

# MEMOIRE

Présenté

A

L'UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCCEN  
Faculté des Sciences – Département de Physique

Pour obtenir le grade de

**Magister**

**Option : Physique Electronique et Modélisation**

Par

**Mohamed GACEM**

Sur le Thème

---

---

**Comparaison Entre l'Isolation Thermique Extérieure et  
Intérieure d'une pièce D'un Habitat Situé Dans Le Site De  
Ghardaïa**

---

---

Devant le jury d'examen :

**Président**

**B. BENYOUCEF** Professeur Université Abou bekr Belkaid Tlemcen

**Directeur du Mémoire**

**T. BENOUAZ** Professeur Université Abou bekr Belkaid Tlemcen

**Examineurs**

**A.E. MERAD** Maître de Conférences Université Abou bekr Belkaid Tlemcen

**N. BIBI TRIKI** Maître de Conférences Université Abou bekr Belkaid Tlemcen

**Membre Invité**

**S.M.A. BEKKOUCHE** : Maître de Recherche à l'U.R.A.E.R Ghardaïa

---

**Année Universitaire 2010-2011**

## *DEDICACES*

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents.

A mes sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# REMERCIEMENTS

Avec l'aide de Dieu tout puissant, j'ai pu accomplir ce modeste travail

Les travaux qui font l'objet de ce mémoire ont été réalisés au sein du laboratoire Physique Electronique et Modélisation du Département de Physique de la faculté des Sciences de l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen , sous la direction de Monsieur le Professeur BENOUAZ Tayeb.

Je tiens à lui exprimer particulièrement ma gratitude, c'est bien lui qui a dirigé ce mémoire avec une disponibilité de tous les instants ; il a guidé mes travaux avec patience et sérieux tout le long de la préparation de ce mémoire.

J'exprime aussi ma vive reconnaissance à Monsieur BEKKOUCHE Sidi Mohamed El Amine Maître de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergie Renouvelables de Ghardaïa pour ses conseils judicieux et le soutien qu'il m'a prodigué au cours de l'élaboration de ce mémoire ainsi que l'esprit d'initiative et de recherche qu'il a su me transmettre.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Messieurs les membres du jury.

À Monsieur Benyoucef Boumediene, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, pour honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

À Monsieur Bibi Triki Nasr Eddine , Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen , pour avoir accepté de juger ce travail.

À Monsieur Merad Abdelkrim , Maître de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie tous les membres du Laboratoire que j'ai pu côtoyer durant toutes ces années passées.

A tous ceux qui m'ont aidé, par une grande collaboration ou par une tendre parole.

**Gacem Mohammed**

# Table des matières

<b>Introduction Générale</b>	<b>5</b>
<b>1 Modes de Transfert de Chaleur</b>	<b>9</b>
1.1 Introduction . . . . .	9
1.2 Conduction . . . . .	10
1.2.1 Loi de Fourier . . . . .	10
1.2.2 Résistance thermique . . . . .	11
1.3 Convection . . . . .	13
1.3.1 Calcul du coefficient d'échange par convection . . . . .	13
1.3.2 Convection forcée . . . . .	14
1.3.3 Convection naturelle . . . . .	16
1.4 Transfert par rayonnement . . . . .	17
1.4.1 Puissance échangée entre deux corps . . . . .	17
1.4.2 Facteur de forme géométrique, exemples simples . . . . .	19
<b>2 Description et Inertie Thermique de l'Enveloppe</b>	<b>22</b>
2.1 Introduction . . . . .	22
2.2 Plan Descriptif des deux Pièces . . . . .	23
2.3 Détermination des Éléments de caractérisation de l'enveloppe . . . . .	26
2.3.1 Transmission de la chaleur à travers les murs . . . . .	27
2.3.2 Etude expérimentale . . . . .	31

2.4	Conclusion . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Théorie et Confrontation avec l'Expérience</b>	<b>36</b>
3.1	Introduction . . . . .	36
3.2	Vers le Modèle et la Simulation . . . . .	37
3.3	Rayonnement Solaire à l'Extérieur de l'Atmosphère . . . . .	37
3.4	Position du Soleil . . . . .	38
3.4.1	Coordonnées équatoriales . . . . .	38
3.4.2	Coordonnées horizontales . . . . .	40
3.5	Orientation d'un Plan . . . . .	42
3.6	Angle d'Incidence sur un Plan . . . . .	42
3.7	Méthode Semi-Empirique de Perrin Brichambaut . . . . .	43
3.7.1	Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair) . . . . .	43
3.7.2	Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert) . . . . .	44
3.8	Modélisation Physique des Phénomènes de Transferts Thermiques . . . . .	45
3.8.1	La salle du séjour . . . . .	47
3.8.2	La pièce . . . . .	49
3.9	Résultats Théoriques et Expérimentaux . . . . .	51
3.9.1	Journée du 26 Mai 2008 . . . . .	51
3.9.2	Journée du 05 Janvier 2009 . . . . .	54
3.10	Conclusion . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Etude Comparative, Isolation Thermique par l'Extérieur ou par l'Intérieur?</b>	<b>57</b>
4.1	Introduction . . . . .	57
4.1.1	Problème de l'isolation thermique . . . . .	58
4.1.2	Objectif de l'étude . . . . .	59
4.2	Isolation Thermique Extérieure et Intérieure, Comportement et Performance	59
4.2.1	Cas du mur isolé par l'extérieur . . . . .	59

4.2.2	Cas du mur isolé par l'intérieur . . . . .	60
4.3	Modifications Apportées aux Equations de Bilans Energétiques . . . . .	61
4.3.1	Isolation thermique intérieure . . . . .	61
4.3.2	Isolation thermique extérieure . . . . .	62
4.4	Mise en Oeuvre Numérique . . . . .	62
4.5	Conclusion . . . . .	67
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>70</b>

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

À l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment représente de 30 à 40 % de la consommation totale d'énergie et une forte part des impacts environnementaux d'origine anthropique. De ce fait, il présente un fort potentiel d'amélioration à la fois sur les plans énergétiques et environnementaux. Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, plusieurs éléments de solution peuvent être mis en oeuvre de manière complémentaire. Des solutions, appliquées au bâtiment, amènent à travailler simultanément sur la consommation du bâtiment, sa structure et ses divers équipements, dès la phase de conception [1].

L'un des buts principaux de la construction des bâtiments est de mettre les occupants à l'abri des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités. L'isolation thermique doit répondre à ce but. Il s'agit de protéger les occupants de manière automatique et passive des facteurs climatiques: pluie, vent, rayonnement solaire direct, rayonnement chaud ou froid de diverses parois. Le concepteur doit aussi faire en sorte que la consommation d'énergie (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par les règlements et les possibilités financières des occupants. L'évolution des techniques et le développement de nouveaux matériaux de construction contribuent à l'amélioration du confort thermique des usagers des bâtiments. Certains matériaux naturels encore mal connus peuvent entraîner une diminution des dépenses énergétiques des bâtiments par une meilleure qualité d'isolation et contribuer ainsi à la protection de l'environnement [2].

Avec les renforcements des normes, les recherches au niveau de la thermique du bâtiment se sont accentuées, en particulier l'isolation thermique de l'enveloppe qui joue un rôle important dans la maîtrise de la consommation d'énergie. En effet, une grande part des déperditions thermiques est liée aux pertes de chaleur à travers les murs, la toiture et le plancher. Pour cela, les recherches s'orientent principalement dans l'amélioration des techniques et des performances thermiques des isolants thermiques existants [3]. D'ail-



leurs, de nombreuses études et retours d'expériences ([1], [4] - [7]) sur les bâtiments les plus performants montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports solaires passifs, a mise en place d'une ventilation double-flux avec récupération de chaleur et, dans la plupart des cas, une isolation thermique de l'enveloppe.

La plupart des logements construits aujourd'hui en Algérie sont relativement non isolés, ce qui signifie que ces bâtiments ont de fortes déperditions thermiques et de fait consomment beaucoup plus d'énergie. De plus, ceux-ci sont chauffés grâce à des énergies fossiles, donc fortement pourvoyeurs de gaz à effet de serre responsable en partie des changements climatiques. L'élévation globale des températures et la forte consommation énergétique nécessitent l'élaboration des concepts à forte efficacité énergétique qui seront appliqués aux bâtiments. L'isolation thermique est complexe et très diversifiée. Selon les matériaux utilisés et les pièces à isoler, l'économie résultant de l'isolation thermique sont très variables. L'isolation thermique assure trois principales fonctions dans un logement. La première consiste à renforcer le confort en supprimant l'effet paroi froide l'hiver et paroi chaude l'été. La deuxième consiste à réduire les consommations d'énergie pour le chauffage et / ou la climatisation. Cette deuxième fonction induit la troisième qui consiste à rendre l'habitat plus écologique en diminuant les pollutions liées au rejet dans l'air des restes de combustibles.

La démarche de modélisation adoptée dans cette contribution étant un couplage des phénomènes thermiques. Ce travail s'appuie sur les recherches préalables de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables. L'objectif est de développer un modèle mathématique permettant de traiter les problématiques concernant la conception globale de l'enveloppe. C'est un outil adapté et couplé à la simulation numérique simplifiée et pouvant s'inscrire dans une démarche d'éco-conception des bâtiments, permettra en particulier d'effectuer de nombreux calculs en un temps restreint. Un recensement des techniques de conception dans les bâtiments permet de traiter principalement l'isolation thermique intérieure et extérieure des parois opaques verticales de l'enveloppe de l'habi-

tat choisi. La nécessité d'isoler thermiquement est surtout importante dans les parois qui sont soumises aux conditions climatiques extérieures d'une région aride ou semi-aride.

Toutefois, en Europe, compte tenu des nouvelles exigences de confort thermique, il est à retenir que l'isolation thermique des murs peut se faire par l'intérieur, les performances obtenues sont souvent moindres qu'une intervention par l'extérieur. Mais le chantier est plus économique et à la portée du bricoleur. L'objectif primordial dans ce mémoire est de faire une comparaison entre l'isolation thermique intérieure et extérieure de point de vue température. On veut démontrer aussi par une étude expérimentale que l'inertie thermique d'un bâtiment ou d'un logement en milieu Saharien se combine souvent avec l'isolation thermique des parois comme facteur de confort.

- Une bonne compréhension des types fondamentaux de Transfert Thermique est une nécessité fondamentale pour la plupart des cursus en thermique. Le premier chapitre aborde les trois modes de transfert de la chaleur à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement.

- Dans le deuxième chapitre, le plan descriptif des deux pièces mis en place est décrit, l'étude expérimentale de l'inertie thermique de l'habitat est importante pour pouvoir assurer une ambiance intérieure confortable.

- Le troisième chapitre est consacré à la mise en oeuvre numérique. Des résultats de simulation numérique ont été confrontés avec des données expérimentales mesurées pour voir dans quelle mesure la théorie s'accorde avec l'expérience.

- Les avantages de l'isolation par l'extérieur sont bien connus : absence de ponts thermiques sur les liaisons entre les murs et les planchers et inertie apportée par les murs du côté intérieur. Nous procéderons dans le quatrième chapitre à une étude comparative entre l'isolation thermique intérieure et extérieure de point de vue température. On peut voir par la suite est ce que cette technique reste économiquement avantageuse. L'analyse des résultats obtenus à partir des méthodes identifiées durant ces phases a permis de tirer quelques conclusions de ce travail et d'esquisser des perspectives.

# Chapitre I

## Modes de Transfert de Chaleur

# Chapitre 1

## Modes de Transfert de Chaleur

### 1.1 Introduction

La thermodynamique nous a montré qu'elle est essentiellement basée sur deux principes mesurant la variation d'énergie entre un état initial et un état final. Dans la majorité des cas, cette variation est due à des échanges de travail et thermique (chaleur). Pratiquement, le travail s'applique sur les fonctions d'états qui ont la propriété de ne dépendre que des états initial et final. Ainsi on n'étudie pas la nature et la durée de l'interaction du système avec l'extérieur qui est à l'origine de la variation de l'état du système. Lorsqu'on parle de « transferts thermiques », on cherche à expliquer la façon dont les transferts de chaleur se font ainsi que leur vitesse.

Le second principe de la thermodynamique spécifie que le transfert de chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid, ou de façon équivalente d'une température élevée vers une température plus basse. Le système ne sera donc pas en équilibre thermique durant le transfert. L'approche qu'on va poursuivre est essentiellement phénoménologique, cest à dire d'origine expérimentale, et macroscopique. Ainsi on parle de transfert thermique pour décrire un échange de chaleur lié à une différence de température. Plusieurs modes de transfert vont être étudiés mais dans tous les cas on peut définir la puissance transmise

entre deux points de températures différentes  $T_1 > T_2$  [8].

$$P = h S (T_1 - T_2) \quad (1.1)$$

L'unité de  $P$  est le Watt ( $W$ ) ou *Joule / s*.

Cette relation est connue sous le nom de loi de Newton,

$S$  est la surface au travers de laquelle le transfert se fait en  $m^2$ ,

$h$  un coefficient de transfert de chaleur en  $W m^{-2} K^{-1}$ .

Le but de l'étude thermique est souvent de déterminer  $h$ .

## 1.2 Conduction

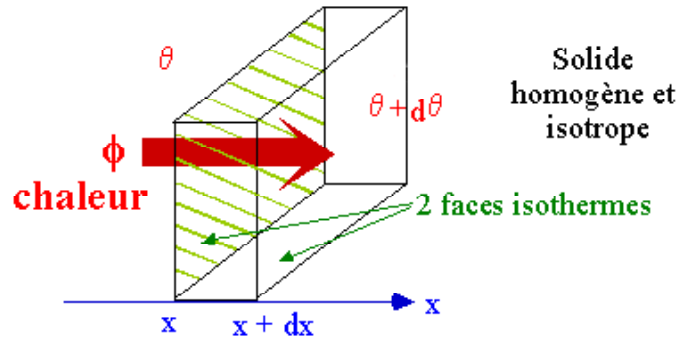
Ce mode de transfert de chaleur se retrouve dans tous les composants "solides" d'une transmission, c'est le plus simple. Il correspond au transfert de chaleur dans un solide d'un point chaud vers un point froid.

### 1.2.1 Loi de Fourier

Soit un corps solide, homogène et isotrope à travers lequel passe un courant unidirectionnel de chaleur. Soit une petite couche plane perpendiculaire à la direction  $x$  de propagation de la chaleur d'épaisseur  $dx$  et d'aire  $S$  à l'intérieur de ce milieu (figure 1.1). Les deux faces de cette couche sont des surfaces isothermes. La première est à la température  $\theta$  et la seconde à la température  $\theta + d\theta$  (avec  $d\theta < 0$ ). Le gradient de température  $\frac{d\theta}{dx}$ , est la variation de la température par unité de longueur, lorsqu'on se déplace dans la direction de propagation de la chaleur.

La conservation d'énergie au sein du volume défini par  $dx$  et  $A$  se traduit par l'équation (1.2).

$$k \left( \frac{d^2 \theta}{dx^2} \right) + Q = \rho C \frac{d\theta}{dt} \quad (1.2)$$



**Fig. (1.1):** Conduction dans une couche élémentaire de mur plan

$\rho$  : est la masse volumique de la pierre ( $Kg\ m^{-3}$ ).

$k$  : est la conductivité thermique de la pierre ( $W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ).

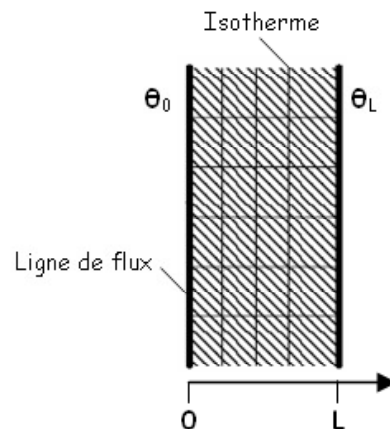
$C$  : est la chaleur spécifique ( $J\ Kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ).

$t$  : est le temps caractéristique ( $s$ ).

La fonction  $Q$  de l'équation (1.2) représente la source de la chaleur, les variables indépendantes sont la position  $x$  et le temps  $t$ .

### 1.2.2 Résistance thermique

Considérons le problème simple de conduction dans un mur (figure 1.2) de conductivité  $k$  constante et d'épaisseur  $L$ . A travers le mur, la température varie de  $\theta_0$  (température de la paroi gauche) à  $\theta_L$  (température de la paroi droite).



