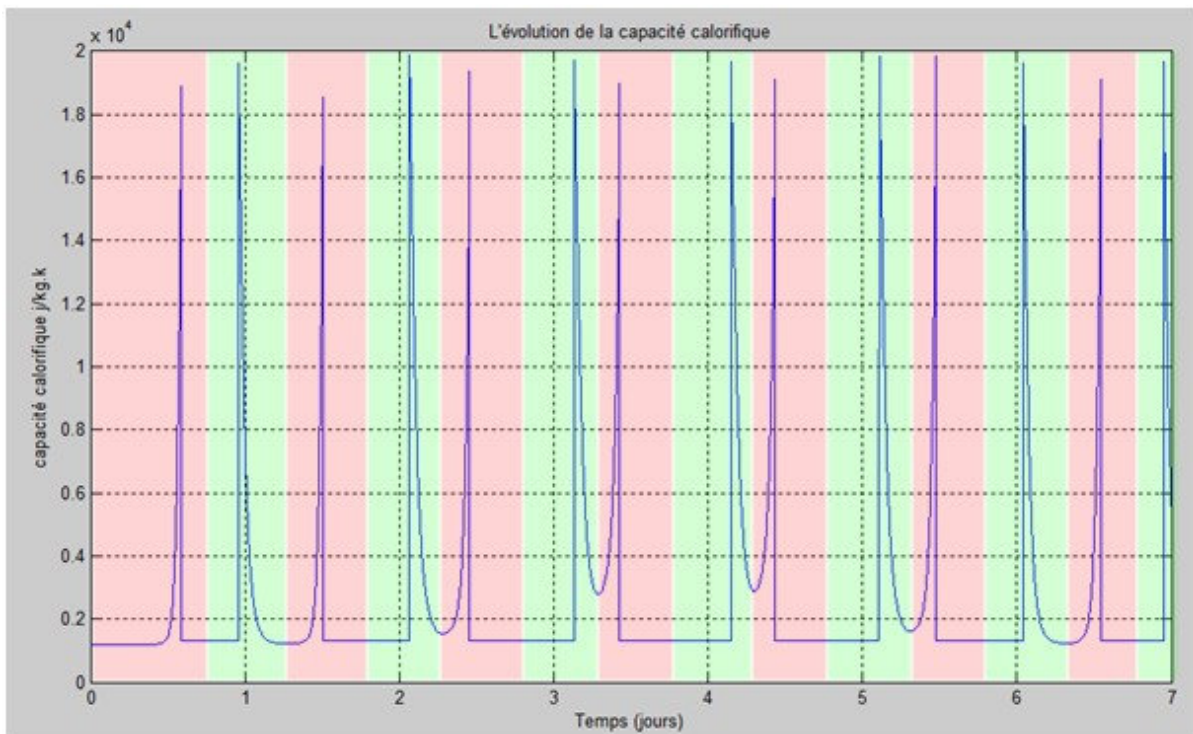


Figure IV. 14. Déroulement de la capacité calorifique de MCP2.

Le 1^{er} point noté, c'est les 14 pics sur la *fig V.14*. Cela correspond à une température $T_p = 27,6^\circ\text{C}$ et à un stockage ou bien déstockage de chaleur latent de 20 kJ/kg.K . Une moyenne de deux pics par jour assure un cycle fusion / solidification. Le cycle commence avec une fusion quand le MCP augmente et franchit les $27,6^\circ\text{C}$ pour donner un 1^{er} pic (zone rouge). La température augmente au-delà de la bande de transition ce qui provoque une fusion totale. Le nouveau passage par la température de pic en fin de journée entraîne la solidification du MCP2 (zone verte). La baisse de température en dessous de la bande de transition explique la solidification complète.

Le processus suit ce cycle du 2^{ème} au 6^{ème} jour. Néanmoins le MCP n'atteint pas la solidification complète, car il reste au-dessus de la température T_ℓ . Le dernier jour, la température de MCP passe en dessous de $T_\ell = 22^\circ\text{C}$ entraînant la 2^{ème} solidification complète.

Finalement, le fonctionnement de ce MCP est meilleur par rapport au précédent puisque il est plus actif au cœur de sa bande de transition. Le MCP réussit à accomplir le cycle fonte / solidification deux fois. Les autres jours présentent des cycles presque complets. Ce type de MCP est plus adapté aux conditions climatiques difficiles variables.

V.4. Comparaison des cinq modèles

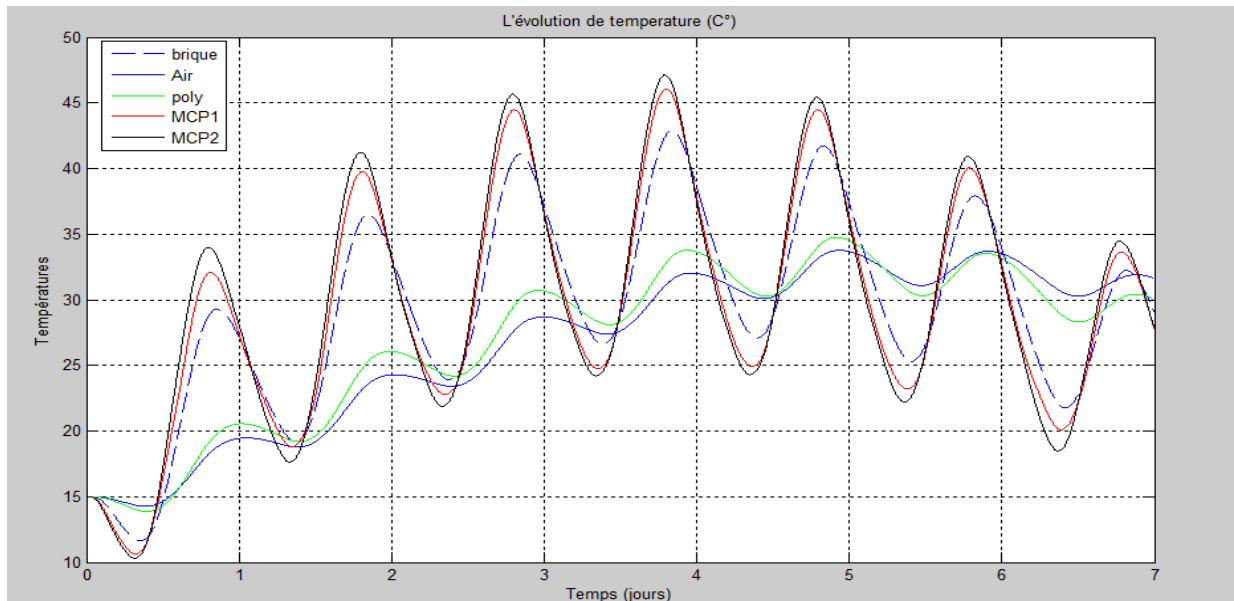


Figure IV. 15. Evolution des températures intérieures pour les cinq cas.

La comparaison entre les différents cas traités précédemment est assez difficile. On peut remarquer que le modèle d'isolation avec une lame l'air intermédiaire assure son rôle d'isolation thermique, la même façon que celui du polystyrène, alors que les MCP1 et MCP2 agissent différemment. On dit que les deux premières contiennent des matériaux d'isolation avec des conductivités thermiques très faibles ($\lambda_{\text{air}} = 0.0234 \text{ W/m.K}$, $\lambda_{\text{poly}} = 0.038 \text{ W/m.K}$) et des C_p moyenne. En revanche, les deux derniers modèles sont des modèles de stockage d'énergie étant donné leurs C_p très importantes, (le $c_{p\text{MCP1}} = 4250 \div 15000 \text{ J/kg.k}$ et $c_{p\text{MCP2}} = 1200 \div 20000 \text{ J/kg.K}$), ainsi que des λ assez élevées que celles des deux premiers.

En comparant l'air au polystyrène, il s'avère que le modèle de l'air est plus performant. Mais, la paroi chaude de la lame d'air échange ses calories avec la paroi froide par convection. Pour que l'air conserve ses qualités d'isolation, il doit être immobile. Cette immobilité s'obtient en l'enfermant dans des alvéoles les plus petites possible afin de fragmenter et de freiner par frictions les mouvements de convection. Ceci est le cas de polystyrène.

Finalement c'est difficile d'assurer l'immobilité totale de l'air entre deux parois en brique, ce qui ne nous donne pas les résultats observés. En réalité, un simple changement d'épaisseur de la lame l'air peut inciter la convection. La variation de l'épaisseur de la lame d'air ne donne pas des résultats linéaires. En fin de compte, le polystyrène peut être préférable puisque ces résultats sont les plus logiques.

Si on revient aux deux modèles de MCP, c'est surtout des modèles de stockage d'énergie. Les fluctuations des températures (ETM) de MCP2 sont plus importantes que celle de MCP1.

