

MEMOIRE

Présenté à

L'UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCCEN

Pour obtenir le grade de

Magister Spécialité " Énergies Renouvelables "

Par

Mr HAMDANI Maamar

**Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces
d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa**

Devant le jury d'examen

Président

B. BENYOUCEF

Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen

Directeur de Mémoire

T. BENOUAZ

Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen

Examineurs

A. ZERGA

**Maître de Conférences à l'Université Abou-Bakr
Belkaïd – Tlemcen**

R. SAIM

**Maître de Conférences à l'Université Abou-Bakr
Belkaïd – Tlemcen**

Membre invité

S. M. A. BEKKOUCHE

**Maître de Recherches à l'Unité de Recherche Appliquée
en Energies Renouvelables – Ghardaïa**

Année Universitaire 2010 ~ 2011

MEMOIRE

Présenté à

L'UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCCEN

Pour obtenir le grade de

Magister Spécialité " Énergies Renouvelables "

Par

Mr HAMDANI Maamar

**Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces
d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa**

Devant le jury d'examen

Président

B. BENYOUCEF

Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen

Directeur de Mémoire

T. BENOUAZ

Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen

Examineurs

A. ZERGA

**Maître de Conférences à l'Université Abou-Bakr
Belkaïd – Tlemcen**

R. SAIM

**Maître de Conférences à l'Université Abou-Bakr
Belkaïd – Tlemcen**

Membre invité

S. M. A. BEKKOUCHE

**Maître de Recherches à l'Unité de Recherche Appliquée
en Energies Renouvelables – Ghardaïa**

Année Universitaire 2010 ~ 2011

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents qui ont fait preuve de beaucoup de patience et de sacrifice, qu'ils trouvent ici un modeste témoignage de mon indéfini tendresse... Il y a tant d'amour et de générosité dans vos âmes.

À ma femme qui m'a toujours encouragé et motivé tout au long de mes travaux,

À mes frères, Omar et Lakhdar.

À tous mes collègues de l'URAE et particulièrement M. K. Cherier, K. Kaci, M. Ghrici, S. Kherrou, F. Chellali, M.M. Hadjiat, K. Benyelloul.

À tous les membres du laboratoire de Physique Electronique et Modélisation de Tlemcen.

Enfin, je ne pourrais manquer de souligner l'apport et le soutien de mes collègues étudiants à l'École doctorale de l'Université de Tlemcen qui ont rendu cette période de ma vie si intéressante et si enrichissante. Mon ouverture sur plusieurs cultures s'est réalisée grâce aux échanges que nous avons eus; Hocine, Soumia, Nouria, Nawel, Khaled, AËK, Yahia, Djamel, Yesref, Ali, Nour-Eddine.

HAMDANI Maamar

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable de Ghardaïa avec la collaboration du Laboratoire de Physique Electronique et Modélisation du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, sous la direction de Monsieur T. BENOUAZ Professeur à l'Université de Tlemcen.

Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour la clarté de son enseignement, les conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigués au cours de l'élaboration de ce mémoire, ainsi que l'esprit initiative et de recherche qu'il a su me transmettre.

Je remercie vivement Monsieur B. BENYOUCEF Professeur et Directeur de l'Unité de Recherche des Matériaux et Energies Renouvelables de l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Merci à Monsieur A. ZERGA, Maître de Conférences à l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ces travaux,

J'exprime aussi ma vive connaissance à Monsieur R. SAIM Maître de Conférences à l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait d'examiner ces travaux,

Merci à Monsieur S. M. A. Bekkouche Maître de Recherches à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa. Au delà de ces activités, je tiens à le remercier encore pour la qualité de nos échanges ces dernières années.

HAMDANI Maamar

Table des matières

Nomenclature	4
Introduction Générale	9
1 Rappels sur les Modes de Transferts Thermiques	13
1.1 Introduction	13
1.2 Modes de Transferts Thermiques	14
1.2.1 Conduction	14
1.2.2 Convection	15
1.2.3 Transfert par rayonnement	21
2 Choix d'un Modèle Numérique Adéquat pour l'Estimation des Eclairements Incidents	26
2.1 Introduction	26
2.2 Mouvement de la Terre autour du Soleil	27
2.3 Rayonnement Solaire à l'Extérieur de l'Atmosphère	28
2.4 Position du Soleil	29
2.4.1 Coordonnées équatoriales	29
2.4.2 Coordonnées horizontales	31
2.5 Orientation d'un Plan	32
2.6 Angle d'Incidence sur un Plan	33
2.7 Masse Atmosphérique	33

2.8	Epaisseur Optique de l'Atmosphère	34
2.9	Modèle de Capderou	35
2.9.1	Eclairement reçu sur un plan horizontal par ciel clair	35
2.9.2	Eclairement global reçu sur un plan incliné	37
2.10	Méthode Semi-Empirique de Perrin Brichambaut	39
2.10.1	Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)	39
2.10.2	Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert)	40
2.11	Modèle R. Sun	41
2.11.1	Facteur de trouble de Linke	41
2.11.2	Eclairement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair	41
2.11.3	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair	42
2.11.4	Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair	43
2.11.5	Eclairement diffus incident sur un plan incliné par ciel clair	45
2.12	Simulation Numérique et Confrontation des Résultats	46
2.13	Conclusion	53
3	Validation de la Théorie et Confrontation avec l'Expérience	56
3.1	Introduction	56
3.2	Plan Descriptif	56
3.3	Modélisation et Simulation Numérique	60
3.3.1	Sans isolation thermique	60
3.3.2	Avec isolation thermique	69
3.4	Méthodologie et Confrontation des Résultats	72
3.5	Conclusion	79
4	Isolation Thermique et Effet de l'Orientation de l'Habitat sur ses Tempé- ratures	81
4.1	Introduction	81
4.2	Solaire Passif	82

4.3	Confort Thermique	83
4.4	Isolation Thermique	84
4.5	Orientation	85
4.6	Eclairements Solaires et Temperature Ambiante	86
4.7	Influence de l'Orientation du Bâtiment sur ses Températures	88
4.7.1	Période chaude	89
4.7.2	Période froide	93
4.8	Conclusion	96
	Conclusion Générale	98

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
Φ	Densité du flux thermique de la source de chaleur	$W m^{-2}$
Q_{ij}	Flux de rayonnement entre les surfaces i et j	W
Q_{cd}	Flux de chaleur transmis par conduction.	W
Q_{cv}	Flux de chaleur échangé par convection.	W
Q_r	Flux de chaleur échangé par rayonnement	W
T	Température	K
v	Volume	m^3
m	Masse	Kg
m_A	Masse atmosphérique	Kg
x	Variable d'espace dans la direction du flux.	m
S	Aire de la surface	m^2
U_m	Vitesse moyenne du fluide	$m s^{-1}$
λ	Conductivité thermique du milieu.	$W m^{-1} K^{-1}$
h_{cv}	Coefficient de transfert de chaleur par convection.	$W m^{-2} K^{-1}$
ρ	Masse volumique	$kg m^{-3}$
C_p	Chaleur spécifique du fluide	$J kg^{-1} K^{-1}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W m^{-2} k^{-4}$
μ	Viscosité dynamique du fluide	$pa.s$
L	Longueur caractéristique de la surface d'échange	m
N_U	Nombre de Nusselt	
R_e	Nombre de Reynolds	
P_r	Nombre de Prandtl	
G_r	Nombre de Grashof	
N	Numéro du jour de l'année à partir du premier janvier	
δ	Déclinaison du soleil	<i>degré</i>
H	Angle horaire	<i>degré</i>

TSV	Temps solaire vrai	<i>heure</i>
TL	Temps local	<i>heure</i>
DE	Décalage horaire	<i>heure</i>
φ	Latitude de lieu	<i>degré</i>
h_0^{ref}	Latitude de soleil corrigée	<i>degré</i>
h_0	Latitude de soleil	<i>degré</i>
$F_d (h_0)$	Latitude de soleil	<i>degré</i>
h	Hauteur du soleil	<i>degré</i>
a	Azimuth du soleil	<i>degré</i>
β	Inclinaison du plan par rapport au plan horizontal	<i>degré</i>
δ_R	L'épaisseur optique de Rayleigh	<i>m</i>
γ	Hauteur du plan	<i>degré</i>
i	Angle d'incidence sur un plan	<i>degré</i>
I_0	Constante solaire	$W m^{-2}$
Cts	correction terre soleil	$W m^{-2}$
z	Altitude de lieu	<i>m</i>
G	Rayonnement global horizontal	$W m^{-2}$
G_{hc}	Rayonnement global horizontal	$W m^{-2}$
I	Rayonnement direct horizontal	$W m^{-2}$
B_{0c}	Rayonnement direct normal (<i>R.sun</i>)	$W m^{-2}$
B_{hc}	Rayonnement direct horizontal (<i>R.sun</i>)	$W m^{-2}$
B_{ic}	Rayonnement direct incliné (<i>R.sun</i>)	$W m^{-2}$
D	Rayonnement diffus horizontal	$W m^{-2}$
D_{hc}	Rayonnement diffus horizontal (<i>R.sun</i>)	$W m^{-2}$
In	Rayonnement direct normal	$W m^{-2}$
α	Coefficient d'absorption	m^{-1}
e	Epaisseur de la couche du mur	<i>m</i>

F_{ij}	Facteur de forme entre les surfaces i et j	
F_{iciel}	Facteur de forme entre les surfaces i et le ciel	
Q_{rciel}	Flux de chaleur échangé par rayonnement avec le ciel	W
$Q_{rsolext}$	Flux de chaleur échangé par rayonnement avec le sol extérieur	W
Q_{cvam}	Flux de chaleur échangé par convection avec l'ambiance	W
R	Résistance thermique	Ω

Indices

a	Ciment
b	Pierre
c	Plâtre
h	Béton
d	Carrelage
g	Hourdis
s	Sable
p	Porte de la pièce
f	Fenêtre de la pièce
ps	Porte de la salle de séjour
fs	Fenêtre de la salle de séjour
fij	Facteur de forme entre les surfaces i et j
pol	Indice du polystyrène
i, j	Surfaces
1	Mur Sud du salon
2	Mur Ouest du salon
3	Toit du salon
4	Air intérieur du salon
5	Mur Est du salon

6	Sol du salon
7	Mur Nord du salon
8	Mur Sud extérieur du salon
9	Mur Ouest extérieur du salon
10	Mur Sud de la pièce
11	Mur Est de la pièce
12	Toit de la pièce
13	Air intérieur de la pièce
14	Mur Ouest de la pièce
15	Sol de la pièce
16	Mur Nord de la pièce
17	Mur Sud extérieur de la pièce
18	Mur Est extérieur de la pièce
<i>tpext</i>	Surface extérieure du toit de la pièce
<i>tsext</i>	Surface extérieure du toit du salon
<i>nextp</i>	Surface extérieure du mur Nord de la pièce
<i>nexts</i>	Surface extérieure du mur Nord du salon
<i>solext</i>	Surface du sol à l'extérieur
<i>sints</i>	Surface du sol à l'intérieur

Introduction Générale

Introduction Générale

Avec la crise énergétique, l'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important pour le confort des occupants car les températures extrêmes, qu'elles soient chaudes ou froides, peuvent provoquer des effets gênants chez l'homme. Actuellement, la prise en compte du confort thermique dans les bâtiments se fait avec des méthodes et des outils élaborés à partir d'approches simplifiant la complexité des phénomènes interactifs. Ainsi, les exigences constructives favorisent le surdimensionnement des équipements de contrôle et de régulation des ambiances thermiques (systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de climatisation), principales sources de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, dans le bâtiment.

Le secteur du bâtiment est donc l'un des secteurs ayant le plus d'impact sur l'environnement. Un habitat à basse consommation énergétique est un concept de bâtiment performant. Il peut constituer l'une des réponses possibles aux défis énergétiques et environnementaux d'aujourd'hui. À la lumière de quelques études (de [1] à [10]), ce concept a été défini et caractérisé, puis différents outils et méthodes ont été identifiés pour permettre l'analyse des performances d'un bâtiment.

Les recherches au niveau de la thermique du bâtiment se sont accentuées, en particulier savoir l'orientation du bâtiment et 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 performances thermiques des bâtiments à ces niveaux. D'ailleurs les recherches s'accroissent pour viser une meilleure isolation et orientation de l'enveloppe et minimiser les pertes thermiques. L'orientation d'une façade est le paramètre clé des interactions visuelles et thermiques. Cependant, cela se traduit par l'ensoleillement disponible, le niveau du rayonnement sur un mur est sensiblement plus élevé dans une direction et moindre

dans l'autre, ce qui signifie que les conditions de protection sont importantes [11]. Si le taux d'ensoleillement est faible, il est intéressant de trouver l'orientation la mieux adaptée pour profiter des quelques heures de soleil. Par contre, si le taux est important, le choix se portera plus facilement sur une orientation qui permet de limiter les apports solaires d'été [12].

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre des efforts menés pour maîtriser les impacts environnementaux du bâtiment tout en assurant une qualité des ambiances intérieures satisfaisantes à Ghardaïa. Ils consistent à explorer l'approche adaptative du confort thermique de point de vue température pour développer des modèles mathématiques de deux pièces d'un habitat au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) de Ghardaïa. On s'intéresse plus particulièrement à l'étude de l'effet de l'orientation du bâtiment sans et avec 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. Les résultats ont été confrontés avec des données expérimentales mesurées.

- Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les différents modes de transfert thermique qui sont à la base de notre étude.

- Le second chapitre est consacré au choix d'un modèle empirique efficace pour l'estimation des éclairissements incidents sur les surfaces horizontale et verticale.

- Dans un troisième chapitre, nous allons effectuer des études expérimentales pour la validation des approches proposées. Des résultats numériques ont été confrontés avec des données expérimentales mesurées pour voir dans quelle mesure la théorie s'accorde avec l'expérience.

- L'objet du dernier chapitre est de se rapprocher si c'est possible vers un mode de conception architecturale plus adéquat en variant l'orientation de l'habitat en présence et en

absence de l'isolation thermique.

Finalement, une conclusion générale terminera notre mémoire, permet de donner quelques solutions, critères et remarques architecturales passives.

Chapitre I

Rappels sur les Modes de Transferts Thermiques

Chapitre 1

Rappels sur les Modes de Transferts Thermiques

1.1 Introduction

La chaleur est la forme ultime d'une dégradation d'énergie. On sait comment l'énergie électrique peut se dégrader en chaleur par effet Joule et comment, en mécanique, l'énergie cinétique peut se transformer en chaleur du fait des frottements. Cette dégradation n'est pas irrémédiable et il est possible de recréer une énergie plus noble (mécanique, électrique.etc.) en construisant des machines thermiques. La principale difficulté qu'on rencontre lors de l'étude de la chaleur est due à la multiplicité des effets qu'elle peut produire. La chaleur influe considérablement sur de nombreuses réactions chimiques, elle élève la pression des gaz, elle dilate les liquides, les solides et les gaz, elle engendre des différences de potentiel électrique et elle provoque les changements d'état de la matière (solide, liquide et gazeux) [13].

La thermique est l'étude de la chaleur et de la température. Cette science étudie comment la chaleur peut s'échanger entre des corps solides, liquides ou gazeux et comment un corps peut accroître ou diminuer sa température. Elle se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution de la température, entre l'état

d'équilibre initial et l'état d'équilibre final. Ce premier chapitre donne des rappels qui sont en l'occurrence le bagage scientifique utile et nécessaire pour développer ces présentes études. On s'intéresse particulièrement à :

- Des phénomènes d'échanges thermiques qui ont lieu sous forme de conduction, convection et rayonnement.
- Aux calculs des facteurs de forme en utilisant quelques équations et diagrammes.