**Fig. (1.2):** Schématisation du mur monocouche.

L'équation qui gouverne le problème en stationnaire et sans génération interne de chaleur est:

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = 0 \quad \text{avec pour conditions limites} \quad \begin{cases} x = 0 \rightarrow \theta = \theta_o \\ x = L \rightarrow \theta = \theta_L \end{cases} \quad (1.3)$$

La solution de cette équation est:

$$\theta = \theta_o + (\theta_L - \theta_o) \frac{\theta}{L} \quad (1.4)$$

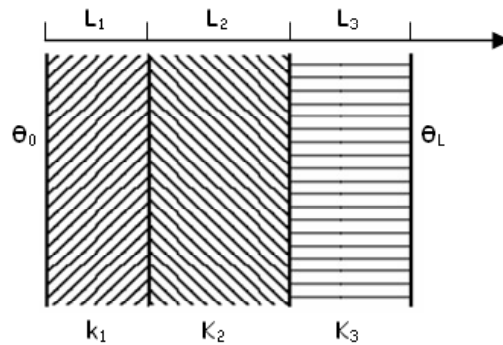
Le flux qui traverse le mur est:

$$\phi = \frac{k}{L} (\theta_o - \theta_L) = -k \frac{d\theta}{dx} \quad (1.5)$$

Si la section du mur est  $A$ , la quantité de chaleur qui traverse le mur est:

$$\Phi = \frac{k A}{L} (\theta_o - \theta_L) \quad (1.6)$$

On définit par  $\frac{k A}{L}$  la conductance et par  $\frac{L}{k A}$  la résistance thermique du mur.  
Pour un mur multicouches



**Fig. (1.3):** Schématisation du mur multicouches.

Les résistances thermiques s'expriment par:

$$R_i = \frac{L_i}{A_i k_i} \quad (1.7)$$

et la quantité de chaleur traversant le mur (Figure 1.3) par:

$$\Phi = \frac{\theta_o - \theta_L}{\sum R_i} \quad (1.8)$$

## 1.3 Convection

L'échange thermique par convection a pour origine le mouvement d'un fluide. En effet hormis le rayonnement à travers les corps transparents, la conduction est le seul mode de transmission de la chaleur à travers le solide. Pour les fluides, c'est différent:

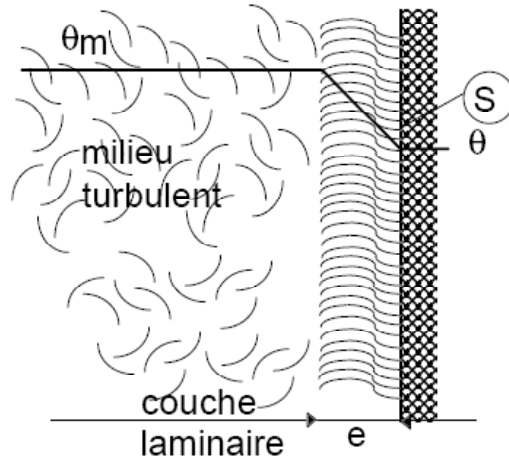
- le transfert thermique s'effectue par conduction lorsqu'il n'y a pas de mélange de matière, ou lorsque l'écoulement est laminaire,
- dans un écoulement turbulent en contact avec une paroi solide, il existe le long de la paroi une mince couche de fluide en écoulement visqueux que l'on considère comme laminaire. L'épaisseur de ce film laminaire dépend des propriétés physiques du fluide et de la nature de l'écoulement,
- dans une direction perpendiculaire à la paroi ( donc au ligne de courant), on admettra qu'il n'y a aucun mélange de matière et que la chaleur peut se transmettre que par conduction,
- en dehors de la couche laminaire, la chaleur se transmet par mélange des particules de fluides, provoquant une égalisation rapide de la température.

### 1.3.1 Calcul du coefficient d'échange par convection

Le flux thermique de conduction à travers la couche laminaire (Figure 1.4) peut s'exprimer par la loi de Fourier par:

$$\phi = \frac{\lambda}{e} S (\theta_m - \theta) \quad (1.9)$$





**Fig. (1.3):** Gradient thermique dans la couche laminaire.

Mais en général, on ne connaît pas  $e$ , de plus l'épaisseur du film laminaire dépend de la vigueur de la zone turbulente voisine. On exprime alors le flux thermique par:

$$\phi = h S (\theta_m - \theta) \quad (1.10)$$

$h$  ( $W / m^2 \text{ } ^\circ C$ ) est appelé coefficient d'échange par convection.

Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes:

- conduction entre les particules de fluides qui se rencontrent,
- mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide. Si ce mouvement n'est provoqué que par les différences de températures (donc de densité), la convection est naturelle. Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, mise en pression, etc...), la convection est forcée.

### 1.3.2 Convection forcée

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange  $h$  par convection est indépendant de la différence de température de la paroi et du fluide ( $\theta_m - \theta$ ) mais il dépend des six grandeurs suivantes:

- $U_m$  vitesse moyenne du fluide ( $W m^{-2} K$ ),

- $\rho$  masse volumique du fluide ( $Kg\ m^{-3}$ ),
- $C_p$  chaleur spécifique du fluide ( $J\ Kg^{-1}\ K^{-1}$ ),
- $\mu$  viscosité dynamique du fluide ( $Pa\ s$ ),
- $\lambda$  conductivité thermique du fluide ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ),
- $D$  dimension caractéristique de la surface d'échange ( $m$ ).

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivant:

Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{h D}{\lambda} \quad (1.11)$$

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (1.12)$$

Nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\rho} \quad (1.13)$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélations mathématiques pour les deux modes de convection (naturelle ou forcée).

Re le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide.

Si  $Re < 2000$ , l'écoulement est laminaire.

Si  $2000 < Re < 3000$ , l'écoulement est intermédiaire.

Si  $Re > 3000$ , l'écoulement est turbulent.

Pr: le nombre de Prandtl caractérise les propriétés thermiques du fluide.

Nu: le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

**Exemple: plaque verticale, oblique ou horizontale**

Il existe généralement deux expressions dans la littérature:

$$Nu = \frac{2}{3} Re^{0.5} Pr^{1/3} \quad (1.14)$$

$$Nu = \frac{0.036 \operatorname{Re}^{0.5} \operatorname{Pr}}{1 + 0.83 (\operatorname{Pr}^{1/3} - 1)} \quad (1.15)$$

### 1.3.3 Convection naturelle

Le mouvement du fluide est dû aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi. Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est fonction de sa température. La convection forcée est négligeable si:  $Gr/\operatorname{Pr}^2 > 100$

$$Nu = C (Gr \operatorname{Pr})^n \quad (1.16)$$

avec

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2} \quad (1.17)$$

Si la convection est laminaire  $Gr \operatorname{Pr} < 10^9$  et donc  $n = 1/4$

Si la convection est turbulente  $Gr \operatorname{Pr} > 10^9$  et donc  $n = 1/3$

**Exemple : plaque plane verticale ou horizontale de longueur  $L$  et de température uniforme.**

Si la convection est laminaire

$$Nu = 0.53 (Gr \operatorname{Pr})^{1/4} \quad (1.18)$$

Si la convection est turbulente

$$Nu = 0.104 (Gr \operatorname{Pr})^{1/3} \quad (1.19)$$

[8], [9] et [10]

## 1.4 Transfert par rayonnement

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée. Inversement, soumis à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en chaleur. Le rayonnement est un processus physique de transmission de la chaleur sans support matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid : le corps chaud émet un flux  $\phi_1$  et absorbe une partie du flux  $\phi_2$  émis par le corps froid. Comme  $\phi_1 > \phi_2$ , le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid. A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe.

On définit:

Coefficient d'absorption

$$\alpha = \frac{\text{flux absorbé}}{\text{flux incident}} \quad (1.20)$$

Coefficient d'émission

$$\varepsilon = \frac{\text{flux émis}}{\text{flux incident}} \quad (1.21)$$

Coefficient de réflexion

$$\rho = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}} \quad (1.22)$$

La conservation de l'énergie implique:

$$\alpha + \varepsilon + \rho = 1 \quad (1.23)$$

### 1.4.1 Puissance échangée entre deux corps

Entre deux corps noirs, l'un chaud (température  $T_1$ ), l'autre froid (température  $T_2$ ), en vis-à-vis total ( c'est à dire que tout le flux émis par l'un des corps est reçu par l'autre),

le flux net échangé s'écrit:

$$\Phi = flux\ émisi - flux\ absorbé = S \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.24)$$

$\sigma$  : constante de Stéfán-Boltzmann,  $\sigma = 5,67.10^{-8} (W.m^{-2}.k^{-4})$

Si les deux corps ne sont pas en vis-à-vis total, le flux net échangé entre deux corps s'écrit:

$$\Phi = S_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.25)$$

$T$  : température de la surface ( $K$ ).

$F_{1,2}$  : facteur de forme entre les surfaces  $S_1$  et  $S_2$ .

$S$  : aire de la surface ( $m^2$ )

$\Phi$  : flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces  $S_1$  et  $S_2$  ( $W$ ).

Où  $F_{1,2}$  est un nombre appelé facteur de forme qui fait intervenir la géométrie considérée et les émissivités des deux corps.

L'évaluation des facteurs de forme ou facteur d'angle, liés aux transferts de chaleur par rayonnement, entre deux surfaces.  $F_{ij}$  (facteur de forme) est une quantité purement géométrique, qui ne dépend ni de la nature ni de la température des deux surfaces. On peut aussi interpréter  $F_{ij}$  comme étant la probabilité pour qu'un rayon issu de  $S_i$  soit intercepté par  $S_j$ . Pour plusieurs surfaces on définit le facteur de forme général entre deux surfaces  $S_i$  et  $S_j$ :

$$Q_{ij} = S_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) = S_j F_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4) \quad (1.26)$$

$Q_{ij}$  : flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces  $i$  et  $j$ . Si le coefficient d'émission  $\varepsilon$  du corps est différent du facteur  $F_{ij}$ , on peut admettre que:

$$F_{ij} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} - 1 + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{S_i}{S_j} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right) - 1} \quad (1.27)$$

Les échanges par rayonnement entre deux surfaces quelconques d'un habitat mettent en jeu deux facteurs différents.

-L'angle sous lequel chaque surface est vue par l'autre.

-Leurs caractéristiques d'émission et d'absorption.

### 1.4.2 Facteur de forme géométrique, exemples simples

Le facteur de forme géométrique ne dépend que de la géométrie et de la disposition relative des surfaces  $S_i$ .

$$S_i F_{ij} = S_j F_{ji} \quad (1.28)$$

$$\sum_{j=1}^{j=n} F_{ij} = 1 \quad (1.29)$$

$n$  : le nombre de surfaces entourées par la surface  $i$ .

Ces deux relations sont utiles pour la détermination des facteurs de formes de plusieurs surfaces.

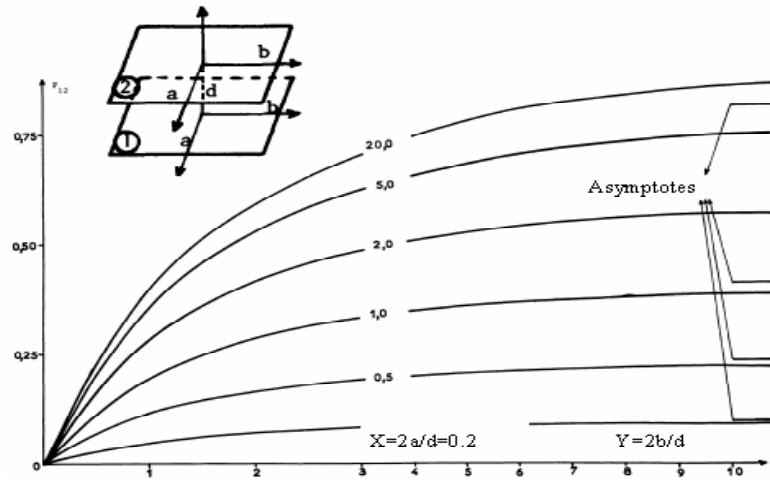
Si les surfaces  $S_i$  et  $S_j$  sont planes, subséquentement elles ne peuvent pas rayonner vers elles mêmes puisqu'elles ne sont pas convexes.

#### Facteur de forme entre deux surfaces rectangulaires (ou carrées) planes et parallèles

Facteur de forme entre deux surfaces rectangulaires (ou carrées) planes et parallèles, centrées et de mêmes dimensions.  $x = x' = y = y'$  : rectangles de mêmes dimensions.

$$F_{12} = \frac{1}{2 \pi x^2} [F(2x, 2x) - F(2x, 0) - F(0, 2x)] \quad (1.30)$$

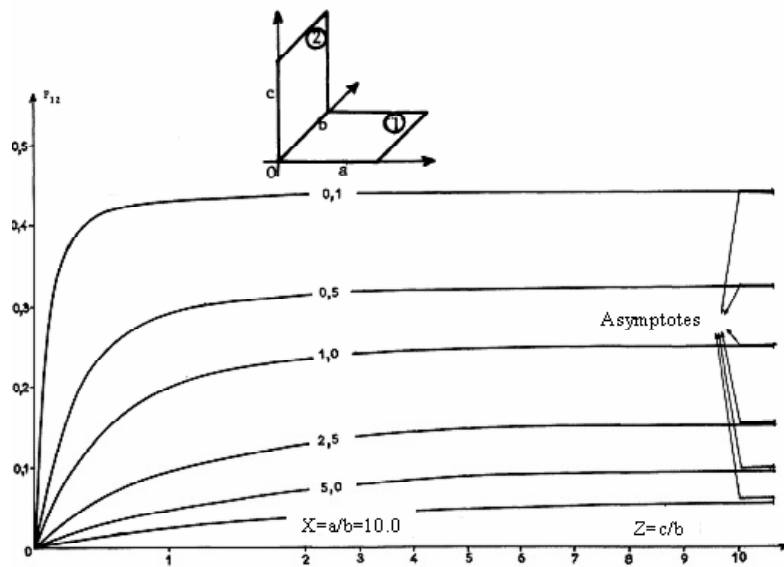
Nous avons représenté sur la figure (1.4) quelques courbes donnant les facteurs de forme de deux surfaces rectangulaires égales parallèles et opposées représentatives de la formule précédente [11] et [12].



**Fig.(1.4):** Facteurs de forme de deux surfaces rectangulaires et parallèles de mêmes dimensions

### Facteur de forme entre deux surfaces adjacentes perpendiculaires

Le facteur de forme de 1 vers 2 est calculé à partir de la figure suivante.



**Fig.(1.7):** Facteurs de forme de surfaces rectangulaires.

Ainsi que nous l'indiquons que les solutions proposées ici permettent de résoudre sans approximation les cas pratiques les plus courants [11], [12]..

## **Chapitre II**

### **Description et Inertie Thermique de l'Enveloppe**



# Chapitre 2

## Description et Inertie Thermique de l'Enveloppe

### 2.1 Introduction

L'enveloppe d'un bâtiment correspond à la notion de clos et de couvert tant en ce qui concerne la couverture que les façades ou les parties enterrées. C'est l'interface entre un espace qui doit satisfaire aux besoins de confort et de protection de ses occupants, et un environnement qui présente de l'inconfort et des risques. Elle est de ce fait, soumise à de multiples actions et la pérennité de ses performances doit être assurée. Placée dans le contexte général de la maîtrise de la demande énergétique et de la réduction des gaz à effet de serre, l'approche intégrée de la performance énergétique de l'enveloppe, considérée comme un composant thermique, demande une analyse multicritère des composants et des fonctions à assurer. L'étude de la paroi, milieu incontournable de transferts de chaleur et point sensible dans l'acte de conception d'un bâtiment, demande en particulier une approche du couplage avec la maîtrise des ambiances intérieures en conditions estivales et hivernales, exigences récentes sur les plans de la réglementation et de la normalisation. L'impact de la perméabilité à l'air de l'enveloppe et l'optimisation de matériaux isolants constituent des problématiques importantes, qu'il faut associer aux aspects sanitaires de

la qualité de l'air et au confort thermique en période estivale.

Les travaux de recherche et de développement antérieurs (de [13] à [19]) ont permis une évolution technologique en vue de répondre aux exigences des différents programmes. Cependant, l'enveloppe joue un rôle clé dans la réduction des besoins énergétiques du bâtiment. L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe peut être obtenue par l'isolation, le traitement des ponts thermiques, la maîtrise des transferts d'air et d'humidité, l'amélioration des vitrages..., ce qui permet de mieux maîtriser la consommation d'énergie, que ce soit pour le chauffage ou la climatisation. Toutefois, plusieurs travaux récents ([13], [14]), dont certains ont été effectués par l'Equipe Architecture Solaire et Bioclimatique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, ont permis de prouver que l'enveloppe de ces types de construction est la cause principale de la grande part des déperditions incontrôlées. A cet effet, on se base dans ce chapitre sur la campagne expérimentale de prélèvements et de mesures qui a été effectuée par l'équipe en période estivale pour évaluer les températures intérieures et caractériser l'inertie thermique de l'enveloppe.

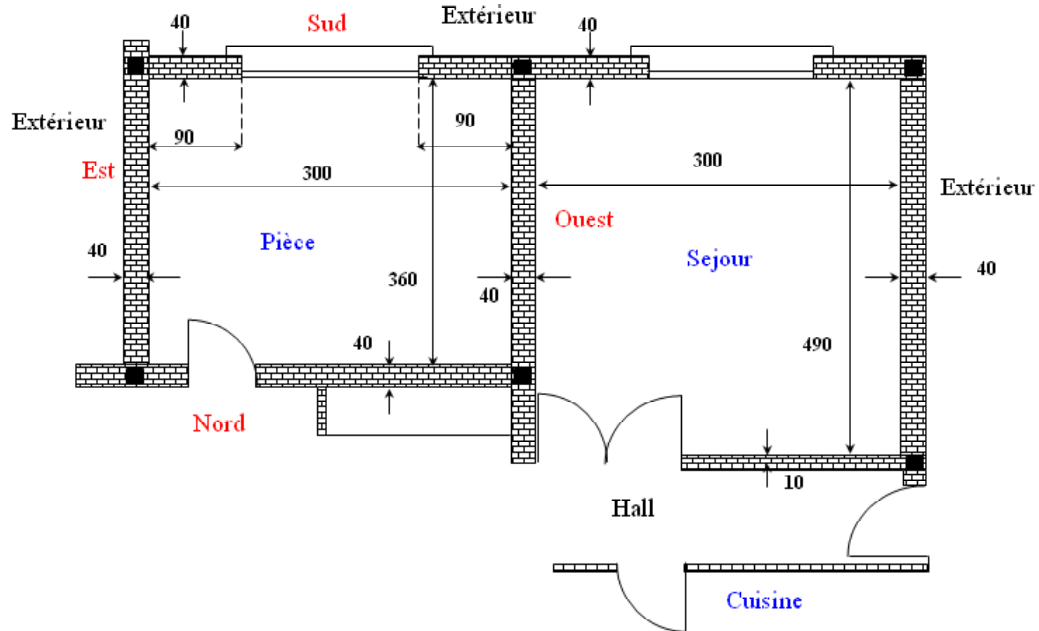
## **2.2 Plan Descriptif des deux Pièces**

Généralement, la pierre n'est plus un matériau très utilisé en Algérie. Réputée chère et difficile à mettre en oeuvre, elle disparaît progressivement de la construction neuve au profit du Bloc béton ou de la brique. Les logements de Ghardaïa ont été notre source d'inspiration dans la proposition de ce plan. Il est adapté aux commodités de la vie contemporaine, tel que l'utilisation des matériaux locaux à l'image de la pierre qui disponible dans la région, le plâtre, la chaux et même le ciment mortier. Les figures 2.1 - 2.6 sont des schématisations de deux chambres d'une habitation réelle (URAER) située au rez-de-chaussée ou au premier étage comprenant les éléments suivants:

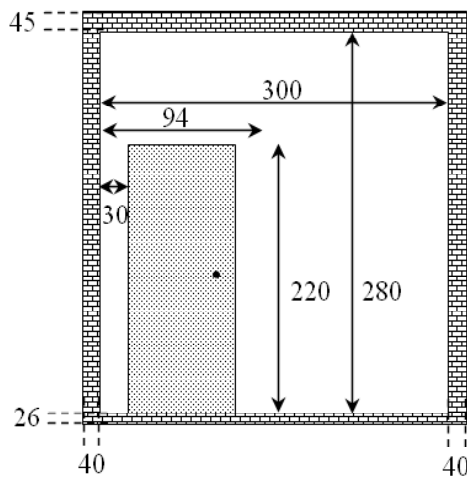
- L'enveloppe du bâtiment ou parois extérieures constituées d'une structure lourde généralement en 40 cm de pierre, en deux couches de 1.5 cm du ciment mortier et en couche

supplémentaire de 1 cm d'enduit de plâtre.