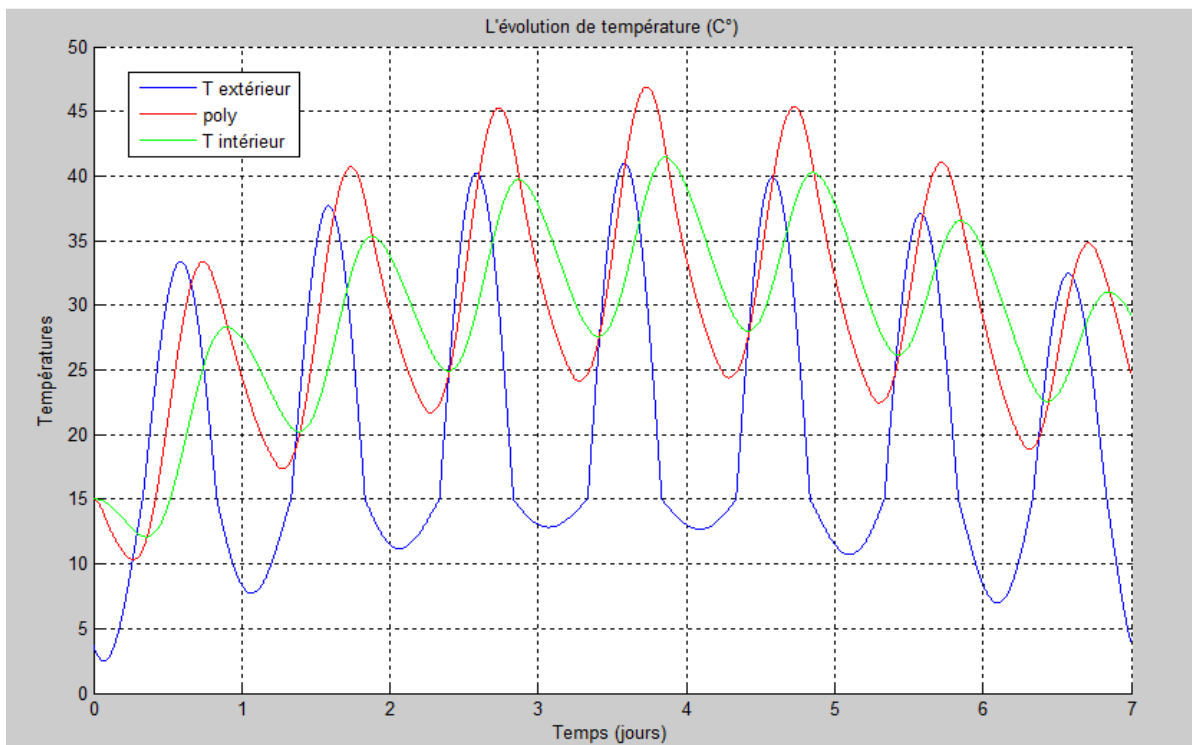
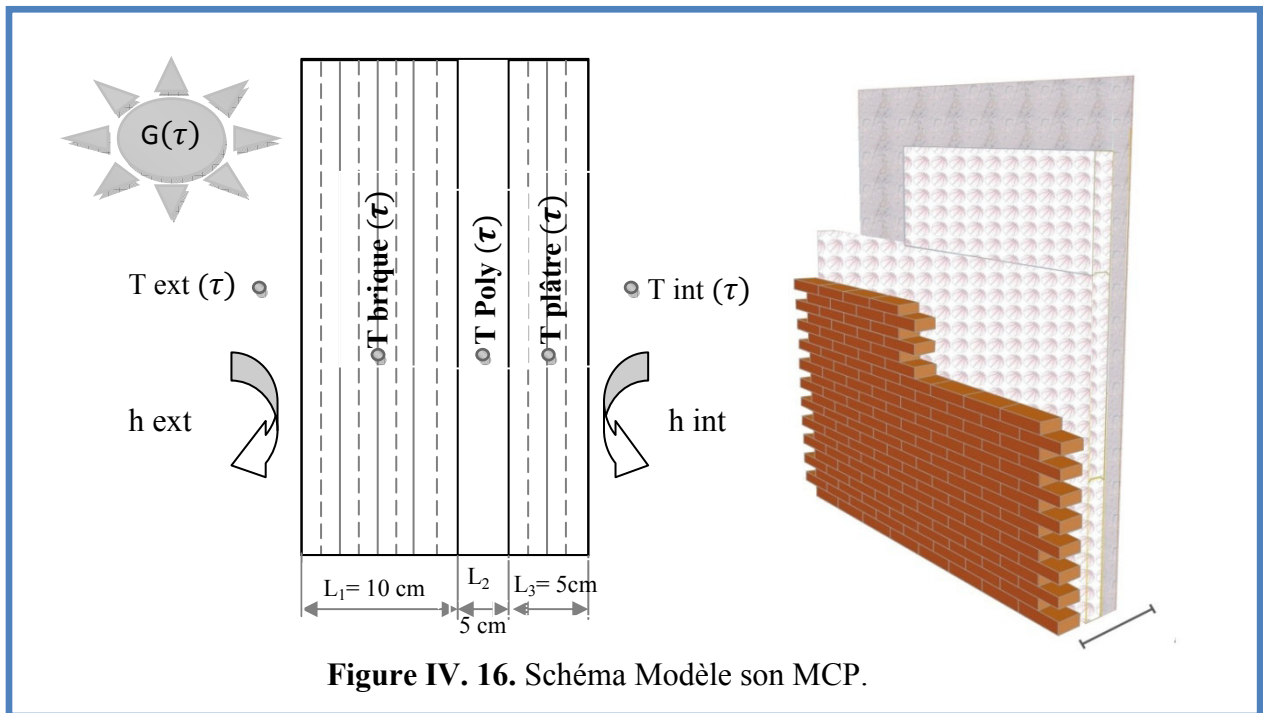
- En plein jour, lorsque le MCP fond, il stocke de la chaleur latente, le MCP type 2 peut stocker une chaleur de 20 kJ/kg.K si sa température augmente au delà de 27,6 °C. De même pour MCP type 1 qui peut stocker jusqu'à 15 kJ/kg.K s'il dépasse les 22,6°C. Quand les deux MCP passent les 29°C le $C_{p_{MCP2}}$ devient très faible devant le $C_{p_{MCP1}}$ ils sont respectivement 1.3 kJ/kg.K et $C_{p_{min}} = 4,25$ kJ/kg.K. A partir de ce moment (29°C), le MCP type 1 peut stocker les 4,25 kJ/kg.K même s'il est à la phase liquide contrairement au MCP type 2 qui ne peut stocker que 1.3 kJ/kg.K.
- Quand l'ensoleillement est réduit (nuit), Les pics de température en plein nuit avec MCP1 sont plus faibles que ceux du MCP2. C'est la raison pour la quelle on observe un déstockage de chaleur latente plus important du MCP1.
- En conclusion, il s'avère que le MCP ne peut être utilisé seul comme isolant thermique. Pour le rendre efficace, il faut l'intégrer dans un système déjà isolé. Pour cela, il faut penser à combiner les deux types des modèle précédant (isolation thermique avec des matériaux d'isolation et le stockage de chaleur avec de MCP).

IV.5. L'intégration de MCP dans une paroi isolée

En ce qui concerne le MCP, et depuis la démonstration de la qualité du MCP type1 et type2, il est établie que le type1 est préférable pour des conditions climatique modérées. En revanche, le type 2 se comporte mieux dans des conditions météorologiques difficiles. L'idéal serait de travailler avec les deux MCP.

IV.5.1. Modèle sans MCP

Afin d'évaluer l'effet du MCP, On va créer une configuration simple d'une paroi munie d'une couche en brique à l'extérieure d'épaisseur de 10 cm, une couche en polystyrène (5 cm) et une couche en plâtre à l'intérieur (5 cm).



IV.5.2. Le MCP en 1^{ère} position

Une 2^{ème} configuration a été proposée avec l'intégration d'une épaisseur de 5 mm de MCP type1 ou bien type2. L'emplacement du MCP joue un rôle prédominant dans les résultats. Dans un 1er temps, on positionne le MCP en 1^{ère} position (c'est-à-dire brique / MCP / polystyrène / plâtre).

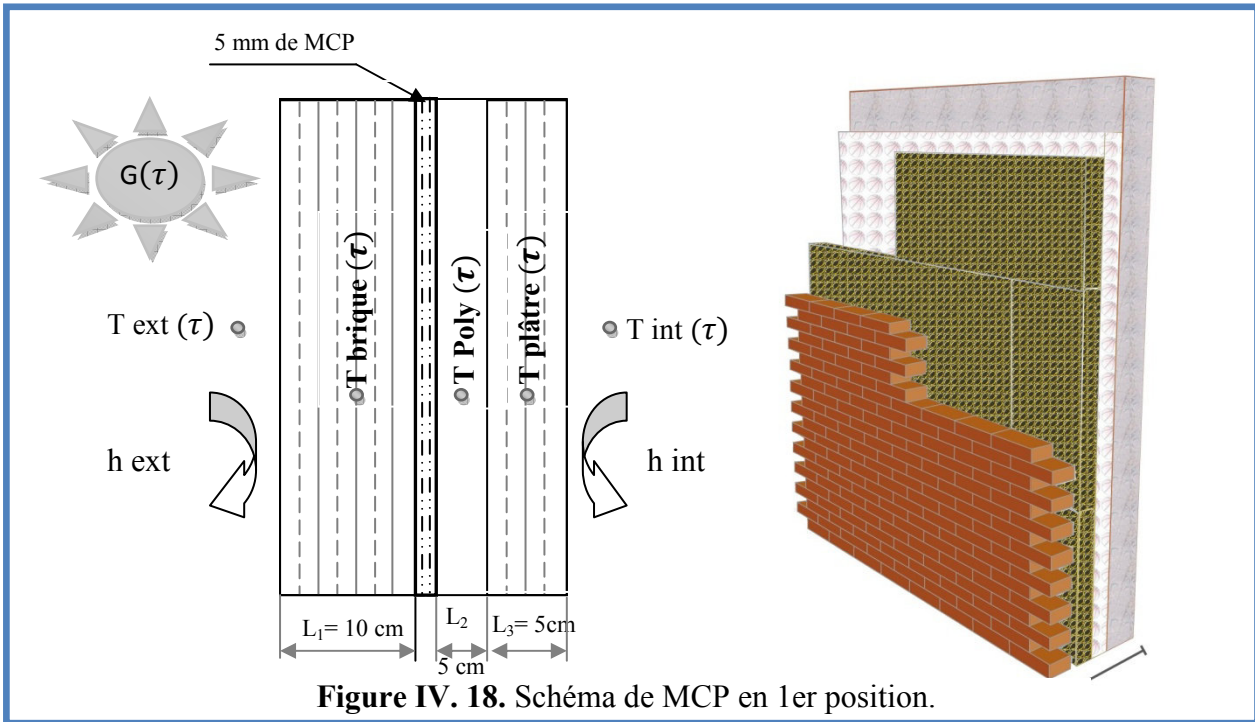


Figure IV. 18. Schéma de MCP en 1er position.

