

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



**MEMOIRE**

PRESENTE AU

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, FACULTE DES TECHNOLOGIES

DE L'UNIVERSITE DE BLIDA

Département de Génie mécanique

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

**MASTER**

EN GENIE MECANIQUE

**OPTION :SYSTEMES ENERGETIQUES ET THERMIQUES AVANCEES**

**THEME**

**Etude de l'apport des matériaux à changement de phase pour la  
climatisation passive**

Présenté par : **M<sup>r</sup> BOUITNA MOHAMED**

Encadré par : **Dr ELHADI BOUGUERRA**

Année Universitaire

2013/2014

# *Dédicace*

*Je dédie cette thèse*

*A ma très chère mère*

*A mon cher père*

*A mes très chers et formidables frères et sœurs*

*A toute ma famille*

*A mes très chères amis et collègues*

# *Remerciements*

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU TOUT PUISSANT pour m'avoir donné le courage et la détermination nécessaire pour réaliser cette thèse de fin d'étude qui compte tant pour mon avenir intellectuel et professionnel.

Je souhaite remercier mon directeur de thèse, Dr ELHADI BOUGUERRA d'avoir accepté de m'encadrer et de m'avoir encouragé à développer mes idées. Je lui suis également reconnaissant pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Je désire en outre remercier tous mes professeurs. Ce travail est le fruit des efforts qu'ils ont fournis pour mon enseignement et ma formation. J'ai eu beaucoup de plaisir à étudier à leurs côtés.

J'adresse de sincères remerciements au président, d'avoir accepté de lire ma thèse et d'avoir présidé ma soutenance.

J'associe à ces remerciements mes examinateurs d'avoir accepté de lire et d'examiner mon travail.

Enfin, Je remercie tous le personnel de la scolarité du département de MECANIQUE, pour leur aide et leur bonne humeur. Nous avons partagé de bons moments.

**Merci à tous !**

## ***Abstract***

This work represents a numerical modelling of thermal behavior in a habitat where we integrated the phase change materials (PCM) .The numerical simulation of the studied house was realized by nodal method and a software called "BERKELEY MADONNA".This study allows us to know the influence of phase change materials on the variation of temperature in the interior of the habitation and determine the impact of phase change materials on passive cooling.

**KEY WORDS :** the phase change materials ,passive cooling ,nodal method.

## ***Résumé***

Ce travail représente une modélisation numérique de comportement thermique dans un habitat ou on a intégré des matériaux à changement de phase (MCP). La simulation numérique de la maison étudiée est réalisée par la méthode nodale et un logiciel appelé (BERKELEY MADONNA).L'étude permet de connaître l'influence des MCP sur la variation de la température à l'intérieur de l'habitation et de déterminer l'impact des MCP sur la climatisation passive.

**MOTS CLES :** Les matériaux à changement phase, climatisation passive, la méthode nodale.

## ***ملخص :***

هذا العمل عبارة عن تمثيل رقمي للسلوك الحراري في مسكن أدخلنا عليه مواد متغيرة الحالة (MCP). المحاكاة الرقمية للمنزل استعملت فيها طريقة العقدية وبرنامج يسمى (BERKELEY MADONNA)

هذه الدراسة مكنتنا من معرفة تأثير مواد متغيرة الحالة على درجة الحرارة داخلية للمنزل وتحديد الأثر المواد متغيرة الحالة على التبريد بدون الأجهزة الكهربائية.

**كلمات البحث:** مواد متغيرة الحالة، تبريد بدون أجهزة كهربائية، طريقة العقدية.



## SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : généralité sur les MCP</b>	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Méthode de stockage de l'énergie thermique .....	3
1.3 Définitions de base.....	4
1.4 Matériaux à changement de phase dans les bâtiments.....	8
1.5 Type des MCP.....	8
1.6 Critères de sélection un MCP.....	10
1.7 Analyse des systèmes de stockage d'énergie à base de MCP dans le bâtiment.....	10
1.8 Procédures d'intégration des MCP.....	12
1.9 Utilisations passives des MCP en bâtiment.....	12
1.10 Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment.....	13
1.11 Autre intégration des MCP dans le bâtiment.....	15
1.12 Utilisation active des MCP dans le bâtiment.....	16
1.13 Comparaison des paramètres caractéristiques des échangeurs passifs et actifs.....	18
1.14 Les avantages et les inconvénients des MCP.....	18
<b>Chapitre 2 : étude théorique</b>	
2.1 Introduction .....	20
2.2 Plan de la maison choisie.....	20
2.3 Description des différents éléments constituant la maison.....	20
2.4 Apports ou pertes de chaleur par introduction de l'air extérieur.....	23
2.5 Modélisation des différents transferts de chaleur dans un habitat.....	23
2.6 Les données climatiques.....	26
2.7 Intégration des matériaux à changement de phase.....	27
2.8 Principe de l'analyse thermique par la méthode nodale.....	29
2.9 Modèle thermique .....	33
<b>Chapitre 3 : résultats et discussion</b>	
3.1 Résultats de la simulation .....	36
3.2 Besoin en climatisation .....	44
3.3 Conclusion .....	45
Conclusion générale .....	47



## LISTES DES FIGURES

<b>N° de la figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure 1</b>	Consommation énergétique finale en Algérie par secteur en 2010	2
<b>Figure 2</b>	Différentes méthodes possibles du stockage du chaud et du froid	4
<b>Figure 3</b>	Température en fonction de la Chaleur	4
<b>Figure 4</b>	Micro encapsulation	6
<b>Figure 5</b>	Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau	8
<b>Figure 6</b>	Différents modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment	12
<b>Figure 7</b>	Evolution des températures dans les cellules jumelées contenant de l'enduit avec et sans MCP au cours d'une journée d'été ensoleillée dans le cadre du projet RETERMAT	14
<b>Figure 8</b>	Modèle d'un mur trombe à base de MCP	15
<b>Figure 9</b>	plan de la maison	20
<b>Figure 10</b>	coupe sur un mur externe	21
<b>Figure 11</b>	Coupe sur le mur interne	22
<b>Figure 12</b>	Rayonnement solaire sur le site de BLIDA pour le mois juin	27
<b>Figure 13</b>	Chaleur spécifique en fonction de température	28
<b>Figure 14</b>	Coupe sur un mur (choix des nœuds)	33
<b>Figure 15</b>	Calcul de la conductance équivalente	33
<b>Figure 16</b>	Schéma électrique équivalent	34
<b>Figure 17</b>	variation de la température de la chambre 1 à BLIDA	36
<b>Figure 18</b>	variation de la température du séjour à BLIDA	37
<b>Figure 19</b>	variation de la température du séjour à DJELFA ( $T_m=24^{\circ}\text{c}$ )	39
<b>Figure 20</b>	variation de la température du séjour à DJELFA ( $T_m=25^{\circ}\text{c}$ )	40
<b>Figure 21</b>	variation de la température pour 3 jours de mois juillet dans le séjour à BLIDA (18, 19, et 20 juillet)	42
<b>Figure 22</b>	variation de la température du plâtre du plafond pendant 3 jours de juin à Blida (10, 11, et 12 juin)	43
<b>Figure 23</b>	La température de l'air extérieur pour les deux sites	48
<b>Figure 24</b>	Le rayonnement reçu sur un plan horizontal pour les deux sites	49
<b>Figure 25</b>	le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers l'est pour les deux sites	50
<b>Figure 26</b>	Le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers le sud pour les deux sites	51
<b>Figure 27</b>	le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers l'ouest pour les deux sites	52
<b>Figure 28</b>	Le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers le nord pour les deux sites	53



<b>Figure 29</b>	Schéma électrique équivalent (chambre 1)	54
<b>Figure 30</b>	Schéma électrique équivalent (salle de bain)	54
<b>Figure 31</b>	Schéma électrique équivalent (chambre 2)	55
<b>Figure 32</b>	Schéma électrique équivalent (cuisine)	55
<b>Figure 33</b>	Schéma électrique équivalent (débarras)	56
<b>Figure 34</b>	Schéma électrique équivalent (séjour)	56

## Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
<b>Qsen</b>	Apport par chaleur sensible	W
<b>qvinf</b>	Débit de l'air infiltré	m <sup>3</sup> /s
<b>qvan</b>	Débit de l'aire neuf	m <sup>3</sup> /s
<b>hc</b>	coefficient d'échange convectif superficiel	W/m <sup>2</sup> .K
<b>ΔT</b>	écart de température entre l'air et la surface de la paroi	K
<b>U</b>	Coefficient d'échange global	W/m <sup>2</sup> .K
<b>α</b>	Coefficient d'absorption	%
<b>S</b>	Surface	m <sup>2</sup>
<b>q</b>	Rayonnement global reçu par une surface unitaire	W/m <sup>2</sup>
<b>α<sub>vit</sub></b>	Coefficient d'absorption du vitrage	%
<b>τ<sub>vit</sub></b>	Coefficient de transmission	%
<b>Q<sub>ab</sub></b>	Flux absorbé	W
<b>Q<sub>tr</sub></b>	Flux transmis	W
<b>A</b>	Albédo	%
<b>C<sub>sl</sub></b>	Chaleur spécifique de la phase liquide	J/kg.K
<b>ΔH</b>	l'enthalpie de fusion latente	J/kg
<b>T<sub>m</sub></b>	Température de fusion	°c
<b>β</b>	paramètre de forme	/
<b>2τ</b>	la plage dans laquelle 99% de le changement de phase se produit	/
<b>C<sub>peq</sub></b>	chaleur spécifique d'un mélange plâtre MCP	J/kg.K
<b>C<sub>i</sub></b>	Capacité thermique d'un nœud	J/K
<b>ρ<sub>i</sub></b>	La masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
<b>c<sub>i</sub></b>	Chaleur spécifique	J/kg.K
<b>V<sub>i</sub></b>	Volume d'un nœud	m <sup>3</sup>
<b>φ<sub>CON</sub></b>	Flux conductif	W
<b>φ<sub>CONV</sub></b>	Flux convective	W
<b>φ<sub>RAY</sub></b>	Flux rayonné	W
<b>φ<sub>FLU</sub></b>	Flux due au transport fluide	W
<b>Q<sub>i</sub></b>	Source de flux	W
<b>G</b>	Conductance	W/K
<b>T<sub>ext</sub></b>	Température extérieur	°C

**Liste des tableaux**

<b>N° de tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 1</b>	Certaines propriétés thermiques de certains MCP	9
<b>Tableau 2</b>	Différents critères à respecter lors du choix d'un MCP pour une application donnée dans un bâtiment	10
<b>Tableau 3</b>	Quelques dispositions des MCP dans le bâtiment	11
<b>Tableau 4</b>	Comparaison des paramètres caractéristiques des échangeurs passifs et actifs	18
<b>Tableau 5</b>	Les caractéristiques physiques des éléments constituant les murs extérieurs	21
<b>Tableau 6</b>	Les caractéristiques physiques des éléments constituant les murs extérieurs	22
<b>Tableau 7</b>	Les caractéristiques physiques de toit	22
<b>Tableau 8</b>	Les caractéristiques physiques du plancher bas	23
<b>Tableau 9</b>	Coefficient de convection	24
<b>Tableau 10</b>	coefficient d'échange global	25
<b>Tableau 11</b>	Albédo des sites BLIDA & DJELFA	27
<b>Tableau 12</b>	Propriétés thermo physique de MCP	28
<b>Tableau 13</b>	Expression élémentaire des différentes conductances	31
<b>Tableau 14</b>	Consommation en climatisation pour les deux sites	45

### **1.1 Introduction :**

Les matériaux à changement de phase ont été un sujet principal de recherche ces 20 dernières années [6]. Ils ont été largement étudiés par de nombreux auteurs avec une focalisation sur leurs propriétés, applications, processus de transfert de chaleur et de sélection des matériaux.

Les matériaux à changement de phase ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente, la chaleur étant absorbée ou restituée du passage de l'état liquide et vice versa. Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et la restituent lorsque la température diminue. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande, plus les propriétés de stockage (et de restitution) de la chaleur seront intéressantes. Pour le stockage de l'énergie, d'autres changements de phase sont théoriquement envisageables : solide-solide, solide-gaz, liquide-gaz, mais en pratique c'est le passage solide-liquide qui offre le plus d'applications (on peut tout de même noter l'exception des fluides frigorigènes qui sont très utilisés). La plupart des transitions liquide-gaz et solide-gaz impliquent des volumes importants ou de hautes pressions pour stocker le matériau à son état gazeux. De plus, ces transitions demandent des températures (et donc de l'énergie) plus importantes que dans le cas des transitions solide-liquide. Quant aux transitions solide-solide, elles sont généralement très lentes et ont de faibles énergies de transformation [7].

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.

### **1.2 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 ultérieurement. 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. [8]

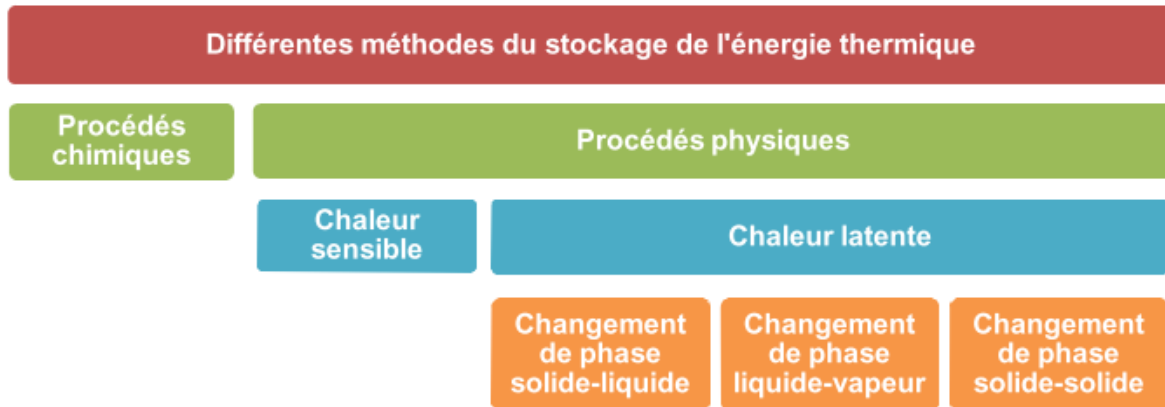


Figure 2 : Différentes méthodes possibles du stockage du chaud et du froid

### 1.3 Définitions de base

#### 1.3.1 Chaleur latente :

Il s'agit de la chaleur échangée avec le milieu extérieur lors d'un changement d'état : solidification, fusion, ébullition, etc. Le changement de phase se traduit par un gain ou une perte de chaleur latente [8].

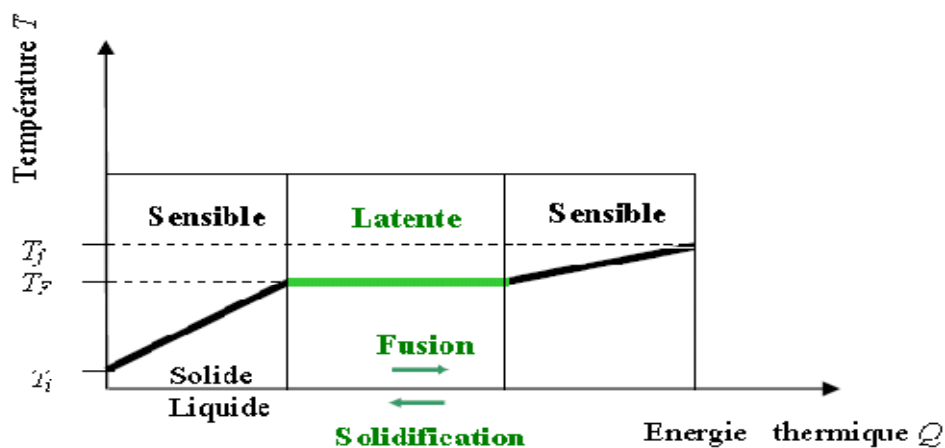


Figure3 : Température en fonction de la Chaleur

#### 1.3.2 Chaleur sensible :

C'est la quantité de chaleur échangée, sans transition de phase physique, entre deux corps formant un système isolé. Le qualificatif sensible se justifie par le fait que l'échange de

chaleur, sans changement de phase physique, correspond à une variation de la température du corps, laquelle peut être ressentie ou mesurée pour un observateur. En cela, la chaleur sensible s'oppose à la chaleur latente, qui, elle, ne se traduit pas par un changement de température, mais par un changement de phase[8].

### **1.3.3 Cinétique de fusion :**

Les vitesses de fusion des MCP sont relativement faibles. S'il faut trop de temps au matériau pour accumuler ou libérer de l'énergie, celui-ci perd alors en efficacité dans les applications pratiques. Mais cette cinétique peut être améliorée par l'introduction de solvants à forte polarité au sein du MCP [8].

### **1.3.4 Enthalpie de fusion :**

Il s'agit de l'énergie absorbée sous forme de chaleur par un corps lorsqu'il passe de l'état solide à l'état liquide à température et pression constantes. L'enthalpie échangée lors du changement d'état résulte de la modification (rupture ou établissement) de liaisons interatomiques ou intermoléculaires.

On nommait autrefois chaleur latente cette grandeur, en référence à la vision substantialiste de la chaleur (considérée comme un fluide, une substance, immatérielle) qui était largement répandue jusqu'au XIXe siècle avec notamment les travaux de Joseph Fourier sur cette dernière [8].

### **1.3.5 Macro encapsulation :**

Dispositif par lequel un produit est emballé dans des contenants aux dimensions décimétriques à métriques (tubes, sachets, etc). Les MCP macro encapsulés peuvent être utilisés comme parties constituantes d'échangeur de chaleur. Ces MCP macro encapsulés sont généralement fabriqués pour chaque application visée.

L'encapsulation semble être une bonne solution au confinement des MCP. En effet, lorsque ce dernier est à l'état liquide, il n'a plus de tenue physique et nécessite un contenant. La difficulté technologique consiste à maximiser les échanges thermiques par tous les moyens.

La faible conductivité thermique des MCP peut devenir dans le cas d'une macro encapsulation, un élément limiteur des transferts. De plus une attention particulière est à

apporter au décollement entre le MCP et son contenant qui peut apparaître après plusieurs cycles de fusion-consolidation[8].

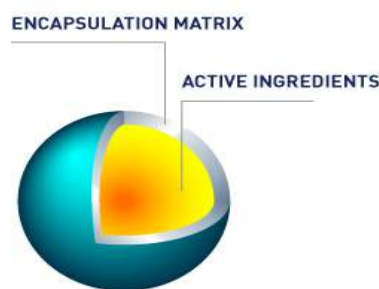
### 1.3.6 Micro encapsulation :

Tout l'intérêt des microcapsules réside dans la présence d'une membrane qui isole le contenu du milieu extérieur.