1.2 Modes de Transferts Thermiques

Il est habituel dans l'étude des transferts thermiques, de distinguer trois grandes parties se rattachant chacune à un mode de transfert particulier de la chaleur. La conduction, la convection et le rayonnement. Chacun de ces modes étant lui même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, comme l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants fondamentaux ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes, électrons libres,), ceux-ci pourront échanger tout ou une partie de leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre l'énergie cinétique:

- Soit par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par exemple), ce qui correspond à la conduction.
- Soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement.

Enfin dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, on considère également, mais cette fois à l'échelle macroscopique, comme un mode de transfert de chaleur appelé convection, les échanges résultants du déplacement des diverses parties d'un fluide à des températures différentes [14].

1.2.1 Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par

conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts: une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres [15].

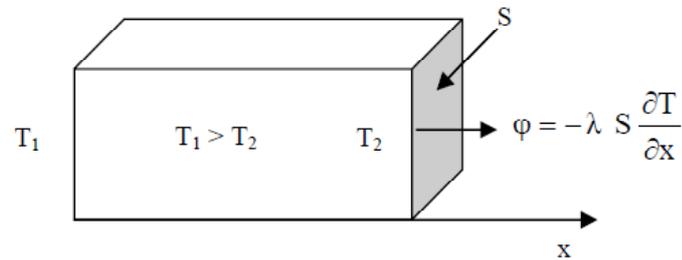


Fig.(1.1): transfert par conduction.

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

$$Q_{cd} = - \lambda \ grad T \quad (1.1)$$

ou sous forme algébrique :

$$Q_{cd} = - \lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.2)$$

Q_{cd} : flux de chaleur transmis par conduction (W).

λ : conductivité thermique du milieu ($W m^{-1} K^{-1}$).

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

S : aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

1.2.2 Convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi

transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas, l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement[16].

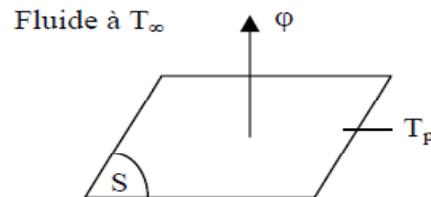


Fig.(1.2): transfert par convection.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$Q_{cv} = h_{cv} (T_p - T_f) \quad (1.3)$$

Q_{cv} : flux de chaleur transmis par convection (W).

h_{cv} : coefficient de transfert de chaleur par convection ($W m^{-2}K^{-1}$).

T_p : température de la surface du solide (K).

T_{∞} : température du fluide loin de la surface du solide (K).

S : aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

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

Convection naturelle et convection forcée

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue:

-La convection libre ou naturelle: le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières

et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

-La convection forcée: le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...etc.). L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

Régimes d'écoulement

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement.

Considérons à titre d'exemple l'écoulement d'un fluide dans une conduite :

En régime laminaire, l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes

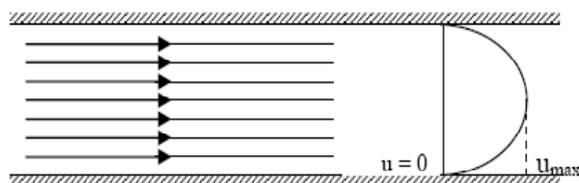


Fig.(1.3): le régime d'écoulement laminaire

Entre deux filets fluides adjacents les échanges de chaleur s'effectuent donc :

Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.

Par convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.

- En régime turbulent, l'écoulement n'est pas unidirectionnel :

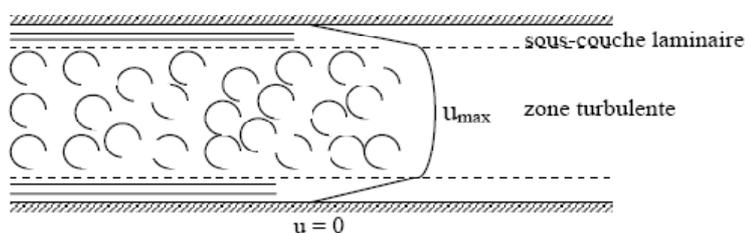


Fig.(1.4): le régime d'écoulement turbulent

L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction est généralement négligeable par rapport à la convection.

Analogie de Reynolds

De même qu'au niveau moléculaire on explique la viscosité des gaz par la transmission des quantités de mouvement des molécules lors des chocs intermoléculaires. On explique la transmission de la chaleur par la transmission d'énergie cinétique lors de ces mêmes chocs. Cette liaison intime des phénomènes de viscosité et de transfert de chaleur conduisent à l'analogie de Reynolds: dans un écoulement fluide avec transfert de chaleur dans un tube, le profil des vitesses et le profil des températures sont liés par une relation de similitude:

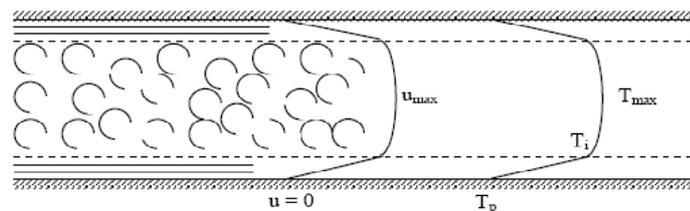


Fig.(1.5): profil des vitesses dans un écoulement

Couches limites dynamiques et thermiques

Quelque soit le régime d'écoulement, il demeure une sous-couche laminaire (couche limite dynamique) dont l'épaisseur est d'autant plus réduite que le nombre de Reynolds est grand. L'épaisseur de cette couche limite varie en fonction de nombreux paramètres: nature du fluide température, rugosité de la paroi..... . L'analogie de Reynolds montre que le gradient thermique est particulièrement important au voisinage de la paroi, c'est à dire dans la sous-couche laminaire. Quelque soit le régime d'écoulement du fluide, on considère que la résistance thermique est entièrement située dans le film laminaire qui joue le rôle d'isolant thermique (couche limite thermique).

Calcul du coefficient d'échange par convection

On exprime le flux thermique échangé par convection par:

$$Q_{cv} = h S (T_p - T_f) \quad (1.4)$$

h : est appelée coefficient d'échange par convection ($W m^{-2} K$).

$(T_p - T_f)$: différence de la température de la paroi et du fluide (K).

- En convection forcée, le coefficient d'échange h est indépendant de la différence de la température de la paroi et du fluide mais il dépend des grandeurs suivantes:

U_m : vitesse moyenne du fluide ($m s^{-1}$).

ρ : masse volumique du fluide ($k .g .m^{-3}$).

C_p : chaleur spécifique du fluide ($J .k .g^{-1} .K^{-1}$).

μ : viscosité dynamique du fluide ($P a \cdot s$).

λ : conductivité thermique du fluide ($W .m^{-1} .K^{-1}$).

L : dimension caractéristique de la surface d'échange (m).

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

Nombre de Nusselt

$$Nu = \frac{h L}{\lambda} \quad (1.5)$$

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho U_m L}{\mu} \quad (1.6)$$

Nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\rho} \quad (1.7)$$

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).

$$Nu = f (Re, Pr) \quad (1.8)$$

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.

$$Nu = \frac{2}{3} Re^{0.5} Pr^{1/3} \quad (1.9)$$

$$Nu = \frac{0.036 Re^{0.5} Pr}{1 + 0.83 (Pr^{1/3} - 1)} \quad (1.10)$$

-En 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: $Gr / pr^2 > 100$

$$Nu = C (Gr Pr)^n \quad (1.11)$$

avec

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2} \quad (1.12)$$

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

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

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

Si la convection est laminaire

$$Nu = 0.53 (Gr Pr)^{1/4} \quad (1.13)$$

Si la convection est turbulente

$$Nu = 0.104 (Gr Pr)^{1/3} \quad (1.14)$$

1.2.3 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 [15]. 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 Φ_1 et absorbe une partie du flux Φ_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

$$\alpha = \frac{\textit{flux absorbé}}{\textit{flux incident}} \quad (1.15)$$

Coefficient d'émission

$$\varepsilon = \frac{\textit{flux émis}}{\textit{flux incident}} \quad (1.16)$$

Coefficient de réflexion

$$\rho = \frac{\textit{flux réfléchi}}{\textit{flux incident}} \quad (1.17)$$

La conservation de l'énergie implique:

$$\alpha + \varepsilon + \rho = 1 \quad (1.18)$$

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:

$$\Phi = \text{flux émis} - \text{flux absorbé} = S \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.19)$$

σ : constante de Stéfan-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:

$$\Phi = S_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.20)$$

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).

Φ : 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 :

$$Q_{ij} = S_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) = S_j F_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4) \quad (1.21)$$

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

$$F_{ij} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_i} - 1 + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{S_i}{S_j} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right) - 1} \quad (1.22)$$

Les échanges par rayonnement entre deux surfaces quelconques d'un habitat mettent en jeu deux facteurs différents [16].

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

-Leurs caractéristiques d'émission et d'absorption.

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 .

$$S_i F_{ij} = S_j F_{ji} \quad (1.23)$$

$$\sum_{j=1}^{j=n} F_{ij} = 1 \quad (1.24)$$

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 [17].

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 [17].

$$F_{12} = \frac{1}{2 \pi x^2} [F(2x, 2x) - F(2x, 0) - F(0, 2x)] \quad (1.25)$$

Nous avons représenté sur la figure (1.6) quelques courbes donnant les facteurs de forme de deux surfaces rectangulaires égales parallèles et opposées représentatives de la formule (1.25) [17].

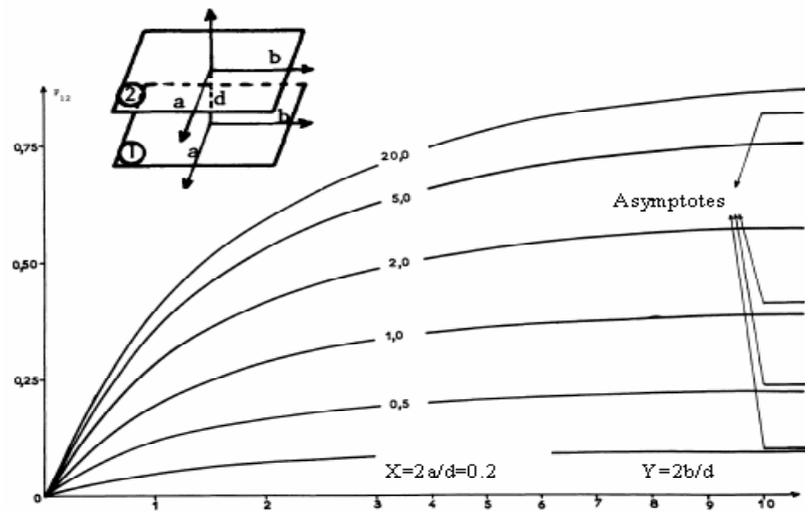


Fig.(1.6): Facteurs de forme de deux surfaces rectangulaires et parallèles de mêmes dimensions

Facteur de forme entre deux surfaces adjacentes perpendiculaires

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

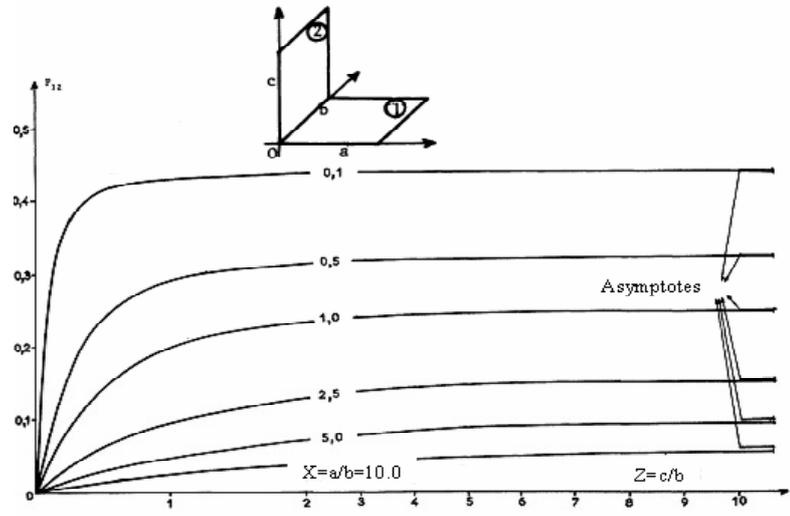


Fig.(1.7): Facteurs de forme de surfaces rectangulaires

Ainsi que nous l'indiquions que les solutions proposées ici permettent de résoudre sans approximation les cas pratiques les plus courants [17].

Chapitre II

Choix d'un Modèle Numérique Adéquat pour l'Estimation des Eclairéments Incidents

Chapitre 2

Choix d'un Modèle Numérique Adéquat pour l'Estimation des Éclairements Incidents

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre est consacré à des rappels qui sont en l'occurrence le bagage mathématique utile pour repérer la position du soleil à un moment donné de l'année et pour déterminer les grandeurs astronomiques. On s'intéresse plus particulièrement au choix d'un modèle empirique efficace pour l'estimation des éclairements incidents sur les surfaces horizontales et verticales. Les résultats de la simulation numérique seront confrontés avec des valeurs données par notre station radiométrique implantée au niveau de notre unité.

Le Sun-Tracker est une station de grande précision comprend deux parties:

- une partie fixe composée d'un Pyranomètre type EKO pour mesurer l'irradiation solaire globale reçue par une surface horizontale, d'un thermohygromètre type TECNOEL pour la mesure de la température et de l'humidité et d'un solarimètre.
- et une partie mobile basée sur un système robotisé capable de suivre la trajectoire du

soleil du lever au coucher.



Fig.(2.1): Station radiométrique de L'URAER

La première étape consiste en la détermination des différents paramètres astronomiques, et plus précisément la position exacte du soleil quelque soit le moment de l'année. Avant toute chose, il est nécessaire de définir les deux concepts indispensables afin de situer un lieu dans le monde: la latitude φ et la longitude λ . Ils sont fondés respectivement sur la position des parallèles, qui sont des lignes parallèles à l'équateur, et des méridiens, qui font le tour du globe terrestre en passant par les deux pôles et qui se réfèrent au méridien de Greenwich.

Les trois modèles que nous avons retenus, sont: le modèle de Capderou, le modèle R.sun et la méthode empirique de Perrin Brichambaut .

2.2 Mouvement de la Terre autour du Soleil

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil: 147millions de Km et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné: 152 millions de Km, la distance moyenne

étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle δ avec la normale du plan de l'écliptique [19, 20].