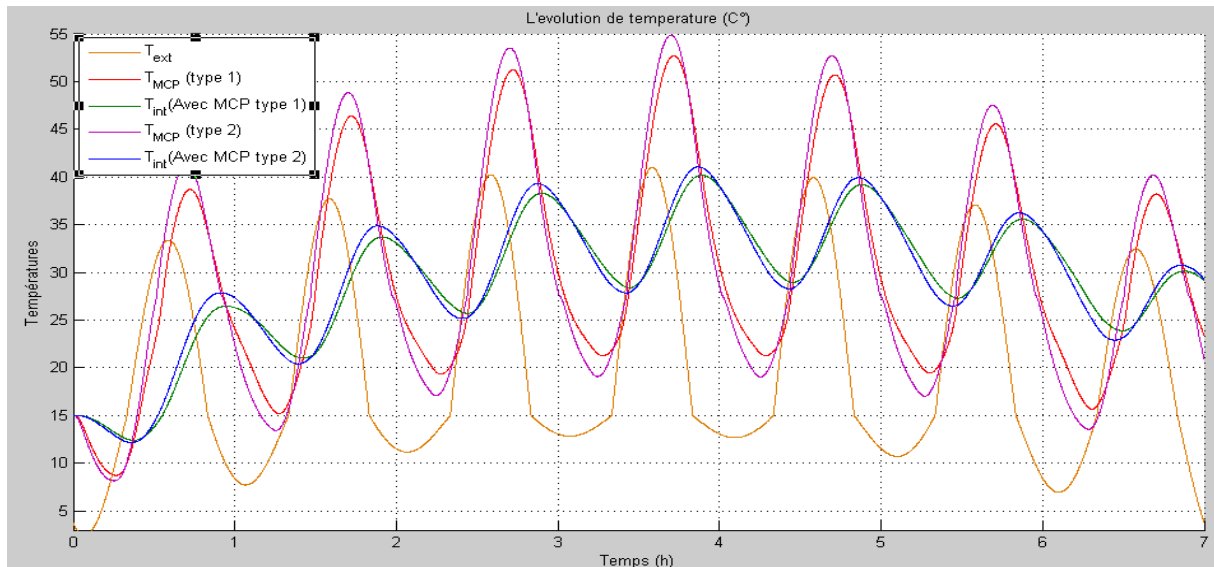


Figure IV. 19. Evolution des températures extérieures, intérieures et au milieu de paroi MCP pour les deux types.

La Fig V.19. Montre l'évolution des températures extérieurs, intérieurs et la température au milieu de paroi MCP pour les deux types. En Intégrant les deux modèles (mur avec des matériaux d'isolation et stockage de chaleur avec le MCP) dans une seule configuration, on obtient une isolation et un confort thermique acceptable, Ce dernier cas de figure permet de jouer sur « l'intelligence du mur ». Avec cette configuration, on ne s'intéresse pas seulement aux charges et décharges de MCP, on s'attache également à la manière de distribuer la chaleur emmagasinée dans le MCP.

Le MCP stocke un maximum de chaleur au cours de la journée. Seulement la décharge se fait à l'extérieur plus qu'à l'intérieur, dû à l'emplacement du MCP entre la paroi brique et polystyrène (conductivité thermique de polystyrène moins faible que la brique). Autrement dit, le polystyrène conduit un minimum de chaleur vers l'intérieur, par contre la brique transfère un maximum de chaleur vers l'extérieur. Ce qui assure la fraîcheur de la chambre à l'intérieur. Cela donne un déphasage assez important entre le milieu intérieur et l'extérieur comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau IV. 4. Valeurs des déphasages MCP type1 et MCP type2.

/	Jours	1	2	3	4	5	6	7
Déphasage (h) Ext / Int	MCP type1	8,54	7,8	7,53	7,34	7,2	7,08	7,2
	MCP type2	7,73	7,17	6,98	6,84	6,69	6,64	6,7

Si on revient aux cas précédant, le déphasage total (ext / int) était autour de 5h, désormais, on obtient jusqu'à 8,5h de décalage de temps entre l'extérieur et l'intérieur. Cela est dû à la cinétique thermique élevée du mur.

Si on compare les deux types de MCP, le 1^{er} type assure un meilleur cinétique, le mur a le temps de refroidir au cours de la nuit pour reprendre le stockage à l'arrivée du jour. Utilisant le 2^{ème} type de MCP et avec une capacité de stockage plus importante (20 kj/kg.K), le mur est toujours chargé, ce qui réduit le temps réponse et par la suite la cinétique thermique.

Avec ce déphasage de temps, il est noté que la température au sein de la chambre atteint son maximum après 7,5h de temporisation par rapport au maximum extérieur (12h). Autrement dit, la température atteint son maximum en fin journée.

Par ailleurs, il est possible de libérer l'excédent de chaleur par une ouverture vers l'extérieur (ouverture d'une fenêtre, ventilation).

Concernant le gain énergétique, la fig V.20 montre la comparaison entre le modèle avec et sans MCP.

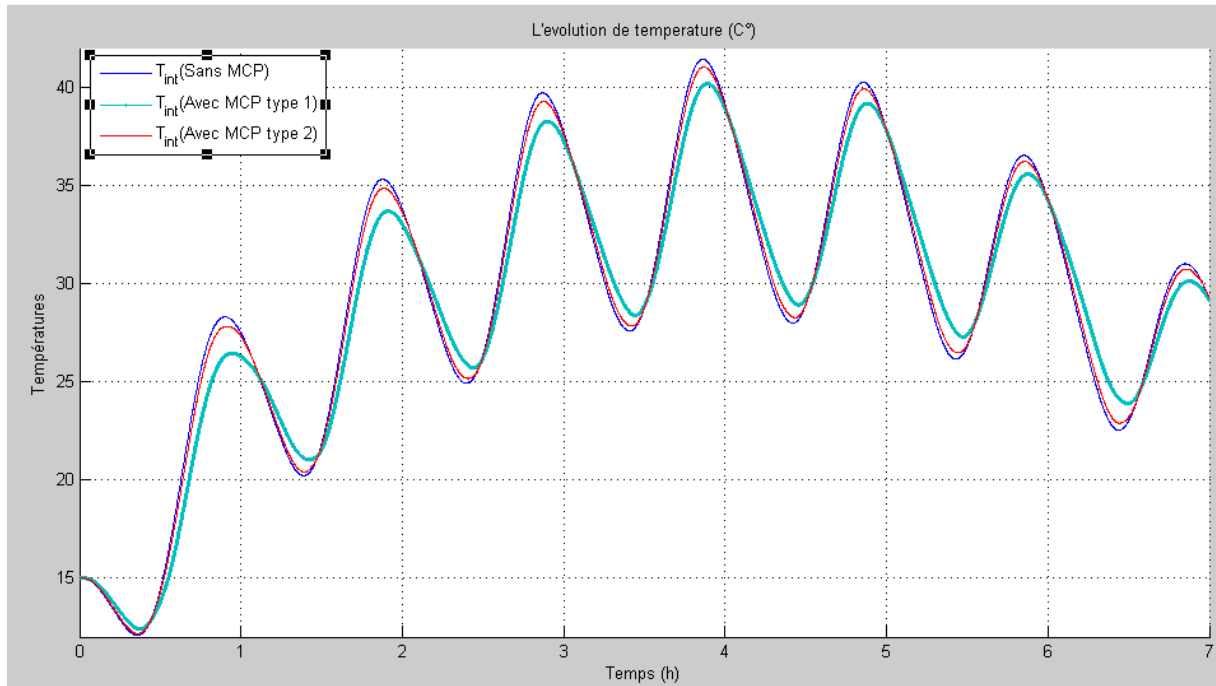


Figure IV. 20. La comparaison entre le modèle avec et sans MCP.

Le tableau suivant représente les valeurs des gain énergétique type1 et MCP type2

Tableau IV. 5. Valeurs des gains énergétiques avec MCP type1 et 2.

/	MCP	Jours	1	2	3	4	5	6	7
Gain énergétique Total (°C)	Type1	Nuit / jours	0,33 / 1,85	0,77 / 1,62	0,78 / 1,45	0,8 / 1,25	0,94 / 1,29	1,25 / 0,96	1,36 / 0,88
		Totale	2,18	2,39	2,23	2,05	2,19	2,08	2,24
		Type2	MCP type2	0,25 / 0,48	0,58 / 0,45	0,53 / 0,43	0,55 / 0,39	0,67 / 0,35	0,79 / 0,3
	Totale		0,73	1,03	0,96	0,94	1,02	1,09	1,28

Le tableau ci-dessus représente le gain en plein jour, le gain en pleine nuit et le gain total pour les deux cas de MCP.