Les MCP ainsi encapsulés peuvent être ensuite utilisés dans un système de stockage d'énergie latente dans lesquels ils sont apposés en amas et le fluide vecteur de l'énergie à stocker (air ou eau) traverse alors cet amas.

L'avantage de cette géométrie interne de stockeur en amas de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange (surface sphérique). D'autre part, la faible conductivité thermique n'est pas un facteur limitant des transferts du fait des petites dimensions des vésicules. Néanmoins, il est possible que des cycles de fusion-solidification répétés induisent l'apparition d'un décollement entre le MCP et sa vésicule contenante, et ainsi une augmentation forte et préjudiciable de la résistance thermique vésicule-MCP.

L'autre avantage des microcapsules est qu'ils sont aisés à manipuler et que leur intégration est adaptable aisément à tout système passif tels que des matériaux de constructions de type béton en plâtre ou panneau bois reconstitué ou système actif. Procédé par lequel on enferme un produit dans des microparticules [8].



**Figure4 :** Micro encapsulation

Si ces microparticules sont creuses (vésiculaires), on parle de microcapsules, mais si elles sont pleines (matricielles), on parle de microsphères. La taille des microparticules varie de  $1\mu\text{m}$  à  $1\text{mm}$ , et ces dernières peuvent être biodégradables ou non.

Tout l'intérêt des microcapsules réside dans la présence d'une membrane qui isole le contenu du milieu extérieur.

Les MCP ainsi encapsulés peuvent être ensuite utilisés dans un système de stockage d'énergie latente dans lesquels ils sont apposés en amas et le fluide vecteur de l'énergie à stocker (air ou eau) traverse alors cet amas.

L'avantage de cette géométrie interne de stockeur en amas de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange (surface sphérique). D'autre part, la faible conductivité thermique n'est pas un facteur limitant des transferts du fait des petites dimensions des vésicules. Néanmoins, il est possible que des cycles de fusion-solidification répétés induisent l'apparition d'un décollement entre le MCP et sa vésicule contenant, et ainsi une augmentation forte et préjudiciable de la résistance thermique vésicule-MCP. L'autre avantage des microcapsules est qu'ils sont aisés à manipuler et que leur intégration est adaptable aisément à tout système passif tels que des matériaux de constructions de type béton en plâtre ou panneau bois reconstitué ou système actif [8].

### **1.3.7 Résistance au transfert thermique :**

Lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique a lieu à l'interface solide/liquide. Lorsque le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse derrière lui une nouvelle phase que le flux thermique doit traverser avant d'atteindre le front en question. Plus l'épaisseur de cette phase est importante et plus la résistance thermique qu'elle engendre est grande.

### **1.3.8 Surfusion :**

La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation. Elle n'apparaît que pour certains types de MCP tels que les matériaux inorganiques. Les solutions pour remédier à ce problème sont multiples :

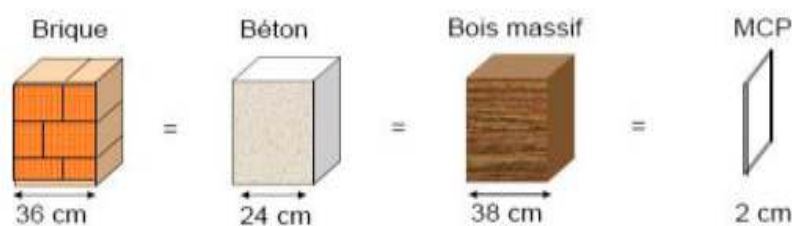
- Incorporer des additifs tensio-actifs.
- Faciliter la nucléation au moyen de cristaux solides stables autour de la température de cristallisation : ceux-ci servent de points d'accroche pour la cristallisation du matériau.
- Garder une zone froide à l'intérieur du matériau.

La surfusion empêche notamment l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température voulue [8].



## 1.4 Matériaux à changement de phase dans les bâtiments :

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. D'après le fabricant de MCP, BASF micronal, une paroi contenant 2 cm de MCP fabriqué par BASF a la même Performance en termes d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm ou un mur en béton d'épaisseur de 24 cm ou du bois massif d'épaisseur 38 cm [9].



**Figure 5 :** Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau.

Dans les systèmes de stockage d'énergie pour les bâtiments, on utilise en général les transformations solide/liquide parce qu'elles ont des enthalpies de changement de phase élevées (quoiqu'en générale inférieures à celles des transformations gaz/solide et gaz/liquide) et des expansions volumiques réduites (<10%) lors de la fusion [9].

## 1.5 Type des MCP

### 1.5.1 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°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 [9].

### 1.5.2 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 [9].

### 1.5.3 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		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.4H2O	18.5	231
	Mn(NO3)2 .6H2O	25.8	125.9
	Na2SO4.10H2O	32	251
PCMs Eutectiques	66,6%CaCL2.6H2O+33,3%Mgcl20.6H2O	25	127
	48%CaCL2+4,3% NaCl+47,3%H2O	26.8	188
	47%Ca(NO3)2.4H2O+53%Mg(NO3)2 6H2O	30	136

**Tableau 1** : Certaines propriétés thermiques de certains MCP [9]

### 1.6 Critères de sélection 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 tableau 2 ci-dessous :

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

**Tableau 2** : Différents critères à respecter lors du choix d'un MCP pour une application donnée dans un bâtiment [8]


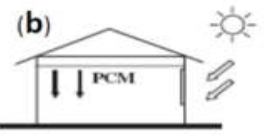
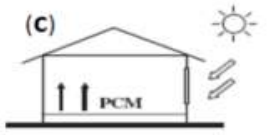

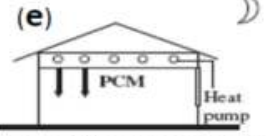
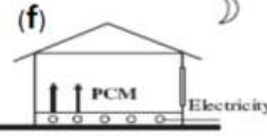



### 1.7 Analyse des systèmes de stockage d'énergie à base de MCP dans le bâtiment :

Bien que les études concernant l'utilisation des MCP dans le bâtiment aient commencé dès la moitié du XXème siècle, elles ont pris un regain de plus en plus important au cours de ces dernières années du fait des éléments suivants :

\* La grande différence de consommation d'énergie entre les heures de pointe et les heures creuses, pour le rafraîchissement (été) et pour le chauffage des bâtiments (hiver et saisons intermédiaires).

\* La grande différence de consommation d'énergie entre les heures de pointe et les heures creuses, pour le rafraîchissement (été) et pour le chauffage des bâtiments (hiver et saisons intermédiaires).

\* une volonté d'utilisation rationnelle plus efficace des unités de production de chauffage et refroidissement, il s'agit ici essentiellement de ne consommer de l'énergie électrique que sur des tranches horaires à faible coût, pour utiliser l'énergie produite sur d'autres tranches horaires qui correspondent au besoin (tableau 3, schéma (e) et (f)). L'utilisation de ces MCP en assistance au chauffage ou au refroidissement est, soit passive, soit active (tableau 3, schémas (a) (b) (c) ou (d) (e) (f)). Concernant l'utilisation de ceux-ci en assistance au rafraîchissement, une phase de régénération de MCP (solidification) nocturne est nécessaire, afin d'assurer une capacité de stockage de chaleur diurne quotidienne ; celle-ci peut être

	MURS	PLAFONDS / TOITURE	PLANCHERS
CHAUFFAGE SOLAIRE PASSIF	 <p>(a) Avec un rayonnement solaire diurne</p>	 <p>(b) Avec un rayonnement solaire diurne</p>	 <p>(c) Avec un rayonnement solaire diurne</p>
CHAUFFAGE ACTIF	 <p>(d) Avec un système de capteurs solaires</p>	 <p>(e) Avec l'utilisation à faible coût de l'électricité la nuit</p>	 <p>(f) Avec l'utilisation à faible coût de l'électricité la nuit</p>
VENTILATION NOCTURNE	 <p>(g) Avec un renouvellement d'air nocturne</p>	 <p>(h) Avec un renouvellement d'air nocturne</p>	 <p>(i) Avec un renouvellement d'air nocturne</p>

passive (free-cooling) ou active (renouvellement d'air nocturne par ventilation forcée (tableau 3, schéma (g) (h) (i)).

**Tableau 3 :** Quelques dispositions des MCP dans le bâtiment [9].

### 1.8 Procédures d'intégration des MCP :

Parmi les différents moyens d'intégration de MCP dans les bâtiments étudiés dans la littérature, nous disposons actuellement de 2 méthodes d'utilisation de MCP dans les bâtiments : l'intégration directe et l'encapsulation avant intégration.

**Intégration directe** : les MCP sont mélangés avec des matériaux de construction (en général le plâtre ou le béton) lors de la fabrication ou alors incorporés dans les pores d'un matériau porteur (imprégnation).

**\*Encapsulation avant intégration** : les MCP sont soit en micro encapsulation, soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction, soit dans les échangeurs de chaleur. Ces mises en forme offrent un double avantage : d'une part, la surface d'échange entre le MCP et l'extérieur augmente considérablement, facilitant d'autant la transition de phase, et d'autre part, les risques de fuites, lorsque le MCP est à l'état liquide, sont réduits à zéro [8].

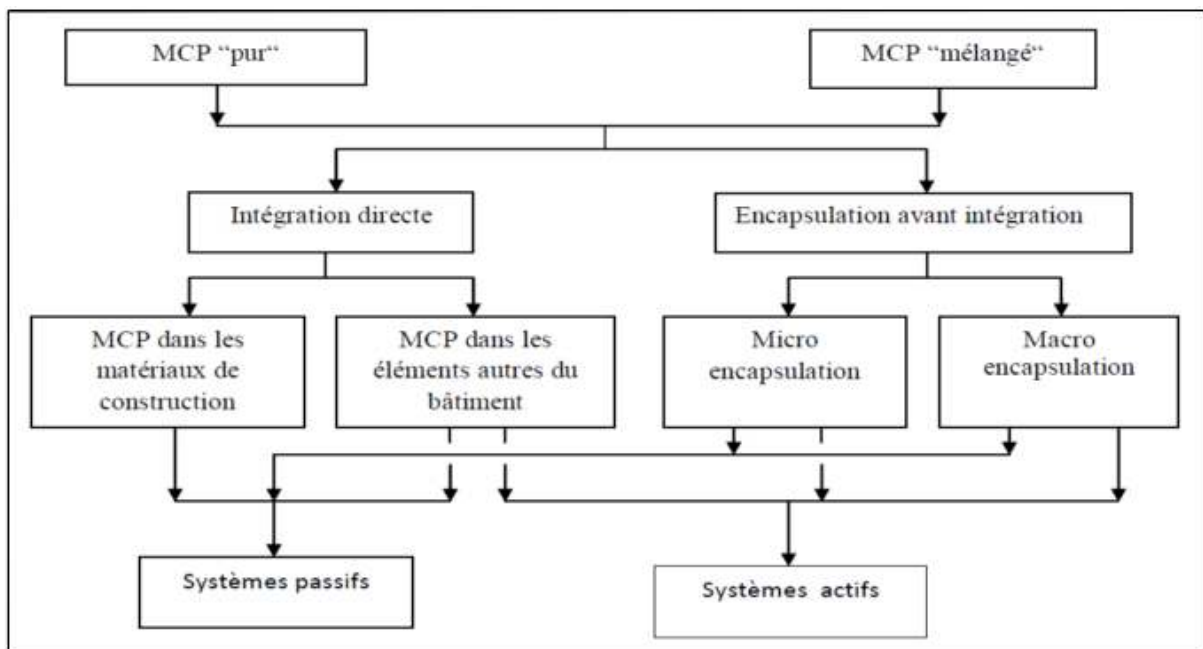


Figure 6 : Différents modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment [9].

### 1.9 Utilisations passives des MCP en bâtiment :

Il s'agit ici de l'utilisation des MCP par intégration de ceux-ci dans les divers éléments constituant un bâtiment : enveloppes, plafonds, planchers, parois, menuiseries, mobiliers, etc. Le stockage et le déstockage d'énergie s'effectue au gré des échanges de chaleur avec l'air intérieur du bâtiment et l'environnement de celui-ci (air extérieur, rayonnement solaire, rayonnement nocturne, etc.). Ces échanges sont dits passifs car ils ne sont pas actionnés par un système mécanique, à l'exception parfois d'une ventilation nocturne forcée du bâtiment.

-Que ce soit en utilisation en termes d'assistance au refroidissement ou d'assistance au chauffage, un système passif ne permet pas de corrélérer facilement les besoins aux productions assurés par les systèmes énergétiques.

-Il y a une difficile accessibilité aux MCP, c'est-à-dire il existe des résistances thermiques de conduction et de convection naturelle (généralement) entre la source de l'énergie à stocker et le MCP stocké. Ces résistances sont un frein au stockage-déstockage de cette énergie.

### **1.10 Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment :**

L'intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment est la plus utilisée parmi les utilisateurs passifs des MCP dans le bâtiment parce que la surface d'échange de chaleur est grande. Ils sont capables de combiner les fonctions de stockeur de chaleur et élément de construction. En général, la profondeur de l'échange de chaleur est courte. Ils sont en général installés dans les bâtiments pour contribuer à l'amélioration du rafraîchissement des résidences.

Les structures les plus fabriquées sont : les plaques de plâtre, les enduits, les murs trombes à base de MCP, les blocs de béton.

#### **a) Les plaques de plâtre :**

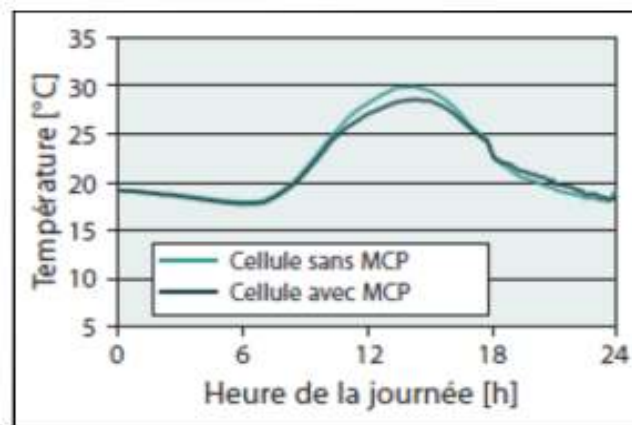
Les plaques de plâtre combinées à un MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. Les MCP utilisés sont en général micro encapsulés. Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit par ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces plaques de plâtres-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composé d'un isolant (le plus souvent en polystyrène) et du plâtre-MCP.

#### **b) Les enduits :**

Actuellement sur le marché, les enduits à base de MCP (fabriqués par Delta ®, maxit clima, etc) existent sous la forme d'un enduit prédosé « prêt-à-gâcher ». Ils sont à appliquer sur une épaisseur d'environ 15 mm. Les travaux sur les enduits à base de MCP les plus connus sont ceux du projet « RETERMAT ». Le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) en Belgique, dans le cadre du projet en collaboration avec trois autres centres de recherche (CRM, CENTEXBEL, CERTECH) a mis au point un enduit contenant 30 % de MCP.

Sur le plan expérimental, de nombreuses mesures ont été effectuées sur deux cellules ayant une surface au sol de 9 m<sup>2</sup> chacune. Elles renfermaient chacune une surface vitrée de 3 m<sup>2</sup> orientée au sud. L'une d'entre elles était revêtue d'enduits à MCP et l'autre avec un enduit traditionnel de même épaisseur de 1,5 cm. Les mesures de températures ont pu être effectuées pour différentes périodes d'ensoleillement.

Les premiers résultats ont démontré que les écarts de température sont de l'ordre de 3 °C entre les deux cellules en ce qui concerne la face interne de l'enveloppe de la cellule. Au niveau du climat intérieur des cellules, une différence de température de 1 °C à 1,5 °C entre les deux cellules a été mesurée pour la température maximale journalière atteinte lors des périodes chaudes et/ou très ensoleillées d'été.



**Figure 7 :** Evolution des températures dans les cellules jumelées contenant de l'enduit avec et sans MCP au cours d'une journée d'été ensoleillée dans le cadre du projet RETERMAT.

### a) Murs trombes à base de MCP :

Les murs trombes à base MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 20 cm environ d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique. Différents MCP ont été expérimentés pour avoir le meilleur rendement thermique d'un mur

Trombe à base de MCP : Askew (1978) a utilisé de la cire de paraffine, Farouk et Gucero (1979) ont utilisé un mélange de sel de Glauber et de la cire sunocoP-116. Ces différents travaux ont montré que les murs trombe à base de MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou plastique que les murs trombe traditionnels. Ils sont plus légers que les murs trombe traditionnels. Knowler (1983) a utilisé de la cire de paraffine CG avec des additifs métalliques pour augmenter la conductivité globale et l'efficacité du mur trombe à base de MCP. Ces travaux sont encore au stade expérimental.



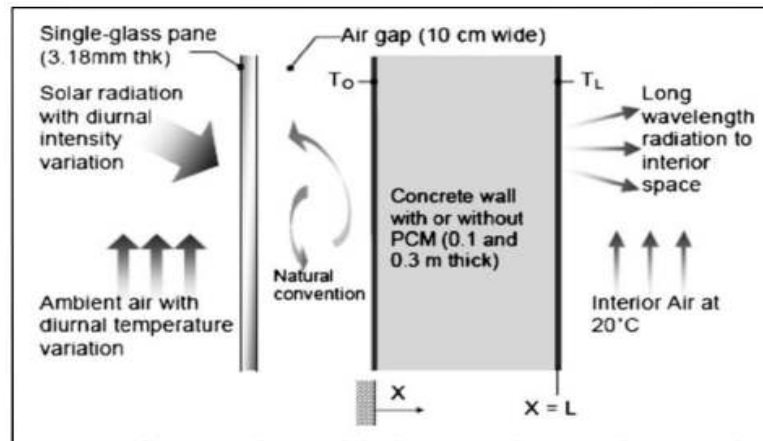


Figure 8 : Modèle d'un mur trombe à base de MCP

**a) Bloc de béton :**

Le centre d'étude du bâtiment (université de Concordia) à Montréal au Canada a mis au point des blocs de béton à base MCP. Ils ont utilisé différents MCP : la paraffine (PAR), stérate de butyle (BS), dodécanol (DD) et polyéthylène (PEG).

Au cours des différents essais sur le rendement thermique de ces blocs de béton-MCP, il ressort que les blocs de béton-MCP à base de paraffine ont la capacité de stockage d'énergie (par mètre carré) plus importantes que les autres MCP expérimentés.