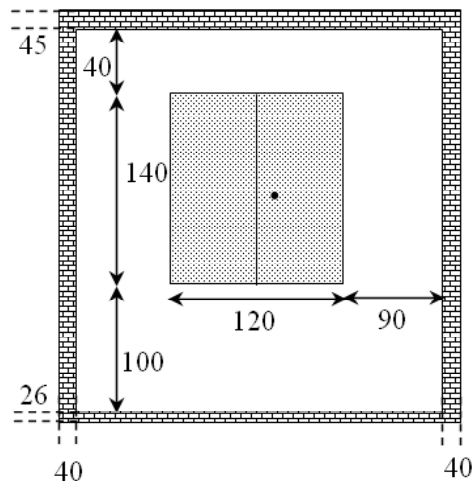
- Les parois intérieures (murs de refend) dont les faces sont seulement en contact avec l'ambiance intérieure sont composées d'une structure lourde de 15 cm de pierre, de deux couches de 1.5 cm du ciment mortier et de deux couches de 1 cm d'enduit de plâtre.



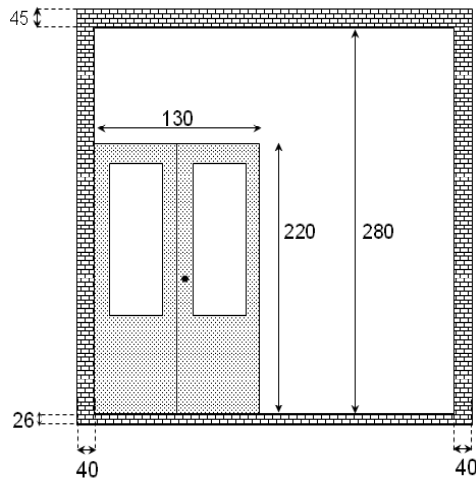
**Fig.(2.1):** Plan descriptif



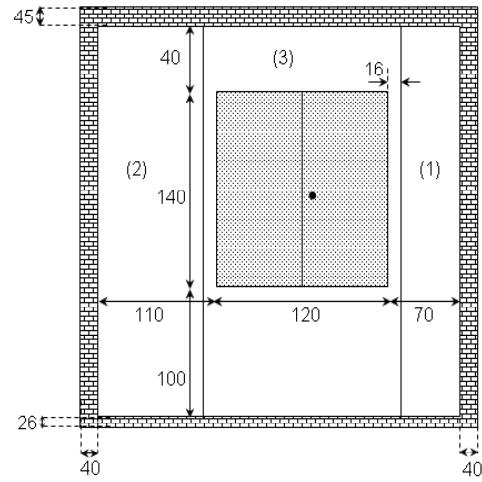
**Fig.(2.2):** Mur Nord de la pièce, vue intérieure.



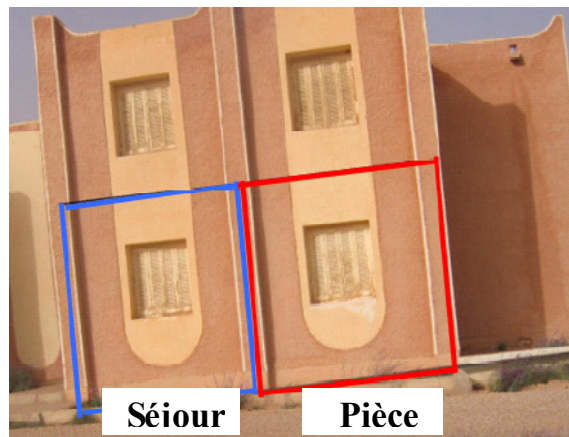
**Fig.(2.3):** Mur Sud de la pièce, vue intérieure.



**Fig.(2.4):** Mur Nord du séjour,  
vue intérieure.



**Fig.(2.5):** Mur Sud du séjour,  
vue intérieure.



**Fig.(2.6):** Vue de l'extérieur.

- Le plancher est posé sur une terre pleine et plate pour le logement du rez-de-chaussée. Il est situé et coulé directement sur le sol, n'occasionne que peu de déperditions. La forme est constituée de sable, du béton et du carrelage. C'est un revêtement de finition, permet un traitement surfacique, antidérapant, résistant à l'usure, aux produits chimique.
- Le toit est composé d'hourdis ciment, d'une dalle de béton, du sable et du ciment mortier de telle façon que les fondations tiennent le coup et acceptent la charge. Pour permettre l'écoulement des eaux, on aura une petite pente (moins de 5%) et plusieurs trous d'évacuation. Jusqu'à présent, les toits plats étaient plus perçus comme des nids à

infiltration que comme une solution architecturale.

- Les fenêtres et les portes contribuent dans le bilan énergétique, elles dépendent de nombreux facteurs, tels que le climat local, l'orientation, le cadre (châssis + intercalaire), la surface relative (fenêtre plancher), la performance des occultations nocturnes et solaires. Dans ce cas, on se focalise uniquement sur les surfaces de la fenêtre et de la porte. On les considère en bois ordinaire.

Ghardaïa, oasis sahariennes situées au Sud de la capitale (600 km), ces régions connues par leur climat aride caractérisé par le manque des précipitations (160 mm/an) et la rarefaction des terres agricoles, des températures diurnes très élevées en été, et des températures basses en hiver (gelées durant les mois de décembre à mi-février).

## **2.3 Détermination des Éléments de caractérisation de l'enveloppe**

La performance énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment est évaluée en fonction des éléments suivants:

- Coefficient de déperdition par transmission, correspondant au flux thermique cédé entre l'espace chauffé et les espaces non chauffés (extérieur, sous-sol, espaces non chauffés).
- Coefficient de transmission surfacique.
- Coefficient de transmission linéique, correspondant au flux thermique en régime stationnaire par unité de longueur.
- Résistance superficielle
- Coefficient moyen de déperdition spécifique par transmission à travers les parois
- Inertie adaptée...[20], [21] et [22].

## 2.3.1 Transmission de la chaleur à travers les murs

### Résistances thermiques des murs à la conduction

Le flux de chaleur par  $m^2$  transmis par conduction à travers un mur plan dépend:

- De l'épaisseur de la paroi
- De la nature du matériau
- Des températures de la face interne et de la face externe du mur

Plus  $\lambda/e$  augmente plus le mur conduit la chaleur,  $\lambda/e = k$  coefficient de conduction du mur.

Plus  $\lambda/e$  diminue ou plus  $\lambda/e$  augmente moins le mur conduit la chaleur, plus le mur résiste au passage de la chaleur, plus il est isolant.

On appelle résistance thermique d'une paroi ou d'un mur à la conduction  $R = e / \lambda$   
 $\Leftrightarrow r = 1 / k$  Dans le cas d'une paroi ou d'un mur composé de plusieurs couches de différents matériaux, la résistance à la conduction de l'ensemble, est la somme de toutes les résistances de chaque matériau  $R = \Sigma e / \lambda$  [20].

### Résistances thermiques superficielles des murs

L'échange de chaleur entre la surface d'une paroi à la température  $\theta$  et le fluide à la température  $T$  dans lequel elle baigne (l'air) se fait par convection et par rayonnement. Le flux de chaleur transmis par  $m^2$ , par convection et rayonnement est:

$$\varphi = h (T - \theta) \quad (2.1)$$

$h$  est le coefficient d'échange thermique de surface. Il dépend de la nature de mur, de son orientation, de la vitesse et de la direction de l'air qui entre en contact avec elle...etc.

$1/h$  est la résistance thermique superficielle du mur.

Si on tient compte des phénomènes de conduction, de convection et de rayonnement, on utilise alors:  $R$  la résistance thermique globale par  $m^2$  de la paroi dont  $K$  le coefficient

de transmission thermique utile ou global de la paroi.

$$K = \frac{1}{R} \quad (2.2)$$

$K$  s'exprime en  $W \ m^{-2} \ K^{-1}$  ou  $W \ m^{-2} \ ^\circ C^{-1}$ .

$R$  s'exprime en  $W^{-1}m^2 \ K$  ou  $W^{-1} \ m^2 \ ^\circ C$ .

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (2.3)$$

$K$  représente l'aptitude d'une paroi à permettre le passage de la chaleur entre les deux milieux qu'elle sépare. Plus  $K$  est grand, plus la qualité thermique de la paroi est mauvaise. La détermination du coefficient  $K$  est la base de tous les calculs thermiques du bâtiment: puissance des appareils de chauffage à installer, température de surface des parois, bilan thermique...[20]

Le flux de chaleur qui est transmis entre les deux milieux, de températures respectives  $T_i$  et  $T_e$  séparé par la paroi est donc:

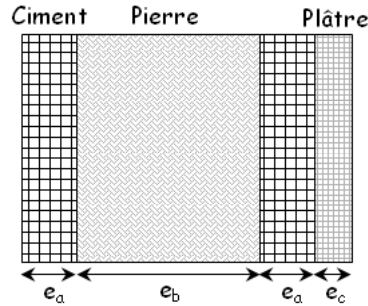
$$\varphi = K (T_e - T_i) \quad (2.4)$$

	<i>Résistance superficielle interne (surface intérieure)</i>	<i>Résistance superficielle externe (surface extérieure ou ventilée)</i>	<i>Résistance superficielle d'une paroi donnant sur l'extérieure ou sur un local ventilé</i>	<i>Résistance superficielle d'une paroi donnant sur un autre local en atmosphère calme</i>
<i>En <math>m^2 K W^{-1}</math> ou en <math>m^2 ^\circ C W^{-1}</math></i>	$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_i}$
<i>Murs verticaux</i>	0.11	0.06	0.17	0.22
<i>Murs horizontaux ou obliques et flux ascendant</i>	0.09	0.05	0.14	0.18
<i>Murs horizontaux et flux descendant</i>	0.17	0.05	0.22	0.34

**Tableau 1:** Calcul des résistances thermiques superficielles des différents murs.

## Application numérique

Les murs Sud, le mur Ouest de la salle du séjour et le mur Est de la pièce se composent de deux couches de ciment mortier, une couche de la pierre lourde et une couche de du plâtre.



**Fig.(2.7):** Couches constituant les murs Sud, Ouest de la salle du séjour et Est de la pièce.

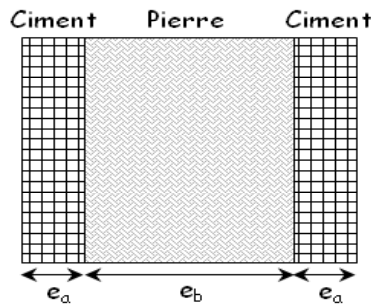
Il s'agit des murs verticaux en contact avec l'extérieur. Donc la résistance superficielle est:

$$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = 0.11 + 0.06 = 0.17 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$$

La résistance thermique globale de ces murs est:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{2 e_a}{\lambda_a} + \frac{e_b}{\lambda_b} + \frac{e_c}{\lambda_c} = 0.3639 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1} \implies K = \frac{1}{R} = 2.748 \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}$$

A l'exception du plâtre, la cloison séparant le séjour de la pièce constitue les mêmes matériaux de construction et avec les mêmes épaisseurs.



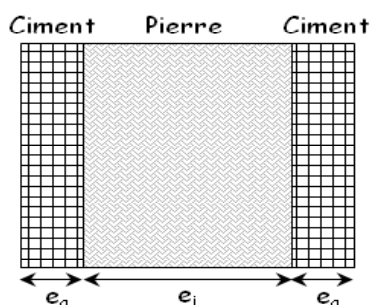
**Fig.(2.8):** Composition de la cloison qui sépare le séjour de la pièce.



La résistance thermique globale est:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{2 e_a}{\lambda_a} + \frac{e_b}{\lambda_b} = 0.3389 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1} \implies K = \frac{1}{R} = 2.9507 \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}$$

Le mur Nord est constitué de deux couches du ciment mortier et une couche plus mince de la pierre lourde.

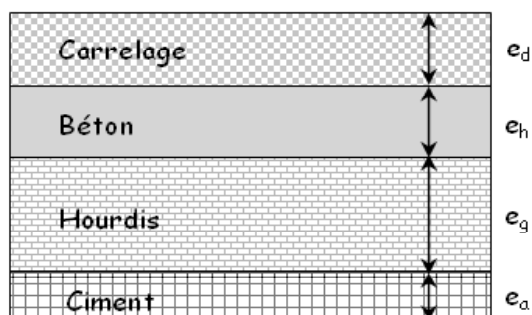


**Fig.(2.9):** Composition du mur Nord

La résistance thermique globale de ces murs est:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{2 e_a}{\lambda_a} + \frac{e_i}{\lambda_b} = 0.2818 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1} \implies K = \frac{1}{R} = 3.5486 \text{ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}$$

Les toits sont constitués du ciment mortier, d'hourdis ciment, du béton et une couche de carrelage.



**Fig.(2.10):** Composition des toits

Il s'agit dans ce cas des surfaces horizontales en contact avec l'habitat du premier étage.

La résistance thermique globale du toit est:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_a}{\lambda_a} + \frac{e_g}{\lambda_g} + \frac{e_h}{\lambda_h} + \frac{e_d}{\lambda_d} = 0.5774 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1} \implies K = \frac{1}{R} = 1.7319 \text{ m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}$$

Les épaisseurs et les valeurs des conductivités thermiques utilisées dans les calculs sont:

$$e_a = 0.015 \text{ m}, e_b = 0.4 \text{ m}, e_c = 0.01 \text{ m}, e_i = 0.1 \text{ m}, e_g = 0.2 \text{ m}, e_h = 0.045 \text{ m}$$

$$\lambda_a = 1.15 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \lambda_b = 2.8 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \lambda_c = 0.4 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1},$$

$$\lambda_g = 1.1 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, \lambda_h = 1.4 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

### 2.3.2 Etude expérimentale

L'analyse par l'étude expérimentale vise le comportement thermique de ces deux chambres heure par heure. Elle permet de déterminer quelques solutions améliorant les conditions de confort et les performances énergétiques de l'habitation. La connaissance de l'évolution des températures permet de mieux appréhender les situations de confort ou d'inconfort rencontrées et de calculer les besoins énergétiques en tenant compte des variations climatiques jour/nuit. Pour effectuer les mesures, nous avons utilisé une unité d'acquisition de type Fluke Hydra Série II qui, quelque soit sa qualité, cumule à tous les niveaux des erreurs même si elles ne sont pas vraiment considérables. Une autre difficulté inhérente réside dans la présence des phénomènes de bruitage et plus particulièrement les bruits liés aux mesures. Les thermocouples type K sont utilisés pour la mesure des températures des parois et de l'air. Le principe est basé sur l'effet Seebeck. Pour la mesure des températures des murs Sud et Nord, cinq thermocouples ont été placés en différents points sur chaque paroi. De même, nous avons recueilli les valeurs des températures intérieures de l'air ambiant en plaçant les cinq thermocouples dans différents points. Les valeurs expérimentales tracées dans les figures sont obtenues en faisant les moyennes de celles enregistrées. Pour ce faire, on prend les exemples donnés par les figures 2.11 et 2.12 qui représentent les courbes des températures de chaque lieu.

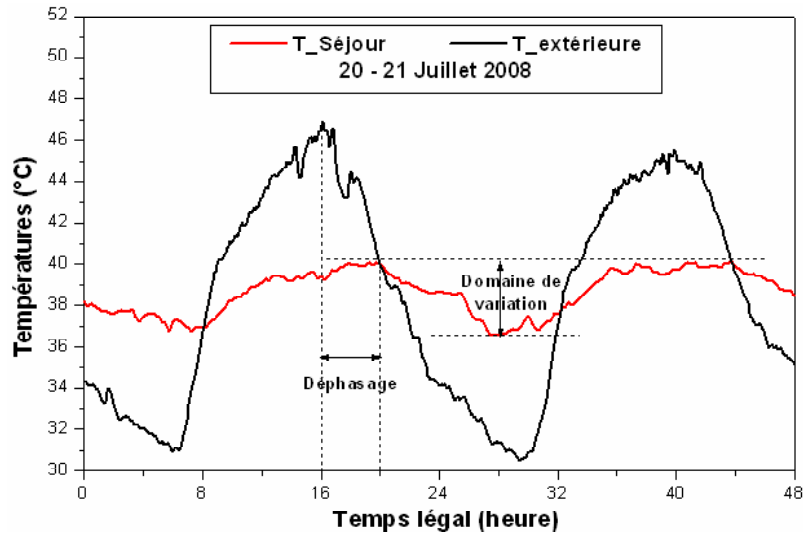


Fig.(2.11): Températures mesurées intérieure et extérieure, Ghardaïa le 20-21 Juillet 2008.