Le MCP type1 réduit les fluctuations d'une façon à avoir les 2,19°C comme moyenne de gain énergétique total, par contre le MCP type 2 assure un gain moins important de 1°C. Il est clair maintenant que le MCP type 1 isole mieux que le type 2 précisément dans cette configuration.

La configuration (brique / MCP / polystyrène / plâtre) est plus adaptée aux conditions climatique d'été, puisque elle travaille plus sur l'isolation thermique que sur le confort.

▪ **Evaluation de modèle dans les conditions estimées de la saison d'hiver**

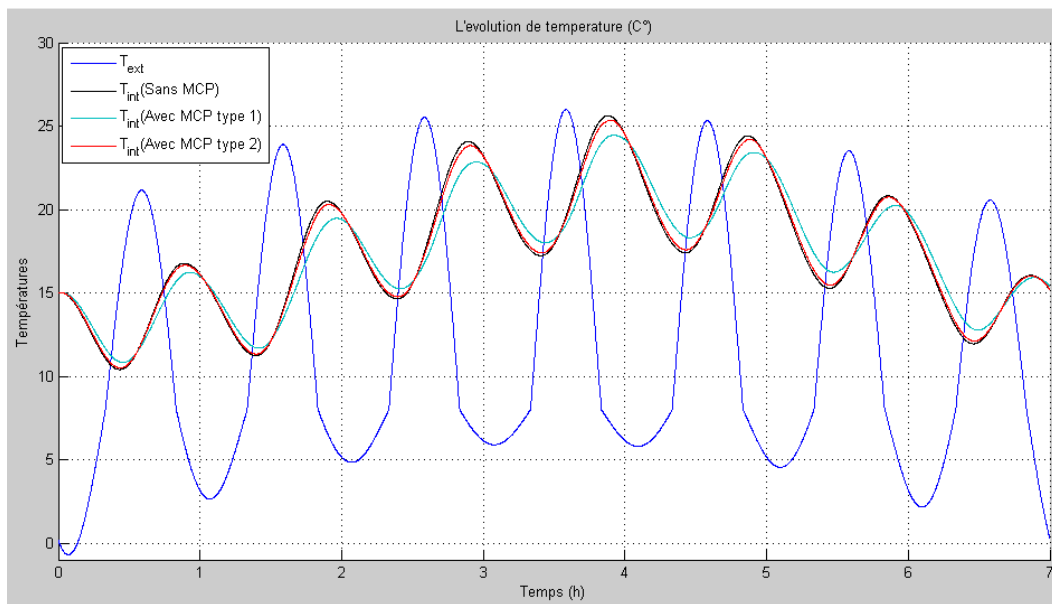


Figure IV. 21. Température extérieure et intérieure sans et avec MCP pour les deux type.

IV.5.3. Le MCP en 2^{ème} position

La 3^{ème} configuration porte sur le changement d'emplacement de MCP en 2^{ème} position (c'est-à-dire brique / polystyrène / MCP / plâtre).

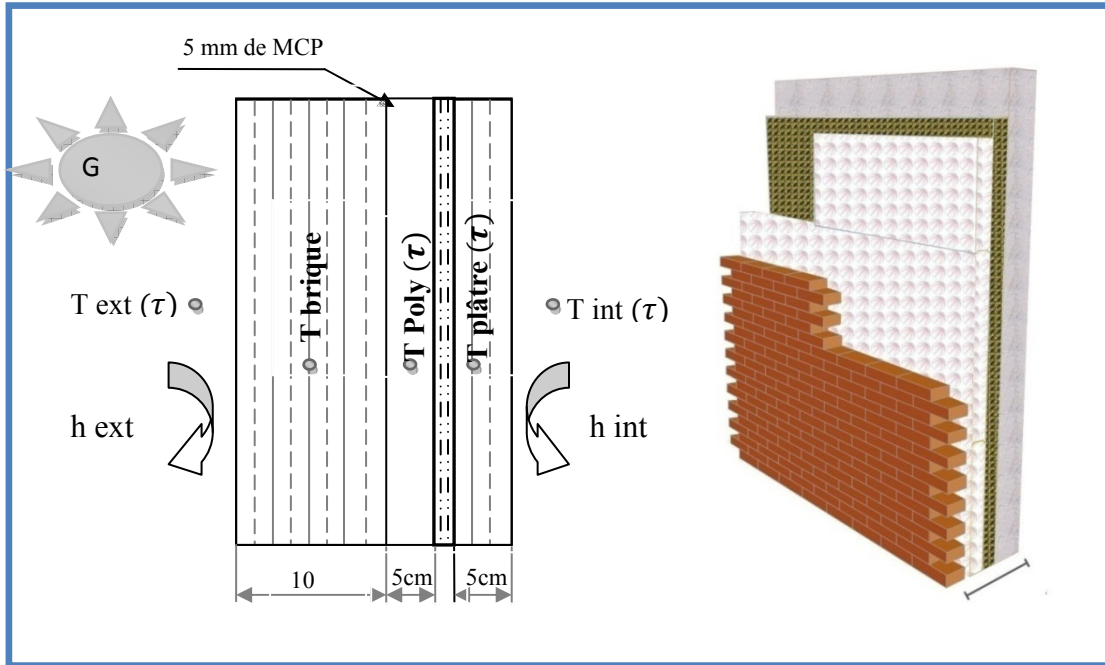


Figure IV. 22. Schéma de MCP en 2ème position.

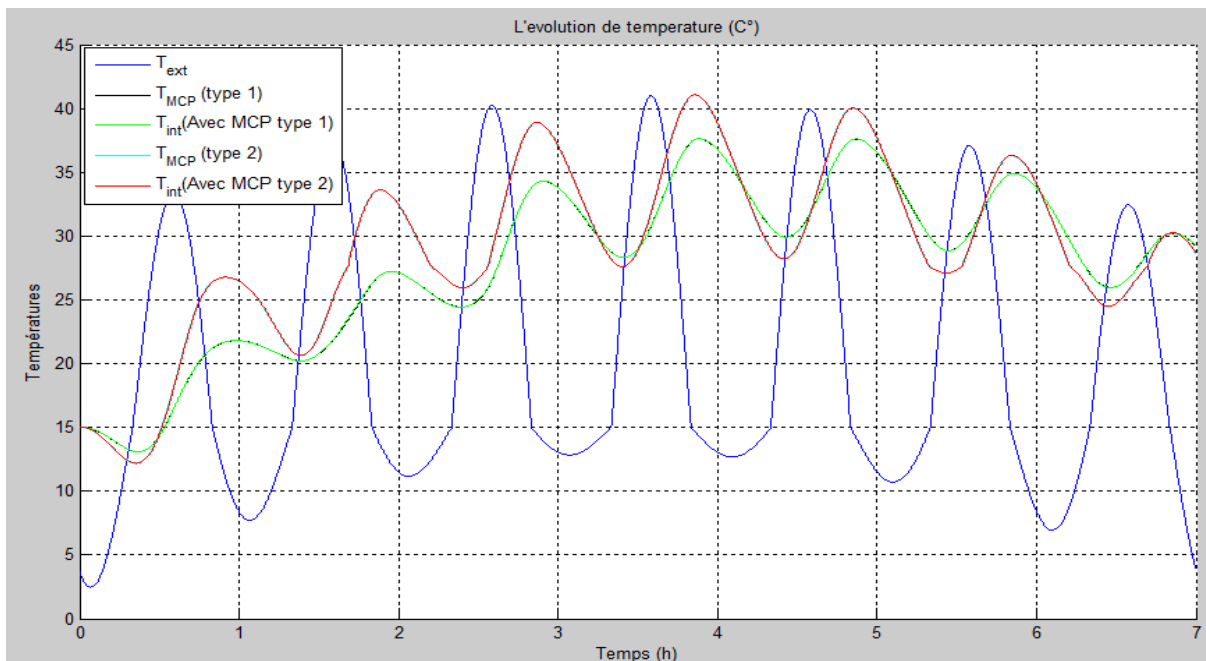


Figure IV. 23. Valeurs des températures extérieures, intérieures et au milieu de paroi MCP pour les deux types.

La Fig V.22. Montre l'évolution des températures extérieurs, intérieurs et la température au milieu de paroi MCP pour les deux types. On obtient une isolation et un confort thermique plus meilleur par rapport à la configuration ou le MCP et en 1^{er} position. Jouent sur l'intelligence du mur, et avec cette configuration, on essaye de positionner le MCP pour qu'il soit le plus proche de l'intérieur.

Le MCP dans ce cas stocke un minimum de chaleur au cours de la journée. Seulement la décharge se fait à l'intérieur plus qu'à l'extérieur (contrairement au configuration précédant), dû à l'emplacement du MCP entre le polystyrène et la paroi plâtre (conductivité thermique de plâtre plus importante que celle de polystyrène). Autrement dit, le plâtre conduit un maximum de chaleur vers l'intérieur, par contre le polystyrène transfère un minimum de chaleur vers l'extérieur. Cela confirme la faible conductivité thermique de plâtre, ainsi la conservation de chaleur à l'intérieur de la chambre. Cela donne un déphasage assez important entre le milieu intérieur et l'extérieur comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau IV. 6. Valeurs des déphasages MCP type1 et MCP type2.