**1.11 Autre intégration des MCP dans le bâtiment :**

D'autres compartiments du bâtiment sont utilisés pour l'intégration des MCP. Néanmoins, la plupart sont encore au stade expérimental. Les travaux les plus avancés sont l'intégration des MCP dans les fenêtres, les rideaux de fenêtres, le plancher et le plafond.

**a) Intégration des MCP dans les fenêtres :**

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les plus connus sont ceux du cabinet architectural « GlassX » fondé par Dietrich Schwarz. Il a mis au point les fenêtres « GlassX ». Ces dernières sont composées de quatre éléments au sein d'un seul ensemble fonctionnel : une isolation translucide, une protection contre les surchauffes estivales, un matériau à changement de phase intégré dans des conteneurs hermétiquement scellés en polycarbonate peints en gris pour favoriser l'efficacité de l'absorption. En général, c'est un MCP à base de sel hydraté avec une température de fusion aux alentours de 27 °C qui est utilisé. Cette paroi est scellée par un verre de sécurité trempé de 6 mm qui peut être agrémenté d'une sérigraphie esthétique du côté intérieur. Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est supérieure à 40



°C (été), il y a un réfléchissement total des rayons solaires sur la fenêtre. Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est inférieure à 35 °C (hiver), les rayons solaires traversent complètement la fenêtre.

### **a) Intégration des MCP dans les rideaux :**

Les rideaux à base de MCP sont encore au stade de l'expérimentation dans l'optique d'une amélioration du confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée, permettant ainsi aux MCP de se solidifier et à la pièce concernée de se réchauffer.

### **b) Intégration des MCP dans les plafonds et planchers :**

Les produits à base de MCP installés dans les plafonds et les planchers pour améliorer le confort du bâtiment sont en général des panneaux à base de MCP. Dans ce cas de figure, le panneau le plus connu est le panneau DuPont™ Energain®. D'autres fabricants de produits à base de MCP (Solairked, Rubitherm, Cristopia, etc) proposent un panel de panneaux à base de MCP.

## **1.12 Utilisation active des MCP dans le bâtiment**

Les systèmes actifs sont des systèmes où la circulation du fluide dans les composants est actionnée par un système mécanique (ventilateur, pompe, etc). Ce caractère actif permet d'utiliser la capacité de stockage et/ou de déstockage d'énergie à la demande, c'est-à-dire de façon non subie.

Les systèmes actifs sont composés en général de trois éléments :

- L'échangeur de stockage de l'énergie thermique de chaleur latente : C'est l'élément central du dispositif de stockage.
- Le circuit de circulation du fluide (souvent de l'air, parfois de l'eau) caloporteur.
- Un ventilateur ou une pompe qui détermine le débit de fluide.

### **Assistance au rafraîchissement des bâtiments :**

Pendant la journée, on fait circuler l'air « chaud » du bâtiment dans un système actif. Ce dernier contient des MCP solidifiés. Ces derniers soumis à une température supérieure à leur température de fusion vont fondre en absorbant la chaleur de l'air. Ensuite, on réinjecte cet air rafraîchi dans le bâtiment. Pour solidifier le MCP, durant la nuit, on fait circuler l'air extérieur au bâtiment « frais » qui a une température inférieure à la température de fusion du MCP.

### **Assistance au chauffage des bâtiments :**

Le principe est le même mais le fonctionnement s'inverse durant la journée, on fait circuler l'air « chaud » du bâtiment (ou issu d'un système de chauffage, à source d'énergie solaire ou électrique par exemple), ce qui permet de stocker la chaleur. On réchauffe le bâtiment en faisant circuler l'air « frais » de ce dernier dans ces échangeurs lorsque c'est nécessaire pendant la nuit.

Au cours de ses vingt dernières années, différents auteurs ont menés des travaux pour avoir les meilleurs systèmes actifs de type d'échangeur de chaleur Air-MCP. Parmi ses travaux, il ressort deux familles dont les travaux ont bien avancés. Il s'agit des systèmes d'échangeurs à Air-MCP avec des MCP en « plaques » et ceux contenant des MCP disposés en « amas ».

### 1.13 Comparaison des paramètres caractéristiques des échangeurs passifs et actifs :

Paramètres	Utilisation passive des MCP	Utilisation active des MCP	
		MCP en plaques	MCP en amas
Choix de MCP	Différents MCP sont expérimentés mais les plus utilisés sont la paraffine et les sels hydratés.	Il n'y a que Zalba et d'Arkar qui ont expérimentés différents types de MCP. Pour les autres, les MCP utilisés sont conçus par les auteurs.	
Encapsulation des MCP	Facile : ils intègrent en général les différents compartiments du bâtiment.	La plupart sont faciles à concevoir.	
Contenant des MCP encapsulés	Limitée.	Importante pour la plupart.	
Intégration de l'échangeur dans le système	Facile.	Difficile en général.	
Intégration du système dans le bâtiment	Facile.		Difficile en général.
Echange thermique Air-MCP	Non contrôlé.	Contrôlé bien qu'il se fasse de manière indirecte.	
Coût du système	Peu d'informations disponibles.		
Application réelle	Les expérimentations donnent des résultats encourageants.		

Tableau 4: Comparaison des paramètres caractéristiques des échangeurs passifs et actifs [8].

### 1.14 Les avantages et les inconvénients des MCP

#### Les avantages :

1-Capacité relative à emmagasiner des calories, puis à les restituer.

2-Enthalpies de changement de phase élevées et expansions volumiques réduites (<10%) lors de la fusion.

3-Apport d'inertie à un bâtiment avec faible encombrement.

4-Amélioration du confort (seulement possible dans le cas où le MCP est accouplé à une sur ventilation nocturne, une régulation précise et une bonne isolation) due à :

- Une réduction de la température maximale à l'air
- Une température de surface du mur plus basse.

5-Utilisation sous diverses formes : microcapsules intégrées dans des plaques de plâtre, des enduits, du béton.

### **Les inconvénients :**

1-Importante énergie grise requise pour la fabrication du produit

2-Diffusion dans les bâtiments encore limitée, peu de retour d'expériences et peu de produits concrets existent sur le marché.

3-Il faudrait un produit spécifique en fonction du lieu géographique et du climat.

## 2.1 Introduction :

Pour déterminer la charge de climatisation nécessaire pour assurer le confort thermique des occupants, il faut étudier tous les éléments qui interviennent dans ce contexte, les plus significatifs sont :

- Le système constructif de la maison (méthodes et matériaux de construction).
- Le climat local (variation de la température de l'air extérieur, et rayonnement solaire).
- Les apports de chaleur interne dues aux occupants et appareils électroménagers

## 2.2 Plan de la maison choisie

La maison choisie est une maison individuelle qui comprend deux chambres, une cuisine, sanitaires et un séjour d'une surface globale d'environ 102 mètre carrés.

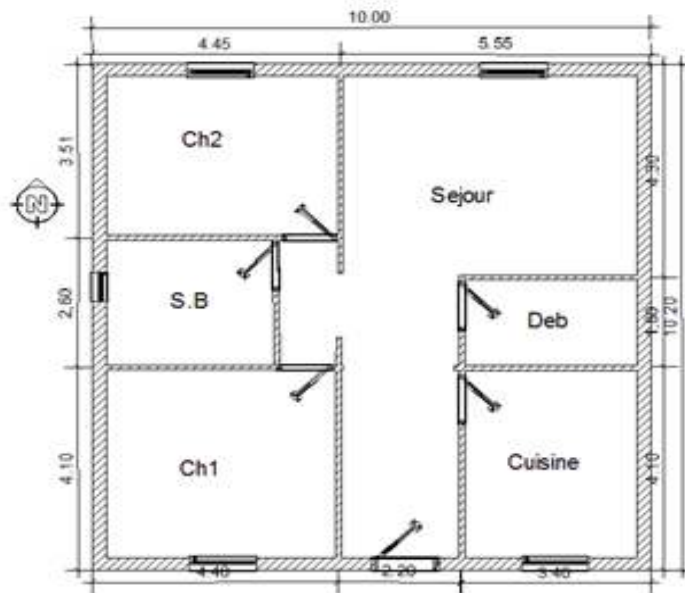


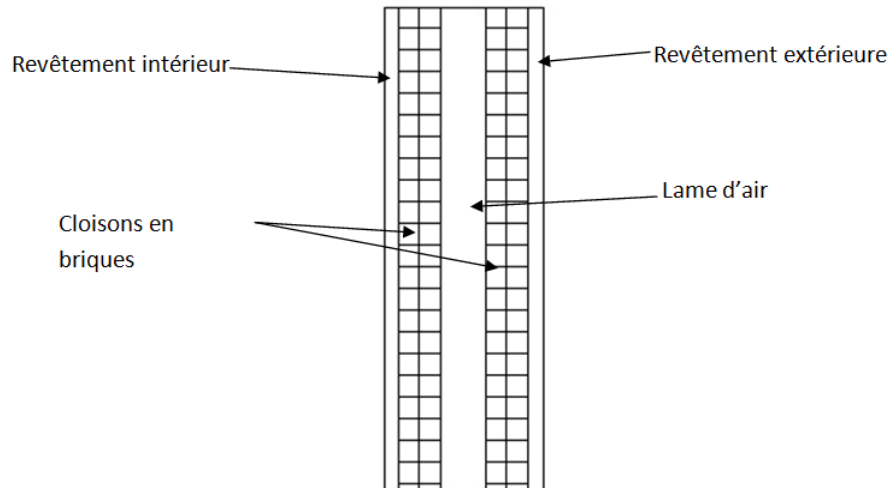
Figure 9 : plan de la maison

## 2.3 Description des différents éléments constituant la maison

### 2.3.1 Les murs :

#### a. Les murs externes

Ils sont construits en double cloison en brique avec une lame d'air non ventilée à l'intérieur et avec un revêtement extérieur en mortier de ciment d'une épaisseur de 1.5cm, et le revêtement intérieur est réalisé avec du plâtre d'une épaisseur de 1.5cm comme est montré sur la figure N°10.



**Figure 10** : coupe sur un mur externe.

La hauteur des murs est de 2.60m et les épaisseurs et caractéristiques des matériaux de construction constituant le mur sont regroupées dans le tableau suivant :

Elément	Epaisseur (cm)	Conductivité (W /m.K)	Résistance (m <sup>2</sup> .K/W)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (j/kg.K)
<b>Revêtement extérieur</b>	1.5	1.15	0.013	1900	1080
<b>Brique</b>	10	0.5	0.20	1000	920
<b>Air stagné*</b>	10	0.72	0.14	1.29	1000
<b>Plâtre</b>	1.5	0.35	0.043	850	936
<b>Vitrage</b>	0.3	2.9	0.001	1500	730

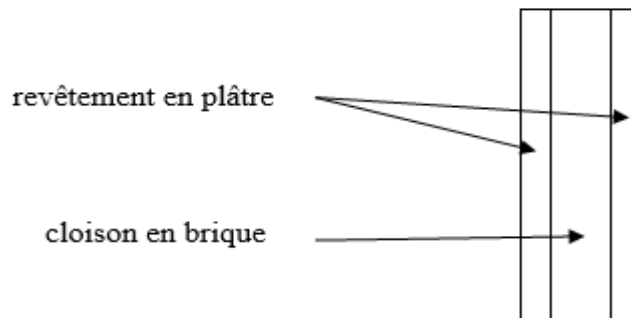
\*Il s'agit d'une conductivité effective tenant compte de la convection naturelle.

**Tableau 5** :Caractéristiques physiques des éléments constituant les murs extérieurs [10]

Les murs externes sont en couleur claire d'un coefficient d'absorption solaire ( $\alpha=0.4$ ), et contiennent 4 fenêtres de 1.2m<sup>2</sup> et une de 0.2m<sup>2</sup> en simple vitrage.

### b. les murs internes

Les murs internes sont construits avec une cloison de brique revêtue des deux côtés d'une couche de plâtre comme elle est montrée sur la figure suivante :



**Figure 11** : Coupe sur le mur interne

Les caractéristiques des matériaux utilisés pour les murs internes sont les mêmes que ceux utilisés pour les murs externes. La surface totale des murs internes est de 73.8 m<sup>2</sup>.

Elément	Epaisseur (cm)	Conductivité (W/m.K)	Résistance (m <sup>2</sup> .K/W)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (j/kg.K)
<b>Brique</b>	10	0.5	0.20	1000	920
<b>Plâtre</b>	1.5	0.35	0.043	850	936

**Tableau 6** : Les caractéristiques physiques des éléments constituant les murs extérieurs [10].

### 2.3.2 Les planchers :

#### a. le plancher haut (plafond) :

Le plancher haut est réalisé comme est montré dans le tableau suivant :

Elément	Epaisseur (cm)	Conductivité (W/m.K)	Résistance (m <sup>2</sup> .K/W)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (j/kg.K)
<b>hourdis</b>	15	1.15	0.13	1800	1000
<b>béton</b>	5	1.75	0.028	2300	1080
<b>Plâtre</b>	1.5	0.35	0.043	850	936

**Tableau 7** : Les caractéristiques physique de toit [10].

**b. Le plancher bas :**

Matériau	Epaisseur (cm)	Conductivité (W/m.K)	Résistance (m <sup>2</sup> .K/W)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Carrelage granito	02	2.1	0.014	2200	936
Mortier	03	1.4	0.028	2200	1080
Béton lourd	10	1.75	0.085	2300	1080

**Tableau 8 :** Caractéristiques physiques du plancher bas [10].

**2.4 Apports ou pertes de chaleur par introduction de l'air extérieur**

Puisque on n'a pas pris en considération l'humidité de l'air, on ne considère que les apports ou les pertes sensibles de l'extérieur vers l'intérieur. (Infiltration d'air)

$$Q_{sen}=0.32*(q_{vinf}+q_{van})*(T_a-T_{int}) [10].$$

Pour le cas étudié le débit par chambre  $q_{van}=50 \text{ m}^3/h$  [10].

Pour le débit de l'air infiltré par les ouvrants est estimé comme suit :

$$q_{vinf} = q_{vinf \text{ porte}} + q_{vinf \text{ fenêtres}} [10].$$

$$q_{vinf \text{ porte}} = 5.2 * \text{Surface porte} [10].$$

$$q_{vinf \text{ fenetres}} = 14.5 * \text{surface fenêtre} [10].$$

0.32 : C'est la chaleur volumique de l'air (Wh/m<sup>3</sup>.°c).

**2.5 Modélisation des différents transferts de chaleur dans un habitat :**

**2.5.1 Echange par convection**

**2.5.1.a Echanges convectifs intérieurs :**

Les échanges convectifs entre les faces intérieures des parois et les volumes d'air sont dus, pour l'essentiel, à l'effet de convection naturelle résultant de la non-homogénéité de leurs températures. Les points chauds tels qu'appareils de chauffage, de cuisson ou d'éclairage, ainsi que les zones d'absorption du rayonnement solaire sont des moteurs convectifs particulièrement actifs. De même, les mouvements d'air entre zones contiguës et vers ou



depuis l'extérieur induisent des vitesses d'air qui influent sur les flux convectifs. Malgré ces phénomènes tendant à brasser l'air, on observe souvent une stratification consistant en couches horizontales d'air stable, dont la température croît avec la hauteur. Ce phénomène est d'autant moins négligeable que le local a une grande hauteur sous plafond. Tout ceci fait de la convection un phénomène mal contrôlé et difficile à représenter avec précision et détails. Pour cela, on fait appel à des corrélations qui donnent les valeurs du nombre de Nusselt ou des coefficients d'échange superficiels en fonction de paramètres décrivant les principales configurations possibles, par exemple sous la forme suivante :

$$h_c = a\Delta T^n + b$$

Respectivement :

$h_c$  : coefficient d'échange convectif superficiel [ $W/m^2.K$ ].

$\Delta T$  : écart de température entre l'air et la surface de la paroi en (k).

a et b : paramètres dont les valeurs ont été mesurées expérimentalement.

Les valeurs constatées diffèrent beaucoup selon les auteurs. Dans le doute, on préférera utiliser des valeurs constantes de qui, bien que plus conventionnelles, permettent toutefois de comparer différents résultats sans qu'un biais ne soit introduit par une représentation faussement précise. On retiendra les valeurs suivantes :

$h_c$ ( $w/m^2.k$ )	Paroi verticale	Plancher	Plafond
Eté	9	6	6

**Tableau 9** : coefficient de convection [10]

### 2.5.1.b Echange convectifs extérieurs :

De la même façon qu'à l'intérieur, les faces extérieures des parois échangent de la chaleur sous forme convective avec l'air extérieur. Mais cette fois-ci, l'ambiance extérieure n'est pas aussi tranquille et les échanges convectifs sont fortement tributaires du vent. L'influence du vent sur le coefficient de transmission thermique d'une paroi ne se fait sentir que pour des parois non ou peu isolées, c'est pourquoi ce coefficient est généralement calculé avec une valeur de  $h_c$  correspondant à la vitesse moyenne annuelle du vent dans des conditions moyennes c.-à-d. 3 à 4 m/s dans ces conditions, les valeurs conventionnelles données à  $h_c$  sont :

$h_c = 17 w/m^2.K$  pour des parois horizontales [10].

$h_c = 16.6 w/m^2.K$  pour des parois verticales [10].

### 2.5.1.c Coefficient d'échange global

Le coefficient d'échange global entre l'environnement extérieur et l'intérieur de l'habitat à travers l'enveloppe sont déterminés sont rapportées sur le tableau suivant :

Elément	Plancher haut	Plancher bas	Mur extérieurs	Mur intérieurs
Coefficient d'échange global U (W/m <sup>2</sup> .K)	2.33	2.5	1.73	2.52

**Tableau 10** : coefficient d'échange global.

### 2.5.2 Laissons avec le sol :

Cette singularité constitue certainement le phénomène dont la prise en compte est la plus critiquable dans la majorité des modèles, logiciels et résultats ayant été produits jusqu'à présent. On sait, en effet, les mesures le prouvent, que le sol peut avoir une interaction importante avec le bâtiment. Son comportement est fortement bidimensionnel, quelquefois tridimensionnel, ses caractéristiques sont en général très hétérogènes et mal connues, et la condition en limite basse difficile à apprécier. Une simplification courante consiste à négliger l'effet du sol en supposant le bâtiment reposant sur un vide sanitaire parfaitement ventilé, ou ayant un plancher bas très isolé sur sa face inférieure, de façon à découpler, dans le modèle, le bâtiment du sol.

La température de sol est la moyenne annuelle de la température de lieu, pour notre cas est égale à 18 °c.