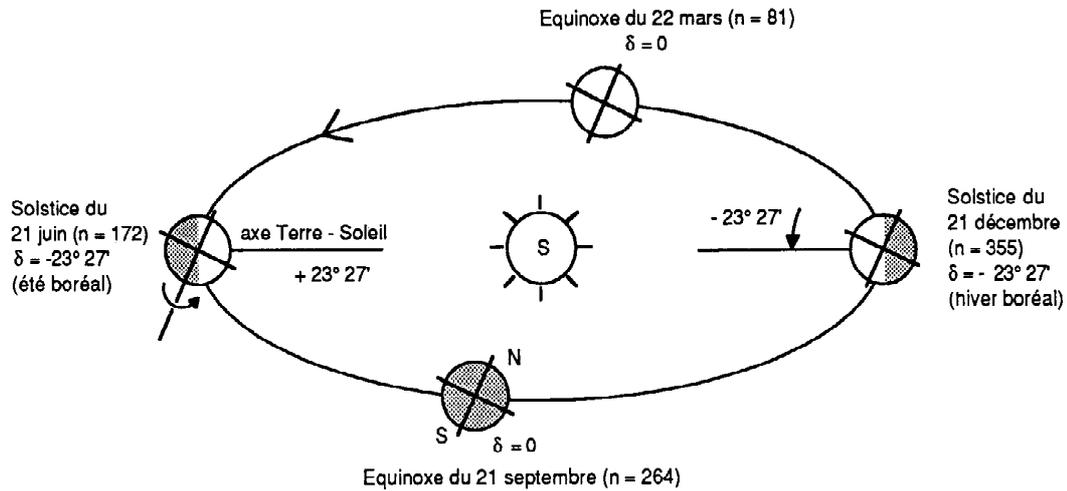


Fig.(2.2): Mouvement de la terre autour du soleil

2.3 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 [19]. La constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est: $I_0 = 1367 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$

I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable (trajectoire elliptique) [20]. La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{ts} = 1 + 0.034 \cos \left(\left(\frac{360}{365} \right) (N - 2) \right) \quad (2.1)$$

$$I = I_o C_{ts} \quad (2.2)$$

Dans le modèle de R.sun, La correction terre soleil est donnée par la formule suivante (de [21] à [23]):

$$C_{ts} = 1 + 0.034 \cos (N' - 0.048869) \quad (2.3)$$

$$N' = 2 \pi \times \frac{N}{356, 25} \quad (2.4)$$

N : est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

2.4 Position du Soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différentes.

2.4.1 Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ, H) (Fig.2.3).

Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial.

$$\sin (\delta) = 0.398 \times \sin \left\{ \frac{360}{365} \times (N' - 82) + 2 \times \sin \left(\frac{360}{365} \right) \times (N' - 2) \right\} \quad (2.5)$$

La déclinaison varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [23].

La déclinaison solaire utilisée dans le modèle de R.sun est donnée par l'expression suivante [23]:

$$\sin (\delta) = 0.3978 \times \sin [N' - 1.4 + 0.0355 \times \sin (N' - 0.0489)] \quad (2.6)$$

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.

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (2.7)$$

Dans le modèle R.sun, l'angle horaire est donné par l'équation suivante (de [21] à [23]):

$$H = 0.261799 \times (TSV - 12) \quad (2.8)$$

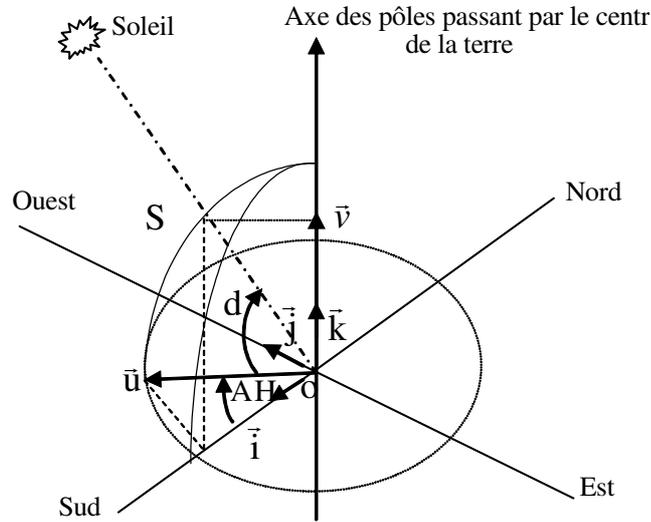


Fig.(2.3): Repère équatorial

Temps solaire vrai

Pour que les formules de $\sin(h)$ et $\sin(a)$ soient directement utilisables, 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 $24H$. Il est midi ($12H$) lorsque le soleil est au zénith, on a donc [24]:

$$TSV = TL - DE \left(\frac{E_t + 4\lambda}{60} \right) \quad (2.9)$$

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° à midi, 90° à 18 heures et -90° 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 (1.10):

$$E_t = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \quad (2.10)$$

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

λ : Longitude du lieu, en degrés.

2.4.2 Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut a (Fig.2.4).

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° , (de [24] à [30]).

$$\sin (h) = \cos (\delta) \cos (\varphi) \cos (H) + \sin (\varphi) \sin (\delta) . \quad (2.11)$$

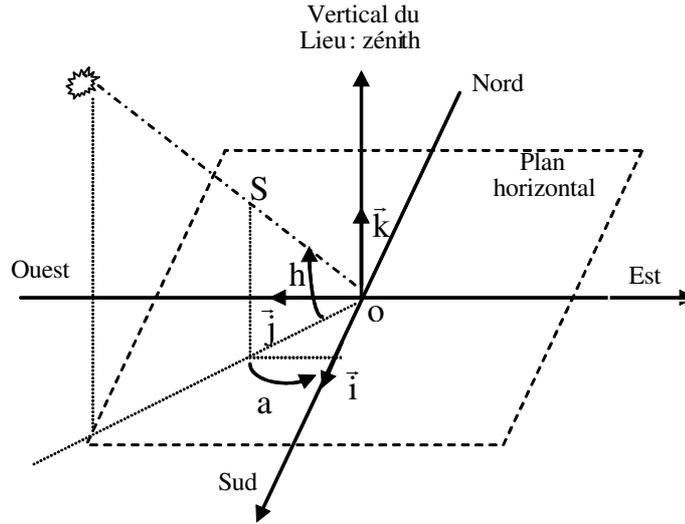


Fig.(2.4): Repère horizontal

Azimet 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 (2.12) pour calculer l'azimet du soleil (de [24] à [30]):

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(H)}{\cos(h)} \quad (2.12)$$

L'azimet est compris entre -180° et 180° [23].

R.sun a utilisé une équation qui dépend de la déclinaison solaire δ , de la latitude du lieu φ et de l'angle horaire H

$$\cos(a) = \frac{\sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(H) - \cos(\varphi) \sin(\delta)}{\left\{ [\cos(\delta) \sin(H)]^2 + [\sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(H) - \cos(\varphi) \sin(\delta)]^2 \right\}^{0.5}} \quad (2.13)$$

2.5 Orientation d'un Plan

Un plan quelconque est défini par deux angles (α, γ) :

γ : hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan

horizontal.

α : 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 β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par:

$$\beta = 90 - \gamma \quad (2.14)$$

2.6 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 (de [24] à [27]):

$$\cos(i) = \sin(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) - \sin(\gamma) \sin(h) \quad (2.15)$$

En coordonnées horaires:

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\alpha) \cos(\gamma) \sin(H) \cos(\delta) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ & (\cos(H) \cos(\delta) \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cos(\varphi)) \\ & + \sin(\gamma) (\cos(H) \cos(\delta) \cos(\varphi) + \sin(\delta) \sin(\varphi)) \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.7 Masse Atmosphérique

On appelle masse d'air la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [30]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante [30]:

$$m_A = \frac{1}{\sin(h) + 9.40 \times 10^{-4} [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (2.17)$$

En 1989, Kasten et al (de [31] à [35]) donnent une expression pour m_A qui est devenue largement utilisée. Le modèle R.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

$$m_A = \frac{p/p_0}{\sin(h_0^{ref}) + 0.50572(h_0^{ref} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (2.18)$$

p/p_0 : est la correction de l'altitude Z (m) :

$$p/p_0 = \exp(-Z/8434.5) \quad (2.19)$$

h_0^{ref} : est l'altitude du soleil corrigée par la composante de la réfraction atmosphérique

$$h_0^{ref} = h_0 + \Delta h_0^{ref} \quad (2.20)$$

$$\Delta h_0^{ref} = 0.061359 \left(0.1594 + 1.123h_0 + 0.065656h_0^2 \right) / \left(1 + 28.9344h_0 + 277.3971h_0^2 \right) \quad (2.21)$$

h_0 : est l'altitude du soleil donnée par l'équation (2.66).

2.8 Epaisseur Optique de l'Atmosphère

En 1922, Linke [32] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [32] a utilisé les données spectrales publiées par Feussner et al en 1930 [22, 23]. Il a proposé aussi l'expression (2.22) pour δ_R connue sous le nom de pyréliométrique de Kasten, dont la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$\delta_R = 9.4 + (0.9 \times m_A) \quad (2.22)$$

Dans cette formule, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: CO₂, O₂, NO₂ et le CO n'est pas prise en compte. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou

a utilisé la formule pyréliométrique de Kasten.

En 1986, Louche (de [31] à [35]) ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4^{eme} ordre pour la masse d'air.

Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour [31,36]. Le modèle R.sun a exploité la formule ajustée de Kasten pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule comme suit:

Pour $m_A < 20$

$$\delta_R = \frac{1}{6.6296 + (1.7513 \times m_A) - (0.1202 \times m_A^2) + (0.0065 \times m_A^3) - (0.00013 \times m_A^4)} \quad (2.23)$$

$m_A > 20$

$$\delta_R = \frac{1}{10.4 + 0.718 \times m_A} \quad (2.24)$$

$\delta_R(m)$: est l'épaisseur optique de Rayleigh.

2.9 Modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimés par des facteurs des troubles. A partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directe et diffuse par ciel clair.

2.9.1 Eclairement reçu sur un plan horizontal par ciel clair

La connaissance du facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement direct traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par:

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2.25)$$

T_0 : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante (de [30] à [36]):

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 (2 + \sin(\varphi)) A_{he} - 0.2 Z - (1.22 + 0.14 A_{he}) (1 - \sin(h)) \quad (2.26)$$

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(j - 121)\right) \quad (2.27)$$

Z : l'altitude de lieu.

T_1 : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche:

$$T_1 = 0.89^Z \quad (2.28)$$

T_2 : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption (il dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β , T_2 est donné par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_{he}) (0.63)^Z$$

L'éclairement direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par:

$$I = I_0 \sin(h) C_{ts} \exp\left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^Z} \sin(h)\right)^{-1}\right] \quad (2.29)$$

L'éclairement diffus incident sur un plan horizontal.

$$a = 1.1 \quad b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02(1 - \sin(h))^2 \quad (2.30)$$

$$D = I_0 C_{ts} \exp \left((-1 + 1.06 \log (\sin (h))) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \right) \quad (2.31)$$

L'éclairement global reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$G = I + D \quad (2.32)$$

2.9.2 Eclairement global reçu sur un plan incliné

L'éclairement direct est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I = I_n \cos (i) = I_0 C_{ts} \exp \left[-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89Z} \sin (h) \right)^{-1} \right] \cos (i) \quad (2.33)$$

I_n : L'éclairement direct normal.

i : l'angle d'incidence.

L'éclairement diffus du ciel est composé de trois parties:

-La composante directe ou circumsolaire. Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi angle au sommet compris entre 3° et 15°. Elle peut être considérée aussi qu'elle provient directement du soleil [24, 35].

$$b = \log (T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.5 \log (\sin (h)) \quad a = 3.1 - 0.4b \quad (2.34)$$

$$\delta_d = I_0 C_{ts} \exp \left(-2.48 + \sin (h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2} \right) \quad (2.35)$$

-La composante isotrope qui correspond à un ciel de luminance uniforme.

$$\delta_i = D - \delta_d \sin (h) \quad (2.36)$$

D : est le diffus sur un plan horizontal.

-La composante du cercle de l'horizon qui provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6°. Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphé-

riques.

$$b = \exp (0.2 + 1.75 \log (\sin (h))) \quad (2.37)$$

$$a = \log (T_L^* - T_0) - 3.1 - \log (\sin (h)) \quad (2.38)$$

$$\delta_h = I_0 C_{ts} \frac{-0.02 a}{a^2 + ab + 1.8} \exp (\sin (h)) \quad (2.39)$$

Le diffus du ciel est l'éclairement diffus incident en provenance du ciel.

$$d_{ciel} = \delta_d \cos (i) + \delta_i \frac{1 + \sin (\gamma)}{2} + \delta_h \cos (\gamma) \quad (2.40)$$

L'éclairement diffus du sol est caractérisé par l'albédo du sol qui indique la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque (α, γ)

$$d_{ciel} = \delta_d \frac{1 + \sin (\gamma)}{2} \quad (2.41)$$

avec

$$\delta_d = \rho G \quad (2.42)$$

G : est l'éclairement global horizontal.

ρ : Albédo du sol.

L'éclairement diffus rétrodiffusé est celui diffusé à nouveau par le ciel vers le sol. Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante [24] :

$$\delta'_i = 0.9 (\rho - 0.2) G \exp \left(-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}} \right) \quad (2.43)$$

L'éclairement diffus incident sur un plan incliné est donné par.

$$D = d_{ciel} + d_{sol} + \delta'_i \frac{1 + \sin (\gamma)}{2} \quad (2.44)$$

D'où l'éclairement global incident, à un instant donné sur un plan (α, γ) est: $G = I + D$

2.10 Méthode Semi-Empirique de Perrin Brichambaut

Tout rayonnement incident sur terre va être décomposé en plusieurs rayonnements. Ces derniers varient en fonction de la hauteur du soleil, de l'angle d'incidence, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère. La modélisation théorique des éclairissements solaires est très compliquée, ils sont en fonction des variations climatiques et des intempéries. La méthode empirique de Perrin Brichambaut a donné de bons résultats pour l'estimation de l'énergie reçue par un capteur d'orientation quelconque [24].

2.10.1 Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair)

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

$$E_D = \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_H + \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) a^* G_H \quad (2.45)$$

$$E_S = A \cos(i) \exp\left(-\frac{1}{B \sin(h+2)}\right) \quad (2.46)$$

$$E_G = E_S + E_D \quad (2.47)$$

$$D_H = A (\sin(h))^{0.4} \quad (2.48)$$

$$G_H = A'' (\sin(h))^{B''} \quad (2.49)$$

$$[E_S] = [E_D] = [E_G] = [D_H] = [G_H] \quad (W / m^2) \quad (2.50)$$

D_H : éclairissement diffus reçu par une surface horizontale.

G_H : éclairissement global reçu par une surface horizontale.

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

$$a^* = \begin{cases} 0.9 \text{ à } 0.8 \text{ neige} \\ 0.8 \text{ à } 0.4 \text{ sol clair} \\ 0.4 \text{ à } 0.2 \text{ verdure} \end{cases} \quad (2.51)$$

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

Tableau.(2.1): Paramètres décrivant 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

2.10.2 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 [24, 38]. 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:

$$E'_G = E'_D = kE_G (1 + 0.3 \sin(h)) \quad (2.52)$$

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].

2.11 Modèle R. Sun

2.11.1 Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle (de [31] à [35]). L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur T_L . Selon la formule suivante [31],

$$I_N = I \times \exp(-T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (2.53)$$

la détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement [31]. La plupart des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site [35].

Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles. Par contre, des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes (de [30] à [35]). Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les données du projet Soda [37] mis en disposition sur un site Web. La méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke.

2.11.2 Eclairement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair

Le rayonnement direct normal B_{oc} ($W m^{-2}$) est exprimé en fonction du facteur T_{LK} selon la formule suivante [22, 23]:

$$B_{oc} = I \times \exp\{-0.8662 T_{LK} \times m \times \delta_R(m)\} \quad (2.54)$$

Le terme $-0.8662 T_{LK}$ est le deuxième facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair (sans dimension) corrigé par Kasten (de [30] à [35]).