/	Jours	1	2	3	4	5	6	7
Déphasage (h) Ext / Int	MCP type1	8,9	8,8	7,7	7,2	6,9	5,28	6,7
	MCP type2	7,8	7,4	6,72	6,72	6,4	6,3	6,7

Si on compare les deux configurations (MCP en 1^{er} position, MCP en 2^{ème} position), la 1^{ère} configuration assure un meilleur cinétique, le mur avec le MCP en 2^{ème} position n'pas le temps pour refroidir, il reste toujours chargé ce qui diminue la cinétique du mur.

Avec ce cas, il est noté que la température au sein de la chambre atteint son maximum après une moyenne de 7,3h de temporisation par rapport au maximum extérieur pour le MCP1, par contre une moyenne de 6,8h pour le MCP2.

Concernant le gain énergétique, la fig V.23 montre la comparaison entre le modèle avec et sans MCP.

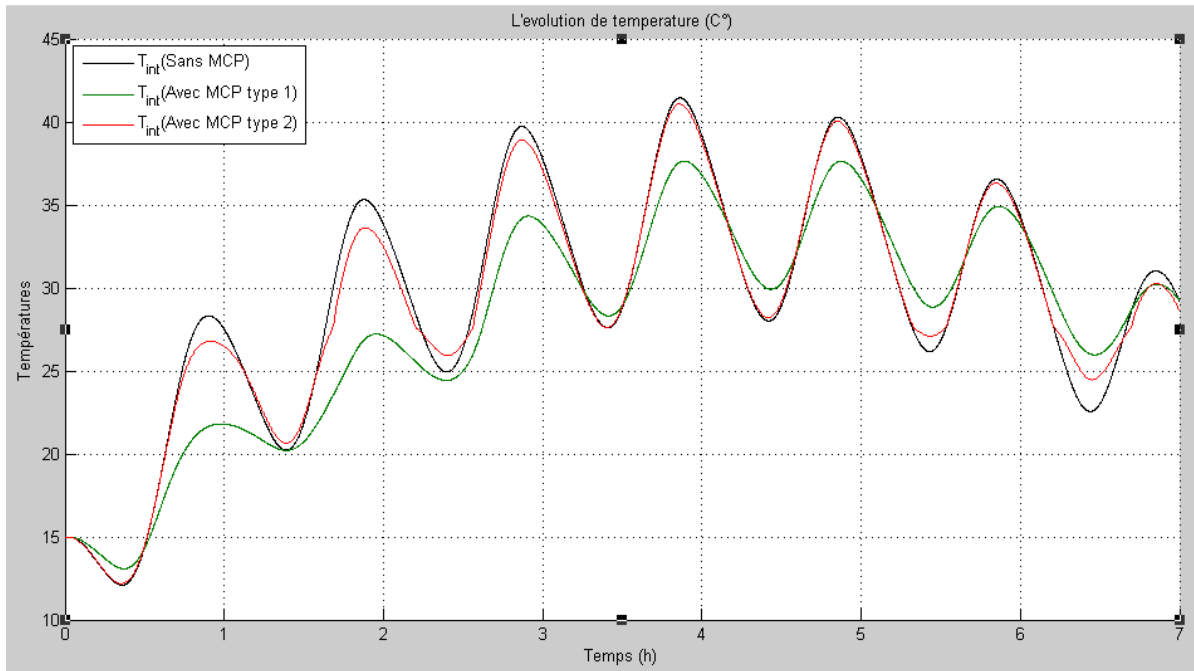


Figure IV. 24. La comparaison entre le modèle avec et sans MCP.

Le tableau suivant représente les valeurs des gain énergétique type1 et MCP type2

Tableau IV. 7. Valeurs des gains énergétiques avec MCP type1 et 2.

/	MCP	Jours	1	2	3	4	5	6	7
Gain énergétique Total (°C)	Type1	Nuit / jours	1 / 6,5	0 / 8	-0,47 / 5,37	0,7 / 3,81	1,9 / 2,7	2,75 / 1,63	3,43 / 0,8
		Totale	7,5	8	4,9	4,51	4,6	4,38	2,63
	Type2	MCP type2	0,19 / 1,52	0,4 / 1,7	1 / 0,8	0 / 0,32	0,2 / 0,28	1,7 / 0,3	1,5 / 0,7
		Totale	1,71	2,1	1,8	0,32	0,48	2	2,2

Le Tab IV.7. représente le gain durant le jour, le durant la nuit et le gain total pour les deux cas de MCP.

Le MCP type1 réduit les fluctuations d’une façon à avoir une moyenne de 5,8°C comme gain énergétique total, par contre le MCP type 2 assure un gain moins important d’une

moyenne de $1,5^{\circ}\text{C}$ seulement. Le MCP type 1 isole mieux que le type 2 encore une fois avec cette configuration.

La configuration (brique / polystyrène / MCP / plâtre) est plus adaptée aux conditions climatiques d'hiver, puisque elle travaille plus sur la conservation de chaleur, ainsi le confort.

■ Evaluation de modèle dans les conditions estimées de la saison d'hiver

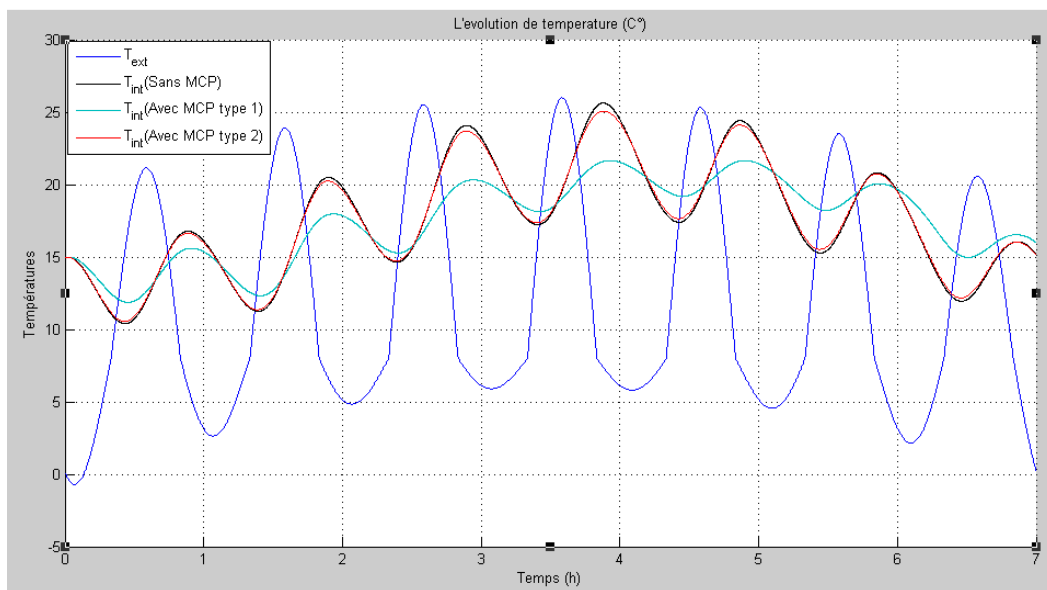


Figure IV. 25. Température extérieure et intérieure sans et avec MCP pour les deux type.

V.5.4. Interprétation des trois modèles

Cette partie nous donne la possibilité de comparer les trois modèles, comment réagit le MCP, son travail, leur influence sur la température intérieure et quelle est la meilleure configuration.

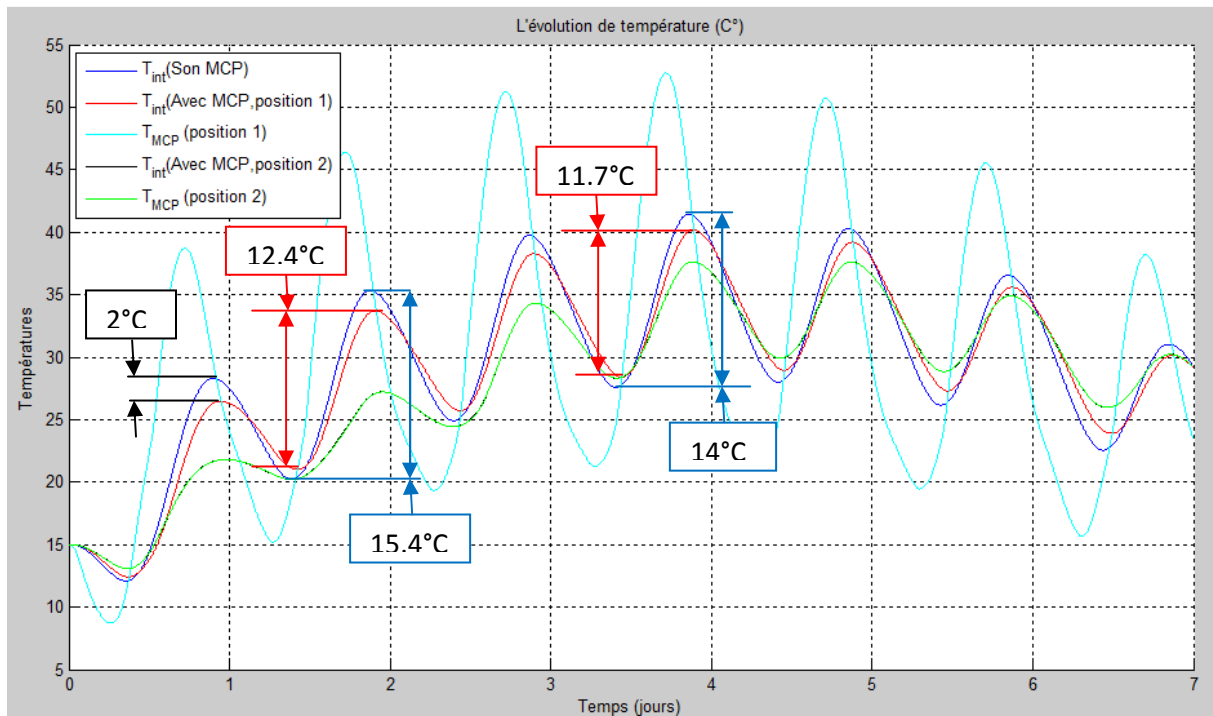


Figure IV. 26. Valeurs des températures intérieures son MCP et avec le en position (1) et (2) avec leurs les températures au milieu de panneaux pour les deux cas.