### 2.5.3 Echange radiatifs

#### 2.5.3.a Parois opaques

Les matériaux opaques sont caractérisés par un facteur d'absorption propre au rayonnement visible et le flux net absorbé s'écrit, en négligeant les flux renvoyés par réflexions sur l'environnement :

$$Q = \alpha * S * q$$

**$\alpha$**  : Coefficient d'absorption

**$S$**  : Surface

**$q$**  : Rayonnement global reçu par une surface unitaire

### 2.5.3.b Parois vitrées

Les parois vitrées sont caractérisées par un facteur d'absorption et d'un facteur de transmission, et le flux absorbé par cette dernière s'écrit :

$$Q_{ab} = \alpha_{vit} * S * q$$

$\alpha_{vit}$  : Coefficient d'absorption du vitrage

$S$  : Surface du vitrage

$q$  : Rayonnement global reçu par une surface unitaire

Et le flux transmis s'écrit

$$Q_{tr} = \tau_{vit} * S * q$$

$\tau_{vit}$  : Coefficient de transmission

Tel que le flux transmis par le vitrage arrive directement sur le plancher ou sur les murs intérieurs en face des vitrages.

## 2.6 Les données climatiques

Les données climatiques sont déterminées à partir de logiciel METEONORM qui permet d'évaluer les valeurs horaires de la température de l'air, de l'éclairement, la vitesse et orientation de vent et l'humidité de l'air extérieur ainsi que la variation au cours de l'année à partir de valeurs prises dans un site ou station pendant une période dépassant les dix ans .

Le rayonnement solaire sera présenté par le rayonnement global qui est la somme de ses deux composants direct et diffus. Ce rayonnement global sera évalué sur les différents composants de la maison c.-à-d. :

-Rayonnement global horizontale qui arrive sur le toit de la maison.

-Rayonnement global sur un plan vertical qui est le cas des murs extérieurs, ses 4 composantes présentées selon l'azimut de la façade étudié.

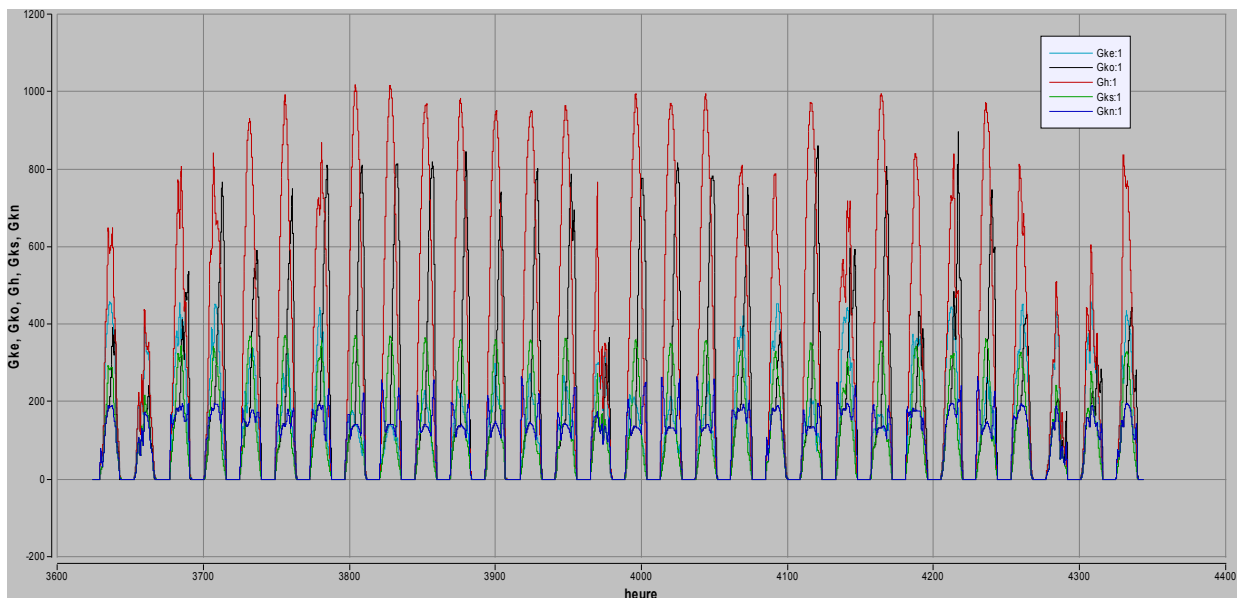
Les courbes représentées dans les courbes de l'exemple sont construites à partir des données horaires du METEONORM après avoir fait un lissage en utilisant grapheur (Berkeley Madonna).

L'albédo du système Terre-atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé.

$$A = \frac{\text{Rayonnement global réfléchi}}{\text{Rayonnement global incident}}$$

SITE	BLIDA	DJELFA
Albédo	0.2	0.2

Tableau 11 : Albédo des sites BLIDA&DJELFA



EXEMPLE :

Figure 12 : Rayonnement solaire sur le site de BLIDA pour le mois juin

Avec : Gh, Gke, Gks, Gko et Gkn sont respectivement les rayonnements arrivant sur une surface unitaire toit, et les 4 murs est, sud, ouest et nord

## 2.7 Intégration des matériaux à changement de phase

L'intégration des matériaux à changement de phase intervient dans la couche de plâtre, en fait des mélanges plâtre MCP a différentes concentration sont expérimentés pour évaluer leurs caractéristiques.

Des approximations algébriques sont faite pour prendre des approches sur l'allure de la chaleur spécifique en fonction de changement de température parmi dès cette approximations la formule exponentielle (Feustel 1995) [13]:

$$C_{ef} = C_{sl} + \frac{\Delta H}{2} \frac{2\beta / \tau}{\text{Cosh}^2 \left[ \frac{2\beta}{\tau} (T - T_m) \right]}$$

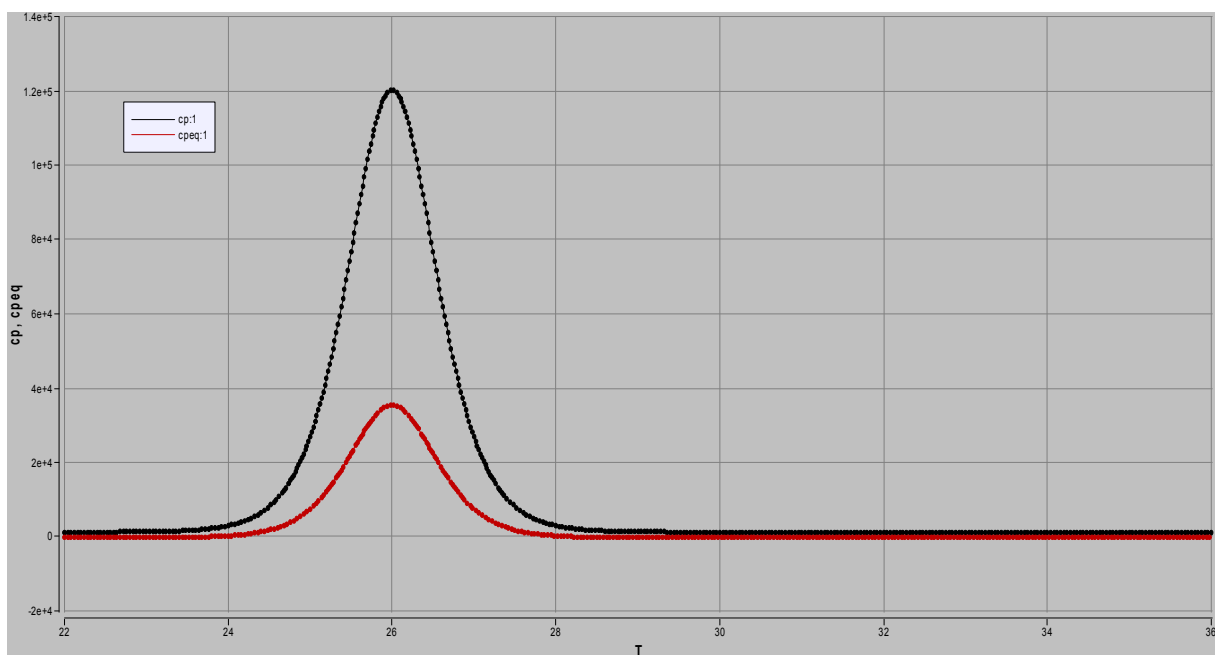
Avec :

$C_{sl}$  : chaleur spécifique de la phase liquide.

$\Delta H$  : l'enthalpie de fusion latente.

$T_m$  : température de fusion.

$\beta$  : paramètre de forme.



$2\tau$  : la plage dans laquelle 99% de le changement de phase se produit.

**Figure 13:**Chaleur spécifique en fonction de température ( $T_m=26^\circ\text{c}$ )

$C_p$  : chaleur spécifique de MCP pure.

$C_{peq}$  : chaleur spécifique d'un mélange plâtre MCP de concentration 30%.

Le matériau à changement de phase utilisé pour cette simulation a un  $\Delta H=170000$  J/kg.

Etat	Conductivité (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	La masse volumique (kg/m3)
------	----------------------	-----------------------------	----------------------------

<b>Solide</b>	0.577	1751.5	1710
<b>Liquide</b>	0.813	2225	1530

**Tableau 12** : Propriétés thermo physique du MCP [14]

## 2.8 Principe de l'analyse thermique par la méthode nodale

Toutes les méthodes de résolution sont fondées sur un découpage du système à modéliser en blocs élémentaires que ce soit, aux différences finies, ou aux éléments finis. Cette technique, a l'intérêt de pouvoir représenter le comportement thermique d'un système complexe en prenant en compte les interactions entre les différentes parties ou composants qui le constituent. Par exemple, elle peut être utilisée dans des domaines très variés pour décrire le comportement d'un satellite artificiel, d'un moteur électrique, les conditions climatiques à l'intérieur d'une station de transformation ou d'un bâtiment de plusieurs pièces. Sur le principe, cette méthode consiste à décomposer le système étudié en différents volumes isothermes appelés nœuds. A chaque nœud sont associés différents paramètres, entre autre une température et éventuellement un apport de chaleur indépendant des échanges thermiques. On s'intéresse ensuite aux couplages entre nœuds, c'est-à-dire aux différents échanges entre les volumes, ce qui nous permet d'écrire nos équations de bilan (conservation de l'énergie et de matière dans l'élément de volume attaché à un nœud donné). Cette approche qui correspond en fait à une discrétisation spatiale du système, nous conduit à définir un réseau thermique avec ses nœuds, ses capacités, ses sources de chaleur, ses conductances, qui traduisent les différents couplages entre nœuds (analogie phénomènes électriques/thermiques) On aboutit ainsi à un système d'équations couplées, éventuellement, non linéaires. Reste alors à préciser les valeurs numériques des éléments de la matrice qui correspondent aux conductances thermiques [11].

### 2.8.1 Principe de la discrétisation

Considérons pour cela un système où siègent différents échanges thermiques (bâtiment, moteur, capteur solaire, échangeur,.....) et en décomposant le en élément de volume  $V_i$  supposés isothermes et de température  $T_i$ . Alors on peut écrire la capacité calorifique de ce

dernier

$$C_i = \rho_i c_i V_i$$

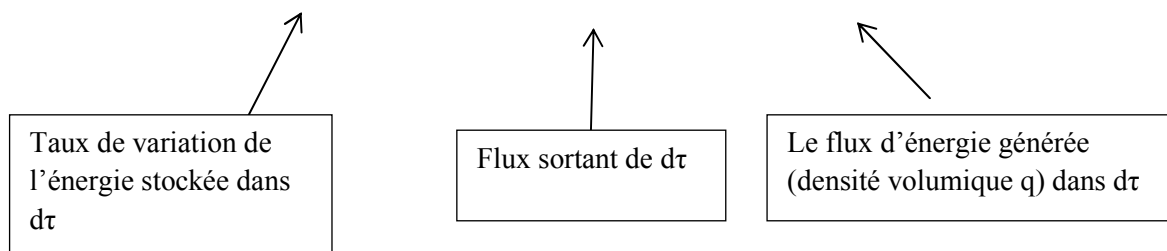
Affectée au centre  $i$  de  $V_i$  appelé nœud du système, il peut se voir doté d'une source  $Q_i$ , représentant le flux d'apport dans  $V_i$ . De plus un nœud  $i$  peut échanger de l'énergie avec tout un ensemble de nœud  $j$  environnant

Décrire un système thermique revient alors à installer un réseau de capacité, de sources de conducteur thermique. Reste alors à préciser ces équations décrivant les échanges d'énergie dans ce réseau [12].

### 2.8.2 Les différentes composantes d'un modèle nodal :

Les expressions de ces composants découlent du principe même de l'analyse, a savoir l'iso thermicité d'un volume nodale  $V_i$ , considérons pour cela l'équation phénoménologique suivante relative à un volume infinitésimal  $d\tau$  :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} d\tau + (\text{div}\Phi) d\tau = q d\tau$$



L'intégration sur  $V_i$  (de température  $T_i$ ) de l'équation précédente conduit a :

$$\int_{V_i} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} d\tau + \int_{V_i} \text{div}\Phi d\tau = \int_{V_i} q d\tau$$

Soit comme tenu de l'hypothèse d'iso thermicité de  $V_i$  :

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} dt = \Phi_{COND} + \Phi_{CONV} + \Phi_{RAY} + \Phi_{FLU} + Q_i$$

### 2.8.3 Notion de nœud de diffusion et de capacité :

D'après le raisonnement précédant, on obtient l'expression de la capacité thermique  $C_i$  associer au nœud  $i$  par :

$$C_i = \int_{V_i} \rho_i c_i d\tau \quad J/K$$

Laquelle se ramène à  $C_i = \rho_i c_i V_i$  dans le cas où le matériau constituant ce nœud est lui-même homogène. Un tel nœud associé un élément de volume, et donc doté d'une capacité est dit nœud diffusion et son équation est de type différentiel [12].

#### 2.8.4 Notion de nœud arithmétique :

$$\Phi_{COND} + \Phi_{CONV} + \Phi_{RAY} + \Phi_{FLU} + Q_i = 0$$

Observant qu'une telle formule n'implique aucunement que la température  $T_i$  n'évolue pas au cours de temps, étant gouverné par une équation algébrique,  $T_i$  n'a pas d'inertie propre et l'on peut alors affirmer qu'un nœud arithmétique se met instantanément en équilibre thermique avec son environnement [12].

#### 2.8.5 Notion de conductance :

Nous justifierons l'appellation de conductance thermique  $G$  par l'expression formelle flux énergétique  $\Phi$  échangé entre deux nœuds  $i$  et  $j$  :

$$\Phi = G (T_j - T_i)$$

Laquelle rappelle celle d'Ohm entre grandeurs électrique :

$$I = G (U_j - U_i)$$

En exploitant la relation précédente, on peut obtenir dans les cas usuels les expressions des conductances relatives à la conduction et à la convection, transport fluidique ainsi qu'au rayonnement.

Nature de l'échange	Expression du flux	Expression de la conductance
<b>Conduction</b>	$\Phi = \frac{kS_{ij}}{L_{ij}} (T_j - T_i)$	$\frac{kS_{ij}}{L_{ij}}$
<b>Convection</b>	$\Phi = h S (T_s - T_i)$	$h S$
<b>Transport fluidique</b>	$\Phi = \dot{m} c (T_j - T_i)$	$\dot{m} c$
<b>Rayonnement</b>	$\Phi = \varepsilon_i \alpha_j S_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4)$	$\varepsilon_i \alpha_j S_i F_{ij} (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j)$

Tableau 13 : Expression élémentaire des différentes conductances [12].



### 2.8.6 Le bilan nodal

Ayant présenté les différents types d'échanges fondamentaux nous allons mettre en place des équations qui, sur un nœud donné, vont traduire les bilans d'énergie.

A titre d'exemple, l'équation nodale traduisant la conservation de l'énergie au nœud  $i$ , supposé impliquer dans des échanges radiatifs et conductifs et soumis de plus à la source  $Q_i(t)$  s'écrit :

$$C_i \dot{T}_i = C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j G_{ij}^c (T_j - T_i) + \sum_k G_{ik}^r (T_k - T_i) + Q_i(t)$$

$G_{ij}^c$  et  $G_{ik}^r$  désignant respectivement des couplages conductifs et radiatifs.

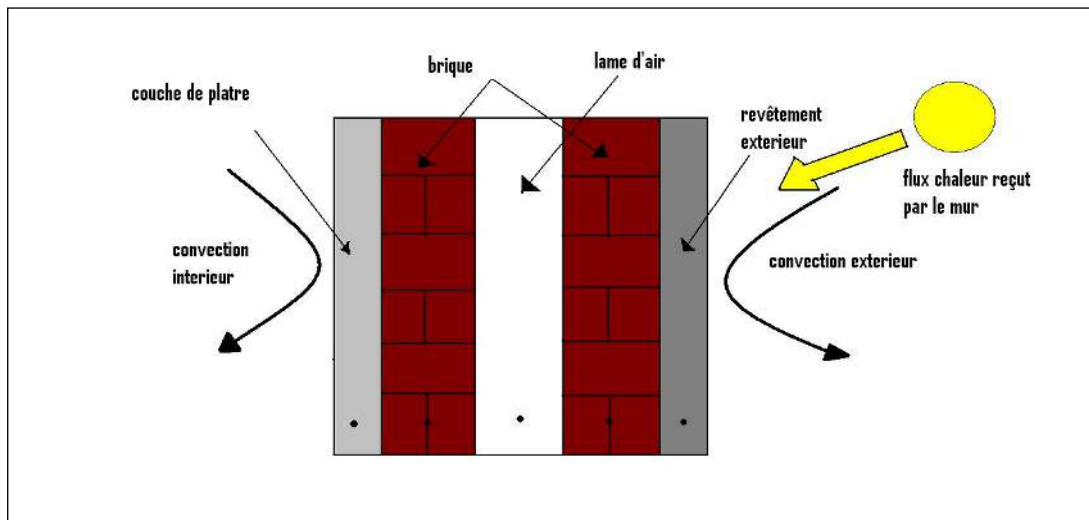
Appliquée à l'ensemble des nœuds installés pour représenter un système thermique la conservation de l'énergie va se traduire par un système d'équations :

- Algébro-différentielles couplées (et non linéaires en cas de présence de rayonnement), dans un problème transitoire (l'adjectif algébrique s'applique ici en cas de nœuds arithmétiques).
- Algébriques couplées et non linéaires dans un problème stationnaire.

C'est un ensemble d'équation qui constitue le modèle nodal. Leur résolution à l'aide de logiciel approprié constituera la simulation du modèle [12].