Le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair B_{hc} est donné par l'équation suivante.

$$B_{hc} = B_{oc} \times \sin h_o \quad (2.55)$$

2.11.3 Eclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair

Puisque le ciel sans nuage devient plus trouble, donc, l'éclairement diffus augmente lorsque l'éclairement direct diminue. L'estimation de la composante diffuse sur un plan horizontal D_{hc} ($W m^{-2}$) est effectuée en faisant le produit de l'éclairement énergétique I normal extraterrestre, le facteur de transmission (T_n est en fonction uniquement du facteur de trouble atmosphérique de Linke corrigé T_{LK}) et une fonction du diffus de l'altitude solaire F_d qui ne dépend que de l'altitude solaire h_o [19, 20].

$$D_{hc} = I \times T_n (T_{LK}) \times F_d (h_o) \quad (2.56)$$

L'estimation du facteur de transmission $T_n (T_{LK})$ permet de donner un éclairement diffus théorique sur une surface horizontale. L'expression suivante est sous forme d'une fonction polynomiale de deuxième ordre:

$$T_n (T_{LK}) = -0.051843 + 0.030543 T_{LK} + 0.0003797 T_{LK}^2 \quad (2.57)$$

F_d : La fonction de l'altitude solaire, elle est donnée par l'expression:

$$F_d (h_o) = A_1 + A_2 \sin h_o + A_3 \sin^2 h_o \quad (2.58)$$

A_i : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L corrigé , définis par les expressions suivantes [22, 23]:

$$A'_1 = 0.26463 - 0.061581 T_{LK} + 0.0031408 T_{LK}^2 \quad (2.59)$$

$$A_1 = 0.0022/T_n (T_{LK}) \quad \text{si} \quad A'_1 T_n (T_{LK}) > 0.0022 \quad (2.60)$$

$$A_1 = A'_1 \quad \text{si} \quad A'_1 T_n (T_{LK}) \geq 0.0022 \quad (2.61)$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_{LK} - 0.011161 T_{LK}^2 \quad (2.62)$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T_{LK} - 0.0085079 T_{LK}^2 \quad (2.63)$$

Subséquentement, l'éclairement global sur une surface horizontale est calculé comme suit:

$$G_{hc} = G_{hc} + D_{hc} \quad (2.64)$$

2.11.4 Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair

Le rayonnement direct normal sur un plan incliné B_{ic} ($W m^{-2}$) est obtenu en utilisant la relation suivante:

$$B_{ic} = B_{oc} \sin \delta_{exp} \quad (2.65)$$

Ou bien

$$B_{ic} = B_{hc} \sin \delta_{exp} / \sin h_o \quad (2.66)$$

Avec δ_{exp} qui est l'angle d'incidence solaire mesuré entre le soleil et une surface inclinée défini dans l'équation (2.73).

La position du soleil par rapport à une surface horizontale est donnée par les deux coordonnées classiques suivantes:

Altitude solaire h_o : un angle entre la trajectoire du soleil et une surface horizontale,

Azimut A_o : angle horizontal entre le soleil et le méridien mesuré à partir de l'Est [22]:

$$\sin h_o = C_{31} \cos T + C_{33} \quad (2.67)$$

$$\cos A_o = (C_{11} \cos T + C_{13}) / \left((C_{22} \sin T)^2 + (C_{11} \cos T + C_{13})^2 \right)^{1/2} \quad (2.68)$$

Avec

$$C_{11} = \sin \varphi \cos \delta \quad (2.69)$$

$$C_{13} = -\cos \varphi \sin \delta \quad (2.70)$$

$$C_{22} = \cos \delta \quad (2.71)$$

$$C_{31} = \cos \varphi \cos \delta \quad (2.72)$$

$$C_{33} = \sin \varphi \sin \delta \quad (2.73)$$

Dans le modèle R.sun, nous avons mis une déclinaison du soleil (*rad*) qui correspond à [22, 36]:

$$\delta = \arcsin (0.398 \times \sin (N' - 14 + 0.0355 \sin (N' - 0.0489))) \quad (2.74)$$

La position du soleil par rapport à une surface inclinée est définie par l'angle δ_{exp} [24].

Si la surface inclinée est définie par l'angle d'inclinaison δ et l'azimut α (un angle entre la projection de la normale sur la surface horizontale et l'Est) alors:

$$\sin \delta_{\text{exp}} = C'_{31} \cos (T - \lambda') + C'_{33} \quad (2.75)$$

où:

$$C'_{31} = \cos \varphi' \cos \delta \quad (2.76)$$

$$C'_{33} = \sin \varphi' \sin \delta \quad (2.77)$$

et:

$$\sin \varphi' = -\cos \varphi \sin \beta \cos \alpha + \sin \varphi \cos \beta \quad (2.78)$$

$$\tan \lambda' = -(\sin \beta \sin \alpha) / (\sin \varphi \sin \beta \cos \alpha + \cos \varphi \cos \beta) \quad (2.79)$$

L'angle horaire du temps du lever et du coucher du soleil sur une surface horizontale T_h^{rs} peut être calculé par:

$$\cos T_h^{rs} = -C_{33} / C_{31} \quad (2.80)$$

L'angle horaire du temps du lever et du coucher du soleil sur une surface inclinée peut être calculé par:

$$\cos (T_h^{rs} - \lambda') = -C'_{33} / C'_{31} \quad (2.81)$$

2.11.5 Eclairement diffus incident sur un plan incliné par ciel clair

Le modèle d'estimation de l'éclairement diffus par ciel clair sur une surface inclinée est représenté par les équations suivantes:

Si

$$h_o \geq 0.1 \text{ rad} \quad (2.82)$$

c'est-à-dire si on considère que

$$h_o \geq 5.7^\circ \quad (2.83)$$

$$D_{ic} = D_{hc} \{F(\gamma_N) (1 - K_b) + K_b \sin \delta_{\text{exp}} / \sin h_o\} \quad (2.84)$$

Si

$$h_o < 0.1 \text{ rad} \quad (2.85)$$

$$D_{ic} = D_{hc} \{F(\gamma_N) (1 - K_b) + K_b \sin \gamma_N \cos A_{LN} / (0.1 - 0.008h_o)\} \quad (2.86)$$

$$A_{LN}^* = A_o - A_N \quad (2.87)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* \quad \text{si} \quad -\pi \leq A_{LN}^* \leq \pi \quad (2.88)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* - 2\pi \quad \text{si } A_{LN}^* > \pi \quad (2.89)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* + 2\pi \quad \text{si } A_{LN}^* < -\pi \quad (2.90)$$

$$K_b = B_{hc} / G_{oh} \quad (2.91)$$

Où G_{oh} ($W.m^{-2}$) est calculé comme suit:

$$G_{oh} = G_o \sin h_o \quad (2.92)$$

2.12 Simulation Numérique et Confrontation des Résultats

Les stations de mesures sont rares à travers le territoire national. Pour l'estimation des irradiations solaires, on a recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation. Pour qu'ils soient applicables aux sites considérés, ces derniers doivent être confrontés aux valeurs réellement mesurées sur le site considéré sur une période qui couvrira les différentes saisons de l'année.

Cependant, une étude comparative a été effectuée sur les éclairagements solaires globaux incidents sur un plan horizontal et sur une surface inclinée à latitude du lieu (32°) orientée vers le Sud. Pour ce faire, plusieurs journées ont été sélectionnées pour comparer les valeurs calculées par les trois modèles et celles données par la station radiométrique de Ghardaïa.

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 raréfaction 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).

La figure (2.5) donne une comparaison entre l'éclairement global horizontal mesuré et calculé pour la journée du 02 Janvier 2009. Tandis que la deuxième (figure (2.6)) indique l'erreur relative commise sur les éclairagements incidents entre dix heures et seize heures.

Le même ordre sera respecté pour la numérotation des autres figures, que se soit pour les éclairagements globaux incidents sur un plan horizontal ou sur un capteur incliné. En d'autres termes, chaque fois que nous procéderons à la confrontation des résultats simulés et mesurés, un calcul d'erreur relative sera mise en place pour juger la fiabilité du modèle proposé au niveau de notre site.

Puisque cette partie est consacrée à l'aspect théorique et expérimental, donc, nous utilisons l'expression de l'erreur relative instantanée qui est donnée par l'équation suivante:

$$Er_r = \frac{|G_{mesuré} - G_{calculé}|}{G_{mesuré}} \quad (2.93)$$

G : éclairement solaire ($W m^{-2}$)

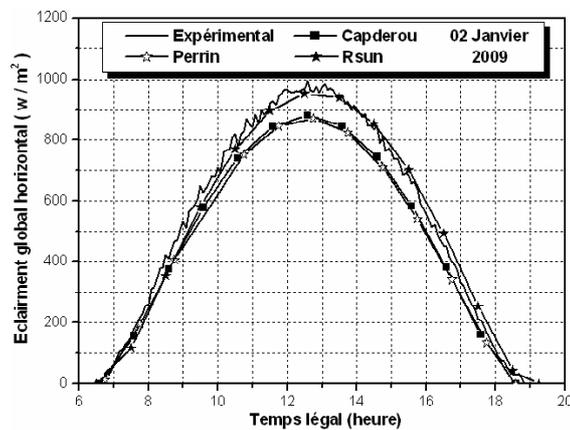


Fig.(2.5): Eclairage global sur une surface horizontale, 02/01/2009.

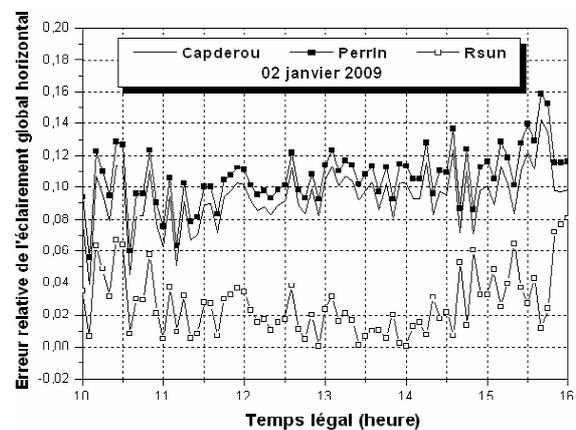


Fig.(2.6): Erreur relative instantanée correspondante, 02/01/2009.

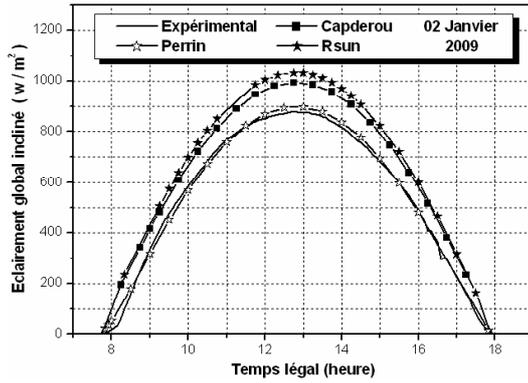


Fig.(2.7): Eclairage global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 02/01/2009.

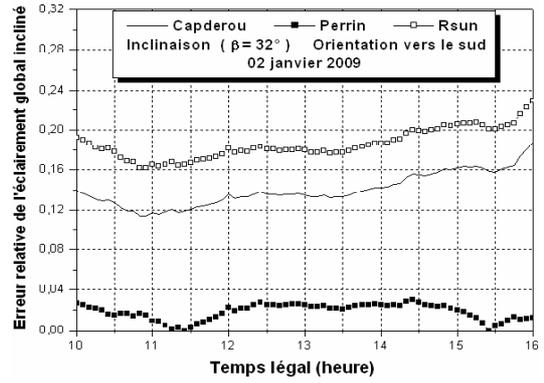


Fig.(2.8): Erreur relative instantanée correspondante, 02/01/2009.

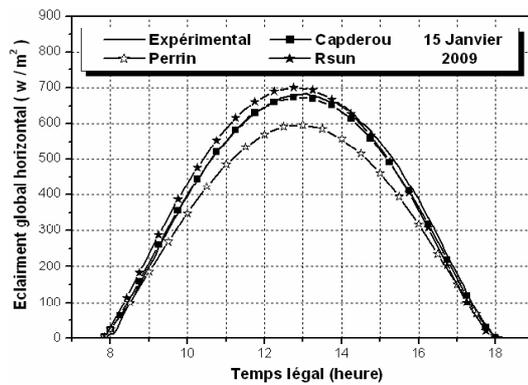


Fig.(2.9): Eclairage global sur une surface horizontale, 15/01/2009.

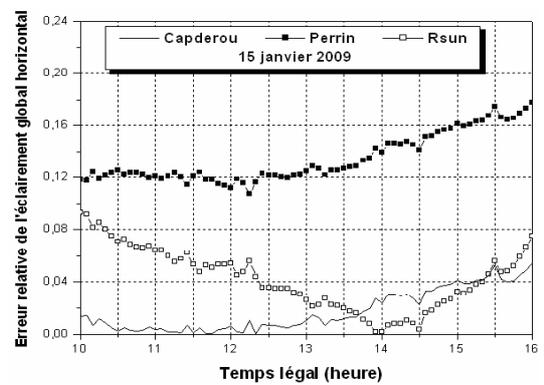


Fig.(2.10): Erreur relative instantanée correspondante, 15/01/2009.

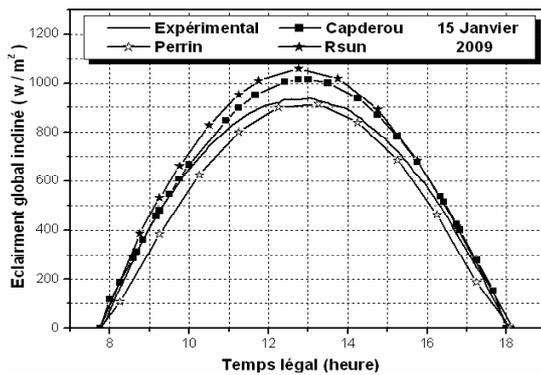


Fig.(2.11): Eclairage global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 15/01/2009.

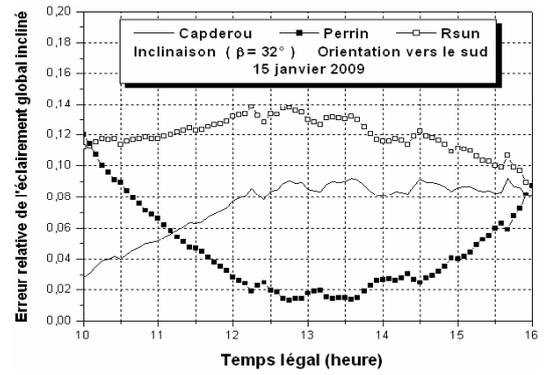


Fig.(2.12): Erreur relative instantanée correspondante, 15/01/2009.

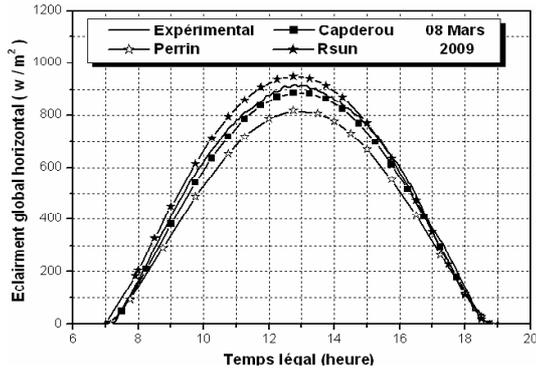


Fig.(2.13): Eclairement global sur une surface horizontale, 08/03/2009.