Au moment d'évaluer les performances d'un MCP pour améliorer le confort thermique d'été dans les bâtiments, on cherche généralement au profil de température de l'air intérieur au cours d'une période représentative courte. Conformément à cette approche, dans le cadre de l'étude de cas, on essaye de discuter les trois modèles (sans MCP, Avec MCP mais en position 1 et avec MCP en position 2), la *Fig IV.25* représente le profil de température de fonctionnement de la chambre.

En particulier, Comme le montre la *Fig IV.25*, l'installation de panneau MCP en position (1) (courbe rouge) produit une diminution de la température de fonctionnement maximum de l'ordre de 2°C par rapport au modèle sans MCP (courbe bleu). En outre, une atténuation significative de la température quotidienne en moyenne, elle est de 3°C le 2^{ème} jour et 2,5°C le 4^{ème} jour.

D'autre part, on peut observer une différence remarquable entre l'installation de MCP en position (1) et celle de position (2). Les résultats obtenus pour se dernier était complètement différents, le MCP commence a travaillé le 4^{ème} jusqu'à 7^{ème} jour, mais d'une façon différente, et il donne des résultats nettement plus meilleurs que la 1^{ère} configuration,

Cela peut dépasser les 4°C de gain dans les pics de plein jour, le MCP travail comme un isolant simple dans les premiers jours.

Pour résoudre ce problème il faut suivre le déroulement de la capacité calorifique dans le MCP, et par la suite il faut détecter l'effet stockage-déstockage de la chaleur pour le panneau MCP. Comme le montre la *Fig IV.26* et *Fig IV.27*.

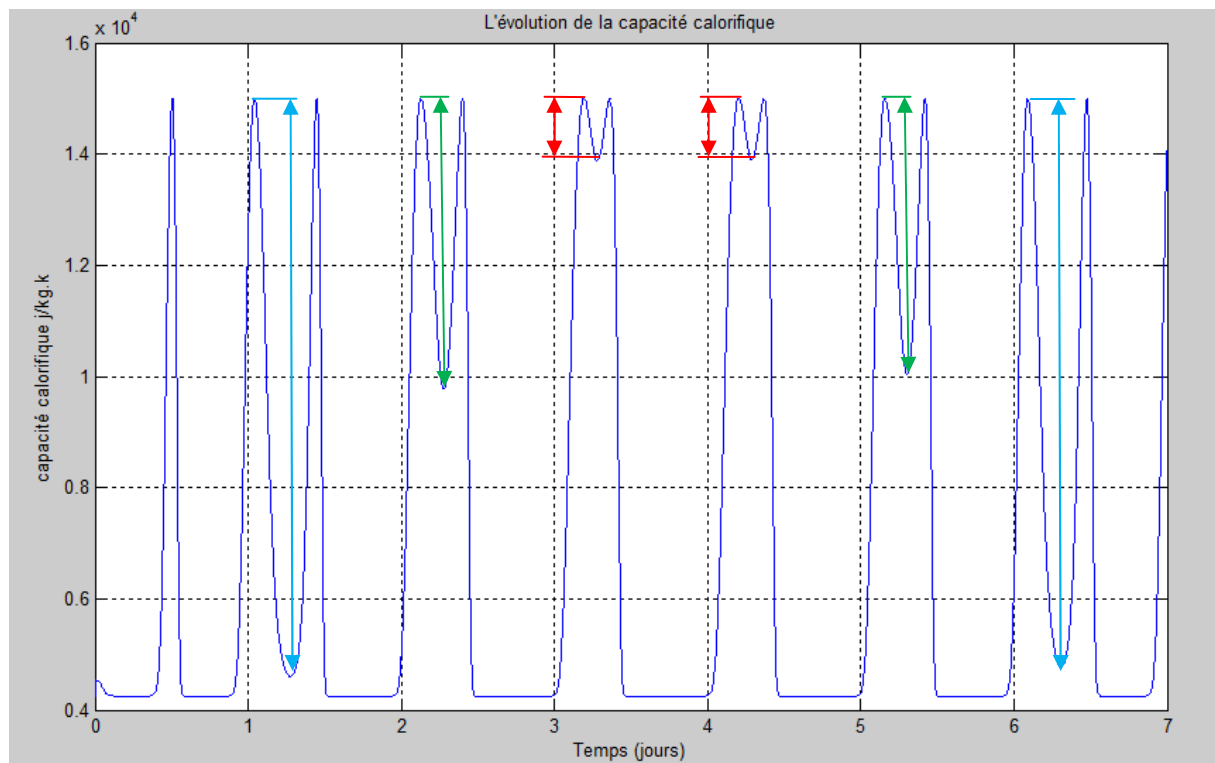


Figure IV. 27. L'évolution de capacité calorifique de MCP (position 1).

Pour le premier cas (position 1), le MCP fait son cycle stockage-déstockage pour tous les jours, et par conséquent il assure le gain pour les 7 jours de semaine, seulement le gain n'est pas constant. En remarque que le MCP donne le gain le plus important quand il est vraiment le temps pour solidifier (les segments bleus), par la suite il donne un gain moyen pour une solidification moins importante (les segments verts), et bien sur des gains faible s'il n'est pas vraiment le temps de solidifier (les segments rouges).

On voit un cycle complètement différent du premier (position 1). Si en change l'emplacement de MCP en position 2, les résultats de ce modèle est nettement plus meilleur que la précédente. Le déroulement de la capacité calorifique de MCP dans ce cas est divisé en deux parties, la partie stockage (en rouge) quand le MCP est fondu, et la partie déstockage (en verte) quand le MCP est en cours de se solidifier, finalement le MCP passe par la température

de pic ($22,6^{\circ}\text{C}$) une seule fois. Pendant la première partie et au cours d'une journée et demi, le MCP essaye de stocker le maximum de chaleur pour ne pas traverser l'intérieur de la chambre. Passant par la deuxième partie, le MCP fait que la décharge ou bien le déstockage de chaleur, il-y-a cinq décharges dans cette partie, précisément en plein nuit. Jusqu'au là, il est remarquable de noter l'intelligence de MCP, puisque il déstocke leur maximum de chaleur si la température est assez faible (1^{er} déstockage, $T=24^{\circ}\text{C}$), la même chose avec $T=26^{\circ}\text{C}$ mais avec moins de décharge, seulement on n'a pas besoins de chaleur si la température est assez importante (2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème}).

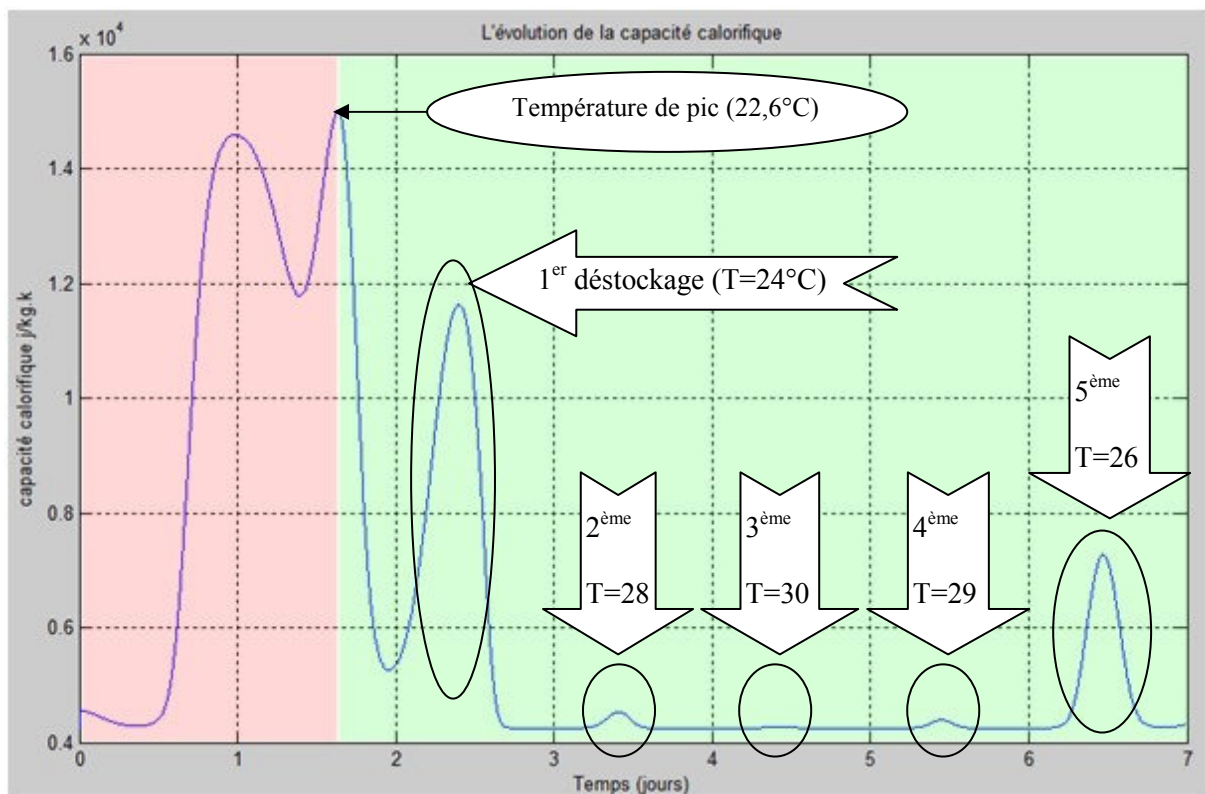


Figure IV. 28. L'évolution de capacité calorifique de MCP (position 2).