## 2.9 Modèle thermique

Pour une analogie électrique équivalente il faut bien choisir l'emplacement des nœuds. Dans

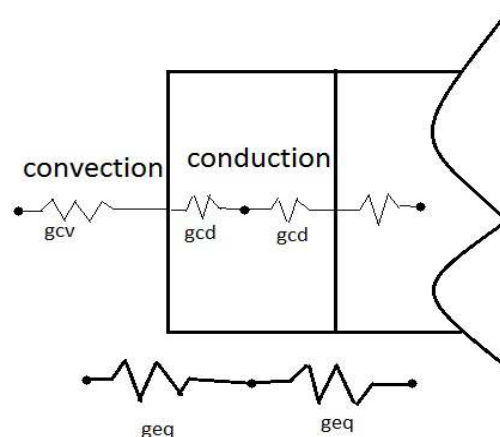


ce modèle les nœuds sont au centre dans les couches du mur.

**Figure 14 :** coupe sur un mur (choix des nœuds)

Nous avons 5 nœuds pour chaque mur, 3 nœuds pour le toit et le plancher bas. En conséquence, dans chaque couche contient deux demi-conductances, pour ce là nous devons calculer la conductance équivalente.

$$g_{eq} = g_{avant} * g_{après} / (g_{avant} + g_{après})$$



**Figur**

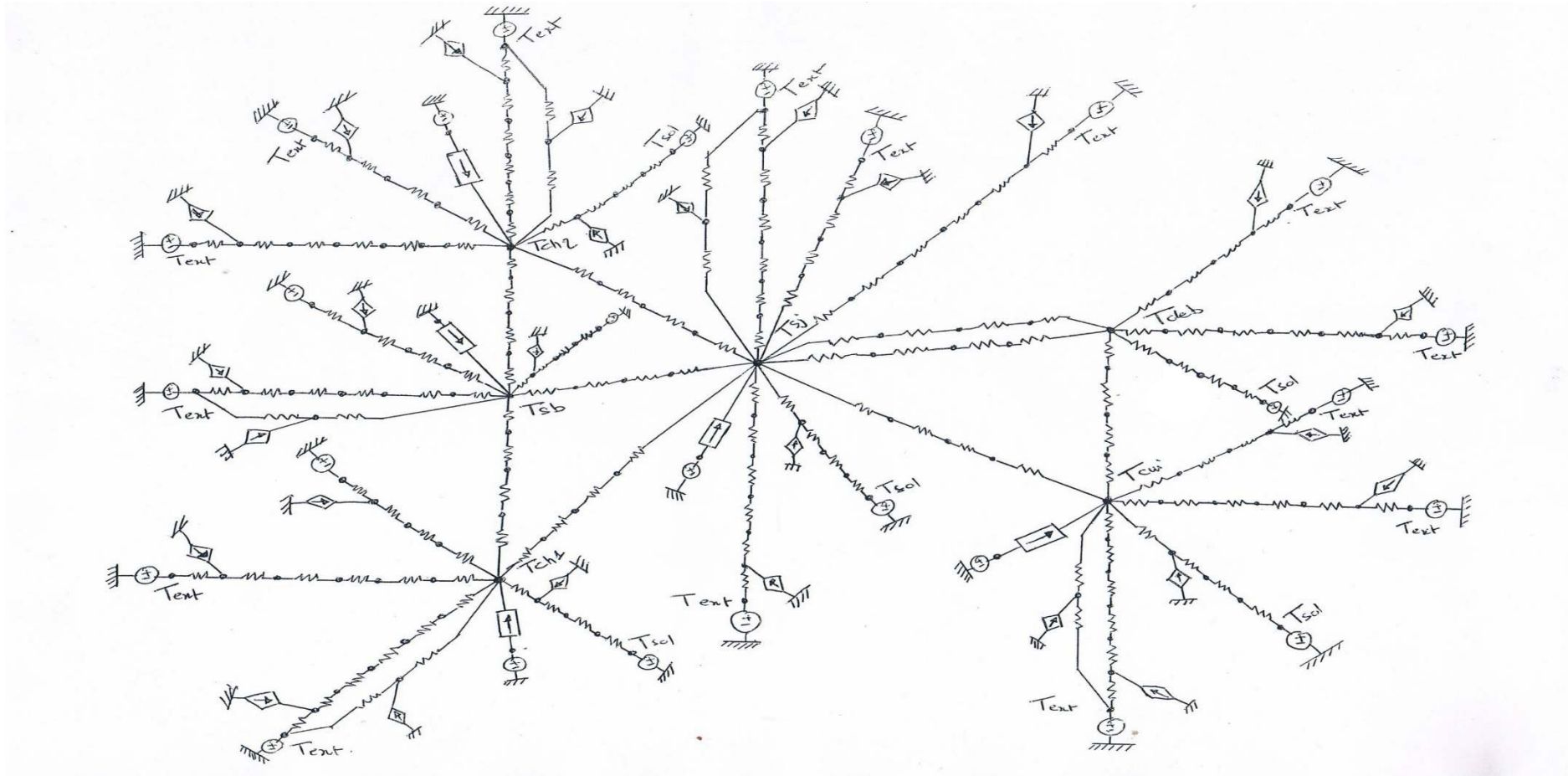
**re**

**15 :**

## Calcul de la conductance équivalente

**Schéma électrique équivalent :**

Puisque on ne tenant pas compte l'échange radiatifs entre les murs et mur-ciel on a le schéma suivant :



**Figure 16 :** Schéma électrique équivalent (toute la maison)

## ETUDE THEORIQUE

Avec :

Text : la température de l'air extérieur.

Tch1 : la température de la chambre 1

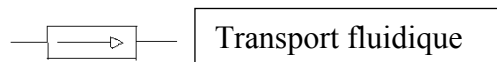
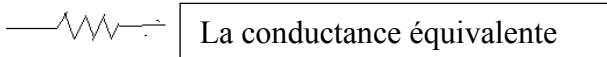
Tsb : la température de la salle de bain

Tch2 : la température de la chambre 2

Tcui : la température de la cuisine

Tdeb : la température du débarras

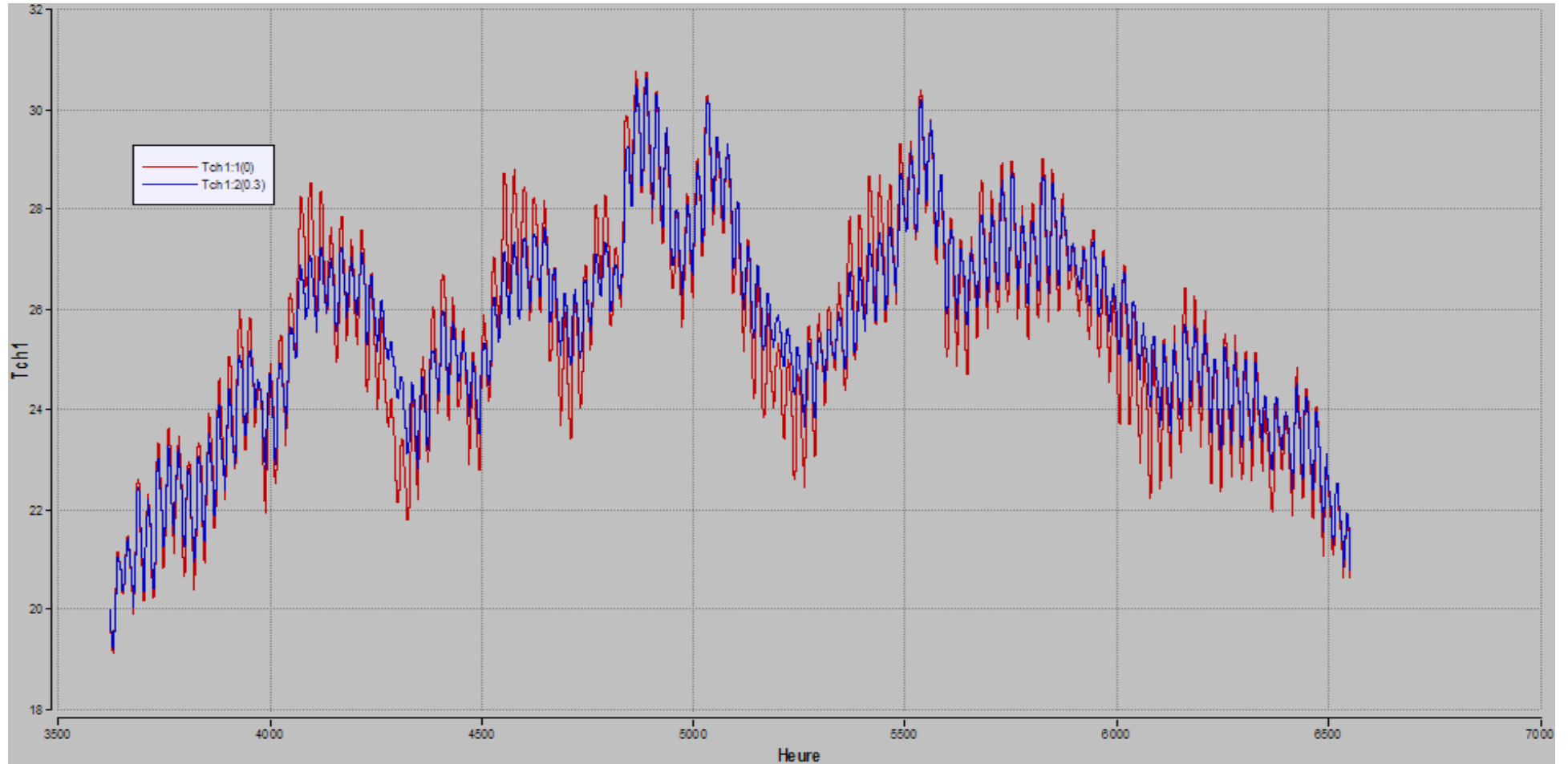
Tsj : la température du séjour



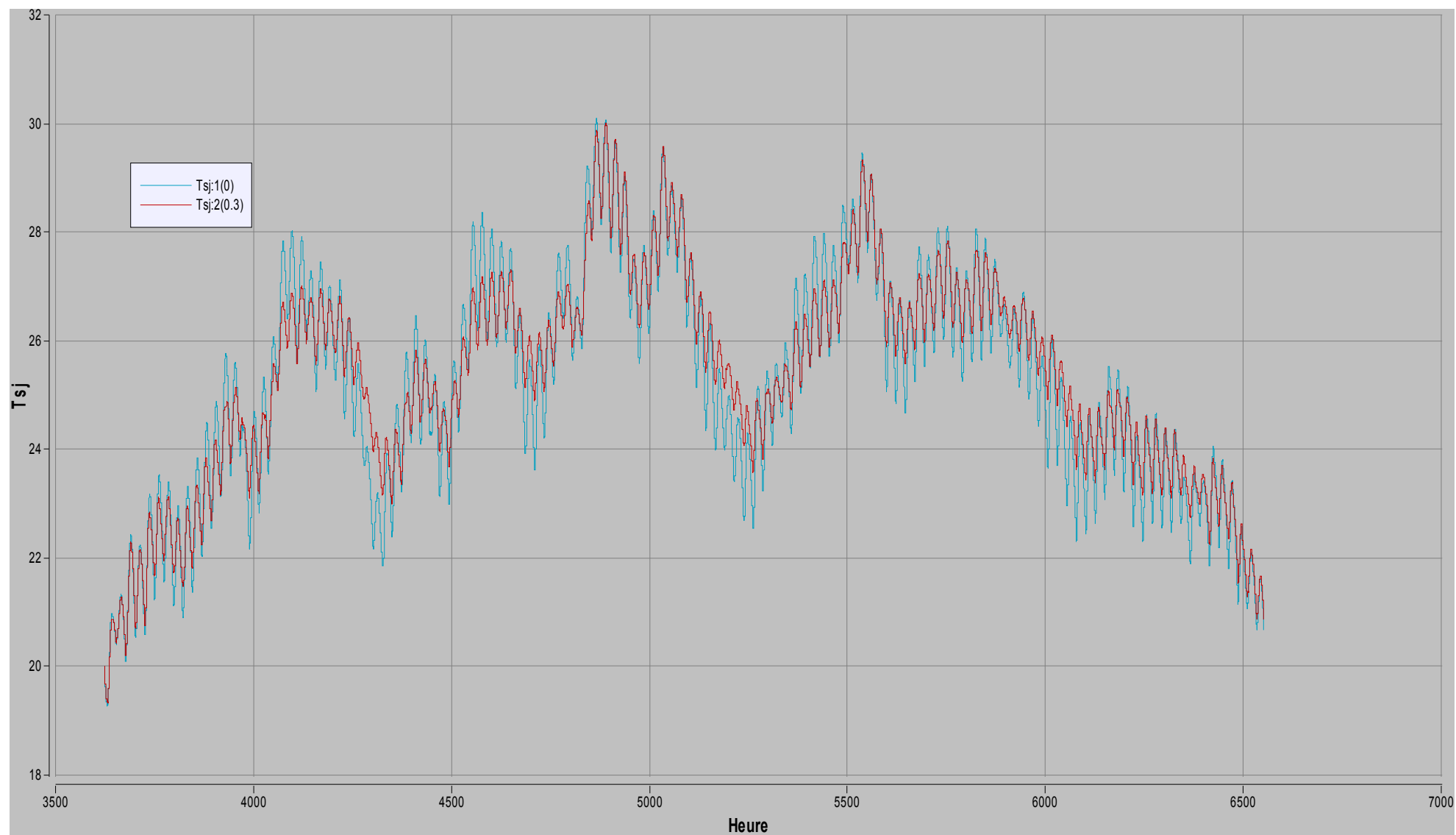
Au total nous avons compté 130 nœuds après la discrétisation des domaines, chaque nœud admet une capacité thermique (voir l'annexe), donc on a un système d'équation différentielle ordinaire non linéaire qui sera résolu par logiciel de simulation Berkeley Madonna qui utilise les méthodes numériques itératives pour la simulation. Nous avons choisi la méthode Runge kutta d'ordre 4 avec un pas de calcul de 30 secondes.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Après la simulation a l'aide de la méthode nodale nous avons obtenu les résultats suivant les résultats sont en fonction d'heure de l'année (1<sup>er</sup> juin jusqu'au le 30 septembre) :



**Figure 17** : variation de la température de chambre 1 à BLIDA ( $T_m=25^\circ\text{C}$ )



**Figure 18** : variation de la température du séjour à BLIDA ( $T_m=25^\circ\text{C}$ )

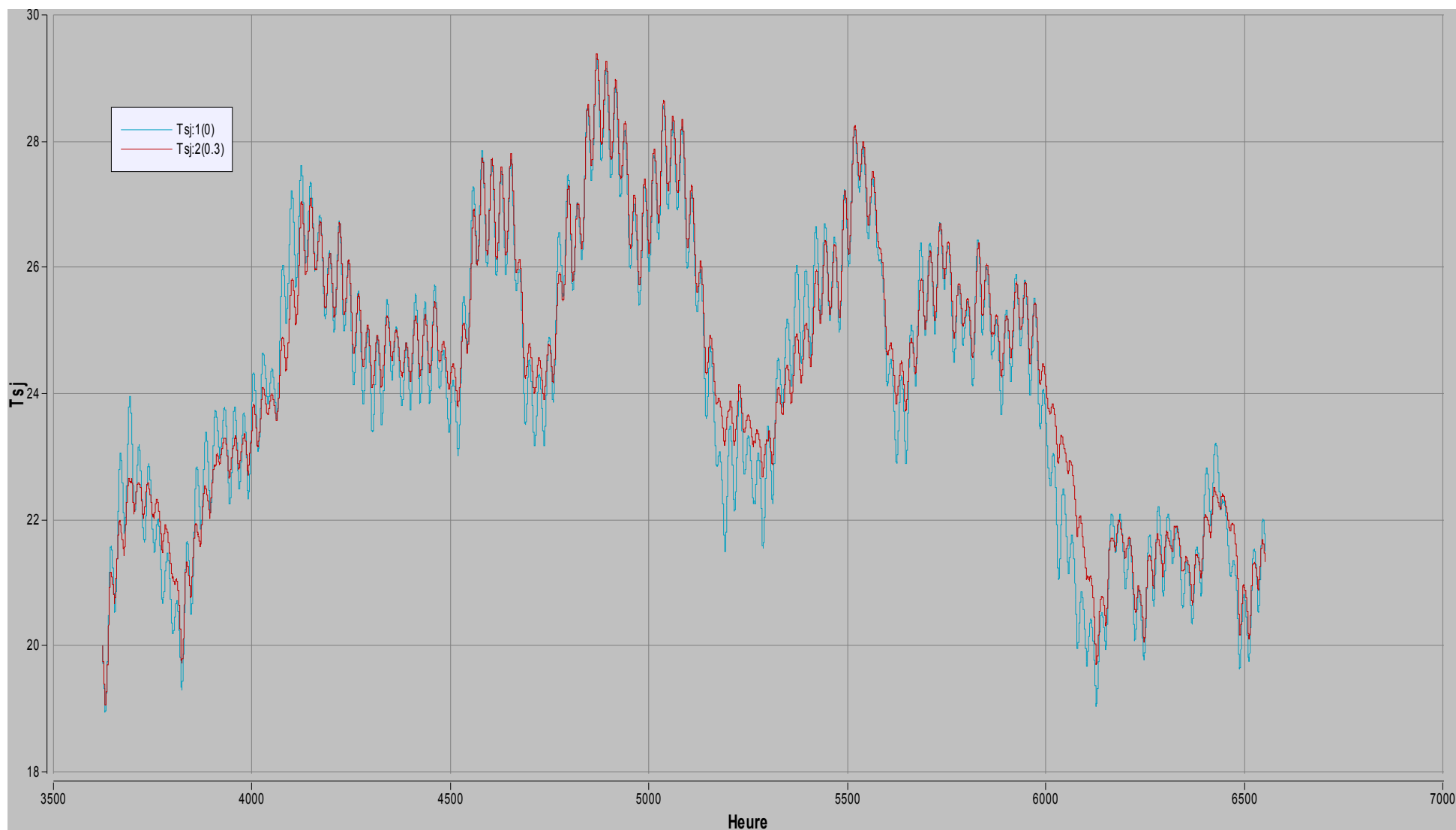
Figure 17 et 18 : présentent l'évolution de la température de la chambre1 et du séjour durant 122 jours, à partir du 1<sup>er</sup> juin jusqu'au 30 septembre avec et sans MCP, Ces figures permettent à nous de constater qu'il y a des amortissements des températures lorsqu'ils varient entre 24°C et 28°C. Ces faibles amplitudes sont très importantes dans les jours suivant : (9-21 juin, les 7 premiers jours du mois de juillet et août, et 15 derniers jours du septembre) et les autres jours où la température de l'air extérieur dépasse le 36°C les pics de température avec et sans MCP sont les mêmes .