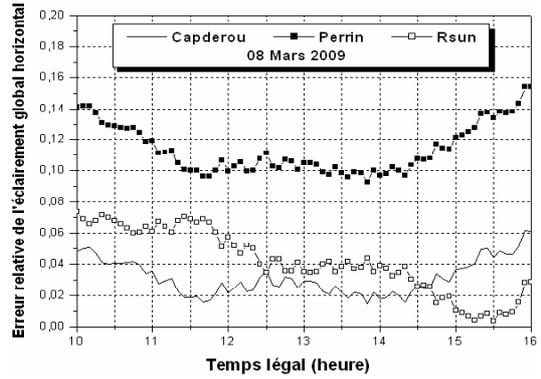


Fig.(2.14): Erreur relative instantanée correspondante, 08/03/2009.

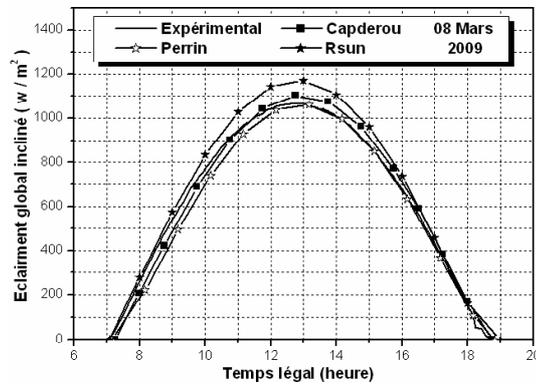


Fig.(2.15): Eclairement global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 08/03/2009.

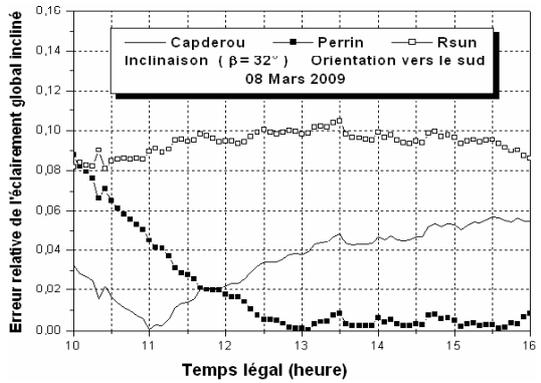


Fig.(2.16): Erreur relative instantanée correspondante, 08/03/2009.

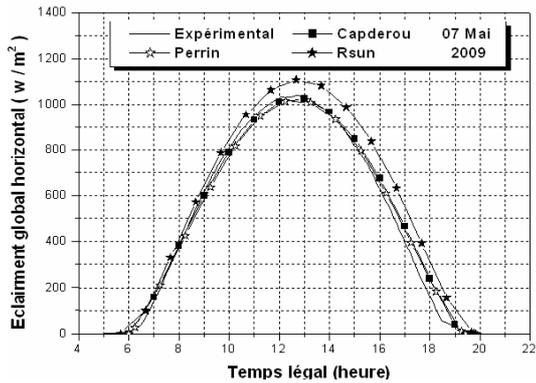


Fig.(2.17): Eclairement global sur une surface horizontale, 07/05/2009.

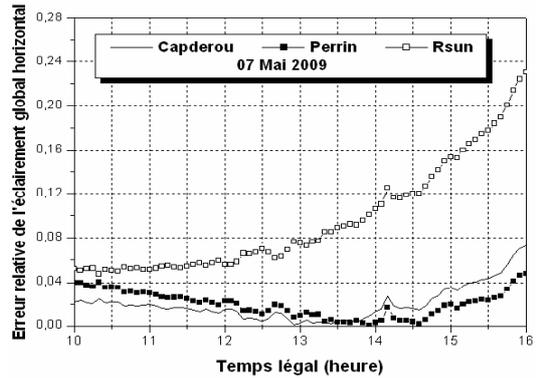


Fig.(2.18): Erreur relative instantanée correspondante, 07/05/2009.

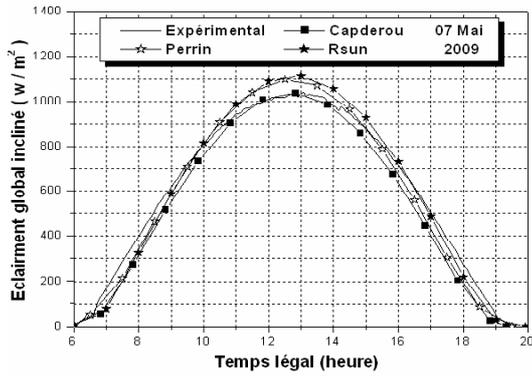


Fig.(2.19): Eclairage global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 07/05/2009.

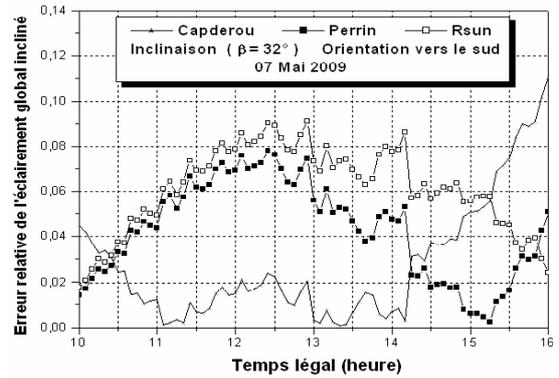


Fig.(2.20): Erreur relative instantanée correspondante, 07/05/2009.

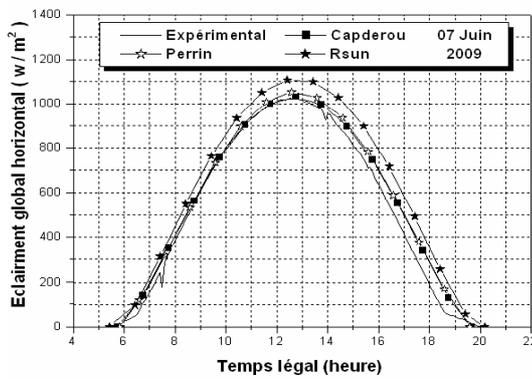


Fig.(2.21): Eclairage global sur une surface horizontale, 07/06/2009.

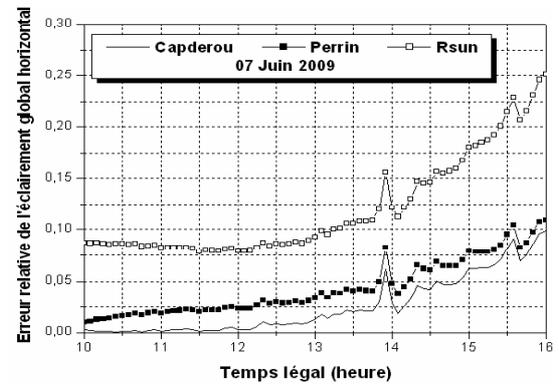


Fig.(2.22): Erreur relative instantanée correspondante, 07/06/2009.

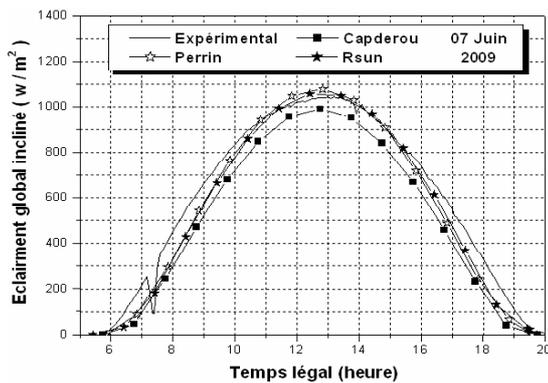


Fig.(2.23): Eclairage global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 07/06/2009.

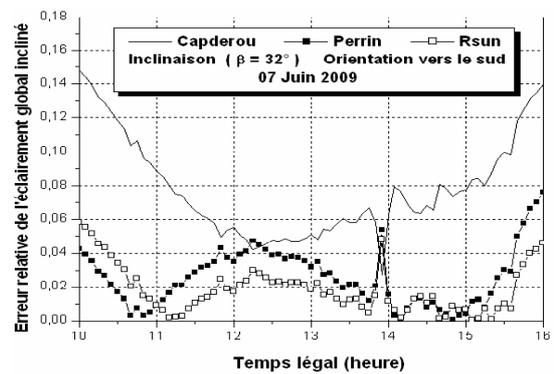


Fig.(2.24): Erreur relative instantanée correspondante, 07/06/2009.

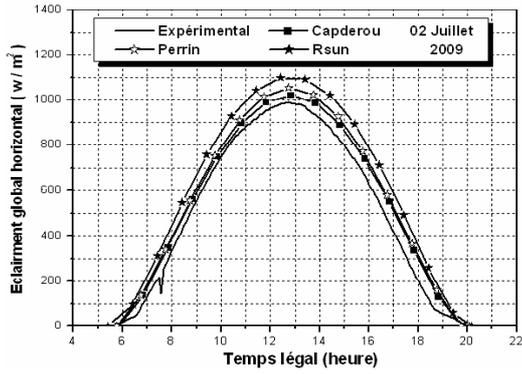


Fig.(2.25): Eclairement global sur une surface horizontale, 02/07/2009.

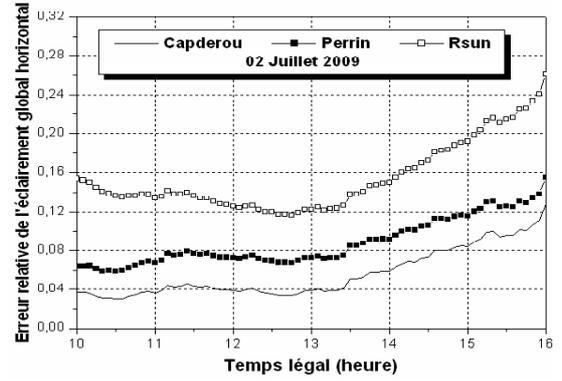


Fig.(2.26): Erreur relative instantanée correspondante, 02/07/2009.

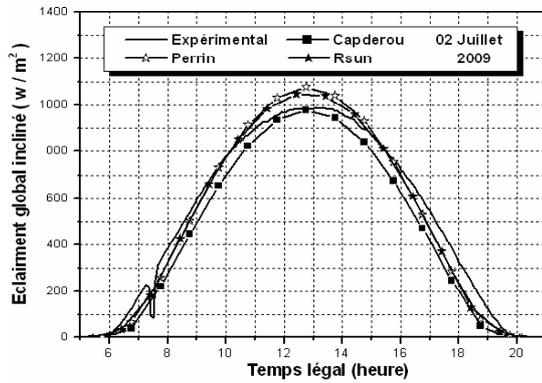


Fig.(2.27): Eclairement global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 02/07/2009.

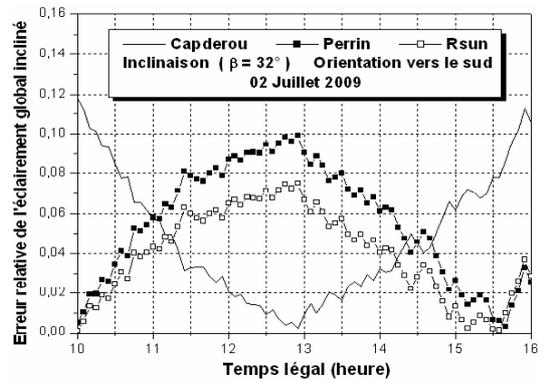


Fig.(2.28): Erreur relative instantanée correspondante, 02/07/2009.

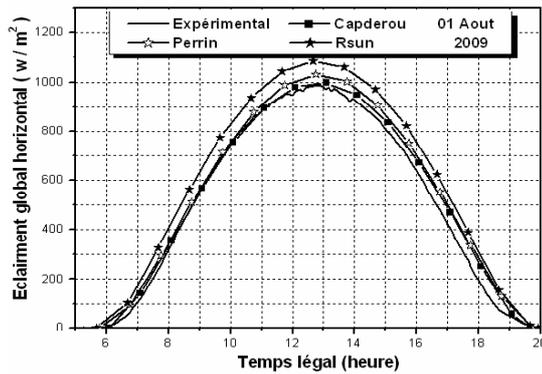


Fig.(2.29): Eclairement global sur une surface horizontale, 01/08/2009.

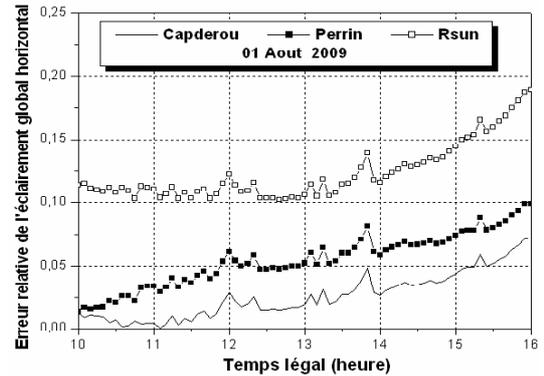


Fig.(2.30): Erreur relative instantanée correspondante, 01/08/2009.

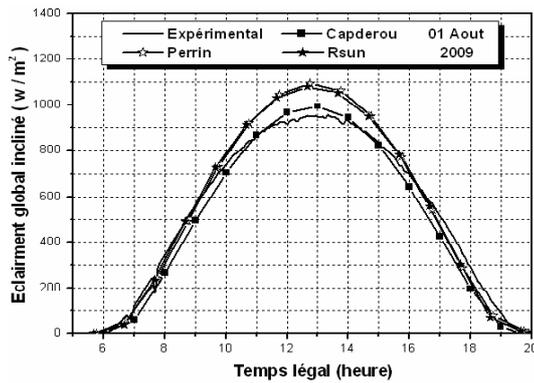


Fig.(2.31): Eclairage global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 01/08/2009.

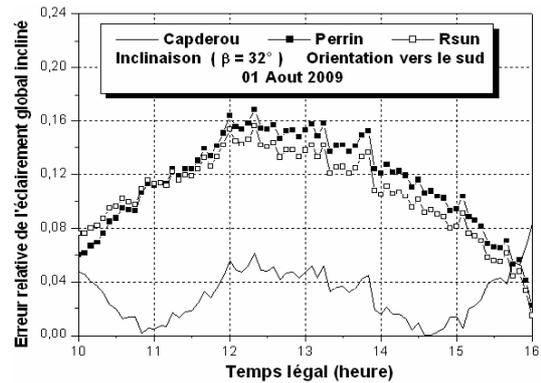


Fig.(2.32): Erreur relative instantanée correspondante, 01/08/2009.

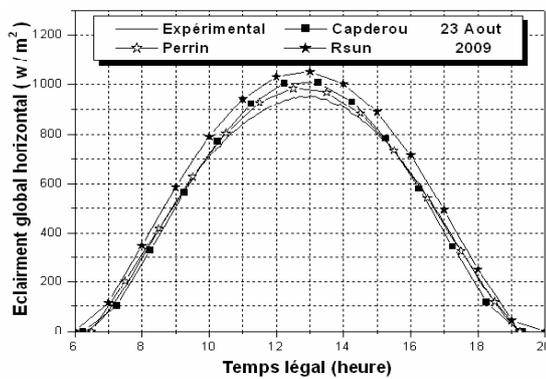


Fig.(2.33): Eclairage global sur une surface horizontale, 23/08/2009.

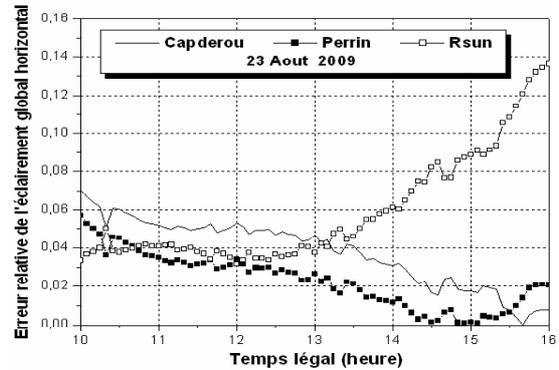


Fig.(2.34): Erreur relative instantanée correspondante, 23/08/2009.