V.6. Configuration finale

D'après les essais précédant et les résultats obtenues, et tenant en compte les changements d'emplacement de MCP, les meilleurs résultats obtenus avec le MCP1, et avec le gain gagné dans les deux cas (les deux emplacements de MCP), on essaye de profiter des deux gains dans une seule configuration. Pour ce là, on propose un modèle avec deux panneaux de MCP.

Ce modèle contient un mur composé de 5 parois. De l'extérieur vers l'intérieur on a respectivement 10cm de brique, 5 mm de MCP, 5 cm de polystyrène, 5 mm de MCP et finalement 5 cm de plâtre.

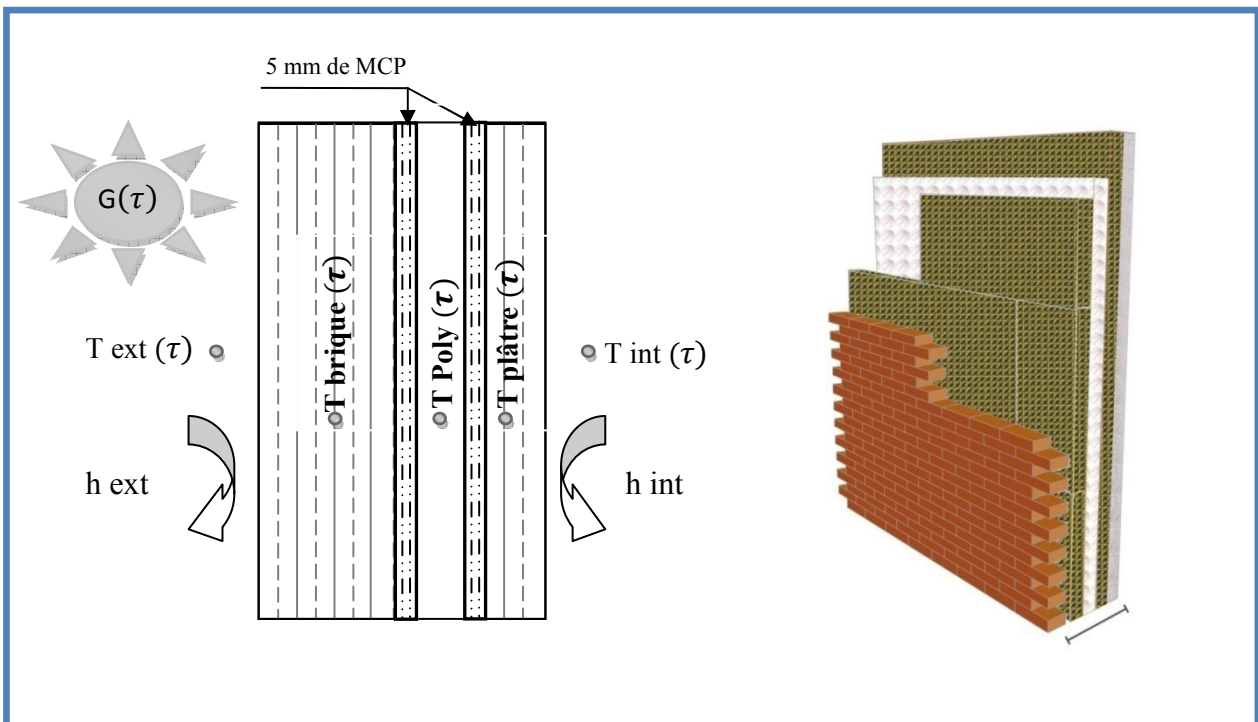


Figure IV. 29. Schéma de configuration finale.

On arrivant jusqu'au là pour faire une comparaison entre ce modèle et le modèle de 3 parois sans MCP (brique / polystyrène / plâtre).

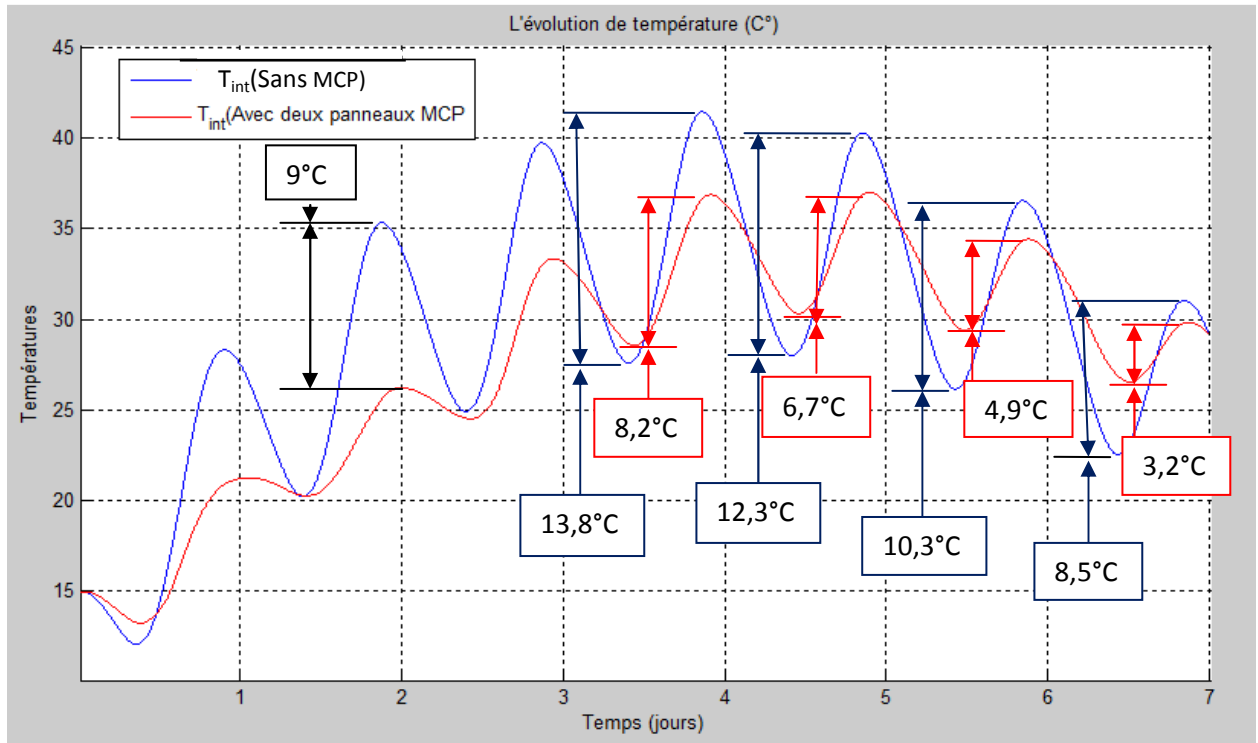


Figure IV. 30. Valeurs des températures intérieures avec et sans MCP.

Tableau IV. 8. Valeurs des gains énergétiques avec et sans MCP.

Jours	1	2	3	4	5	6	7
Gain énergétique Total (°C)	7	9	6,4	5,6	5,6	5,4	5,3
Sans / avec MCP							

La Fig IV.30 représente les valeurs des températures intérieures avec et sans MCP. On peut observer une différence appréciable entre les deux configurations, le MCP réussit à réduire les fluctuations jusqu'à 9°C de gain. En outre, le gain énergétique total varie entre 5,6 et 5,3°C dans le 4ème, 5ème, 6ème et 7ème jour, il est presque constant.

Cependant, dans la tentative d'avoir une vision plus globale concernant l'amélioration de la sensation du confort procuré par le PCM, évaluant la température quotidienne au sein de la chambre, elle est de 8,2°C comme valeur maximal le 4ème jour (le plus chaud), elle commence à diminuer jusqu'à avoir seulement 3,2°C le dernier jour, ce qui confirme l'influence de MCP sur le confort thermique.

Finalement, et a l'aide de cette configuration on a réussi à diminuer les pics de température jusqu'à 9°C comme valeur maximum et 5,3°C comme valeur minimum. Plus que ca, la configuration (brique / MCP / polystyrène / MCP / plâtre) est plus adaptée aux conditions climatique d'été et d'hiver, puisque elle travaille plus sur l'isolation thermique d'une part (brique / MCP / polystyrène ←||) et la conservation de chaleur ainsi le confort d'une autre part (||→ polystyrène / MCP / plâtre).