Les résultats obtenus expriment que l'utilisation des matériaux à changement de phase au niveau des enduits de plâtre sont capables de réduire la température intérieure de l'habitat et améliorer le confort thermique d'une manière passive, les diminutions de température varient entre 1°C à 1.5°C au maximum pour les jours de température extérieure modérée, de cette dernière information évident pour nous que les besoins de climatisation à l'intérieur diminuent.

Les jours extrêmes, les matériaux à changement de phase ils n'ont pas aucun rôle sur la climatisation passive, et il n'est plus aucune différence entre mur contient des MCP et mur sans MCP en ce qui concerne les pics de températures.

En général l'intégration des matériaux à changement de phase peut assurer une climatisation passive dans la saison choisie plus que les jours extrêmes.





**Figure 19** : variation de la température du séjour à DJELFA ( $T_m=24^\circ\text{C}$ )

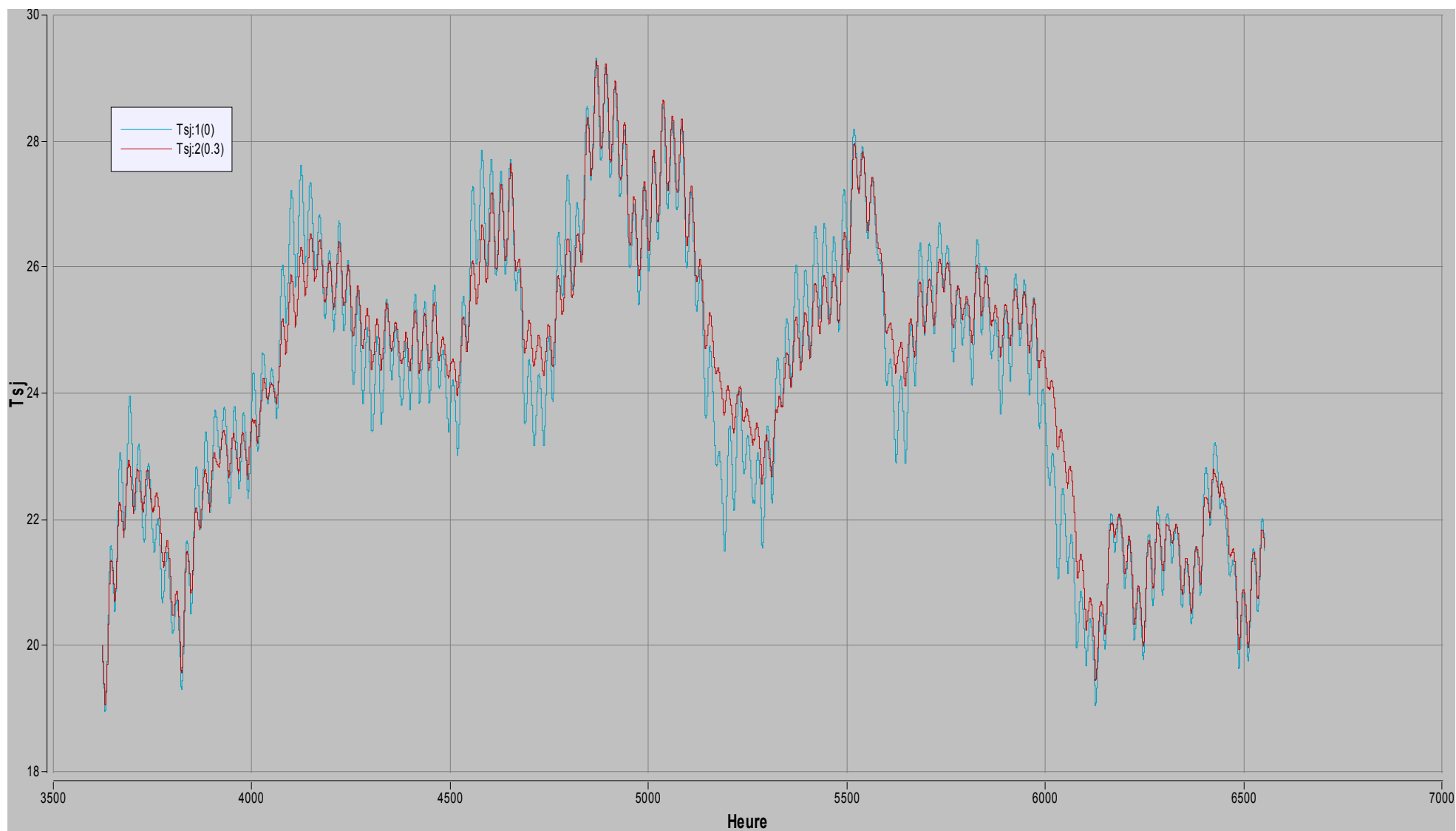


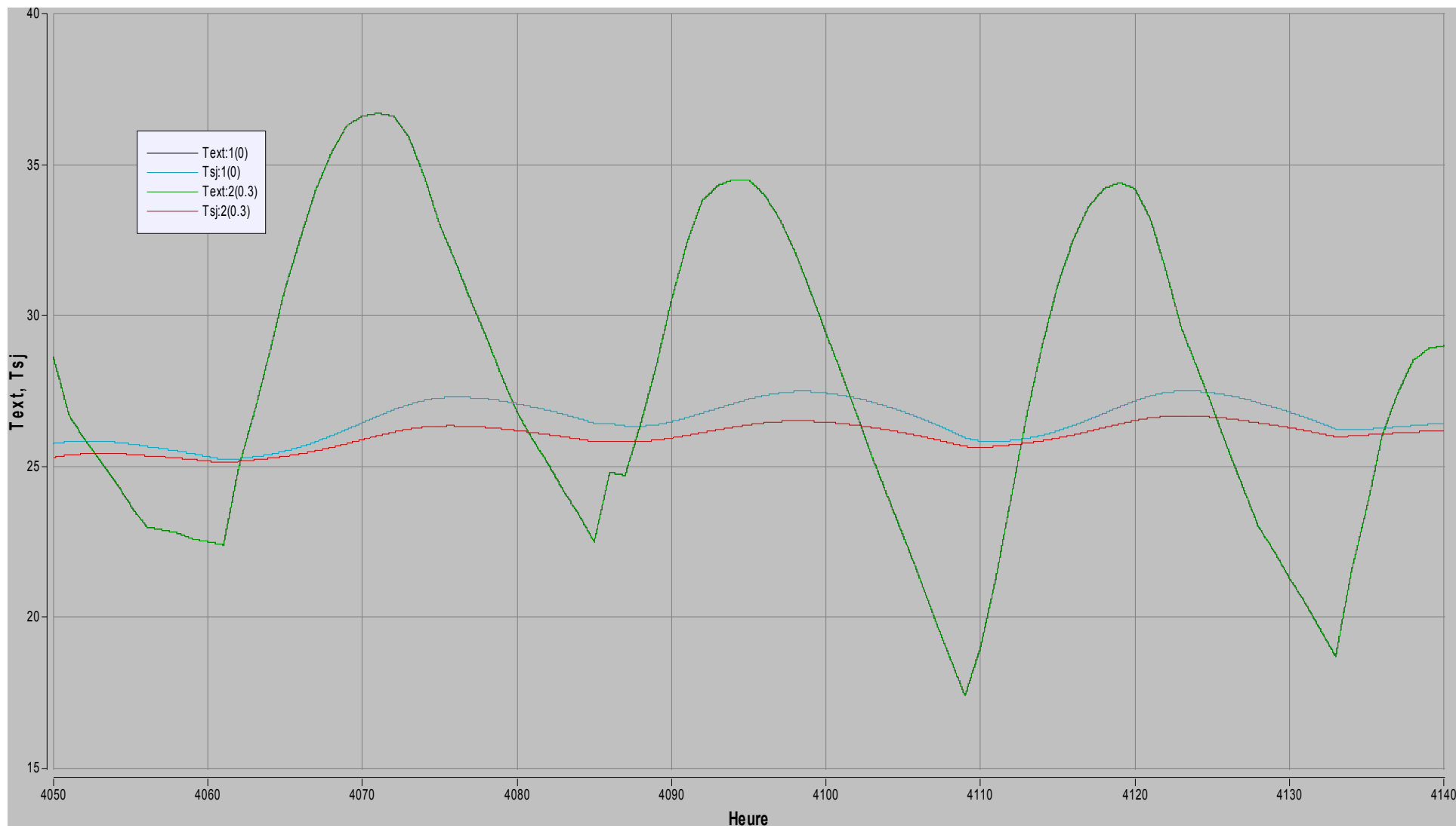
Figure 20 : variation de la température du séjour à DJELFA ( $T_m=25^\circ\text{C}$ )

## RESULTATS ET DISCUSSION

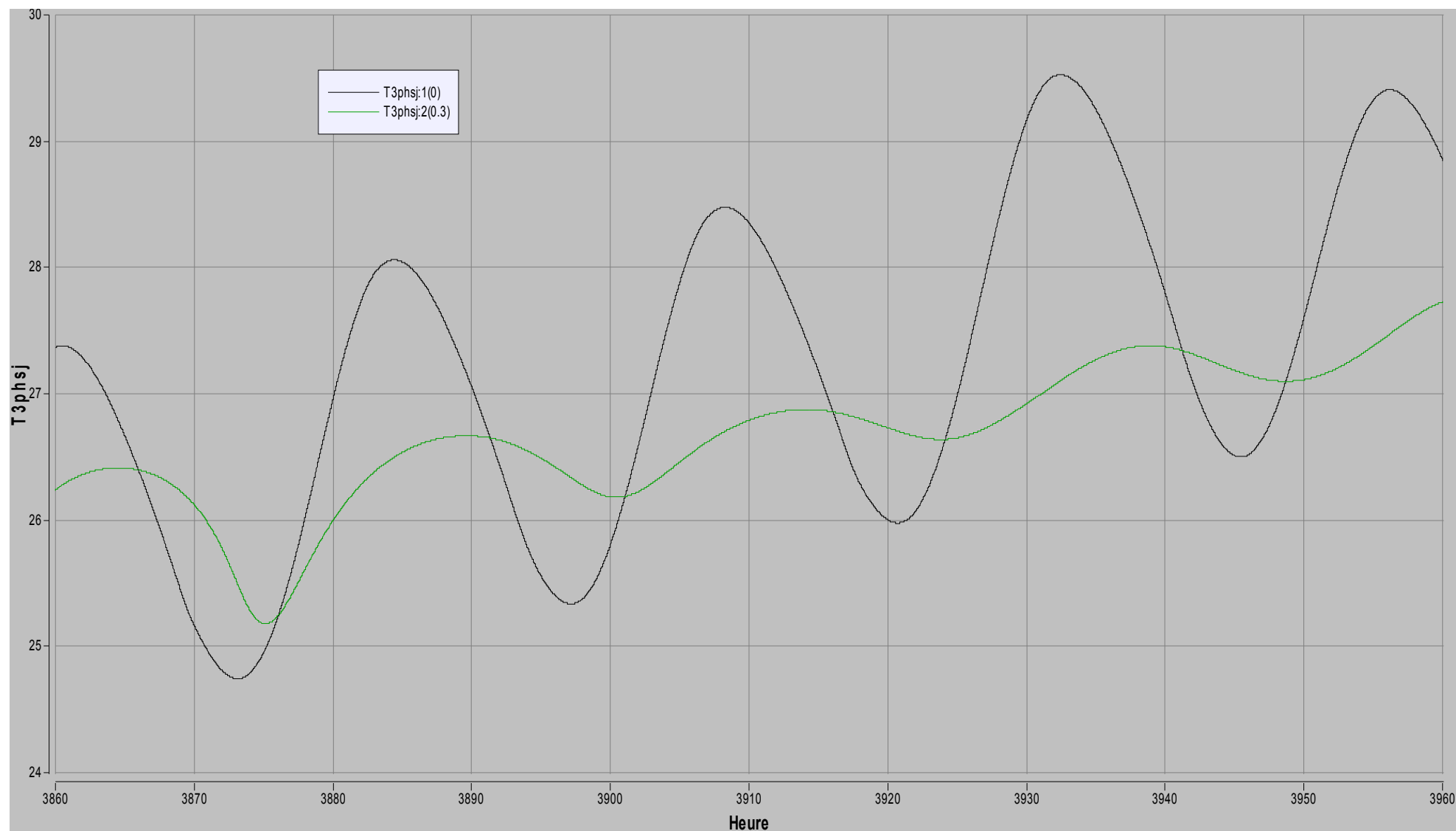
La figure 19 et 20 représentent la variation de température avec et sans MCP dans le séjour avec  $T_m=24^\circ\text{C}$  et  $T_m=25^\circ\text{C}$  à Djelfa, on remarque pour  $T_m=24^\circ\text{C}$  les diminutions sont importantes pour le mois de juin et septembre (début et la fin) avec une température d'extérieur maximale ne dépasse pas  $29^\circ\text{C}$  (varie entre  $21^\circ\text{C}$  et  $29^\circ\text{C}$ ).

Pour  $T_m=25^\circ\text{C}$  les faibles amplitudes importantes constater pour les jours de mois juillet et aout (milieu de graphe) avec une température maximale variée entre  $30^\circ\text{C}$  et  $36^\circ\text{C}$  exceptions les jours extrêmes.

Parmi ces 2 dernières figures de Djelfa, nous concluons que chaque mois de la saison approprié avec une température de fusion déférente pour donner une bonne performance de matériaux à changement de phase sur la climatisation passive.



**Figure 22** : variation de la température pour 3 jours de mois juillet dans le séjour à BLIDA  
(18, 19, et 20 juillet)



**Figure 22** : variation de la température du plâtre du plafond pendant 3 jours de juin à Blida (10, 11, et 12 juin)

La figure 21 présente l'évolution de la température dans le séjour avec et sans MCP durant 3 jours, l'intérêt de l'utilisation des MCP est bien remarquable, pour les températures externes varient entre 26 et 35°C les MCP peuvent diminuer la température dans le séjour environ 1 et 1.5°C pendant 3 jours du mois de juillet, ces résultats signifient que l'intégration des MCP peut améliorer un habitat thermiquement et approcher la température intérieure à la température de confort.

La figure 22 montre la variation de la température du plâtre du plafond avec et sans MCP pendant 3 jours de mois juin, la réduction de température est très importante elle atteinte jusqu'à 2°C, cette information permet de conclure que l'intégration des matériaux à changement de phase dans les couches des plâtres peuvent réduire la température du mur, cette réduction va influencer sur la température intérieure, et la température de l'air au niveau du plâtre est plus froide par rapport le cas sans MCP.

Lorsque la température du mélange (MCP/plâtre) augmente le MCP va absorber la chaleur de l'air au niveau du mur ou le plafond cette utilité qui génère une climatisation passive dans un habitat.

### 3.2 Besoin en climatisation :

Les besoins en climatisation sont déterminés en intégrant la puissance primaire et définie par l'équation différentielle suivante :

$$Q_{tot} = \int -Q_c / (3600 * 1000) dt$$

Q étant la puissance primaire de froid apportée par des moyens mécaniques comme des climatiseurs, des fenêtres ou des scissures, égale 2000 W pour le séjour et 1000 W pour les chambres si la température dépasse la température de confort et 0 dans le cas contraire.

Résultats :

Tconfort= 26°c

	BLIDA		DJELFA	
	Consommation (KWh/saison)	Réduction	Consommation (KWh/saison)	Réduction
Sans MCP	814.40	/	587.28	/
Avec MCP Tm=24°c	835.61	+1,5%	555.96	5.33%
Avec MCP Tm=25°c	772.54	5.2%	487	17.07%
Avec MCP Tm=26°c	779.54	4.2%	504.1	14.16%
Avec MCP Tm=27°c	813.43	0.3%	543	7.53%

**Tableau 14 :** Consommation en climatisation pour les deux sites

Les meilleures réductions d'énergie sont pour Tm=25°c (Djelfa 17.07 % et Blida 5.2%) ces résultats signifient que le MCP choisi s'acclimater avec le site de Djelfa mieux que Blida, avec une température de fusion égale 25°c ,malgré Djelfa un peu chaude par rapport Blida dans la journée mais la chute de température dans la nuit permet d'actionner la chaleur latente de l'MCP plus que Blida (l'amplitude de température extérieure est élevée pour Djelfa).

### 3.3 Conclusion :

Les matériaux à changement de phase peuvent assurer des diminutions de la température intérieure pour les jours de climats modérés, et pour les jours de climats extrêmes le MCP n'assure pas le confort thermique.

Ces résultats confirment que l'utilisation des matériaux à changement de phase permet d'assurer des diminutions entre 1c° et 1.5c° de température et équilibrer une zone ou une habitation proche de la température du confort avec des conditions climatiques spécifiques grâce aux caractéristiques des matériaux à changement phase, et pour les jours plus chaudes

## RESULTATS ET DISCUSSION

les MCP ne peuvent pas améliorer le confort thermique car il y a une grande plage de température entre la température de fusion et de l'air extérieur, en outre le MCP il est fondu totalement on ne peut pas bénéficier leur chaleur latente au cours d'un changement d'état.

On peut dire que les murs qui contiennent des intégrations des MCP sont des murs intelligents, grâce à leur capacité du stockage de chaleur dans la journée et la restitution vers l'intérieur pendant la nuit où la température extérieure diminue et garde les murs froids.



### **Conclusion générale**

Ce travail nous a permis d'étudier les différents transferts de chaleur dans une habitation et d'évaluer l'influence de l'intégration des matériaux à changement de phase sur l'amélioration du confort thermique par l'augmentation de l'inertie du bâtiment.

Les résultats obtenus montrent qu'une adjonction de 30% de MCP au niveau des enduits de plâtre d'une épaisseur de 1.5 cm peuvent réduire la consommation d'environ de 5% sur une période allant du 1er juin jusqu'au 30 septembre pour le site de Blida, et 17 % pour le site de Djelfa sur la même période.

Le choix du MCP est une étape très importante avant l'intégration dans les produits de la construction, les résultats montrent que pour une température de fusion inappropriée avec le climat de site ne peut pas voir une économie.