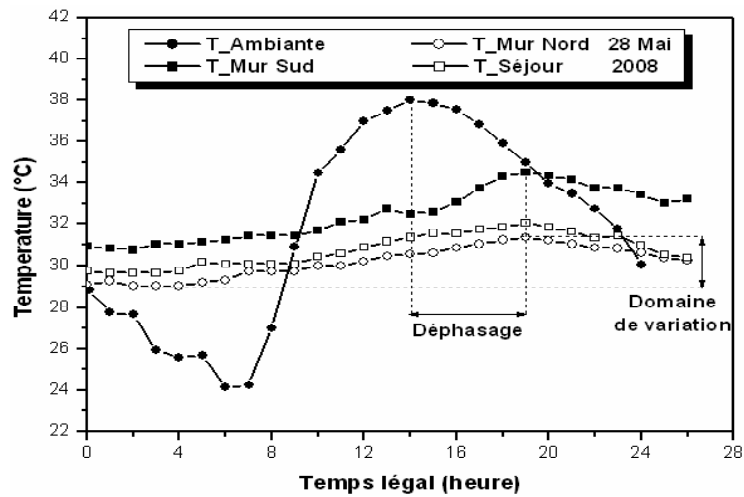


Fig.(2.12): Températures mesurées intérieure et extérieure, Ghardaïa le 20 Mai 2008.

A travers les figures précédentes, on prouve qu'un mur épais en pierre lourde n'isole pas dans ces conditions. Mais, il devra ralentir par son inertie, l'entrée de la chaleur. En principe, l'ambient intérieure doit être rester fraîche en été grâce à leurs murs en pierre à forte inertie thermique. Ces murs épais possèdent un fort déphasage permettant de faire entrer la fraîcheur la nuit dans le mur puis de la restituer la journée. Pour

cela, la pierre deviendra le matériau idéal: dense, apte à stocker et conductible pour favoriser le stockage à condition qu'il existe des nuit fraîches. Effectivement, c'est ça le problème dans ces régions arides: en été, les températures ambiantes extérieures restent presque tout le temps élevée même durant la nuit. L'inertie thermique consiste alors en une accumulation que de la chaleur dans l'enveloppe pour une restitution intérieure par radiation. La complexité de ce phénomène réside en ce que le flux de chaleur à travers l'enveloppe augmente successivement la température des matériaux ce qui permet d'augmenter en même temps la température de l'air de l'habitat.

### **Explication**

L'inertie thermique (ou la masse thermique) est le potentiel de stockage thermique d'un local ou d'une maison. En été, le bâtiment accumule la chaleur puis la restitue de manière diffuse à l'intérieur avec un décalage plus ou moins important dans le temps suivant son inertie thermique. Le déphasage représente le décalage de temps entre le pic de température extérieure et le pic de température à l'intérieur du bâtiment. Il est considéré comme un atout pour le confort d'été car il retarde le transfert de chaleur à travers les murs dans la journée. Plus un matériau est isolant plus il déphase. C'est logique la chaleur se déplace lentement dans celui-ci. Les courbes représentent le déphasage provoqué par l'inertie thermique de l'habitat considéré, elle montre l'évolution journalière des températures du séjour, comparées aux températures extérieures. L'utilisation de la pierre contribue à donner au bâtiment une inertie forte. Elle favorise une plus grande stabilité des températures. Donc, elle offre aux maîtres d'oeuvre une réponse constructive pour réaliser des habitations bien conçues en matière de confort thermique d'été dans d'autres régions dont les nuits sont suffisamment fraîches.

## **2.4 Conclusion**

On peut retenir d'après ces études expérimentales que l'inertie thermique des murs joue un rôle contradictoire. Les faibles variations de température mesurée ont pour consé-

quence de pénaliser le confort à l'intérieur du logement en générale.

L'optimisation de la forme et la structure fonctionnelle d'un habitat en pierre à Ghar-daïa de la construction en vue de faire des économies d'énergie doivent constituer un autre travail pertinent. Une bonne solution pour analyser l'effet de la géométrie de la construction sur la consommation d'énergie est d'utiliser par exemple un indicateur, appelé coefficient de forme qui est défini comme le rapport entre le volume du bâtiment et la somme de toutes les surfaces qui sont en contact avec l'extérieur.

## **Chapitre III**

### **Théorie et Confrontation avec l'Expérience**

# Chapitre 3

## Théorie et Confrontation avec l'Expérience

### 3.1 Introduction

La modélisation d'un bâtiment dans sa globalité est en général constituée d'un réseau complexe de résistances et de capacités thermiques entre les différentes zones internes du bâtiment et entre ces zones et l'environnement proche du bâtiment. Différents types d'outils sont utilisés en physique du bâtiment. Leur utilisation dépend principalement du phasage des étapes de la conception du projet. Ainsi, les règles dites expertes sont plus adaptées au niveau de l'esquisse, les codes simplifiés adaptés permettent les itérations au niveau d'un avant-projet sommaire et les codes spécialisés sont utilisés pour l'évaluation d'un avant-projet détaillé en préalable...

En raison du coût et des durées expérimentales, la modélisation-simulation est un moyen efficace pour mettre au point et étudier le comportement thermique des bâtiments en régime variable. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel MATLAB car il présente l'avantage de posséder une bibliothèque intéressante. Olgyay, malgré sa démarche clairement déterministe, reconnaissait ainsi que la modélisation dans l'architecture, dans toute sa diversité, constitue un mode d'expression privilégié du développement durable [23].

## 3.2 Vers le Modèle et la Simulation

La notion de modèle comme norme abstraite se développe alors en physique. Le modèle est ici un intermédiaire à qui les physiciens délèguent la fonction de connaissance, de réduction de l'encore énigmatique à du déjà connu, notamment en présence d'un champ d'études dont l'accès est difficilement praticable. Si modéliser, c'est déléguer la fonction de connaissance afin de représenter la réalité de façon à la fois économique et fiable, encore faut-il s'assurer que le modèle conserve un lien avec l'expérience [24].

Selon Etienne Guyon, modélisation et simulation restent des démarches distinctes. La modélisation, vu ses outils, garde plus de latitude par rapport au réel que la simulation. Les conditions du mimétisme absolu ne sont pas respectées puisque le modèle opère une simplification du phénomène, ne retenant que les variables les plus caractéristiques. Ceci constitue une approximation, mais qui suffit souvent pour réussir. En regard de cette modélisation, la simulation semble une approche plus coûteuse, puisqu'elle invite à conserver tous les paramètres du problème initial [24]. En effet, ces principes restent justes même pour l'estimation des rayonnements solaires incidents sur les murs de l'habitat. Après le calcul de la position du soleil, on s'intéresse au calcul des éclairagements incidents sur les murs.

## 3.3 Rayonnement Solaire à l'Extérieur de l'Atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre est en fonction de la constante solaire  $I_0$  et de la correction de la distance entre la terre et le soleil . La constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est:  $I_0 = 1367 \text{ (} W \text{ m}^{-2}\text{)}$

$I_0$  est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable



(trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{ts} = 1 + 0.034 \cos \left( \frac{360}{365} (N - 2) \right) \quad (3.1)$$

$$I = I_o C_{ts} \quad (3.2)$$

Dans le modèle de R.sun, La correction terre soleil est donnée par la formule suivante:

$$C_{ts} = 1 + 0.034 \cos \left( N' - 0.048869 \right) \quad (3.3)$$

$$N' = 2 \pi \times \frac{N}{356,25} \quad (3.4)$$

$N$ : est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier. (De [25] au [29]).

## 3.4 Position du Soleil

La terre tourne autour du soleil, mais bien sûr vu de la terre, on dirait plutôt que c'est le soleil qui tourne autour de la terre. Pour cette raison, on cherche à exprimer la position du soleil par rapport à un repère local.

### 3.4.1 Coordonnées équatoriales

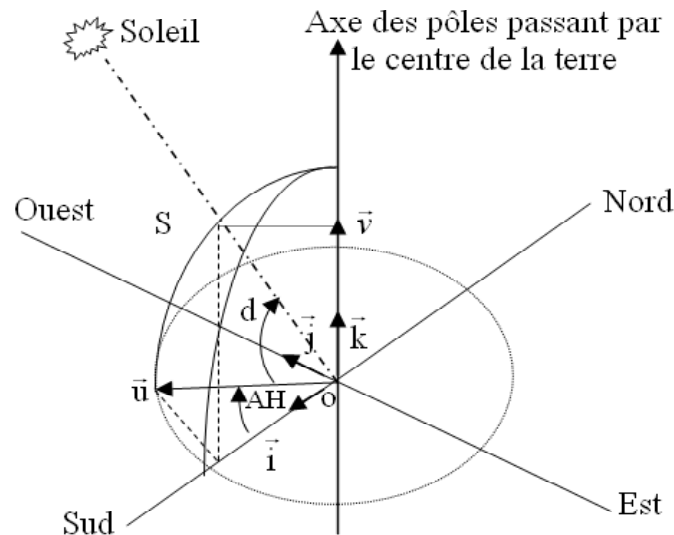
Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles  $(\delta, H)$ .

#### Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Dans le repère équatorial absolu, la position du soleil est repérée par l'ascension droite et la déclinaison, qui correspondent respectivement à l'angle que fait la projection du soleil sur l'équateur céleste avec le point vernal, et à l'angle entre le soleil et l'équateur céleste. L'ascension droite s'exprime en heures, minutes et secondes, alors que la déclinaison

s'exprime en degrés. On rappelle que l'inclinaison de l'axe de la terre par rapport au plan de l'écliptique (obliquité) est  $\varepsilon = 23^{\circ} 27' = 23,45^{\circ}$  et que la déclinaison  $\delta$  vérifie  $-\varepsilon < \delta < \varepsilon$ .

$$\sin(\delta) = 0.398 \times \sin \left\{ \frac{360}{365} \times (N' - 82) + 2 \times \sin \left( \frac{360}{365} \right) \times (N' - 2) \right\} \quad (3.5)$$



**Fig.(3.1):** Repère équatorial

### Angle horaire du soleil

C'est l'angle compris entre le méridien origine passant par le Sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Dans le repère équatorial local ayant pour plan de référence le plan de l'équateur céleste et pour grand cercle origine le méridien local, la déclinaison du Soleil est la même que dans le repère équatorial absolu, mais la longitude du Soleil sera comptée à partir du méridien local. Elle sera appelée Angle Horaire et notée  $H$

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (3.6)$$

Il faut relier l'angle horaire  $H$  au temps légal. Le temps solaire vrai est défini à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. La terre fait un tour complet en  $24 H$ . Il est midi ( $12 H$ ) lorsque le soleil est au zénith, on a donc :

$$TSV = TL - DE \left( \frac{E_t + 4\lambda}{60} \right) \quad (3.7)$$

$TSV$  : Temps solaire vrai qui est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

L'angle  $H$  vaut  $0^\circ$  à midi,  $90^\circ$  à 18 heures et  $-90^\circ$  à 6 heures en heure solaire vrai.

$TL$  : temps légal (donné par une montre).

$DE$  : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 pour l'Algérie).

$E_t$  : est la correction de l'équation des temps. Cette correction varie au cours de l'année de  $-14,3$  ( $mn$ ) à  $16,4$  ( $mn$ ). Elle peut être calculée par la formule approchée suivante:

$$E_t = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \quad (3.8)$$

$E_t$  : calculée en minutes et en fraction décimale de la minute.

$\lambda$  : Longitude du lieu, en degrés.

### 3.4.2 Coordonnées horizontales

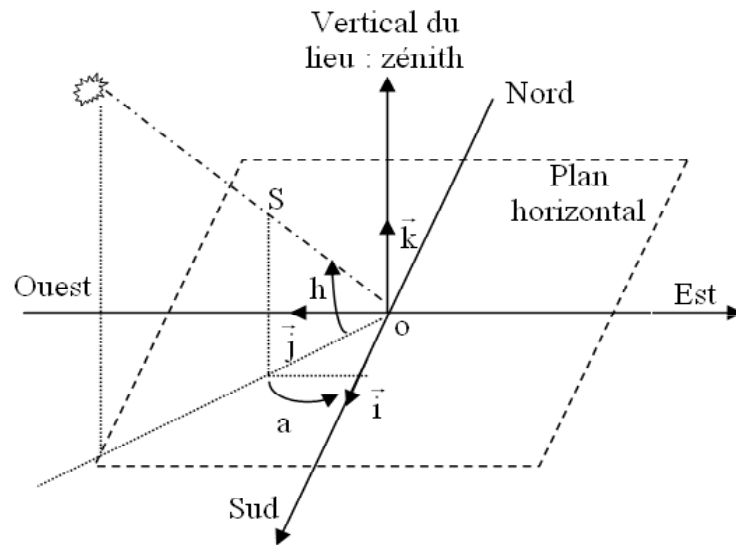
Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère pour plan de référence le plan de l'horizon local et pour grand cercle origine le méridien local, la position du soleil telle qu'elle est perçue par un observateur situé à la latitude  $\varphi$  et à la longitude  $\lambda$  est repérée par les angles appelés azimut et élévation (ou hauteur), respectivement notés  $a$  et  $h$ .

#### Hauteur du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.  
 $h = 0$  : correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre  $+90^\circ$

et  $-90^\circ$ .

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (3.9)$$



**Fig.(3.2):** Repère horizontal

### Azimut du soleil

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante pour calculer l'azimut du soleil:

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(H)}{\cos(h)} \quad (3.10)$$

L'azimut est compris entre  $-180^\circ$  et  $180^\circ$ . On trouve aussi dans la littérature une équation qui dépend de la déclinaison solaire  $\delta$ , de la latitude du lieu  $\varphi$  et de l'angle horaire  $H$

$$\cos(a) = \frac{\sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(H) - \cos(\varphi) \sin(\delta)}{\left\{ [\cos(\delta) \sin(H)]^2 + [\sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(H) - \cos(\varphi) \sin(\delta)]^2 \right\}^{0.5}} \quad (3.11)$$

### 3.5 Orientation d'un Plan

Un plan quelconque est défini par deux angles  $(\alpha, \gamma)$ :

$\gamma$ : hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

$\alpha$ : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud. L'inclinaison  $\beta$  du plan par rapport au plan horizontal est donnée par:

$$\beta = 90 - \gamma \quad (3.12)$$

### 3.6 Angle d'Incidence sur un Plan

L'angle d'incidence  $i$  est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales:

$$\cos(i) = \sin(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) - \sin(\gamma) \sin(h) \quad (3.13)$$

En coordonnées horaires:

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\alpha) \cos(\gamma) \sin(H) \cos(\delta) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ & (\cos(H) \cos(\delta) \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cos(\varphi)) \\ & + \sin(\gamma) (\cos(H) \cos(\delta) \cos(\varphi) + \sin(\delta) \sin(\varphi)) \end{aligned} \quad (3.14)$$

[24] et de [30] au [37]

## 3.7 Méthode Semi-Empirique de Perrin Brichambaut

Le rayonnement solaire qui arrive au sol peut se décomposer en deux parties: l'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffus), qui est mesurée par un pyranomètre muni d'un cache qui provoque l'ombre sur la cellule. L'ensemble forme le rayonnement global mesuré par un pyranomètre. Une approche théorique valable pour un ciel totalement clair a été choisie pour l'estimation des irradiances incidentes.

### 3.7.1 Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)

Pour un ciel clair, les éclairiments du rayonnement direct  $E_S$ , diffus  $E_D$  et global  $E_G$  reçus par un capteur sont donnés par les relations suivantes:

$$E_D = \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_H + \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) a^* G_H \quad (3.15)$$

$$E_S = A \cos(i) \exp\left(-\frac{1}{B \sin(h+2)}\right) \quad (3.16)$$

$$E_G = E_S + E_D \quad (3.17)$$

$$D_H = A (\sin(h))^{0.4} \quad (3.18)$$

$$G_H = A'' (\sin(h))^{B''} \quad (3.19)$$

$$[E_S] = [E_D] = [E_G] = [D_H] = [G_H] \quad (W / m^2) \quad (3.20)$$

$D_H$ : éclairiment diffus reçu par une surface horizontale.

$G_H$ : éclairiment global reçu par une surface horizontale.

$a^*$  : étant l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$a^* = \begin{cases} 0.9 \text{ à } 0.8 \text{ neige} \\ 0.8 \text{ à } 0.4 \text{ sol clair} \\ 0.4 \text{ à } 0.2 \text{ verdure} \end{cases} \quad (3.21)$$

$A, B, A', A'', B''$  : sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère.

Etat de l'atmosphère	$A$	$B$	$A'$	$A''$	$B''$
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	2.5	187	990	1.25

**Tableau.(3.1):** Paramètres décrivant l'état de l'atmosphère

### 3.7.2 Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert)

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuses continues, plus ou moins denses optiquement, et au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire. Dans ces conditions, le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que du rayonnement diffus. Si la couverture nuageuse est homogène, on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol. Le rayonnement global par un ciel couvert est:

$$E'_G = E'_D = k E_G (1 + 0.3 \sin(h)) \quad (3.22)$$

$k$  : coefficient qui dépend de l'état du ciel avant d'être recouvert par les nuages.

$k = 0.6$  pour un ciel bleu foncé.

$k = 0.3$  pour un ciel bleu clair.