Sommaire

RESULTATS ET DISCUSSION	52
IV.1. DESCRIPTION GENERALE DES PROBLEMES :	54
IV.2. PAROI UNE SEULE COUCHE.....	54
▪ PAROI EN BRIQUE.....	54
IV.3. PAROI TROIS COUCHES	56
IV.3.1. PAROI EN BRIQUE / AIR / BRIQUE	56
IV.3.2. PAROI EN BRIQUE / POLYSTYRENE / BRIQUE.....	59
IV.3.3. PAROI EN BRIQUE / MCP1 / BRIQUE	61
IV.3.4. PAROI EN BRIQUE / MCP2 / BRIQUE	65
V.4. COMPARAISON DES CINQ MODELES	68
IV.5. L'INTEGRATION DE MCP DANS UNE PAROI ISOLEE.....	69
IV.5.1. MODELE SANS MCP	69
IV.5.2. LE MCP EN 1 ^{ERE} POSITION	71
▪ <i>Evaluation de modèle dans les conditions estimées de la saison d'hiver</i>	<i>74</i>
IV.5.3. LE MCP EN 2 ^{EME} POSITION.....	75
▪ <i>Evaluation de modèle dans les conditions estimées de la saison d'hiver</i>	<i>78</i>
V.5.4. INTERPRETATION DES TROIS MODELES	78
V.6. CONFIGURATION FINALE.....	82

CONCLUSION GENERALE

La réalité du dérèglement climatique, de la raréfaction des ressources disponibles et de l'augmentation du coût de l'énergie doivent modifier l'approche que nous avons sur notre environnement et notre manière d'envisager la construction et les équipements des prochains bâtiments.

Face à ces problématiques, le bâtiment (ENERGIE – ECOLOGIE - ECONOMIE) se veut précurseur d'une tendance environnementale à l'aide des dernières technologies innovatrices disponibles sur la marché international. C'est pourquoi, notre projet consiste à l'intégration des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en tant que matériaux de construction dans des pièces sélectionnées de ce bâtiment. De par leur particularité à pouvoir stocker et relâcher une quantité importante de chaleur, ils sont une solution intéressante aux problèmes de confort d'été tout en permettant des réductions de consommations de chauffage.

Pour évaluer l'impact des MCP sur les pièces sélectionnées du bâtiment, nous avons utilisé l'outil de simulation numérique matlab qui permet de calculer l'évolution de la température a travers une paroi multi couche a l'aide d'un programme de calcul. Cependant, nous nous sommes confrontés à des problèmes majeurs qui ont donc influés sur la poursuite de notre travail. En effet, d'une part, l'utilisation des MCP au sein du programme matlab et le changement de la capacité calorifique sont calculé par la méthode de Cp effectif. D'autre part, le problème précision l'or de la conduction entre deux couche du mur.

La poursuite de notre travail s'est effectuée en prenant en compte les observations précédentes. Après plusieurs essais, nous avons décidé d'appliquer 5 mm de MCP entre le mur extérieur de pièce sélectionnées du bâtiment et la paroi polystyrène. Nous avons pu observer que les MCP sont capables de stabiliser les températures résultantes des pièces, car il travaille surtout sur l'isolation thermique dans ce cas, assurant par la suite les besoins en climatisation. Lorsqu'il n'y a pas des besoins en chauffage, on a ajouté un deuxième panneau MCP pour qu'il soit le plus proche de l'intérieur.

Sommaire

CONCLUSION GENERALE 85

Références

- [1] Esteban Emilio Montenegro Iturra .« Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique. » Thèse de doctorat Faculté des études supérieures de l'Université Laval.Canada .2011. p164
- [2] K.Parson. “Human thermal environments”. London : 2nd édition, 2003 cite in Thellier, F. « Modélisation du comportement thermique de l’homme et de son habitat, une approche de l’étude du confort », étude réalisée à l’université Paul Sabatier de Toulouse, France. 1989. Pages 163
- [3] Givoni B., « L’homme, l’architecture et le climat » Editions du Moniteur, France. 1978. p39.
- [4]Hoffmann J. B. « ambiances climatisées et confort thermique » les actes du C.O.S.T.I.C .P110
- [5]RGPT. (La réglementation générale française pour la protection du travail) cite in. Bodart M.,2002
Op,cite .p.110
- [6]Liébard, A.et De Herde, A. « Traité d’architecture et d’urbanisme bioclimatiques ». Ed. Le Moniteur. Paris
2005 p. 30a
- [7]Salomon,T et Bedel,S., « La maison des [méga] watts, Le guide malin de l’énergie chez soi ». Ed. Terre vivante. Mens 2004. p. 25.
- [8]Thellier ,Françoise. « L’homme et son environnement thermique – Modélisation ». Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1999, p 65.
- [9]Izard-L. «Architectures d’été construire : pour le confort d’été», Edition Edisud, 1994, p141

- [10]Maalej, J., « Emetteurs de chaleur dans les bâtiments : comportement thermique et étude des performances». Thèse de Doctorat soutenue le 19 septembre 1994, l'Université de Valenciennes, 1994, p 151
- [11]Corinne, M. « Travail à la chaleur et confort thermique ». Les notes scientifiques et techniques de l'INRS, NST 184, décembre 1999
- [12]Moujalled, B. « Modélisation dynamique du confort thermique », thèse de doctorat, présentée à l'institut des sciences appliquées de Lyon .France. 2007
- [13]Vogt J.J. « confort physiologique .technique de l'ingénieur »..B2180. 1995.p 10
- [14]Deoux. S, « Le guide de l'habitat sain », Andorra: édition medicco, Avril 2002, p.211
- [15]Richieri, F. « Développement et paramétrage de contrôleurs d'ambiance multicritères », thèse de doctorat soutenue a L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.p302
- [16]Bonhomme, S. « Méthodologie et outils pour la conception d'un habitat intelligent »,thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2008,p.229
- [17]Izard,J-L. Kaçala,O. « Le diagramme bioclimatique » Envirobat-Méditerranée , laboratoire abc, Esna-Marseille, 2008 téléchargé le 10 Mai 2010 à partir du site <http://www.marseille.archi.fr/~izard/.2008>
- [18] Tittlein, Pierre. « Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation », université de Savoie, 2008, p 220
- [19]The demonstration component of the Joule-Thermie programme.European commission thermie. [en ligne] <http://erg.ucd.ie/ttp.html>
- [20]Ould-Hennia, A. (2003) op cit, p180
- [21] l'importance de l'isolation thermique. pdf

- [22] Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments.pdf
- [23] MEHLING H. et al. ; Heat and cold storage with PCM – An up to date introduction into basics and applications, 2008
- [24] Société BASF, www.basf.com
- [25] EKOMY ANGO S. B. : Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment :
- Développement d'un système actif à matériaux à changement de phase, Thèse de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers, 2011.
- [26] l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers : Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase, 2011-ENAM-0032
- [27] <http://www.sciencedirect.com.www.snd11.arn.dz/science/article/pii/S0378778807000643>
- [28] <http://www.sciencedirect.com.www.snd11.arn.dz/science/article/pii/S0360132312002636>
- [29] <http://www.sciencedirect.com.www.snd11.arn.dz/science/article/pii/S1359431107003547>

Résumé

Ce Projet de fin d'étude s'articule autour de l'utilisation des Matériaux à changement de Phase (MCP) dans les bâtiments de futur. Ils permettent de stocker et de relâcher l'énergie provenant des apports solaires ou internes, ils sont devenu une solution intéressante pour réduire les consommations énergétiques et pour améliorer le confort thermique au sein d'un bâtiment. Une modélisation mathématique de transfert thermique durant le fonctionnement instationnaire a été utilisée pour calculer l'évolution de la température à travers une paroi multicouche qui contient du MCP. Les modèles proposés sont résolus numériquement en utilisant la méthode de différence finie, La résolution matricielle est assurée par la méthode itérative implicite en utilisant l'algorithme TDMA, les résultats obtenus sont déterminés pour une semaine du temps.

Abstract

This End-of-study Project is based on the use of Phase Change Materials (PCM) in the future building. They can store and release energy from solar or internal gains. They are an attractive solution to reduce the energy consumptions and to improve the thermal comfort in a building. Mathematical modeling of non-stationary heat transfer during operation was used to calculate the evolution of the temperature throughout a multilayered wall, comprising the MCP. The proposed models are solved numerically using the finite difference method, the raster resolution is ensured by the implicit iterative method using TDMA algorithm, the results obtained are determined for a week time.

ملخص

ويتركز هذا المشروع لدرجة ماستير على استخدام مرحلة تغيير المواد (PCM) في مباني المستقبل. و التي يمكنها تخزين وإطلاق الطاقة من المكاسب الشمسية والداخلية، والتي تشكل حلا مميزا للحد من استهلاك الطاقة وتحسين الراحة الحرارية في المباني. تم استخدام المذمجة الرياضية لنقل الحرارة أثناء التشغيل و كذا حساب تطور درجة الحرارة من خلال جدار متعدد الطبقات يحتوي على MCP. تحل النماذج المقترحة عدديا باستخدام طريقة الفروق المحددة، وتكون حلول المصفوفة من خلال طريقة تكرارية ضمنية باستخدام خوارزمية TDMA، يتم تحديد النتائج التي تم الحصول عليها لفترة أسبوع.