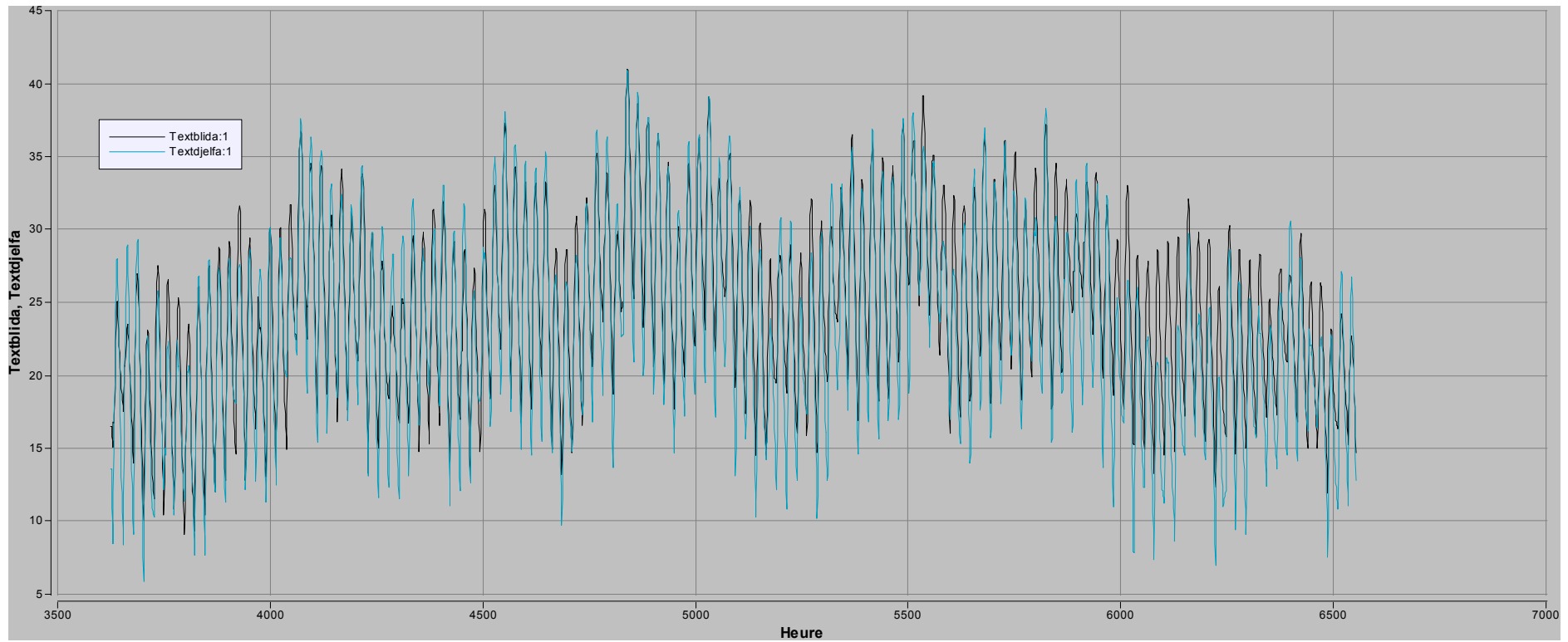
La température de fusion il faut être légèrement inférieur à la température de confort pour garder la climatisation passive le plus longtemps possible.

## Références

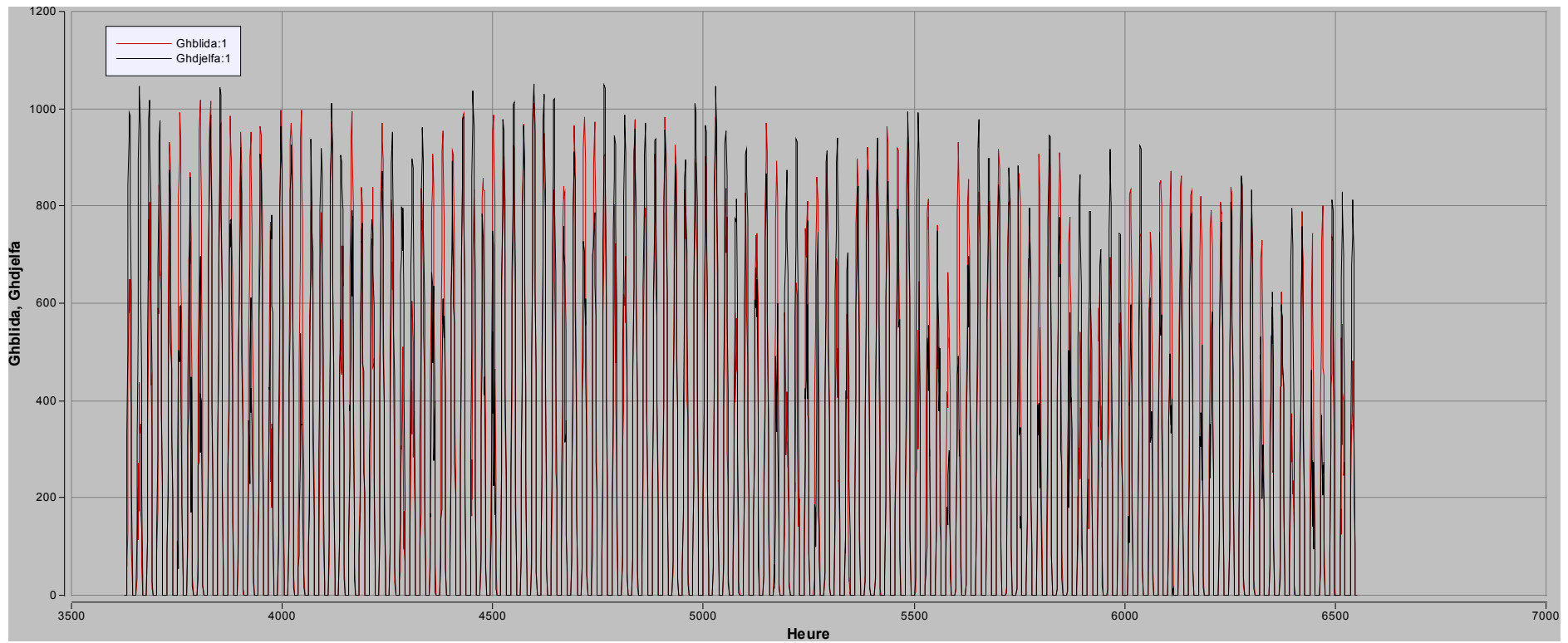
- [1] CIBSE (2007), Guide L: Draft Technical Guidance Document - Section 4.3: Space Heating and Hot water Supply Systems Controls (New Dwellings)
- [2] US Department of Energy. (2011, March 1). Energy Efficiency and Renewable Energy Chapter 2: Residential Sector. Retrieved July 27, 2011, from Buildings Energy Data Book: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/ChapterIntro2.aspx>
- [3] Pascale Maes. Journaliste. article (Pour une climatisation passive des bâtiments: les matériaux à changement de phase) techniques-ingenieur.fr
- [4] BOURSAS Abderrahmane : ETUDE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE D'UN BATIMENT D'HABITATION A L'AIDE D'UN LOGICIEL DE SIMULATION
- [5] A. DJELLOUL, B. DRAOUI, N. MOUMMI : SIMULATION DU COMPORTEMENT ENERGETIQUE DES BATIMENTS RESIDENTIELS AU SUD ALGERIEN
- [6] Abhat, A. (1983). Low Temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. Solar Energy Vol 30 No4 , 313-332
- [7] Mazouzrafik (2013): Etude de l'apport des matériaux à changement de phase pour la climatisation passive. Université de blida département de mécanique.
- [8] Aline LEWANDOWSKI (Aout 2012) : Utilisation des MCP dans le bâtiment 3E Université Polytechnique de Wroclaw departement de mécanique
- [9] Serge Blaise EKOMY ANGO (Novembre 2011) thèse doctorat : Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment développement d'un système actif à matériaux à changement de phase Serge Blaise l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Energétique"
- [10] Document Technique Réglementaire ( D.T.R. C 3-2 ) Réglementation thermique des bâtiments d'habitation.
- [11] Cahier technique n° 145 .Etude thermique des tableaux électriques BT C. KILINDJIAN (juillet 1998).
- [12] ENSMA FORMATION .Modélisation thermique J.B SAULNIER - J.J VULLIERME
- [13] Feustel, H. E. (1995). *Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard*. Indoor Environmental Program, Energy and Environment Division. Lawrence Berkely Laboratory. University of California.
- [14] Annabelle Joulin (2011). Experimental and numerical investigation of a phase change material. Univ Lille Nord de France.



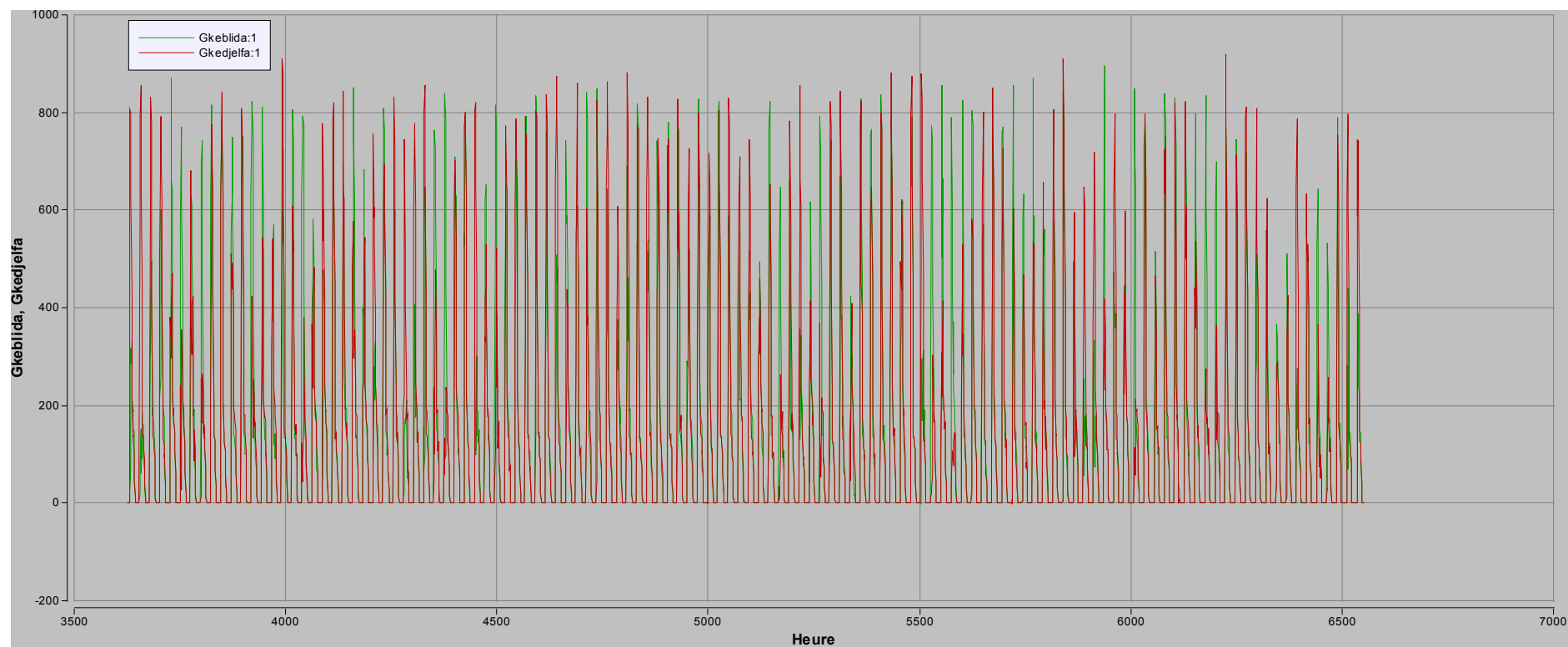
Les données climatiques utilisées dans la simulation(avec un pas de 30 secondes) :



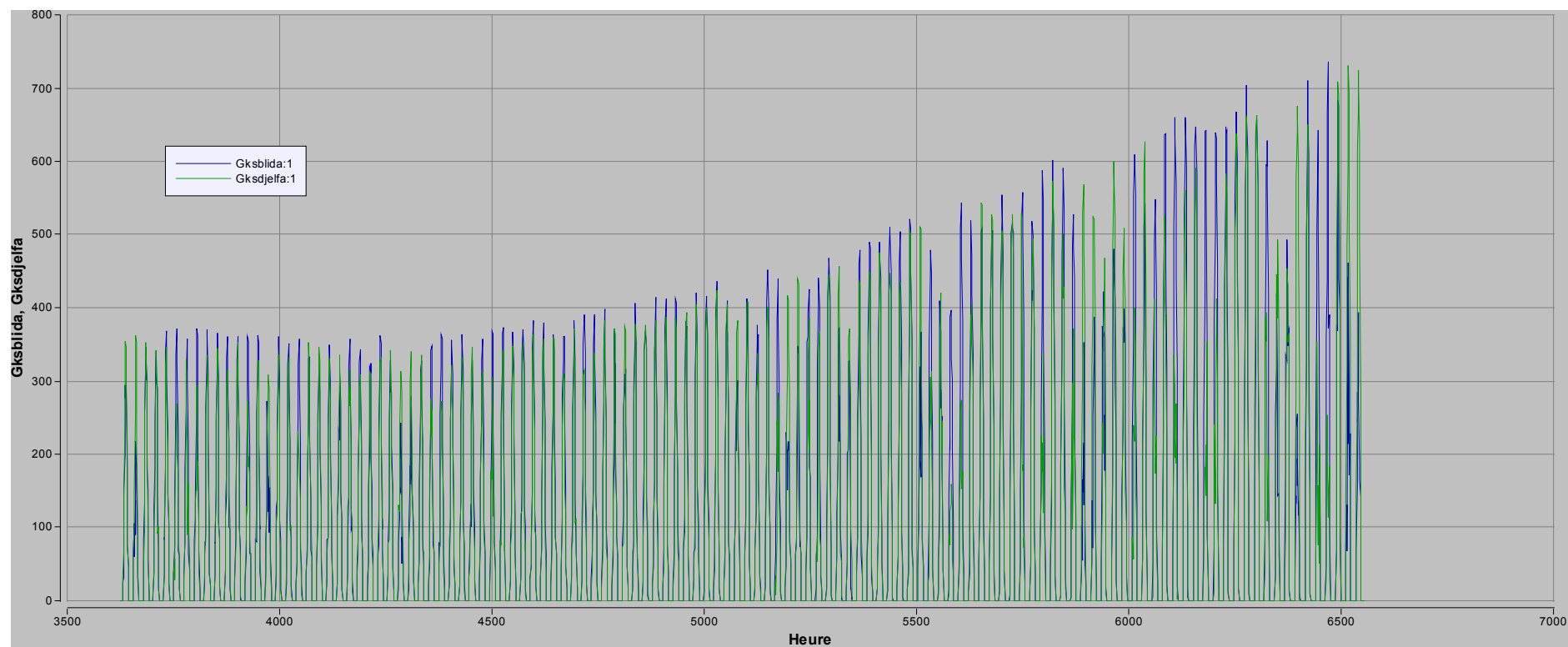
**Figure 23** : la température de l'air extérieur pour les deux sites



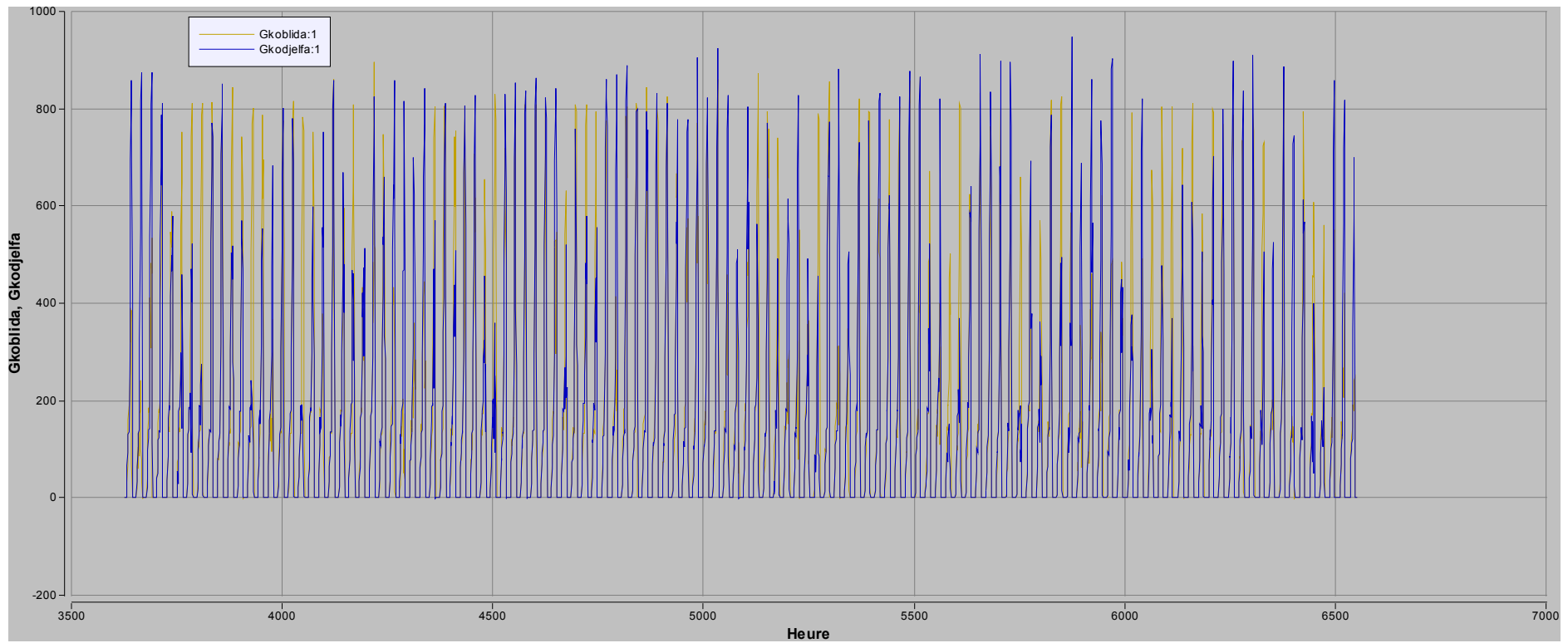
**Figure 24** : le rayonnement reçu sur un plan horizontal pour les deux sites