$k = 0.6$  pour un ciel bleu laiteux. [24] et de [30] au [36]

## 3.8 Modélisation Physique des Phénomènes de Transferts Thermiques

Dans le domaine de l'énergétique des bâtiments, le modèle numérique prédictif est devenu en quelques années un outil très utilisé. Ainsi, des modèles de simulation ont été développés essentiellement pour répondre à des besoins de dimensionnement de l'enveloppe du l'habitat. Le but est l'étude de la variation des températures à l'intérieur en fonction des caractéristiques des matériaux qui la forment. Cela donne une meilleure compréhension des phénomènes et favorise une meilleure isolation thermique. Ces modèles ne concernent que les échanges thermiques. On ne peut donc pas étudier la stratification de l'air d'une zone, l'influence du vent sur les infiltrations d'air, la diffusion d'eau dans les parois,... Les changements d'état ne sont pas non plus pris en compte, donc le stockage par chaleur latente n'est pas traité, ni l'effet des variations d'humidité. C'est donc exclusivement l'enveloppe qui est étudiée [13], [14] et [24]. La méthode suivit vise à assurer la maîtrise des hypothèses et équations de base et à développer les aspects modélisation associés (rayonnement, convection et conduction). Un rappel de thermodynamique générale, permettant de reprendre les concepts classiques. Le premier principe est repris.

En appliquant la loi générale de la conservation de l'énergie, on aboutit à un système non autonome de dix huit équations différentielles ordinaires non linéaires. L'établissement des équations est possible pour toutes les techniques envisagées. On utilise la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4 pour donner les solutions du système. Cette méthode assure, en général, une meilleure stabilité de la solution que la méthode d'Euler. Le modèle mathématique proposé contient certaines hypothèses qui sont des considérations importantes et qui ont été déjà testées et n'ayant pas une influence sur la création et l'utilisation de ce modèle. On suppose que:

- Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels, perpendiculairement à ces parois.
- La distribution de la température sur les surfaces extérieures et intérieures des murs est



uniforme. Donc, les modèles mathématiques vont délivrer uniquement les températures moyennes de l'air et des parois.

- Le régime est permanent à travers les murs lorsque le flux passe d'une couche vers l'autre.
- La convection est naturelle (libre), l'écoulement est laminaire.
- Les portes et les fenêtres sont supposées fermées et en bois ordinaire. Ses températures seront mesurées et imposées. [13], [14] et [24].

Afin de compléter les modèles mathématiques, il faut déterminer également les conditions aux limites, environnantes et les conditions initiales pour la pièce et pour le séjour. Alors, il faut mesurer par exemple les températures du sol à une profondeur  $z$  donnée. Nous avons mesuré aussi les températures des portes et des fenêtres puisque ces dernières rentrent dans les bilans énergétiques globaux.

L'étude des transferts de chaleur dans l'enveloppe de ces deux pièces a révélé l'importance de la prise en compte de ces phénomènes à l'échelle de la paroi pour une bonne évaluation du comportement des ambiances intérieures et pour une meilleure prédiction des températures. Tout d'abord, une modélisation des transferts de chaleur a été entreprise à l'échelle des matériaux par les équations suivantes:

Le coefficient de transfert par rayonnement d'une surface  $i$  avec le ciel est:

$$h_{rciel} = \frac{\sigma (T_{ciel} + T_i) (T_i^2 + T_{ciel}^2)}{\frac{1 - \varepsilon_{ciel}}{\varepsilon_{ciel}} + \frac{1}{F_{iciel}}} \quad T_{ciel} = 0.0552 T_{am}^{1.5} \quad (3.23)$$

Le coefficient de transfert par rayonnement d'une surface  $i$  avec le sol extérieur est :

$$h_{riolext} = \frac{\sigma (T_{solext} + T_i) (T_i^2 + T_{solext}^2)}{\frac{1 - \varepsilon_{solext}}{\varepsilon_{solext}} + \frac{1}{F_{isolext}}} \quad (3.24)$$

On exprime le flux thermique échangé par convection avec l'ambiance par :

$$Q_{cviam} = h_{cviam} S_i (T_i - T_f) \quad (3.25)$$

Les bilans énergétiques des surfaces intérieures et extérieures sont donnés par les équations suivantes :

$$m C_p \frac{dT}{dt} = \sum Q_{absorbées} - \sum Q_{émises} \quad (3.26)$$

### 3.8.1 La salle du séjour

L'idée est d'avoir tout d'abord une comparaison sur les températures de l'air et de chaque surface pour identifier convenablement les directions des transferts de chaleur. Cette étude théorique est réalisée durant une période chaude. Elle est basée sur des remarques préliminaires qui nous conduisent à décider et de juger que:

$$T_{mur\ sud} > T_{mur\ ouest} > T_{toit} > T_{air} > T_{mur\ est} > T_{sol} > T_{mur\ nord}$$

Mur Sud du séjour

$$\rho_a v_1 C_a \frac{dT_1}{dt} = \frac{T_8 - T_1}{\sum R_{sud}} - Q_{r12} - Q_{r13} - Q_{cv14} - Q_{r15} - Q_{r16} - Q_{r17} - Q_{r1p} + Q_{r1f} \quad (3.27)$$

$$\sum R_{sud} = (2 e_a / \lambda_a S_1) + (e_b / \lambda_b S_1) + (e_c / \lambda_c S_1) \quad (3.28)$$

Mur Ouest du séjour

$$\rho_a v_2 C_a \frac{dT_2}{dt} = \frac{T_9 - T_2}{\sum R_{ouest}} + Q_{r12} - Q_{r23} - h_{cv24} S_2 (T_2 - T_4) - Q_{r25} - Q_{r26} - Q_{r27} - Q_{r2p} + Q_{r2f} \quad (3.29)$$

$$\sum R_{ouest} = \sum R_{sud} \quad (3.30)$$

Toit du séjour

$$\rho_a v_3 C_a \frac{dT_3}{dt} = \frac{T_{tpext} - T_3}{\sum R_{toit}} + Q_{r13} + Q_{r23} - h_{cv34} S_3 (T_3 - T_4) - Q_{r35} - Q_{r36} - Q_{r37} - Q_{r3p} + Q_{r3f} \quad (3.31)$$

$$\sum R_{toit} = (e_a / \lambda_a S_3) + (e_h / \lambda_h S_3) + (e_s / \lambda_s S_3) + (e_d / \lambda_d S_3) + (e_g / \lambda_g S_3) \quad (3.32)$$

Air intérieur du séjour

$$\rho_a v_4 C_4 \frac{dT_4}{dt} = h_{cv14} S_1 (T_1 - T_4) + Q_{cv24} + Q_{cv34} + Q_{cvf4} - h_{cv45} S_5 (T_4 - T_5) - Q_{cv46} - Q_{cv47} - Q_{cv4p} \quad (3.33)$$

Mur Est du séjour

$$\rho_a v_5 C_a \frac{dT_5}{dt} = \frac{T_5 - T_4}{\sum R_{est}} + Q_{r15} + Q_{r25} + Q_{r35} + h_{cv45} S_5 (T_4 - T_5) - Q_{r56} - Q_{r57} - Q_{r5p} + Q_{r5f} \quad (3.34)$$

$$\sum R_{est} = (2 e_a / \lambda_a S_5) + (e_b / \lambda_b S_5) \quad (3.35)$$

Sol du séjour

$$\rho_d v_6 C_d \frac{dT_6}{dt} = \frac{T_6 - T_{sint}}{\sum R_{est}} + Q_{r16} + Q_{r26} + h_{cv46} S_6 (T_4 - T_6) + Q_{r36} + Q_{r56} - Q_{r67} - Q_{r6p} + Q_{r6f} \quad (3.36)$$

$$\sum R_{sol} = (e_d / \lambda_d S_6) + (e_h / \lambda_h S_6) + (e_s / \lambda_s S_6) \quad (3.37)$$

Mur Nord du séjour

$$\rho_a v_7 C_a \frac{dT_7}{dt} = \frac{(T_7 - T_{next})}{\sum R_{nord}} + Q_{r17} + Q_{r27} + h_{cv47} S_7 (T_4 - T_7) + Q_{r37} + Q_{r57} + Q_{r67} + Q_{r7f} \quad (3.38)$$

$$\sum R_{nord} = \sum R_{ouest} \quad (3.39)$$

Mur Sud extérieur du séjour

$$\rho_c v_8 C_c \frac{dT_8}{dt} = -\frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud}} + \alpha S_1 E_s + h_{cvam8} S_1 (T_{am} - T_8) + h_{rc8} S_1 (T_c - T_8) + h_{rsolext8} S_1 (T_{solext} - T_8) \quad (3.40)$$

Mur Ouest extérieur du séjour

$$\begin{aligned} \rho_c v_9 C_c \frac{dT_9}{dt} = & -\frac{(T_9 - T_2)}{\sum R_{ouest}} + \alpha S_2 E_o + h_{cvam9} S_2 (T_{am} - T_9) + h_{rc9} S_2 (T_c - T_9) \\ & + h_{rsolext9} S_2 (T_{solext} - T_9) \end{aligned} \quad (3.41)$$

### 3.8.2 La pièce

Les remarques préliminaires dans cette fois ci nous conduisent à supposer que:

$$T_{mur\ sud} > T_{mur\ est} > T_{toit} > T_{air} > T_{mur\ ouest} > T_{sol} > T_{mur\ nord}$$

Mur Sud de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{10} C_a \frac{dT_{10}}{dt} = & \frac{(T_{17} - T_{10})}{\sum R_{sud}} - Q_{r10-11} - Q_{r10-12} - Q_{cv10-13} - Q_{cv10-14} - Q_{cv10-15} \\ & - Q_{cv10-16} - Q_{r10ps} - Q_{r10fs} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Mur Est de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{10} C_a \frac{dT_{11}}{dt} = & \frac{(T_{18} - T_{11})}{\sum R_{est2}} + Q_{r10-11} - Q_{r11-12} - Q_{cv11-13} - Q_{cv11-14} - Q_{cv11-15} \\ & - Q_{r11-16} - Q_{r11ps} + Q_{r11fs} \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\sum R_{est} = (2 e_a / \lambda_a S_{11}) + (e_b / \lambda_b S_{11}) + (e_c / \lambda_c S_{11}) \quad (3.44)$$

Air intérieur de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{13} C_a \frac{dT_{13}}{dt} = & Q_{r10-13} + Q_{cv11-13} + Q_{cv12-13} + Q_{cv13fs} - Q_{cv13-14} - Q_{cv13-15} \\ & - Q_{cv13-16} - Q_{cv13ps} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Mur Ouest de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{14} C_a \frac{dT_{14}}{dt} &= \frac{(T_{15} - T_{14})}{\sum R_{ouest2}} + Q_{r10-14} + Q_{r11-14} + Q_{r12-14} + Q_{cv13-14} - Q_{cv14-15} \\ &\quad - Q_{r14-16} - Q_{r14ps} + Q_{r14fs} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Sol de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{15} C_a \frac{dT_{15}}{dt} &= \frac{(T_{15} - T_{sint})}{\sum R_{sol}} + Q_{r10-15} + Q_{r11-15} + Q_{cv13-15} + Q_{r12-15} + Q_{r14-15} \\ &\quad + Q_{r15-16} - Q_{r15ps} + Q_{r15fs} \end{aligned} \quad (3.47)$$

Mur Nord de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{16} C_a \frac{dT_{16}}{dt} &= \frac{(T_{16} - T_{nexts})}{\sum R_{nord}} + Q_{r10-16} + Q_{r11-16} + Q_{r12-16} + Q_{cv13-16} + Q_{r14-16} \\ &\quad + Q_{r15-16} + Q_{r16fs} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Mur Sud extérieur de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_c v_{17} C_a \frac{dT_{17}}{dt} &= -\frac{(T_{17} - T_{10})}{\sum R_{sud}} + \alpha S_{10} E_s + h_{cvam17} S_{10} (T_{am} - T_{17}) \\ &\quad + h_{rc17} S_{10} (T_c - T_{17}) + h_{rsolext17} S_{10} (T_{solext} - T_{17}) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Mur Est extérieur de la pièce

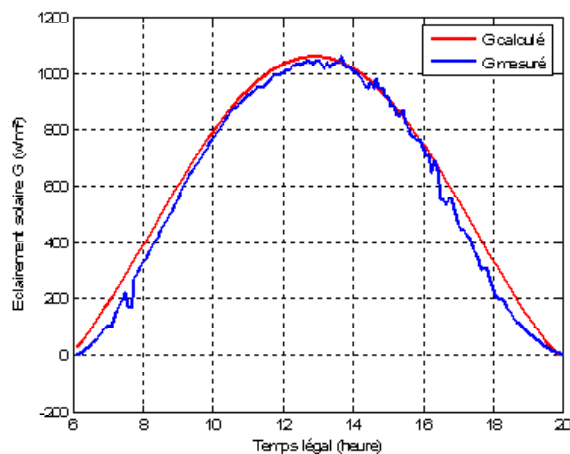
$$\begin{aligned} \rho_c v_{18} C_c \frac{dT_{18}}{dt} &= -\frac{(T_{18} - T_{11})}{\sum R_{est}} + \alpha S_{11} E_e + h_{cvam18} S_{11} (T_{am} - T_{18}) \\ &\quad + h_{rc17} S_{11} (T_c - T_{18}) + h_{rsolext18} S_{11} (T_{solext} - T_{18}) \end{aligned} \quad (3.50)$$

[24], de [38] au [49].

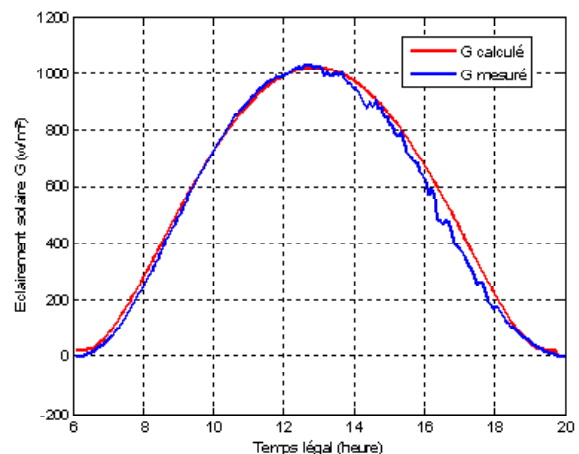
## 3.9 Résultats Théoriques et Expérimentaux

### 3.9.1 Journée du 26 Mai 2008

Le dimensionnement et l'optimisation d'un système solaire utilisant le rayonnement solaire nécessitent une connaissance des éclairagements globaux (soleil et voûte céleste) et diffus (voûte céleste seule), disponibles dans le plan du système. Les chercheurs ont utilisé des méthodes numériques qui seront suivies par de nombreuses validations avec des stations de mesure au sol. Lors de ces simulations, on s'est référé à la station radiométrique de l'URAER. La figure 3.3 donne une comparaison entre l'éclairément global horizontal mesuré et calculé. Tandis que la figure 3.4 présente une confrontation entre les données mesurées et calculées sur un plan orienté vers le Sud et incliné par  $32^\circ$ .

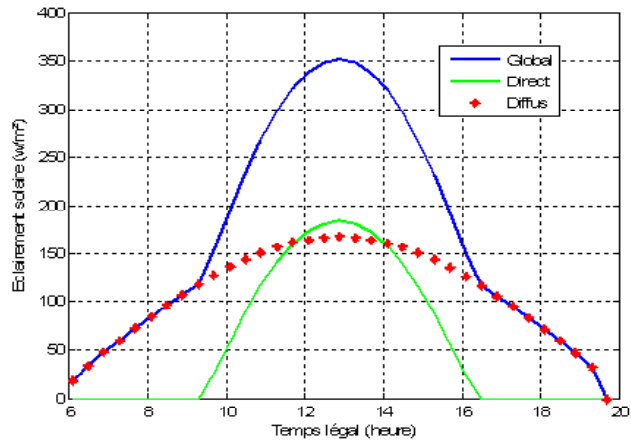


**Fig.(3.3):** Éclairément global sur un plan horizontal, 26 / 05 / 2008.

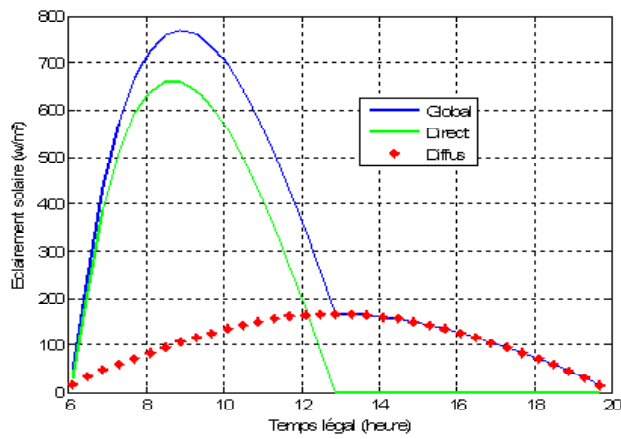


**Fig.(3.4):** Éclairément global sur un plan incliné par  $32^\circ$ , 26 / 05 / 2008.

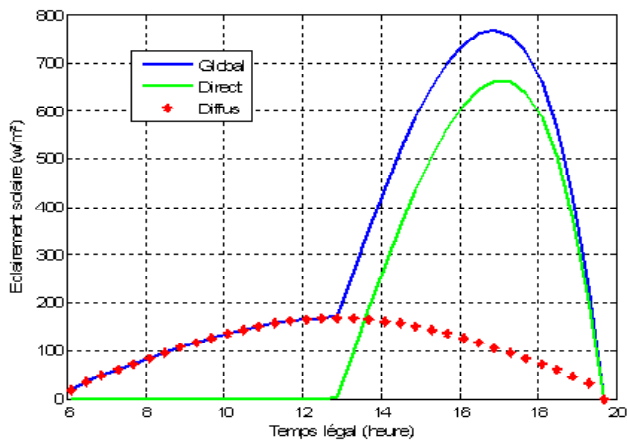
Quoique les densités du flux de chaleur d'origine solaire incidentes sur les murs Est, Ouest et Nord sont décrites respectivement dans les figures 3.5, 3.6 et 3.7.