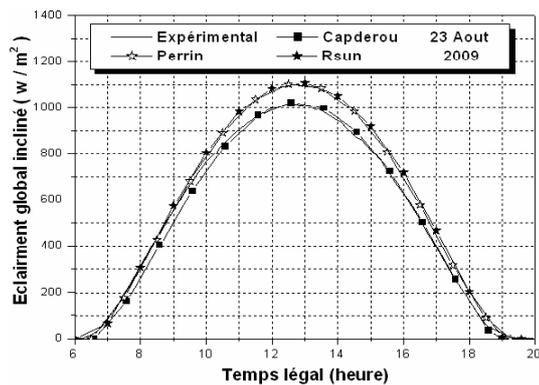


Fig.(2.35): Eclairage global sur une surface inclinée ($\beta = 32^\circ$), 23/08/2009.

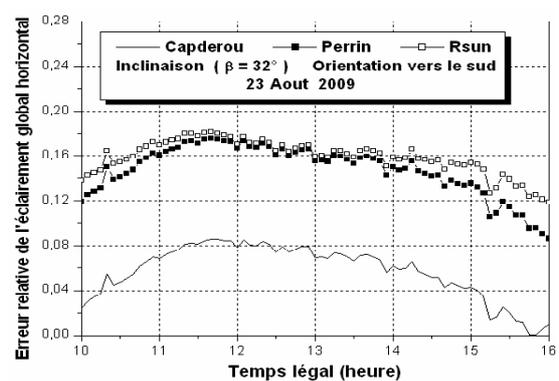


Fig.(2.36): Erreur relative instantanée correspondante, 23/08/2009.

2.13 Conclusion

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'architecture solaire et bioclimatique. L'énergie globale incidente sur un plan incliné est la plus appropriée que celle incidente sur un plan horizontal. La mise au point de la modélisation a été effectuée à l'aide d'une campagne de mesures de l'éclairement solaire global sur des surfaces horizontales et inclinées. Le traitement des données est effectué sur des mesures choisies couvrant l'année 2009, collectées toutes les cinq minutes pour le site de Ghardaïa. Toutes ces étapes permettent de choisir des modèles fiables et adéquats et qui peuvent être exploités durant ces études qui concernent l'effet de l'orientation d'une telle habitation sur ses températures intérieures.

Selon les confrontations et les résultats obtenus, nous avons jugé que:

- Le modèle de Capderou est généralement le plus favorable pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur un capteur horizontal, même s'il ne présente qu'un peu d'avantage par rapport à celui de R.sun. Par contre, la méthode empirique de Perrin Brichambaut donne parfois des résultats qui divergent radicalement par rapport aux valeurs mesurées au niveau de Ghardaïa.
- Il s'ensuit que nous avons trouvé selon les erreurs relatives tracées que la méthode empirique de Perrin Brichambaut est plus conforme pour l'estimation des éclaircissements incidents sur les plans inclinés et plus particulièrement pendant les mois de: Octobre, Novembre, Décembre, Janvier, Février et Mars.
- Les études menées sur les mois de: Mai, Avril, Août et Septembre prouvent que globalement le modèle de Capderou donne les meilleures estimations.
- Nous avons constaté aussi que le modèle R.sun est le plus avantageux pendant le mois de Juin, alors que durant le mois de Juillet, nous avons trouvé que ce modèle donne des bon résultats uniquement au lever et au coucher du soleil. Tandis que le modèle de Capderou est le plus conseillé en dehors de cette intervalle.
- En résumé, nous avons choisi d'utiliser la méthode empirique de Perrin Brichambaut pour calculer les éclaircissements instantanés incidents sur les murs de l'habitat durant la pé-

riode du Octobre jusqu'au mois de Mars. Or que le Modèle de Capderou sera sélectionné pour l'estimation de l'éclairement solaire instantané incident sur le toit pour toute l'année et pour la détermination de l'éclairement incident sur les surfaces verticales exposées au soleil. Il sera appliqué pour les mois d'Avril, Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre (malgré que nous avons trouvé que le modèle R.sun est le plus adéquat pour le mois de Juin).

Chapitre III

Validation de la Théorie et Confrontation avec l'Expérience

Chapitre 3

Validation de la Théorie et Confrontation avec l'Expérience

3.1 Introduction

Le modèle numérique est devenu un outil indispensable dans lequel on peut tester les hypothèses imposées. Ces modèles numériques permettent en outre d'affiner la prévision à court terme en injectant périodiquement dans le modèle de nouvelles valeurs de mesure. D'ailleurs, c'est pour cette raison que nous avons d'abord fonctionné le modèle puis ensuite testé sa cohérence interne afin de le valider expérimentalement.

Une campagne de mesure a été effectuée durant toute l'année, nous avons choisi pour la validation deux journées différentes. Une journée froide qui correspond au 08 Janvier 2008 et une autre chaude (11 Juillet 2008). Le but primordial est de tester la fiabilité de l'approche sous l'influence de conditions climatiques distinctes.

3.2 Plan Descriptif

Dans la région de Ghardaïa, la pierre est le matériau de construction le plus utilisé en raison de sa disponibilité. 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, le plâtre, la chaux et même le ciment mortier. La figure (3.1) est une schématisation de deux chambres d'une habitation réelle 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 de ciment mortier et une 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 de ciment mortier et de deux couches de 1 cm d'enduit de plâtre.

-Le plancher est posé sur une terre pleine et plate. Il est situé et coulé directement sur le sol, n'occasionne que peu de déperditions. La forme est constituée de sable, de 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.[26]. Afin de déterminer les différentes températures, il est utile d'établir les bilans énergétiques où nous nous intéressons essentiellement aux températures intérieures. C'est pour cette raison qu'il est indispensable d'utiliser le plan de la maison pour le dimensionnement et la caractérisation des deux chambres.

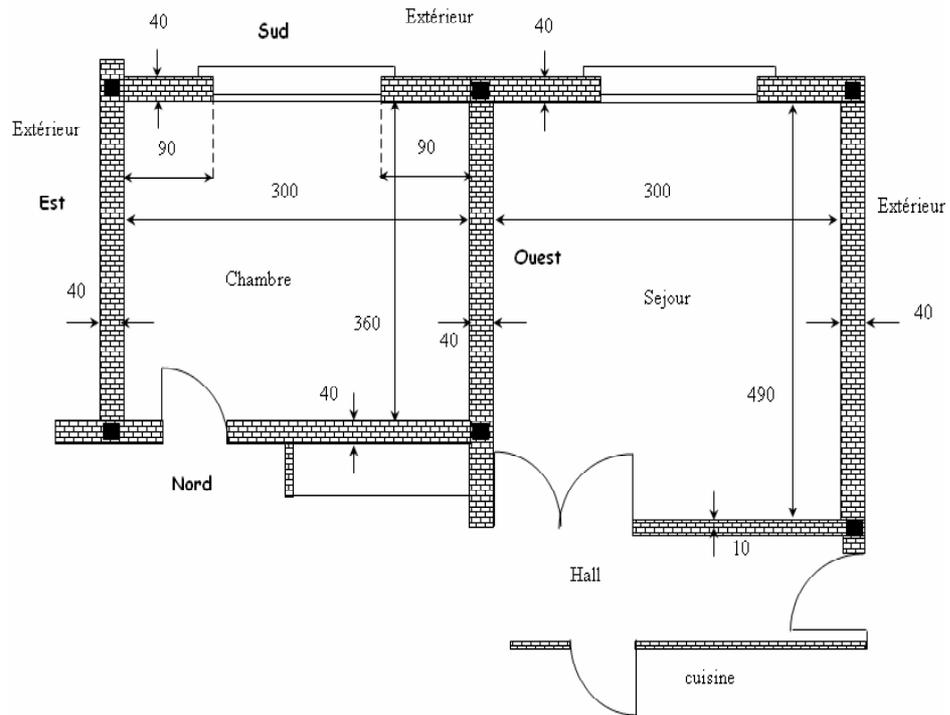


Fig.(3.1): Plan descriptif des pièces étudiées.

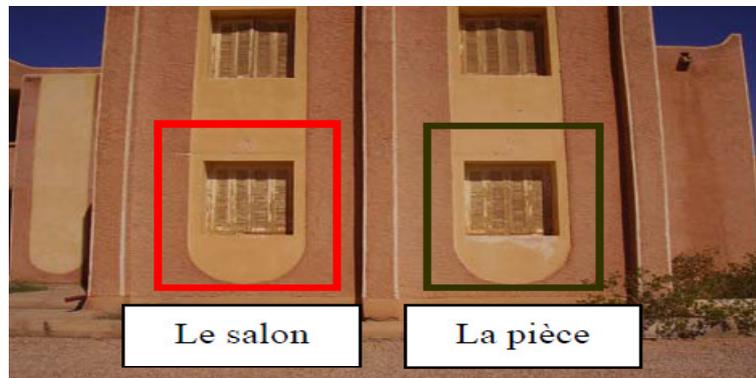


Fig.(3.2): Façades orientées vers le Sud des pièces étudiées.

On remarque d'après la figure (3.2) que les murs exposés sont: le mur Est de la chambre, le mur Ouest du salon et les deux murs Sud. Il est à noter aussi que l'habitat est situé au rez-de-chaussée au dessous d'un autre logement de même plan.

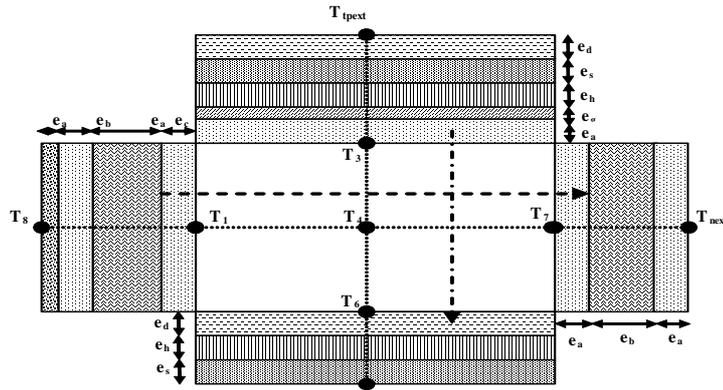


Fig.(3.3): Coupe longitudinale pour l'identification des différentes couches.

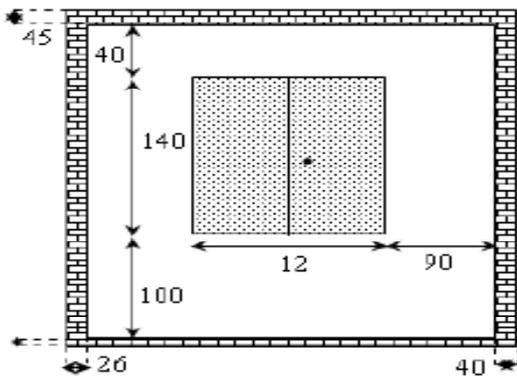


Fig.(3.4): Face Sud de la pièce.



Fig.(3.5): Photo de la face Sud de la pièce sans isolation.

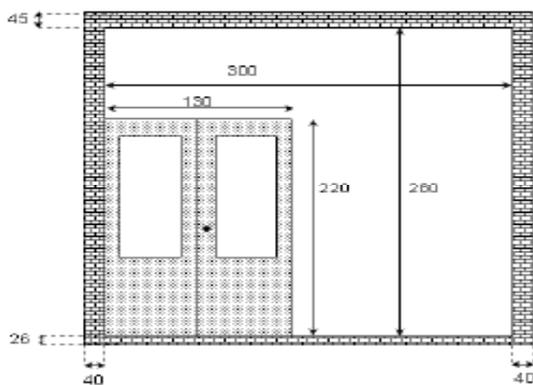


Fig.(3.6): Face Nord du salon.



Fig.(3.7): Photo de la face Nord du salon.

3.3 Modélisation et Simulation Numérique

3.3.1 Sans isolation thermique

L'architecture bioclimatique fait appel à des procédés passifs et ne requiert pas de techniques particulières. Elle demande d'abord du "bon sens". Des simulations thermiques dynamiques permettent ensuite d'étudier la conception du bâtiment et de fournir différentes solutions. Ces études nécessitent des connaissances spécifiques en physique du bâtiment que les architectes se doivent d'acquérir [24]. 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, durant les années 80, développés essentiellement pour répondre à des besoins de dimensionnement de l'enveloppe en terme d'isolation et pour estimer le coût d'exploitation du système de chauffage et de climatisation. L'analyse du fonctionnement des systèmes d'équations décrivant un tel modèle montre que l'établissement de ces dernières est possible pour toutes les techniques envisagées (Avec et sans isolation).

Modèle mathématique

En appliquant la loi générale de la conservation de l'énergie du bâtiment, on aboutit à un système non autonome de dix huit équations différentielles ordinaires non linéaires. L'établissement de ces dernières est possible pour toutes les techniques envisagées en utilisant la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4. Cette méthode assure, en général, une meilleure stabilité de la solution que la méthode d'Euler [24].

On propose des modèles mathématiques qui permettent d'évaluer les performances énergétiques de la pièce. 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. Pour faire

ces études, quelques hypothèses simplificatrices ont été établies :

–Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels,perpendiculaires 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 de la surface considérée.

–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. Leurs températures seront mesurées et imposées.

Pour compléter les modèles mathématiques, il faut déterminer également les conditions aux limites, environnantes et les conditions initiales pour la pièce et pour le salon. 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.