**Figure 25** : le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers l'est pour les deux sites

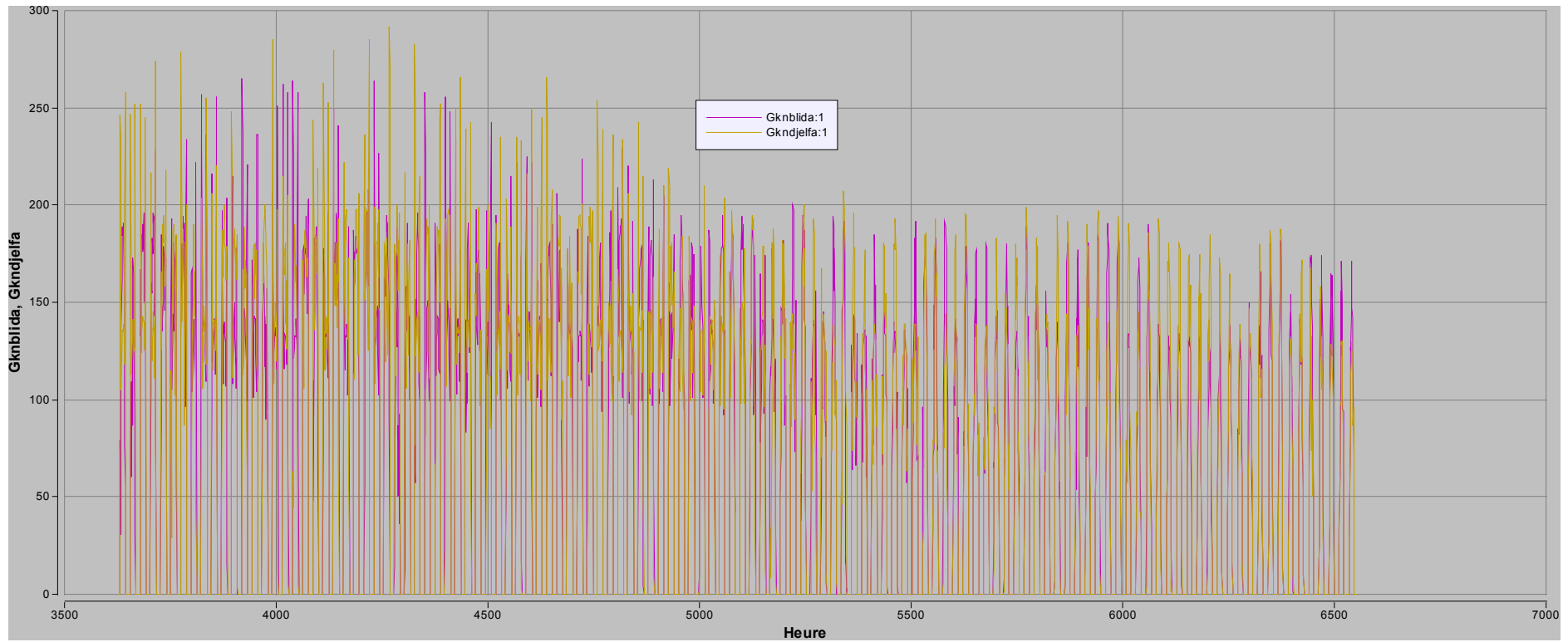


**Figure 26 :** le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers le sud pour les deux sites



**Figure 27** : le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers l'ouest pour les deux sites





**Figure 28** : le rayonnement reçu sur un plan vertical orienté vers le nord pour les deux sites

Les modèles thermiques par chambre :

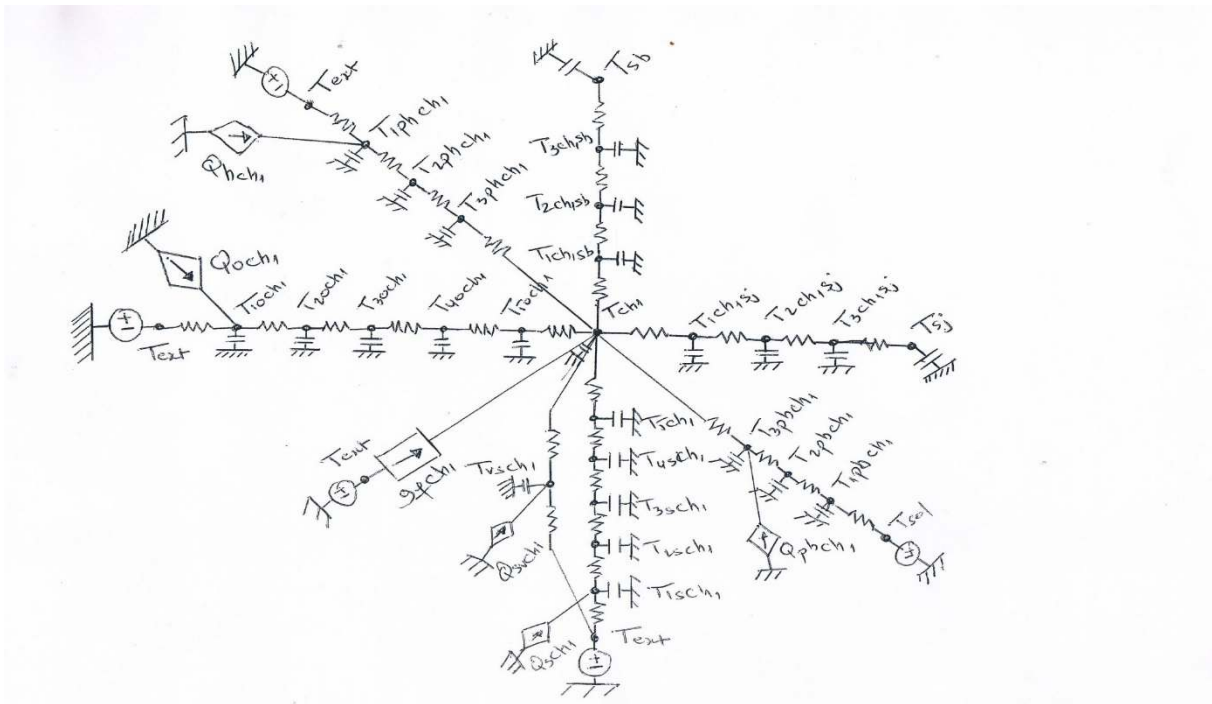


Figure 29 : schéma électrique équivalent (chambre 1)

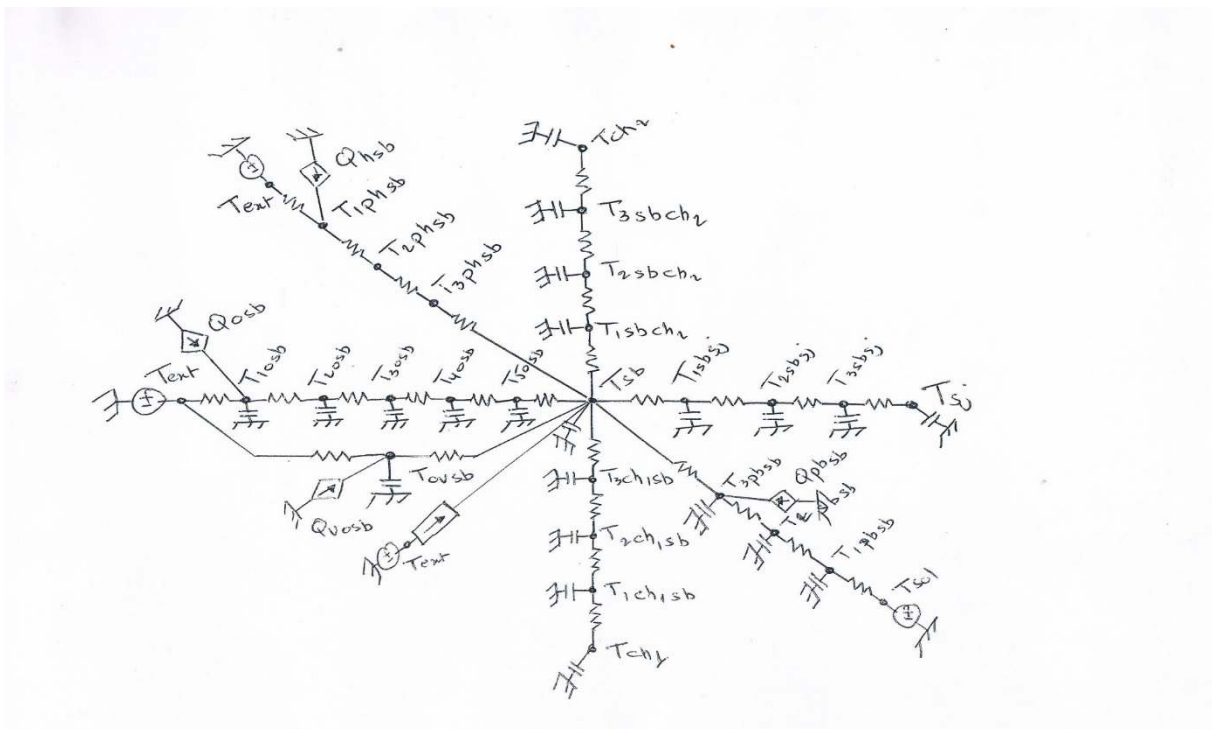


Figure 30 : schéma électrique équivalent (salle de bain)

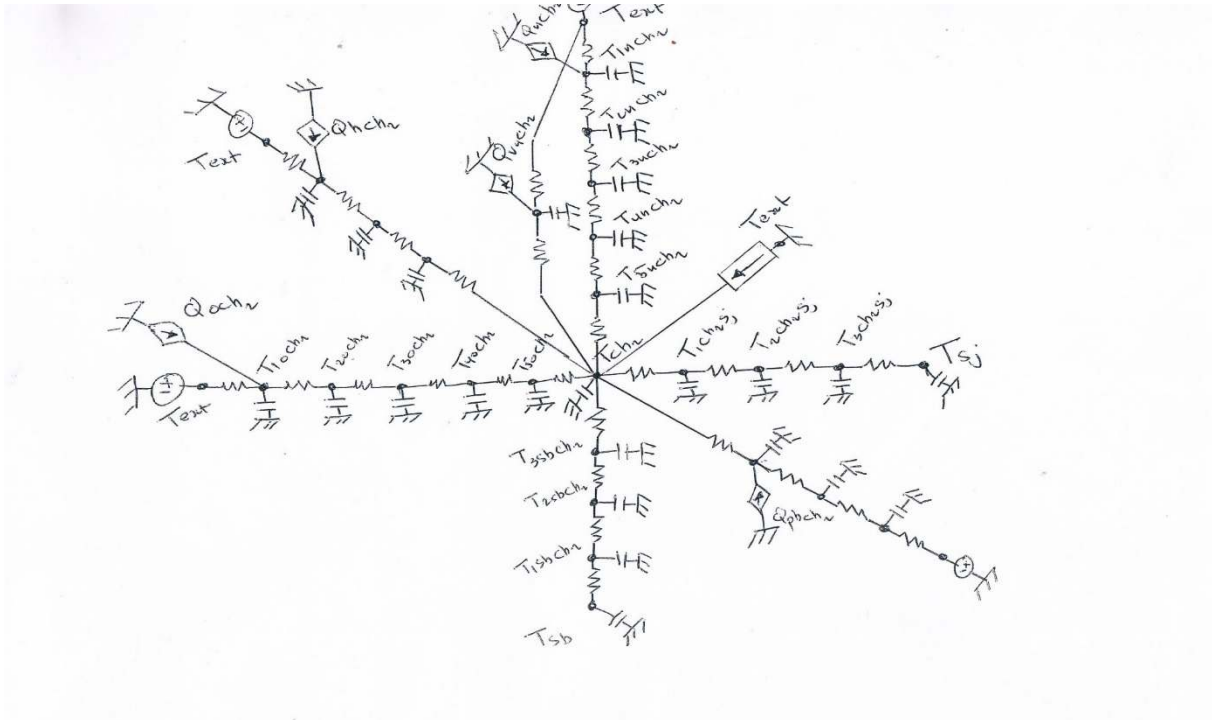


Figure 31 : schéma électrique équivalent (chambre 2)

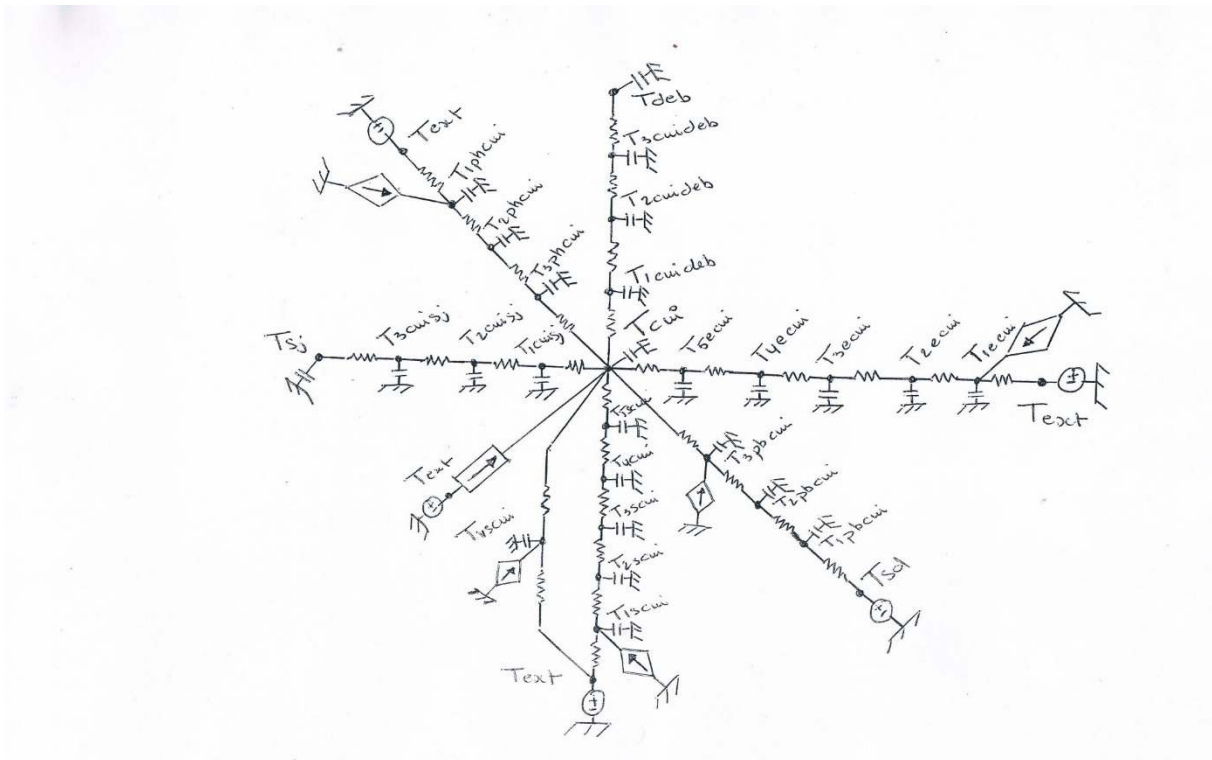


Figure 32 : schéma électrique équivalent (cuisine)

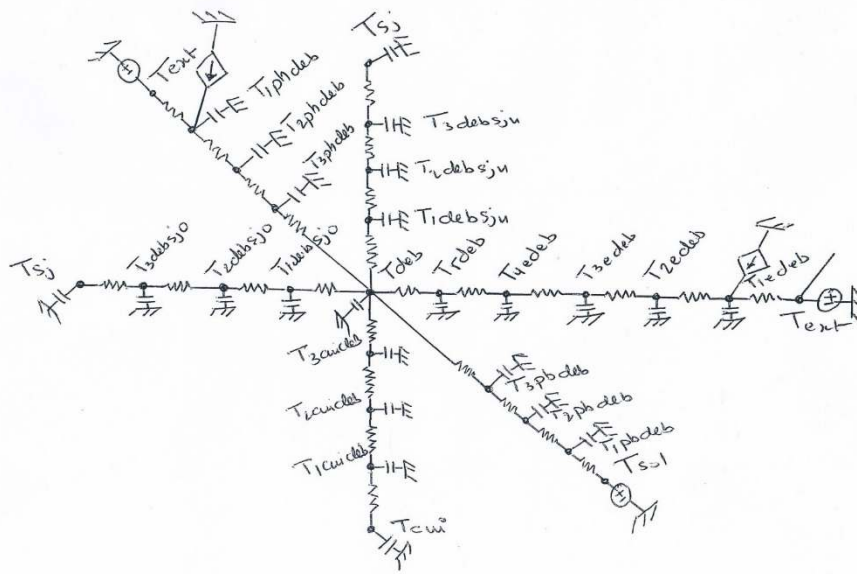


Figure 33 : schéma électrique équivalent (débarras)

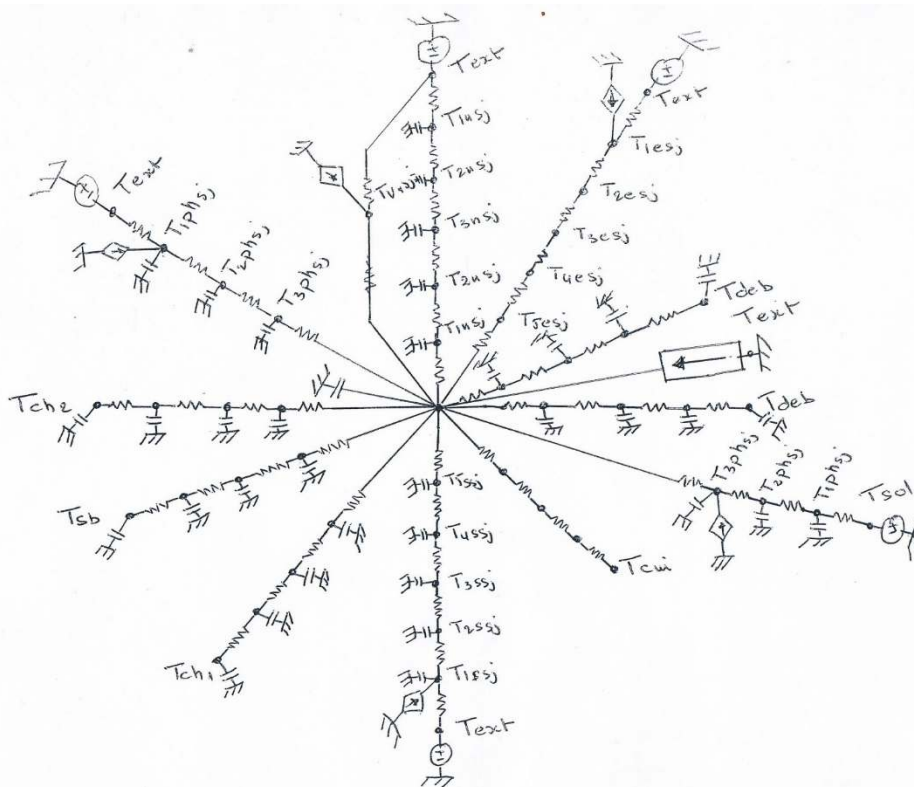


Figure 34 : schéma électrique équivalent (séjour)

Information sur les deux sites :

	Blida	Djelfa
Altitude	341 mètres	1144 mètres
latitude	36.25°	34.4°
Longitude	2.49°	3.15°