**Fig.(3.5):** Eclairement solaire incident sur le mur Sud

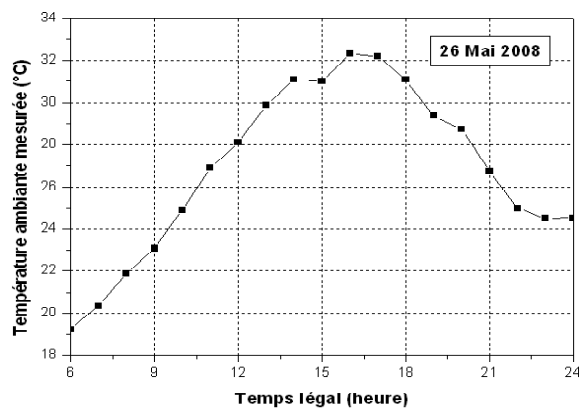


**Fig.(3.6):** Eclairement solaire incident sur le mur Est

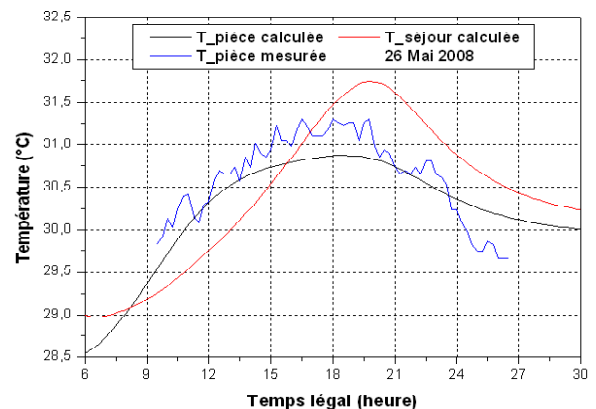


**Fig.(3.7):** Eclairement solaire incident sur le mur Ouest

Si l'expérience n'est pas le fondement de la science, reste qu'elle en est le guide. Mais c'est à l'abandon de la distinction entre l'expérience et la théorie. En effet, elles ne sont pas des domaines complètement séparés, mais on peut dire qu'il n'y a pas d'expérience sans théorie et pas de théorie sans expérience. Vue que la théorie est un ensemble de propositions visant à expliquer des phénomènes. On doit donc fournir des tests qui rendraient possible une validation de la théorie. En utilisant la température ambiante (figure 3.8) et en se basant sur les données calculées de l'éclairement solaire du 26 Mai 2008 et sachant que les températures initiales de la salle de séjour et de la pièce mesurées à 06 heures sont respectivement  $29\text{ °C}$  et  $28.5\text{ °C}$ , on remarque selon la figure (3.9) un accord satisfaisant entre les températures théoriques et expérimentaux de la pièce.



**Fig.(3.8):** Température ambiante mesurée, 26 Mai 2008.



**Fig.(3.9):** Température de la pièce et de la salle de séjour, 26 Mai 2008.

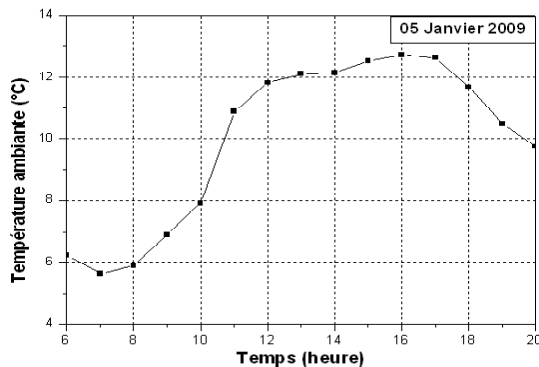
La température de l'air intérieur du séjour est plus grande le soir. Elle devient en revanche plus petite le matin par rapport à la température de l'air intérieur de la pièce. La raison est que les murs Sud et Est sont ceux qui ont été exposés au soleil pour la pièce. Par contre, ce sont les murs Sud et Ouest qui ont été exposés au rayonnement solaire pour la salle du séjour. Donc, c'est tout à fait logique de dire que la quantité d'énergie absorbée le matin par les murs de la pièce est supérieure par rapport à celle absorbée par les murs exposés du séjour et vice-versa.



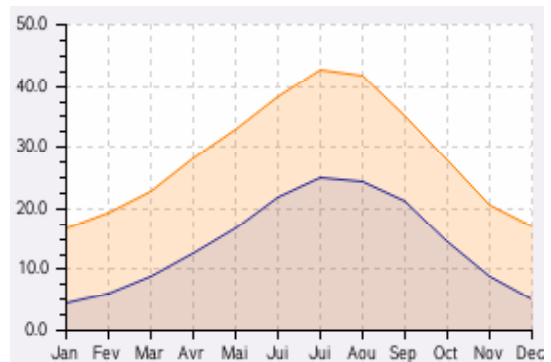
### 3.9.2 Journée du 05 Janvier 2009

En Physique, le recours à la simulation numérique permet d'explorer le comportement d'un modèle mais aussi d'obtenir des résultats qui seront comparés aux données expérimentales. Dans les deux cas le modèle peut être amélioré ou remis en question; son domaine de validité peut être clairement perçu en introduisant correctement les paramètres d'entrée (température ambiante, densité de flux incident, vitesse du vent, conditions aux limites) du programme.

Etant donné la basse latitude et l'altitude modérée, la température à Ghardaïa est très élevée en été, modérément fraîche en hiver. En hiver comme en été, la variation diurne de température est importante, étant donné la sécheresse parfaite de l'atmosphère. Pour la même raison, la luminosité est intense. Les températures mentionnées ci-après sont exprimées en degrés Celsius et représentent les températures journalières du 05 Janvier 2009 (figure 3.10) et les valeurs minimales et maximales observées sur un grand nombre d'années (figure 3.11).

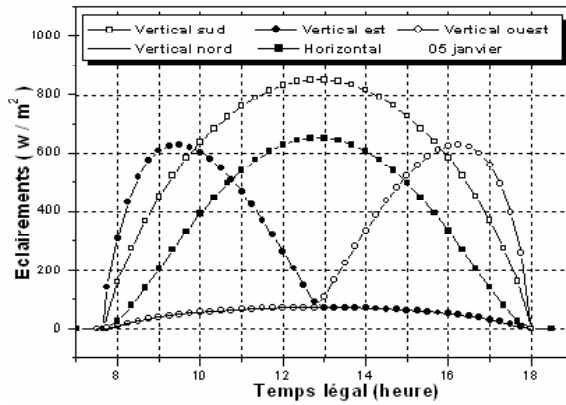


**Fig.(3.10):** Température ambiante mesurée, 26 Mai 2008.

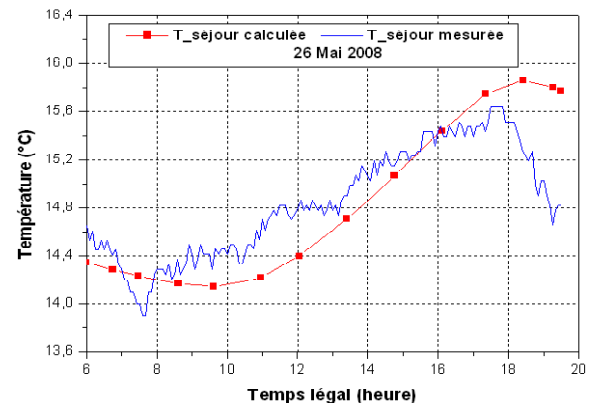


**Fig.(3.11):** Valeurs minimales et maximales des températures observées à Ghardaïa

Par ailleurs, la figure 3.12 donne les variations instantanées des éclairagements solaires incidents sur les murs de l'habitat pour différentes orientations. Des résultats expérimentaux ont été présentés et comparés avec ceux obtenus par simulation.



**Fig.(3.12):** Eclairacements incidents,  
05 Janvier 2009.



**Fig.(3.13):** Température de la salle de  
séjour, 26 Mai 2008.

La figure 3.13 donne l'information que la comparaison est acceptable. D'ailleurs cette étape reconnaît de nouveau l'importance des conditions classiques et opérantes, et du traitement de l'information afin d'accéder à une meilleur modélisation.

### 3.10 Conclusion

Les progrès des méthodes numériques (Runge-Kutta d'ordre 4 à titre indicatif) et l'augmentation des performances des ordinateurs permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes, de simuler des phénomènes naturels, comme les phénomènes de transfert de chaleur dans un habitat. On utilise de plus en plus la simulation numérique, validée par des expériences, pour voir si le modèle conçu est-il capable de reproduire les températures observées dans ces genres de problèmes.

Les résultats de l'analyse sont comparés aux données disponibles et la comparaison est satisfaisante. On peut dire alors que dans l'ensemble, le modèle mathématique proposé est capable de reproduire les températures observées. Donc, le test peut se poursuivre pour effectuer une étude comparatif entre l'isolation thermique intérieure et l'isolation thermique extérieure.

## **Chapitre IV**

### **Etude Comparative, Isolation Thermique par l'Extérieur ou par l'Intérieur ?**

# Chapitre 4

## Etude Comparative, Isolation Thermique par l'Extérieur ou par l'Intérieur ?

### 4.1 Introduction

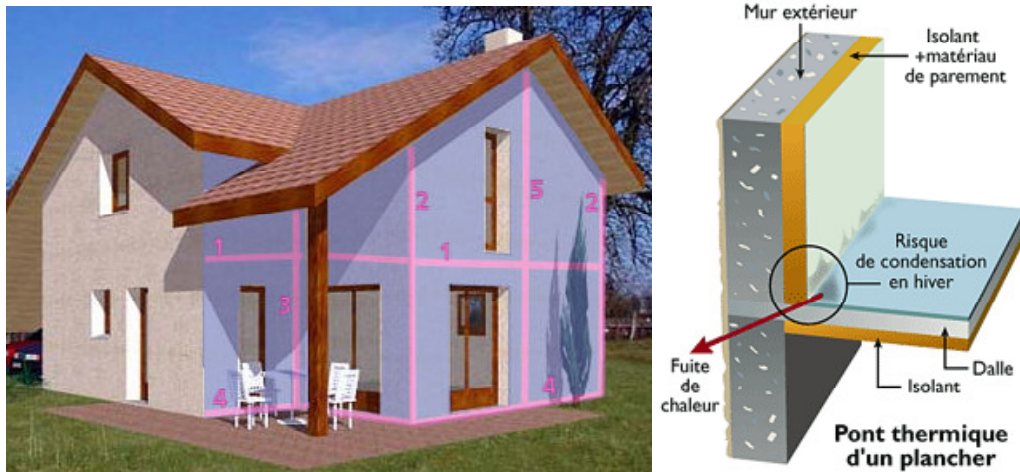
L'isolation thermique vise à limiter les déperditions des logements. Le rôle est de préserver le confort en réduisant les échanges thermiques avec l'ambiance extérieure: si celle-ci est froide, l'isolation garde la chaleur; si celle-ci est chaude; l'isolation préserve la fraîcheur. L'isolant peut se placer de diverses manières dans un mur (à l'extérieur, en sandwich ou à l'intérieur) sans influencer la qualité d'isolation thermique de la paroi. Cependant, sa position modifie l'inertie de la paroi ainsi que le risque de condensation. Le pouvoir isolant d'un matériau est exprimé par sa conductivité thermique. Le vide spatial interdit la convection et la conduction, et seul le rayonnement reste. L'air présente, en effet, une grande résistance thermique pour autant que les mouvements de convection soient empêchés.

Pour remédier les déperditions thermiques au niveau de la conception, il est primordial de choisir des méthodes de construction et des matériaux réduisant au maximum ces

déperditions par les parois. En règle générale, il faut une excellente isolation thermique.

#### 4.1.1 Problème de l'isolation thermique

Le problème de l'isolation thermique et notamment des ponts thermiques, semble avoir trouvé la réponse d'après la littérature: l'isolation extérieure, tout est possible si l'isolation et les parements sont efficaces. Pour l'isolation extérieure, les matériaux écologiques feront l'affaire, si la pose est bien faite. Il est nécessaire donc de calculer des pertes par ponts thermiques de liaison et donc de connaître les longueurs de ces liaisons. Elle fonctionne donc à partir des dimensions d'un mur type qui est illustré ci-dessous (figure 4.1):



**Fig.(4.1):** Illustration des ponts thermiques de liaison.

Les liaisons considérées sont marquées en mauve sur l'illustration (liaison du plancher bas, du plancher intermédiaire, 2 angles de murs sortants, un entrant, un mur de refend) et également les liaisons avec les menuiseries. Toute singularité dans une paroi constitue un pont thermique et plus particulièrement:

- Entre deux parois verticales (angle formé par deux murs ou entre un mur extérieur et un mur intérieur)
- Entre une paroi horizontale et une paroi verticale (à la jonction d'un mur et d'un

plancher)

- Au droit des joints lors de la pose des fenêtres.

### **4.1.2 Objectif de l'étude**

En fin de compte, on cherche si cette isolation extérieure présente des avantages notamment en matière de performance énergétique et plus particulièrement de point de vue température. En fait, on suppose que le problème des ponts thermiques est traité même par l'isolation thermique intérieure afin de faire une étude comparative sur les deux techniques. L'isolation thermique des murs est effectuée par l'ajout d'une lame d'air de 1 cm d'épaisseur, d'une couche de 6 cm de polystyrène et une autre couche de 1 cm de plâtre.

## **4.2 Isolation Thermique Extérieure et Intérieure, Comportement et Performance**

### **4.2.1 Cas du mur isolé par l'extérieur**

L'isolation thermique est appliquée sur la face extérieure de la façade; elle est ensuite protégée par une finition légère (crépi, bardage, etc.) ou lourde (mur creux). Le choix entre les différentes techniques d'isolation du mur par l'extérieur se fait en fonction des critères suivants:

- les performances à atteindre, tant du point de vue énergétique que celui de l'étanchéité à l'eau;
- l'esthétique recherchée;
- la complexité de la façade;
- le prix.

L'isolation extérieure permet de bénéficier de la capacité thermique de la paroi et de limiter les risques de surchauffe en été. Par contre, dans le cas d'un chauffage intermit-

tent, le réchauffement du bâtiment prendra plus de temps.

Le placement de l'isolant du côté extérieur réduit très fortement les variations de température au sein de la maçonnerie. En effet, celles-ci restent très proches des températures intérieures, relativement constantes par rapport aux températures extérieures. Les risques de fissuration d'origine thermique de la maçonnerie sont donc supprimés.

#### **4.2.2 Cas du mur isolé par l'intérieur**

Tout comme pour le mur isolé par l'extérieur, l'apport d'un isolant thermique à la face intérieure de la maçonnerie permet d'en améliorer sensiblement le niveau d'isolation thermique. À côté des ponts thermiques " de conception ", il existe aussi les ponts thermiques " d'exécution ". La perforation de l'isolant pour placer un boîtier électrique, par exemple, peut en créer une fuite de chaleur.

Un bâtiment isolé par l'intérieur perd l'inertie thermique de ses parois extérieures; cela a pour conséquence d'atténuer fortement le rôle de régulation thermique des parois. Ainsi, un local est rapidement chauffé mais il se refroidit tout aussi vite. Ces variations rapides de température nuisent au confort thermique mais ce système peut devenir avantageux lorsque le bâtiment est occupé durant de courtes périodes. Lorsqu'on place un isolant du côté intérieur de la maçonnerie, le mur est plus froid en hiver et plus chaud en été que le même mur sans isolation thermique. Le mur isolé par l'intérieur subit donc des variations de température plus grandes et plus fréquentes. Les fissures qui en résultent peuvent difficilement être évitées. Le risque de fissuration est fonction des paramètres suivants:

- la dimension de la façade;
- le niveau d'exposition au soleil, à la pluie, au vent;
- les caractéristiques mécaniques des matériaux;
- la stabilité dimensionnelle de la maçonnerie;
- la teinte du parement.

L'isolation par l'intérieur constitue un travail délicat en raison des risques suivants:

- Gel dans les maçonneries si celles-ci sont humides;
- Condensation interne favorisant le risque de gel si le pare vapeur n'est pas continu;
- Moisissures, voire même une condensation superficielle, si certaines parties de parois restent froides (création de ponts thermiques);
- Dégâts dans les maçonneries si celles-ci sont fortement exposées aux variations de température;
- Gel dans les canalisations d'eau exposées au froid si celles-ci ne sont pas déplacées

### 4.3 Modifications Apportées aux Equations de Bilans Energétiques

Des modifications au niveau des équations des bilans énergétiques ont été introduites pour avoir une meilleure prédiction des propriétés thermiques. L'isolation thermique des murs exposés, nécessite des changements qui ont été effectuées au niveau des équations de la conduction et au niveau des paramètres qui caractérisent les propriétés physiques des matériaux, en particulier, la chaleur spécifique, la densité volumique et la conductivité thermique. Les équations ci après montrent les rectifications apportées aux équations qui régissent les bilans énergétiques du mur Sud du séjour (sur les parois interne et externe) dans les deux cas.