Le coefficient de transfert par rayonnement d'une surface i avec le ciel est [38]:

$$h_{rciel} = \frac{\sigma (T_{ciel} + T_i) (T_i^2 + T_{ciel}^2)}{\frac{1 - \varepsilon_{ciel}}{\varepsilon_{ciel}} + \frac{1}{F_{iciel}}} \quad (3.1)$$

avec

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{am}^{1.5} \quad (3.2)$$

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

$$h_{riolext} = \frac{\sigma (T_{solext} + T_i) (T_i^2 + T_{solext}^2)}{\frac{1 - \varepsilon_{solext}}{\varepsilon_{solext}} + \frac{1}{F_{isolext}}} \quad (3.3)$$

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

$$Q_{cviam} = h_{cviam} S_i (T_i - T_f) \quad (3.4)$$

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

$$m C_p \frac{dT}{dt} = \sum Q_{absorbées} - \sum Q_{émises} \quad (3.5)$$

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 [43]. Elle est basée sur des remarques préliminaires qui nous conduisent à décider et de juger que:

Pour le salon

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

On impose les conditions initiales et aux limites suivantes:

$$(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9) = (28, 27, 28, 27, 27.5, 27, 27, 28.9, 28.9)$$

Les conditions aux limites et environnantes imposées sont:

$$T_{tex} = 22^\circ C \quad , \quad T_{sints} = 27^\circ C \quad , \quad T_{nex} = 27^\circ C \quad , \quad T_p = 28^\circ C \quad , \quad T_f = 29^\circ C$$

Mur Sud du salon

$$\rho_a v_1 C_a \frac{dT_1}{dt} = Q_{cd81} - Q_{r12} - Q_{r13} - Q_{cv14} - Q_{r15} - Q_{r16} - Q_{r17} - Q_{r1p} + Q_{r1f} \quad (3.6)$$

$$\rho_a v_1 C_a \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud}} - Q_{r12} - Q_{r13} - Q_{cv14} - Q_{r15} - Q_{r16} - Q_{r17} - Q_{r1p} + Q_{r1f} \quad (3.7)$$

avec

$$\sum R_{sud} = (2 e_a / \lambda_a S_1) + (e_b / \lambda_b S_1) + (e_c / \lambda_c S_1) \quad (3.8)$$

Mur Ouest du salon

$$\rho_a v_2 C_a \frac{dT_2}{dt} = \frac{(T_9 - T_2)}{\sum R_{ouest}} + Q_{r12} - Q_{r23} - h_{cv24} S_2 (T_2 - T_4) - Q_{r25} - Q_{r26} - Q_{r27} - Q_{r2p} + Q_{r2f} \quad (3.9)$$

avec

$$\sum R_{ouest} = \sum R_{sud} \quad (3.10)$$

Toit du salon

$$\rho_a v_3 C_a \frac{dT_3}{dt} = \frac{(T_{tpext} - T_3)}{\sum R_{toit}} + Q_{r13} + Q_{r23} - h_{cv34} S_3 (T_3 - T_4) - Q_{r35} - Q_{r36} - Q_{r37} - Q_{r3p} + Q_{r3f} \quad (3.11)$$

avec

$$\sum R_{toit} = (e_a / \lambda_a S_3) + (e_h / \lambda_h S_3) + (e_s / \lambda_s S_3) + (e_d / \lambda_d S_3) + (e_g / \lambda_g S_3) \quad (3.12)$$

Air intérieur du salon

$$\rho_a v_4 C_4 \frac{dT_4}{dt} = h_{cv14} S_1 (T_1 - T_4) + Q_{cv24} + Q_{cv34} + Q_{cvf4} - h_{cv45} S_5 (T_4 - T_5) - Q_{cv46} - Q_{cv47} - Q_{cv4p} \quad (3.13)$$

Mur Est du salon

$$\rho_a v_5 C_a \frac{dT_5}{dt} = \frac{(T_5 - T_4)}{\sum R_{est}} + Q_{r15} + Q_{r25} + Q_{r35} + h_{cv45} S_5 (T_4 - T_5) - Q_{r56} - Q_{r57} - Q_{r5p} + Q_{r5f} \quad (3.14)$$

avec

$$\sum R_{est} = (2 e_a / \lambda_a S_5) + (e_b / \lambda_b S_5) \quad (3.15)$$

Sol du salon

$$\rho_d v_6 C_d \frac{dT_6}{dt} = \frac{(T_6 - T_{\text{int}})}{\sum R_{\text{est}}} + Q_{r16} + Q_{r26} + h_{cv46} S_6 (T_4 - T_6) + Q_{r36} + Q_{r56} - Q_{r67} - Q_{r6p} + Q_{r6f} \quad (3.16)$$

avec

$$\sum R_{\text{sol}} = (e_d / \lambda_d S_6) + (e_h / \lambda_h S_6) + (e_s / \lambda_s S_6) \quad (3.17)$$

Mur Nord du salon

$$\rho_a v_7 C_a \frac{dT_7}{dt} = \frac{(T_7 - T_{\text{next}})}{\sum R_{\text{nord}}} + Q_{r17} + Q_{r27} + h_{cv47} S_7 (T_4 - T_7) + Q_{r37} + Q_{r57} + Q_{r67} + Q_{r7f} \quad (3.18)$$

avec

$$\sum R_{\text{nord}} = \sum R_{\text{ouest}} \quad (3.19)$$

Mur Sud extérieur du salon

$$\rho_c v_8 C_c \frac{dT_8}{dt} = -\frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{\text{sud}}} + \alpha S_1 E_s + h_{cvam8} S_1 (T_{\text{am}} - T_8) + h_{rc8} S_1 (T_c - T_8) + h_{r\text{solext}8} S_1 (T_{\text{solext}} - T_8) \quad (3.20)$$

Mur Ouest extérieur du salon

$$\rho_c v_9 C_c \frac{dT_9}{dt} = -\frac{(T_9 - T_2)}{\sum R_{\text{ouest}}} + \alpha S_2 E_o + h_{cvam9} S_2 (T_{\text{am}} - T_9) + h_{rc9} S_2 (T_c - T_9) + h_{r\text{solext}9} S_2 (T_{\text{solext}} - T_9) \quad (3.21)$$

Pour la pièce

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

On impose les conditions initiales et aux limites suivantes:

avec

$$(T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{17}, T_{18}) = (28, 27, 28, 27, 27.5, 27, 27, 28.9, 28.9)$$

Mur Sud de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{10} C_a \frac{dT_{10}}{dt} &= \frac{(T_{17} - T_{10})}{\sum R_{sud}} - Q_{r10-11} - Q_{r10-12} - Q_{cv10-13} - Q_{cv10-14} - Q_{cv10-15} \\ &\quad - Q_{cv10-16} - Q_{r10ps} - Q_{r10fs} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Mur Est de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{10} C_a \frac{dT_{11}}{dt} &= \frac{(T_{18} - T_{11})}{\sum R_{est2}} + Q_{r10-11} - Q_{r11-12} - Q_{cv11-13} - Q_{cv11-14} - Q_{cv11-15} \\ &\quad - Q_{r11-16} - Q_{r11ps} + Q_{r11fs} \end{aligned} \quad (3.23)$$

avec

$$\sum R_{est} = (2 e_a / \lambda_a S_{11}) + (e_b / \lambda_b S_{11}) + (e_c / \lambda_c S_{11}) \quad (3.24)$$

Air intérieur de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{13} C_a \frac{dT_{13}}{dt} &= Q_{r10-13} + Q_{cv11-13} + Q_{cv12-13} + Q_{cv13fs} - Q_{cv13-14} - Q_{cv13-15} \\ &\quad - Q_{cv13-16} - Q_{cv13ps} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Mur Ouest de la pièce

$$\begin{aligned} \rho_a v_{14} C_a \frac{dT_{14}}{dt} &= \frac{(T_{15} - T_{14})}{\sum R_{ouest2}} + Q_{r10-14} + Q_{r11-14} + Q_{r12-14} + Q_{cv13-14} - Q_{cv14-15} \\ &\quad - Q_{r14-16} - Q_{r14ps} + Q_{r14fs} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Sol de la pièce

$$\rho_a v_{15} C_a \frac{dT_{15}}{dt} = \frac{(T_{15} - T_{sint})}{\sum R_{sol}} + Q_{r10-15} + Q_{r11-15} + Q_{cv13-15} + Q_{r12-15} + Q_{r14-15}$$

$$+Q_{r15-16} - Q_{r15ps} + Q_{r15fs} \quad (3.27)$$

Mur Nord de la pièce

$$\rho_a v_{16} C_a \frac{dT_{16}}{dt} = \frac{(T_{16} - T_{nexts})}{\sum R_{nord}} + Q_{r10-16} + Q_{r11-16} + Q_{r12-16} + Q_{cv13-16} + Q_{r14-16} + Q_{r15-16} + Q_{r16fs} \quad (3.28)$$

Mur Sud extérieur de la pièce

$$\rho_c v_{17} C_a \frac{dT_{17}}{dt} = -\frac{(T_{17} - T_{10})}{\sum R_{sud}} + \alpha S_{10} E_s + h_{cvam17} S_{10} (T_{am} - T_{17}) + h_{rc17} S_{10} (T_c - T_{17}) + h_{rsolext17} S_{10} (T_{solext} - T_{17}) \quad (3.29)$$

Mur Est extérieur de la pièce

$$\rho_c v_{18} C_c \frac{dT_{18}}{dt} = -\frac{(T_{18} - T_{11})}{\sum R_{est}} + \alpha S_{11} E_e + h_{cvam18} S_{11} (T_{am} - T_{18}) + h_{rc17} S_{11} (T_c - T_{18}) + h_{rsolext18} S_{11} (T_{solext} - T_{18}) \quad (3.30)$$

Résultats et simulation numérique

Cette étude nous permet de décrire l'évolution des températures intérieures de ces deux pièces du bâtiment considéré 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. En conséquence, il est légitime de disposer de méthodes numériques permettant de calculer très rapidement ces températures. Conçu pour répondre à ces besoins, Runge-Kutta d'ordre 4 est une méthode numérique qui permet d'appréhender le comportement thermique des murs et de l'air soumis à des sollicitations variées [24]. Les courbes tracées dans les figures (3.8), (3.9), (3.10) et (3.11) représentent l'évolution de la température du toit, du sol, de l'air intérieur et des murs Nord, Sud, Est et Ouest de deux chambres pour deux situations climatiques distinctes, l'une chaude (01 Août 2009) et l'autre froide (02 Janvier 2009).

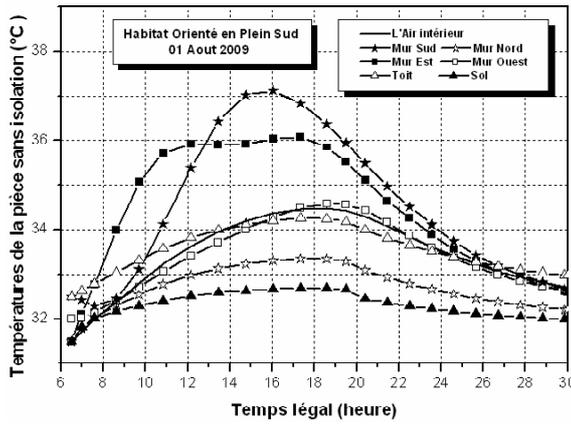


Fig.(3.8): Températures intérieures de la Pièce, Ghardaïa le 01 Août 2009.

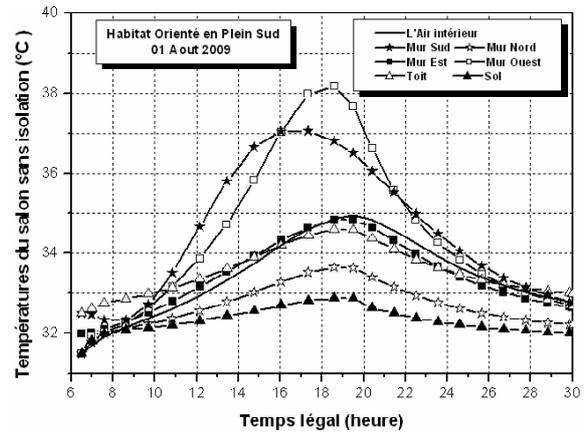


Fig.(3.9): Températures intérieures du Salon, Ghardaïa le 01 Août 2009.

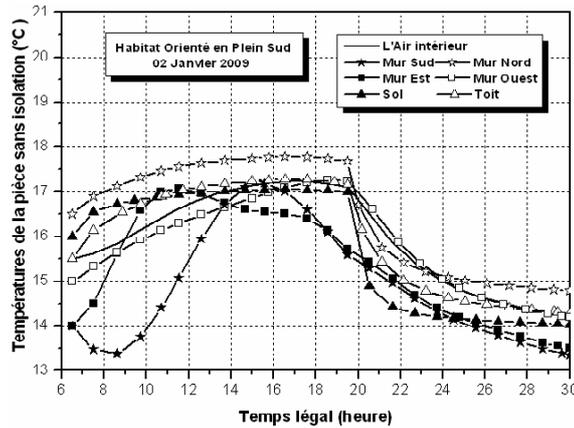


Fig.(3.10): Températures intérieures de la Pièce, Ghardaïa le 02 Janvier 2009.

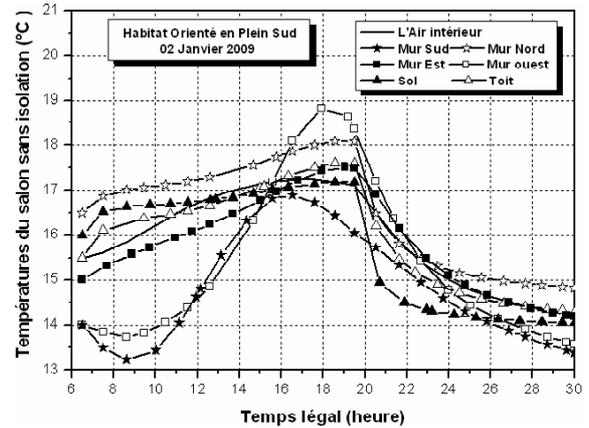


Fig.(3.11): Températures intérieures du Salon, Ghardaïa le 02 Janvier 2009.

On remarque que la température de l'air intérieur du salon devient plus grande le soir et elle est par contre plus petite le matin par rapport à la température de l'air de la pièce. Tandis qu'on constate absolument le contraire pour la pièce. La raison c'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, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée le matin du 01 Août par les murs

de la pièce est supérieure par rapport à celle absorbée par les murs exposés du salon et vice-versa. Par contre, au cours de la période froide, la température de l'air intérieur du salon devient plus grande le soir et elle est par contre plus petite le matin par rapport à la température de l'air de la pièce. On remarque dans cette situation que les températures des surfaces intérieures sont plus grandes par rapport à celles des surfaces exposées.

Les figures (3.12) et (3.13) décrivent les comportements des températures de tout les murs extérieurs pour les deux journées. Les résultats acquis montrent que les températures du mur Est extérieur de la pièce présentent un accroissement remarquable le matin (avant environ 11 heures le 01 Août et avant presque 10 heures et demie pour le 02 Janvier en temps légal) à cause des éclairagements solaires qui forment avec le mur Est un angle qui est le proche de l'angle optimal par rapport à l'angle formé entre l'éclairagement solaire et le mur Sud. En effet, ces températures deviennent les plus faibles à partir de 14 heures (01 Août) ou en partant de 13 heures et car (02 Janvier) en raison de l'effet de l'ombrage. Cependant, le même principe reste valable concernant l'interprétation de l'ordre des températures du mur Ouest du salon le soir.

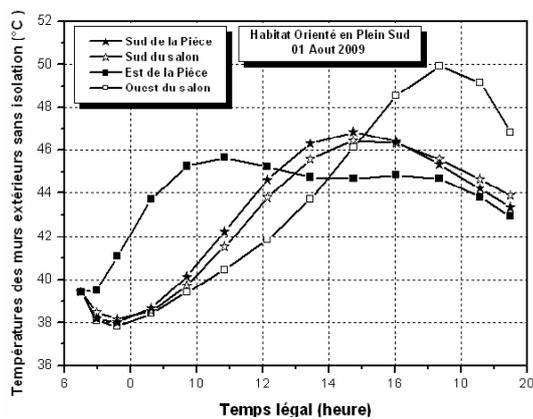


Fig.(3.12): Températures des murs extérieurs.Sans isolation, 01 Août 2009.

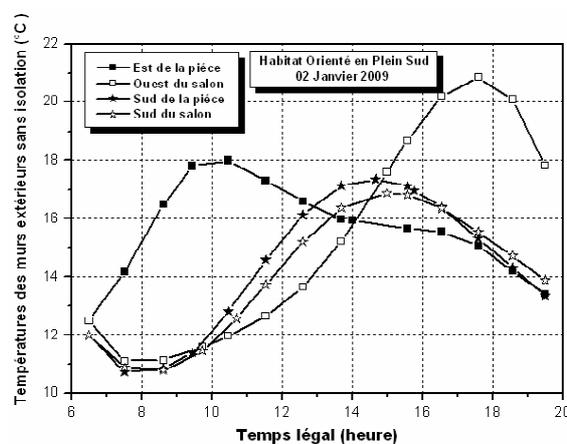


Fig.(3.13): Températures des murs extérieurs.Sans isolation, 02 Janvier 2009.