#### 4.3.1 Isolation thermique intérieure

##### Mur Sud intérieur du séjour

$$\rho_{POL} v_1 C_{POL} \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud\ isolé}} - Q_{r12} - Q_{r13} - Q_{cv14} - Q_{r15} - Q_{r16} - Q_{r17} - Q_{r1p} - Q_{r1f} \quad (4.1)$$

$$\sum R_{sud\ isolé} = (2 e_a / \lambda_a S_1) + (e_b / \lambda_b S_1) + (e_c / \lambda_c S_1) + (e_{air} / \lambda_{air} S_1) + (e_{pol} / \lambda_{pol} S_1) \quad (4.2)$$



### Mur Sud extérieur du séjour

$$\rho_c v_8 C_c \frac{dT_8}{dt} = -\frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud\ isolé}} + \alpha S_1 E_s + Q_{cvam8} + Q_{rc8} + Q_{rsolext8} \quad (4.3)$$

### 4.3.2 Isolation thermique extérieure

#### Mur Sud intérieur du séjour

$$\rho_a v_1 C_a \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud\ isolé}} - Q_{r12} - Q_{r13} - Q_{cv14} - Q_{r15} - Q_{r16} - Q_{r17} - Q_{r1p} - Q_{r1f} \quad (4.4)$$

#### Mur Sud extérieur du séjour

$$\rho_c v_8 C_c \frac{dT_8}{dt} = -\frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud\ isolé}} + \alpha S_1 E_s + Q_{cvam8} + Q_{rc8} + Q_{rsolext8} \quad (4.5)$$

## 4.4 Mise en Oeuvre Numérique

Certaines expériences sont infaisables. Pourquoi refuser toute possibilité de connaissance de ces magnifiques travaux autrement que par la lecture de documents? La simulation se révèle là tout à fait irremplaçable. Des programmes réalisés permettent d'observer des comportements, d'émettre des hypothèses, d'imaginer un protocole expérimental, de l'appliquer, de consigner les résultats, de construire un modèle explicatif.

La présente étude permet de décrire l'évolution des températures intérieures de ces deux pièces durant l'été ou l'hiver. Les conditions initiales de toutes les surfaces et de l'air ont été choisies à partir des valeurs expérimentales. Les courbes tracées dans les figures (4.2), (4.3), (4.4) et (4.5) représentent respectivement l'évolution des températures de la paroi intérieure du mur Sud de la pièce, de l'air ambiant de la pièce, de la paroi extérieure du mur Est de la pièce et de l'air ambiant de la salle du séjour. Les résultats ont été calculés en utilisant les données du 26 Mai 2008.

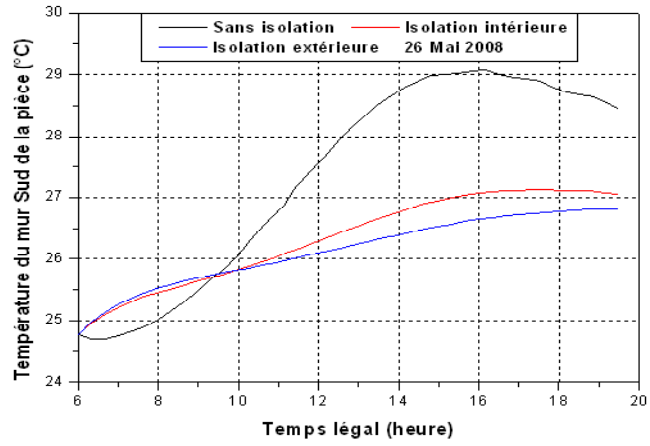


Fig.(4.2): Température de la paroi intérieure du mur Sud de la pièce

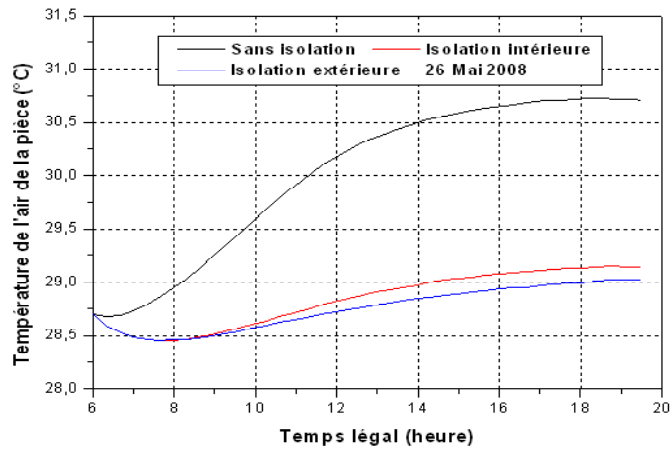


Fig.(4.3): Température de l'air intérieur de la pièce

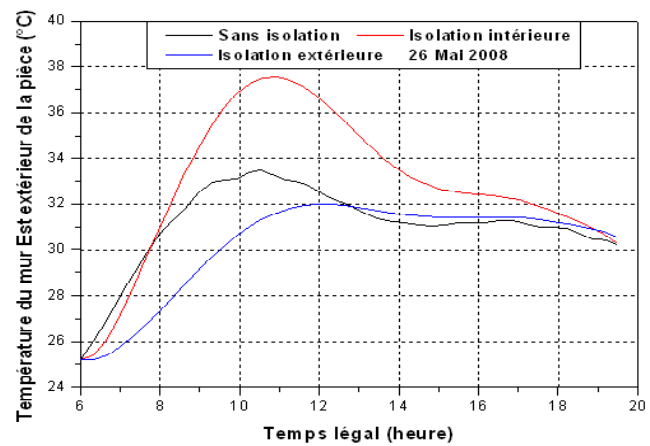
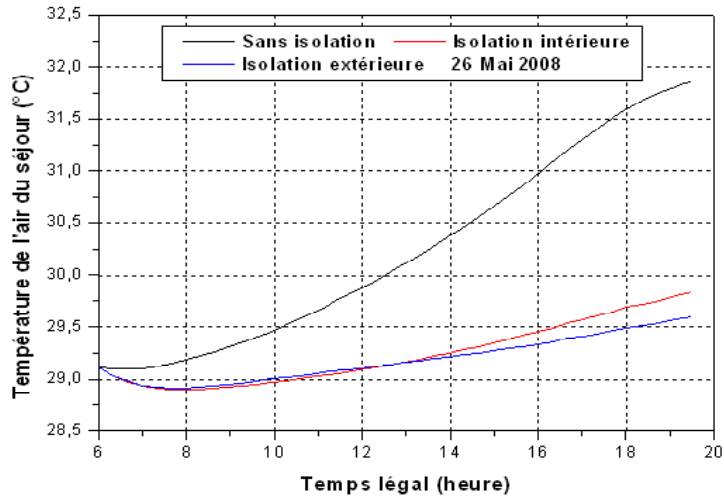


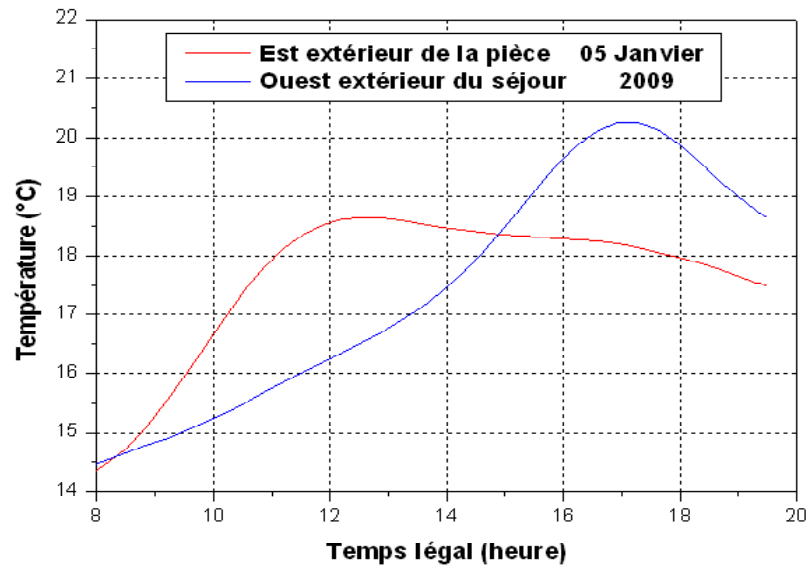
Fig.(4.4): Température de la paroi extérieure du mur Est de la pièce



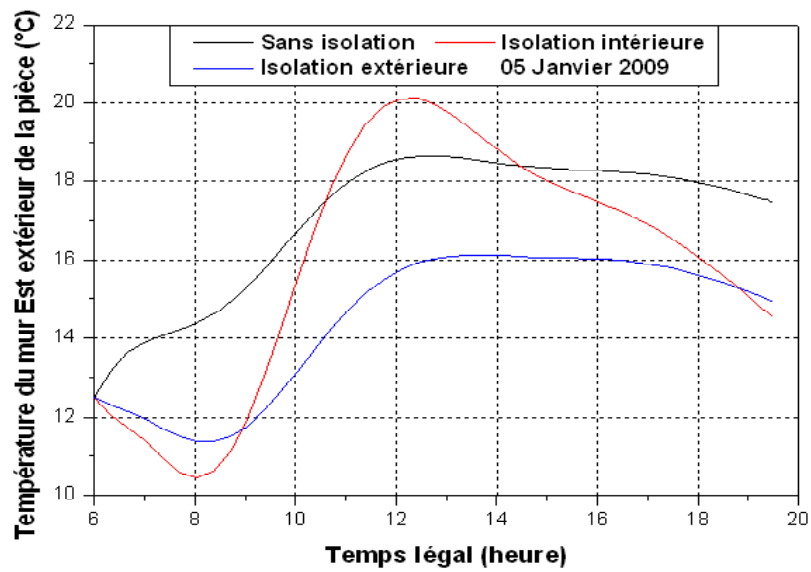
**Fig.(4.5):** Température de l'air intérieur de la salle du séjour

La simulation numérique permet de prévoir l'évolution des températures pour les trois cas: sans isolation, isolation thermique intérieure et l'isolation thermique extérieure. Ces figures montrent l'importance de l'isolation thermique puisque l'écart moyen de température peut dépasser la valeur de  $1.75\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour l'isolation thermique extérieure et  $1.64\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour l'isolation thermique intérieure. Ce qui donne un écart maximum de  $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre l'isolation thermique intérieure et extérieure.

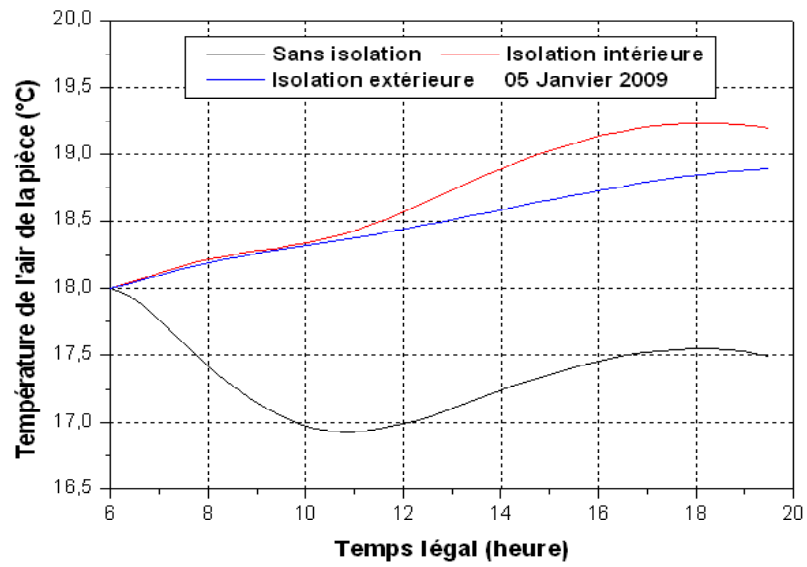
En ce qui concerne la période hivernale, la température est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, la température ambiante moyenne enregistrée au mois de Janvier ne dépasse pas  $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , le minima absolu de cette période a atteint  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De ce fait, nous avons choisi le 05 Janvier 2009 qui est un jour indicatif pour l'illustration des résultats de la simulation numérique. Pour ce faire, à l'exception de la figure (4.6) qui représente les relevés des températures obtenus du mur Est extérieur de la pièce et du mur Ouest extérieur de la salle du séjour, les figures (4.7), (4.8) et (4.9) présentent le comportement observé des températures de respectivement: mur Est extérieur, l'air ambiant à l'intérieur de la pièce et l'air intérieur de la salle de séjour, et ceci dans plusieurs situations: sans isolation thermique, avec isolation thermique intérieure et avec isolation thermique extérieure.



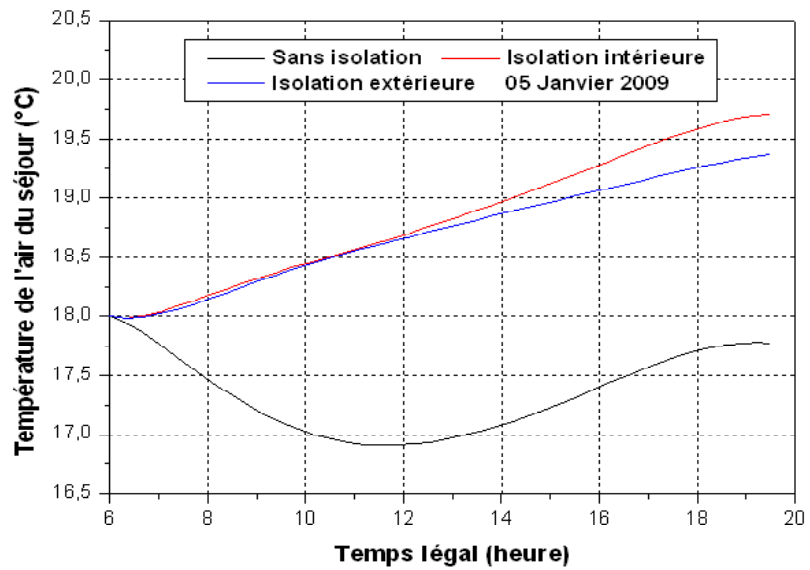
**Fig.(4.6):** Température des parois extérieures du mur Est de la pièce et du murd Ouest du séjour



**Fig.(4.7):** Température de la paroi extérieure du murd Est de la pièce



**Fig.(4.8):** Température de l'air intérieur de la pièce



**Fig.(4.9):** Température de l'air intérieur de la salle du séjour

En premier lieu, on remarque selon la figure 4.6 que la température de la paroi exté-

rière du mur Est de la pièce est plus grande le matin et elle est par contre plus petite le soir par rapport à la température de la paroi extérieure du mur Ouest de la salle du séjour. Ce scénario est observé même pour les températures de l'air des ambiances intérieures. Sans aucun doute, la raison est que les murs Sud et Est sont ceux qui ont été exposés au soleil pour la pièce. Par contre pour le salon, ce sont les murs Sud et le mur Ouest qui ont été exposés au rayonnement solaire. Donc, automatiquement la quantité d'énergie absorbée le matin par le mur Est de la pièce est plus importante par rapport à celle absorbée par le mur Ouest du séjour et vice-versa.

Nous avons confirmé de nouveau que l'isolation thermique est un procédé mis en uvre sur les surfaces d'une construction qui protège la structure du bâtiment en maintenant une température constante.

En période hivernal, on peut tirer d'après cette étude que l'isolation thermique intérieure des murs par l'extérieur peut être considérée comme une solution retenue pour l'isolation des maisons en climat désertique et Saharien. Mais la différence des températures n'est pas vraiment importante. L'écart maximum des températures ne dépasse pas la valeur de 0.5 °C. Son principal avantage est de procéder à deux opérations en même temps : l'isolation du mur et le ravalement extérieur en terme pratique.

## 4.5 Conclusion

Il faut dire tout d'abord que la simulation numérique notamment par le biais des mondes virtuels (modèles mathématiques) deviendra une réalité quotidienne. Il sera bien difficile aux chercheurs de l'ignorer. Par simulation, nous avons trouvé que l'isolation thermique par l'intérieur ou par l'extérieur donne presque des mêmes résultats.

Mais il faut se rappeler que nous avons ignoré les effets des ponts thermiques alors que l'isolation par l'intérieur ne permet pas de traiter tous les types de ponts thermiques. Ses avantages immédiats sont par exemple:

- L'absence de modification de l'aspect extérieur de la maison

- un coût relativement peu élevé, mais entraînant une réduction de la surface des pièces.

L'isolation par l'extérieur est la meilleure lorsque les enduits extérieurs sont défectueux. Elle permet de faire deux opérations en même temps: l'isolation et le ravalement.

Les avantages sont:

- traiter un plus grand nombre de ponts thermiques;
- ne pas modifier les surfaces habitables;
- protéger les murs des variations climatiques.

Mais attention, le coût de cette technique est plus élevé que celui de l'isolation par l'intérieur (hors coût de ravalement).

A propos la simulation, on peut dire que:

Tout processus d'acquisition cognitive aboutit à un modèle. À quel niveau de complexité faut-il se placer? Les modèles (qu'ils soient construits par les chercheurs ou qu'ils leur soient proposés) doivent être suffisamment élaborés pour aboutir aux résultats.

Le traitement de ce sujet compliqué nécessite une simulation qui permet des calculs parfaitement ciblés en rapport avec des compétences précises qu'il s'agit de mettre en jeu. Elle présente une bonne adéquation avec les démarches mises en oeuvre dans les disciplines expérimentales.

## **Conclusion Générale**



# Conclusion Générale

Vu l'intérêt évident de ce secteur à l'échelle nationale, on peut dire que nous avons acquis à la mise au point des modèles mathématiques qui peuvent prédire le comportement thermique. Ces modèles intègrent à la fois les propriétés géométriques et physiques d'une maison individuelle. Le traitement de ce sujet nécessite une simulation qui permet des calculs parfaitement ciblés en rapport avec des compétences précises qu'il s'agit de mettre en jeu. Il faut qu'elle présente une bonne adéquation avec les démarches mises en oeuvre dans les disciplines expérimentales.

A travers ces études, nous avons apporté une analyse sur le comportement thermique. Les approches et les procédures utilisées montrent qu'une bonne utilisation de ces programmes permet de caractériser thermiquement ce type de construction.

Les deux principales causes de l'inconfort des bâtiments à Ghardaïa sont dues d'une part aux matériaux de construction utilisés et d'autre part à l'absence des protections solaires. Les études expérimentales prouvent que l'inertie thermique de la pierre joue un rôle contradictoire dans les régions Sahariennes.

Les performances et les progrès réalisés se font essentiellement sur la réduction des pertes à travers le toit et les murs. L'isolation thermique minimise la consommation énergétique durant les deux période, estivale et hivernale.

La comparaison théorie expérience fait apparaître une concordance raisonnable, compte tenu les incertitudes de modélisation et les erreurs de mesures.

Par simulation numérique, et en respectant les hypothèses proposées dans cet exemple, on trouve que les deux types d'isolation thermique, par l'intérieur ou par l'extérieur, donne presque les mêmes résultats. Mais si on tient compte des effets des ponts thermiques, l'isolation par l'intérieur ne permet pas de traiter tous les types des ponts. Ce qui favorise une autre augmentation des températures intérieures des logements. Ce sont des zones ponctuelles ou linéaires qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présentent un défaut ou une diminution de résistance thermique à la jonction de deux parois en général.

Les jonctions entre deux matériaux de résistance thermique ou de conductivité thermique différentes créent un pont thermique. Ainsi avec une isolation extérieure les ponts thermiques sont presque nuls. En conséquence, puisque les ponts thermiques constituent des zones de fortes déperditions, on peut dire que dans ces conditions, l'isolation thermique extérieure apporte le meilleur compromis de confort.

# Bibliographie

- [1] S. Thiers, Bilans Energétiques et Environnementaux de Bâtiments à Energie positive, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Spécialité: Energétique, 21 Novembre 2008.
- [2] P. Meukam et al, Caractérisation Thermophysique et Mécanique de Briques de Terre Stabilisées en Vue de l'Isolation Thermique de Bâtiment, Matériaux et Constructions, Vol. 36, August - September 2003, pp 453 - 460.
- [3] N. Chami, Evaluation de l'Impact des Isolants Minces Réfléchissants dans le Bâtiment, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Spécialité: Energétique, 19 octobre 2009.
- [4] J. R. Goulding, J.O. Lewis, T.C. Steemers, Energy in Architecture, the European Passive Solar Handbook, 339 p, 1993.
- [5] O. Sidler, Logements à Faibles Besoins en Energie, Guide de Recommandation et d'Aide à la Conception, Région Rhone Alpes, ODH 26, ADEME, Conseil Général de Savoie, 2000.
- [6] Prebat, Comparaison Internationale Bâtiment et Energie: Rapport Final, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie / Plan Urbanisme Construction Architecture / Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2007.
- [7] Effnergie, Réussir un Projet de Bâtiment Basse Consommation, Guide à Destination des Professionnels du Bâtiment, 2008.

- [8] J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Energy Thermal Processes. Second Edition. Wiley Interscience, New York, 1974.
- [9] J.M. Chasseriaux, Convection Thermique et Rayonnement Solaire. Ed. Dunod, 1984.
- [10] J.F. Sacadura, Initiation aux Transferts Thermiques, Technique et Documentation, Paris 1978. Chapitre 4. Transfert de Chaleur par Convection.
- [11] Y. Jannot, Thermique Solaire. Cours et Exercices. Chapitre: l'Energie Solaire. Chapitre: Bibliographie: Facteurs de Forme Géométrique de Rayonnement, Octobre 2003.
- [12] G. Ritoux, Evaluation Numérique des Facteurs de Forme, Revue Phys Appl. 17 (1982) 503-515.
- [13] S.M.A Bekkouche, T Benouaz and A Cheknane, Simulation and Experimental Studies of an Internal Thermal Insulation of Two Pieces of Rooms Located in Ghardaia (Algeria). IJACE International Journal of Advanced Computer Engineering, June 2009, Volume 2 Issue 1.
- [14] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz and A. Cheknane, A modelling Approach of Thermal Insulation Applied to a Saharan Building. Thermal Science, Vol 13 (2009), No. 4, pp. 233-244.
- [15] J. A. Orosa and T. Carpenente, Thermal Inertia Effect in Old Buildings, European Journal of Scientific Research, Vol.27 No.2 (2009), pp.228-233
- [16] S. V. G. Goulart, Thermal Inertia and Natural Ventilation - Optimisation of Thermal Storage as a Cooling Technique for Residential Buildings in Southern Brazil, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements of the Open University for the Degree of Doctor of Philosophy, October 2004.

- [17] K.A. Dornelles and M. Roriz, Thermal Inertia, Comfort and Energy Consumption in Buildings: A Case Study in Sao Paulo State-Brasil, *International Journal for Housing Science and its Applications*, 2004, 28, part 2, pp. 153-162.
- [18] A. Noren, J. Akander, E. Isfät and O. Söderström, The Effect of Thermal Inertia on Energy Requirements in a Swedish Building-Results Obtained With Three Calculation Swedish Building Results Obtained With Three Calculation Models, *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings*, 1999, 1.1999.
- [19] N. Aste, A. Angelotti and M. Buzzetti, The Influence of the External Walls Thermal Inertia on the Energy Performance of Well Insulated Buildings, *Energy and Buildings* 41 (2009) 1181-1187.
- [20] P. Severin, *Traitement des Ambiances, Applications à l'Habitat et aux Locaux Professionnels de l'Hôtellerie - Restauration, Sciences et Technologie de l'Habitat et de l'Environnement*, IUFM de Toulouse Biotechnologie B.
- [21] H. Oiry, J. P. Bardon, Comportement Thermique de Différents Types d'Habitation Soumis à un Ensoleillement et à une Température Extérieure Périodiques , *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1985, Vol. 28 N° 11 p 1991 - 2004.
- [22] J.P. Eggimann, J.L. Badoux, D. Chuard, J.P. Eggimann, C. Scaler, *Architecture Climatique Equilibrée, Conception, Démarche et Dimensionnement*, Programme d'Action PACER, Energies Renouvelables, Office Fédéral des Questions Conjoncturelles 1996.
- [23] A. Potvin, March PhD Arch, Claude MH Demers, MArch, PhD Arch, Marie-Claude Dubois, MArch, PhD Ing, GRAP, Groupe de Recherche en Ambiances Physiques, École d'Architecture, *Le Chauffage Solaire Passif Comme Stratégie Bioclimatique*, Université Laval, [www.grap.arc.ulaval.ca](http://www.grap.arc.ulaval.ca). Esquisses, *Le Bulletin d'Information de l'Ordre des Architectes du Québec* 2004, Volume 15, Numéro 1.

- [24] S.M.A. Bekkouche, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Thèses de Doctorat en Sciences Physiques Soutenue à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Juin 2009.
- [25] A.Ricaud, Gisement Solaire, Cythelia Sarl, Septembre 2009.
- [26] E.Torlaschi, Phénomènes Radiatifs dans L'atmosphère Terrestre, cours de Physique de L'atmosphère, 2003.
- [27] K. Scharmer , J. Greif, The European Solar Radiation Atlas, Vol,01,Fundamentals and Maps, Les Presses de l'École des Mines Paris, 2000.
- [28] E .R. Bird, R.L.Hulstrom, A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces, Seri Tr -642-761 February 1981.
- [29] J.Hofierka, M.Suri,The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications, Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002 - Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [30] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Conception et Validation d'un Logiciel sous Excel pour la Modélisation d'une Station Radiométrique en Algérie Cas d'un Ciel Totale-ment Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 677 - 688.
- [31] M.M. Hadjiat, S.M.A. Bekkouche, M.R. Yaiche, M. Hamdani, Effet de l'Ori-entation sur la Température Intérieure d'une Pièce d'un Habitat Située a Ghardaïa, Revue Internationale d'Héliotechnique Energie - Environnement - N° 39 (2009) 8 - 13.
- [32] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Conception et Validation d'un Programme sous Excel pour L'estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie. Cas d'un Ciel Totale-ment Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, 11 N°3, 2008, 423 - 436.
- [33] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Conception et Validation d'un Programme Sous Execel Pour L'estimation du Rayonnement Solaire Direct en Algerie , Revue Inter-nationale D'héliotechnique N°39 , 2009, 50-55.

- [34] H. Maamar, S.M.A. Bekkouche, Caractérisation, Etude Théorique et Expérimentale d'un Capteur Solaire Plan à Eau de Type Megasun, Premier Workshop International sur les Energies Renouvelables et leurs Applications, Laghouat, les 10, 11 et 12 Mai 2008.
- [35] B.Ould Bilal, V. Sambou, C. M. F. Kébé, M. Ndongo, P.A. Ndiaye, Etude et Modélisation du Potentiel Solaire du Site de Nouakchott et de Dakar, J, Sci, Vol. 7, N° 4, 2007,57 - 66.
- [36] A.Moummi, Al, Estimation du Rayonnement Solaire Par Deux Approches Semi Empiriques dans le Site de Biskra, Proceedings of the 2nd International Conference on Differential Equations in Marrakech, Maroc.
- [37] M. Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, vol1 et 2: Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [38] A. Mingozzi and S. Bottiglioni, Bioclimatic Architecture, the Case Study of the Sustainable Residential Settlement in Pieve Di Cento, 2nd PALENC Conference and 28<sup>th</sup> AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21<sup>st</sup> Century, September 2007, Crete Island, Greece.
- [39] L. Wang, J. Gwilliam and P. Jones, Case study of Zero Energy House Design in UK, Energy and Buildings 41 (2009) 1215-1222
- [40] J. Yu, C. Yang and L. Tian, Low-Energy Envelope Design of Residential Building in Hot Summer and Cold Winter Zone in China, Energy and Buildings 40 (2008) 1536-1546.
- [41] A.F. Tzikopoulos, M.C. Karatza and J.A. Paravantis, Modeling Energy Efficiency of Bioclimatic Buildings, Energy and Buildings 37 (2005) 529-544.
- [42] F.F. Al-Ajmi and V.I. Hanby, Simulation of Energy Consumption for Kuwaiti Domestic Buildings, Energy and Buildings 36 (2004) 710-719.

- [43] E. Gratia and A.D. Herde, Greenhouse Effect in Double-Skin Facade, *Energy and Buildings* 39 (2007) 199-211.
- [44] L. Buzzoni, R. Dall'Olio and M. Spigab, Energy analysis of a Passive Solar System, *Rev Gén. Therm* (1998) 37, 411-416 Elsevier, Paris.
- [45] N. Fezzioui, B. Droui, M. Benyammine et S. Larbi, Influence des Caractéristiques Dynamiques de l'Enveloppe d'un Batiment sur le Confort Thermique au Sud Algérien. *Revue des Energies Renouvelables*, 2008, Vol 11 N°1 p 25 - 34.
- [46] Z. Chelghoum et A. Belhamri, Habitat a Bas Profil Energétique, *Revue des Energies Renouvelables*, Journées de Thermique 2001, p 59 - 64.
- [47] E. Gratia and A.D. Herde, Design of Low Energy Office Buildings, *Energy and Buildings* 35 (2003) 473-491.
- [48] S. Masmoudi and S. Mazouz, Relation of Geometry, Vegetation and Thermal Comfort Around Buildings in Urban Settings, the Case of Hot Arid Regions, *Energy and Buildings* 36 (2004) 710-719.
- [49] P. Taylor, R.J. Fuller and M.B. Luther, Energy Use and Thermal Comfort in a Rammed Earth Office Building, *Energy and Buildings* 40 (2008) 793-800.
- [50] A. Mingozzi; S. Bottiglioni and M. Medola, Passive Cooling of a Bioclimatic Building in the Continental Climate of the Padan Plain: Analysing the Role of Thermal Mass with Dynamic Simulations, *International Journal of Sustainable Energy*, Volume 28, Issue 1 - 3 March 2009 , pages 141 - 156.
- [51] M. Amir, M. Lacroix, Ns. Galanis, Comportement Thermique de Dalles Chauffantes Electriques Pour le Stockage Quotidien , *International Journal of Thermal Sciences* 1999, Elsevier, Paris, Vol 38 p 121 - 131.



- [52] R. Belarbi, M. Spérandio, F. Allard, Evaluation des Bâtiments Munis de Systèmes de Rafraîchissement Passif. Application au Cas de l'Evaporation Adiabatique . Revue Générale de Thermique 1997, Elsevier, Paris, Vol 36 p 547 - 561.
- [53] J.P. Eggimann, J.L. Badoux, D. Chuard, J.P. Eggimann, C. Scaler, Architecture Climatique Equilibrée, Conception, Démarche et Dimensionnement , Programme d'Action PACER, Energies Renouvelables, Office Fédéral des Questions Conjoncturelles 1996.
- [54] D. Khaine., J.Y. Desmons, A. Khaine, R. Benyounes, M. Ray, Simulation du Comportement Thermique d'un Local par la Méthode des Fonctions de Green , International Journal of Thermal Sciences 1999 Elsevier, Paris, Vol 38 p 340 - 347.
- [55] C. Lnard, P. Depecker, J.J. Roux, Un modèle Simplifié Pour la Prédiction du Champ de Température Dans les Bâtiments , Revue Générale de Thermique 1997, Elsevier, Paris. Vol 36 p 113-123.
- [56] H. Oiry, J. P. Bardon, Comportement Thermique de Différents Types d'Habitation Soumis à un Ensoleillement et à une Température Extérieure Périodiques , International Journal of Heat and Mass Transfer, 1985, Vol. 28 N° 11 p 1991 - 2004.
- [57] Monier, Des Toits à Vivre , Le Bulletin d'Informations des Artisans Professionnels, Novembre 2009.
- [58] A. Mingozi; S. Bottiglioni and M. Medola, Passive Cooling of a Bioclimatic Building in the Continental Climate of the Padan Plain: Analysing the Role of Thermal Mass with Dynamic Simulations. International Journal of Sustainable Energy, Volume 28, Issue 1 - 3 March 2009 , pages 141 - 156.
- [59] A. Mingozi, S. Bottiglioni, Bioclimatic Architecture, The Case Study of the Sustainable Residential Settlement in Pieve Di Cento. 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete Island, Greece.

- [60] L. Buzzoni, R. Dall'Olio and M. Spigab, Energy Analysis of a Passive Solar System. Rev Gén. Therm, (1998) 37, 411-416 Elsevier, Paris.

الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد نموذج رياضي يمكننا من المقارنة بين العزل الحراري الخارجي و الداخلي لفضاء عمراني عنصري (غرفة). لقد تم إنجاز النموذج بواسطة برنامج MATLAB 7.0.4 من اجل معرفة التغيرات في درجة الحرارة لمختلف أجزاء النظام و بخاصة حرارة الهواء الداخلي للغرفة وهذا بمحاكاة الوسط الخارجي.

إن النموذج المقترح يأخذ بعين الاعتبار التدفقات التي تلحق بالنظام كالإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الوسط الخارجي من جهة، والتحويلات الحرارية السائدة وسط الغرفة من جهة أخرى. كانت نتائج النموذج إيجابية وهذا من خلال مقارنة حرارة الهواء الداخلي للغرفة المتحصل عليها تجريبيا ونظريا حيث الفارق لا يتعدى  $0.9^{\circ}\text{C}$  وهذا في حالة عدم وجود العزل الحراري للغرفة.

تم العزل الحراري الداخلي والخارجي للغرفة خلال الفترتين المتميزتين (الصيف والشتاء) وهذا من أجل تقليص فاتورة استهلاك الطاقة، و التلوث الناجم عن إنتاجها والوصول إلى درجة الحرارة الملائمة.

**الكلمات المفتاحية:** نموذج رياضي، العزل الحراري الداخلي والخارجي، درجة الحرارة، الحرارة الملائمة.

#### **Abstract :**

The purpose of this study is to find a mathematical model which leads us to the comparison between internal model and external thermal insulation for elementary space living (room). This model has been developed using MATLAB 7.0.4 program in order to know the changes in the degree of temperature of the different parts the system consists of, and particularly the temperature, of the internal air of the room in imitation to the external milieu. The proposed model takes in to consideration the fluxes which influence the system as solar radiation, and the temperature degree of the external milieu, on one hand, and the temperature changing inside the room on the other hand. The results obtained were positive, due to the comparison between the results of the model and the experimental of the internal air of the room. The difference has exceed  $0.9^{\circ}\text{C}$  in the absence of thermal insulation of the room. The internal and external thermal insulation had been done for the sake of minimizing the energy consummation invoice and the pollution resulted from it production and to achieve an appropriate degree of temperature.

**Keywords:** Mathematical model- Internal and external thermal insulation- Appropriate degree of temperature.

#### **Résumé:**

Le but de cette étude est de trouvé un modèle mathématique qui nous permet de faire la différence entre l'isolation thermique extérieure et intérieure d'un espace urbain élémentaire (une pièce). Ce modèle est préparé à l'aide du programme MATLAB 7.0.4 afin de connaitre les changements thermique des différents parts du système, et surtout la température de l'air intérieure de la pièce sise à vis des sollicitations du milieu climatique extérieur. Le modèle proposer prend en considérations les fluxes sollicitant le système talques rayonnements solaire, la température du milieu extérieur et les changements thermique inhérents au milieu de la pièce. Les résultats du modèle étaient positives, et cela après la comparaison entre la température de l'air intérieure de la pièce, obtenue par l'expérience et théoriquement ,dont la différence n'a pas dépasser  $0.9^{\circ}\text{C}$  sans l'aide de l'isolation thermique de la pièce.

Nous avons appliqué l'isolation thermique intérieure et extérieure pendant deux différentes périodes (l'été et l'hiver) afin d'approcher la température idéal de chaque période et aussi de réduire la consommation d'énergie et sa pollution.

**Mots clés :** Modèle mathématique- l'Isolation thermique extérieure et intérieure- Température idéal- Température.