3.3.2 Avec isolation thermique

Rectification du modèle mathématique

L'isolation thermique intérieure des murs exposés par une lame d'air de 1 cm d'épaisseur, une couche de 6 cm de polystyrène et une autre couche (1 cm) de plâtre par exemple, nécessite l'introduction des modifications au niveau des équations des bilans thermiques des murs exposés Sud et Est de la pièce ainsi qu'au niveau des équations des bilans thermiques des murs Sud et Ouest du salon. Les modifications 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 (3.7), (3.8), (3.15) et (3.16) deviennent :

Mur Sud intérieur du salon

$$\rho_{POL} v_1 C_{POL} \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud\ isolé}} - Q_{r12} - Q_{r13} - Q_{cv14} - Q_{r15} - Q_{r16} - Q_{r17} - Q_{r1p} - Q_{r1f} \quad (3.31)$$

avec

$$\sum R_{sud\ isolé} = (2 e_a / \lambda_a S_1) + (e_b / \lambda_b S_1) + (e_c / \lambda_c S_1) + (e_{air} / \lambda_{air} S_1) + (e_{pol} / \lambda_{pol} S_1) \quad (3.32)$$

Mur Sud extérieur du salon

$$\rho_c v_8 C_c \frac{dT_8}{dt} = - \frac{(T_8 - T_1)}{\sum R_{sud\ isolé}} + \alpha S_1 E_s + Q_{cvam8} + Q_{rc8} + Q_{rsolext8} \quad (3.33)$$

Mur Ouest intérieur du salon

$$\rho_{POL} v_2 C_{POL} \frac{dT_2}{dt} = \frac{(T_9 - T_2)}{\sum R_{ouest\ isolé}} + Q_{r12} - Q_{r23} - h_{cv24} S_2 (T_2 - T_4) - Q_{r25} - Q_{r26} - Q_{r27} - Q_{r2p} + Q_{r2f} \quad (3.34)$$

avec

$$\sum R_{ouest\ isolé} = (2 e_a / \lambda_a S_1) + (e_b / \lambda_b S_1) + (e_c / \lambda_c S_1) + (e_{air} / \lambda_{air} S_1) + (e_{pol} / \lambda_{pol} S_1) \quad (3.35)$$

Mur Ouest extérieur du salon

$$\rho_c v_9 C_c \frac{dT_9}{dt} = -\frac{(T_9 - T_2)}{\sum R_{ouest\ isolé}} + \alpha S_2 E_o + h_{cvam9} S_2 (T_{am} - T_9) + h_{rc9} S_2 (T_c - T_9) + h_{rsolext9} S_2 (T_{solext} - T_9) \quad (3.36)$$

Résultats et simulation numérique

La simulation numérique permet de prévoir le comportement thermique pour les deux situations ; sans et avec isolation thermique. Les figures (3.14), (3.15), (3.16) et (3.17) délivrent les courbes des températures de l'air intérieur et de la surface extérieure du mur Sud de la pièce pour les deux journées (chaude et froide).

Les deux premières courbes montrent que l'isolation thermique influe sur le profil des températures de l'air puisque l'écart peut dépasser la valeur de 2 °C pour la période chaude, et la valeur de 1.25 °C en ce qui concerne la période froide. Dans ce cas, il est très important de tenir compte qu'on a supposé que les conditions environnantes initiales ont été plus au moins chaudes par rapport à l'extérieur.

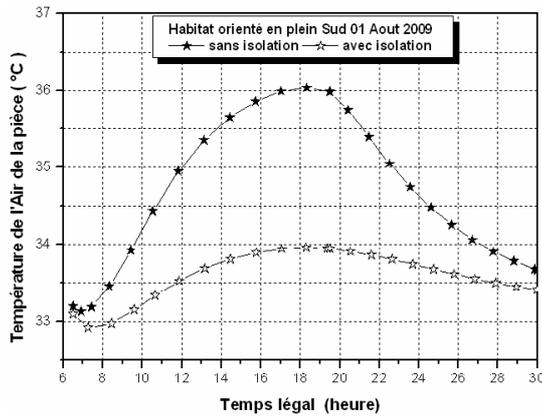


Fig.(3.14): Température de l'air intérieur de la Pièce, 01 Août 2009.

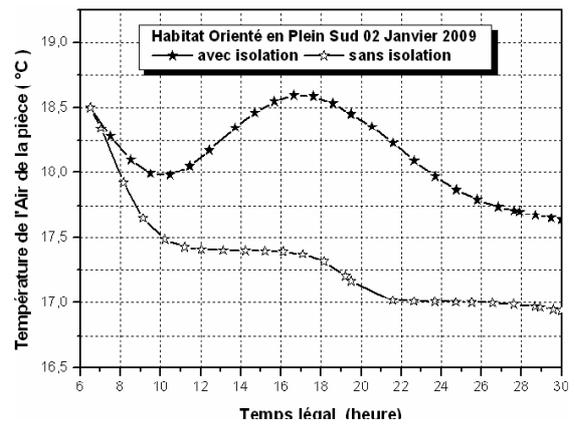


Fig.(3.15): Température de l'air intérieur de la Pièce, 02 Janvier 2009.

La modélisation numérique fournit les valeurs instantanées des températures des surfaces extérieures des murs exposés au soleil. Ces relevés peuvent donner des valeurs plus grandes que ceux obtenues sans isolation thermique durant la période chaude (figure (3.16)). Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que, l'isolant joue le rôle d'une barrière thermique. Le flux de chaleur sera freiné par l'isolation. Elle valorise efficacement les apports du confort thermique.

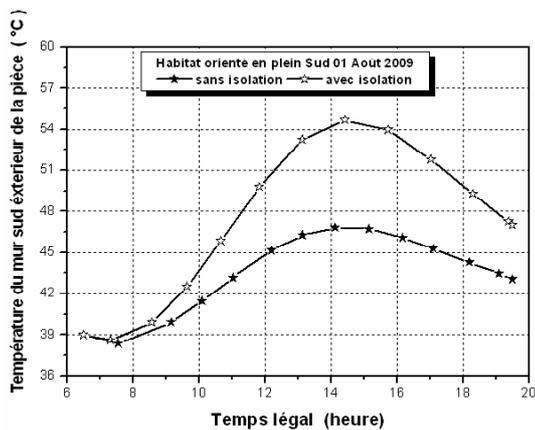


Fig.(3.16): Température du mur Sud extérieur, 01 Août 2009.

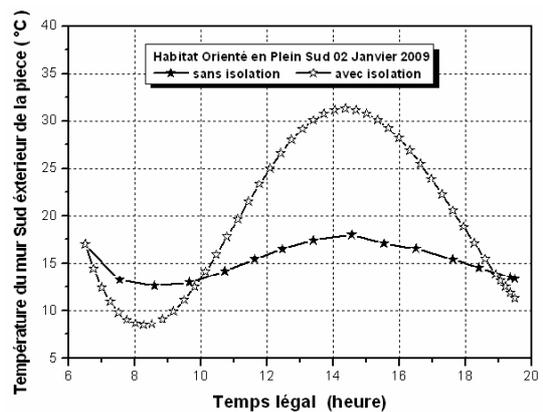


Fig.(3.17): Température du mur Sud extérieur, 02 Janvier 2009.

Les calculs indiqués par la figure (3.17) au cours de l'insolation montrent que les relevés des températures en présence de l'isolation fournissent des valeurs qui sont supérieures si on les compare avec celles en absence de l'isolation. On peut expliquer cet aspect par l'apport des deux couches isolantes qui vont gêner le flux de chaleur de traverser les murs. A ce propos, un changement de direction de transfert de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur s'effectue.

3.4 Méthodologie et Confrontation des Résultats

Pour l'enregistrement des données nous avons utilisé une unité d'acquisition de type Linseis LPD 12 avec un écran numérique d'une interface de deux langues anglais et allemand et un menu programmable. Il comporte douze canaux programmables individuellement en mV , V et mA et peut être connecté à un ordinateur pour l'enregistrement des données [27, 38].

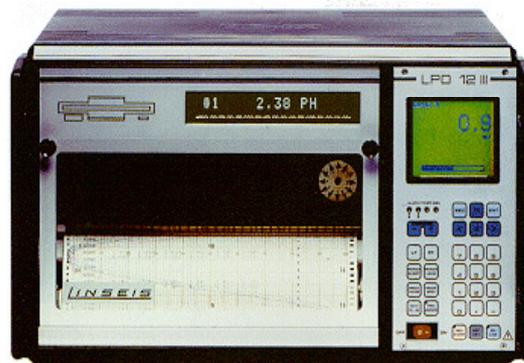


Fig.(3.18): Enregistreur de type Linseis LPD 12.

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. Nous procéderons par les figures tracées ci

dessous à la validation du modèle destiné à la description du comportement thermique de la pièce en absence et en présence de l'isolation thermique intérieure.

Les courbes tracées dans les figures (3.19), (3.20), (3.21) et (3.22) représentent respectivement les températures de l'air, du mur Sud, du mur Nord ainsi que l'erreur relative commise sur chaque température pour la journée du 11 Juillet 2008 et ceci avant l'isolation thermique.

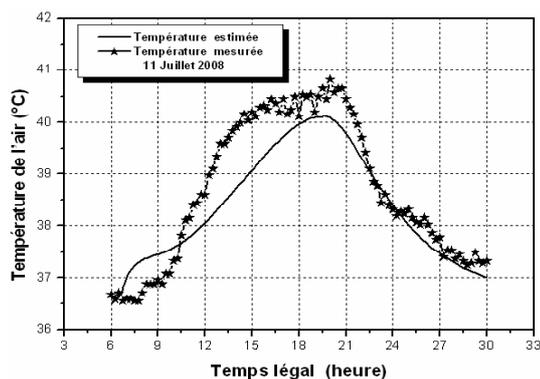


Fig.(3.19): Température de l'air intérieur de la pièce, Sans isolation, Ghardaïa le 11 Juillet 2008.

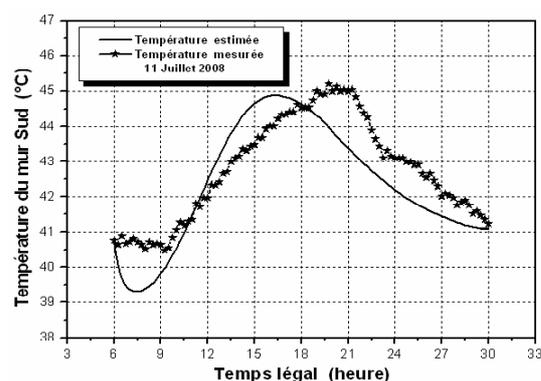


Fig.(3.20): Température du mur Sud de la pièce, Sans isolation, Ghardaïa le 11 Juillet 2008.

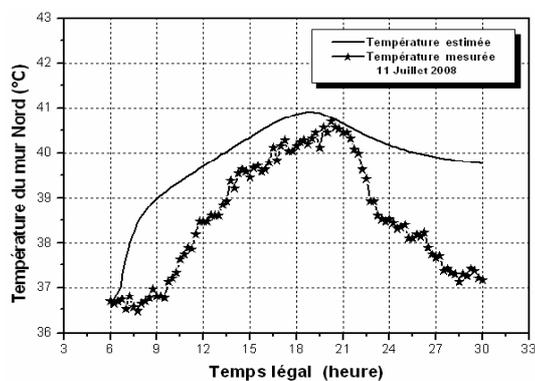


Fig.(3.21): Température du mur Nord de la pièce, Sans isolation, Ghardaïa le 11 Juillet 2008.

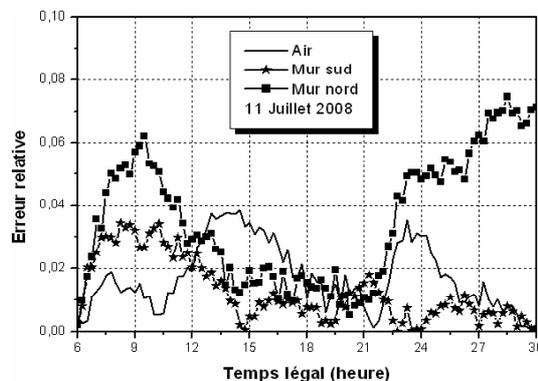


Fig.(3.22): Erreur relative commise sur les températures, Sans isolation, Ghardaïa le 11J uillet 2008.

A l'exception de la figure (3.19), les profils des températures obtenus présentent généralement les mêmes scénarios. Les courbes des températures relatives au mur Sud montrent que les maximums des températures calculées et mesurées ne correspondent pas au même instant. En d'autres termes, le pic de la température calculé du mur Sud correspond à l'instant 16: 00, alors que la valeur maximale de cette température mesurée est atteinte au bout de presque trois heures et demie. Ce déphasage entre ces deux courbes est dû à la forte inertie thermique du mur Sud et au choix des températures environnantes (initiales et aux limites). La différence des scénarios pour ce cas réside aussi au niveau des températures estimées et expérimentales. On remarque que les températures données par le modèle numérique diminuent puis augmentent progressivement entre 6 heure et 10 heure. Par contre, l'expérience montre que les températures dans cet intervalle restent pratiquement stables. Ces résultats confirment de nouveau le précieux rôle de l'inertie thermique de la pierre qui favorise la stabilité des températures intérieures de l'habitat. Malgré ces impressionnantes remarques, nous avons trouvé que l'erreur relative commise sur la température du mur Sud n'accède pas la valeur de 3.5 % or que ces erreurs ne dépassent pas la valeur de 7.5 % pour la température du mur Nord et la valeur de 4 % pour la température de l'air.

Les figures (3.23), (3.24) et (3.25) représentant respectivement les évolutions des températures de l'air, du mur Nord et de l'erreur relative des différentes températures pour la journée du 08 Janvier 2008 en absence de l'isolation thermique intérieure.

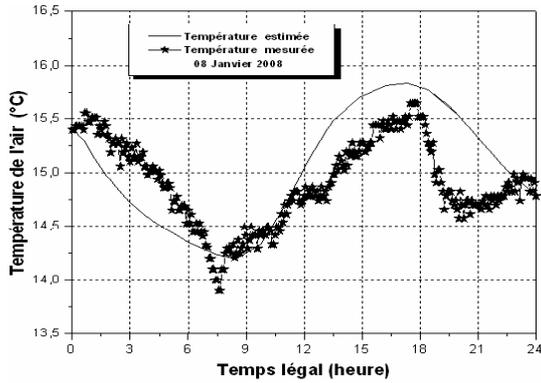


Fig.(3.23): Température de l'air intérieur de la pièce, Sans isolation, Ghardaïa le 08 Janvier 2008.

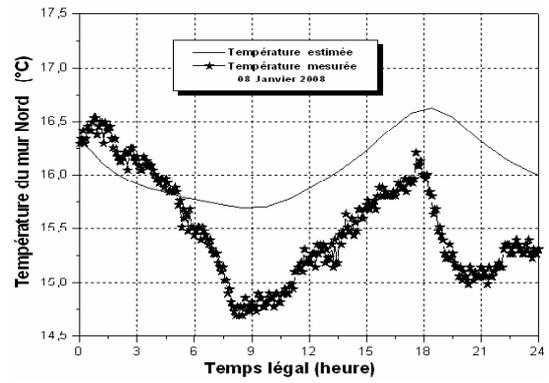


Fig.(3.24): Température du mur Nord de la pièce, Sans isolation, Ghardaïa le 08 Janvier 2008.

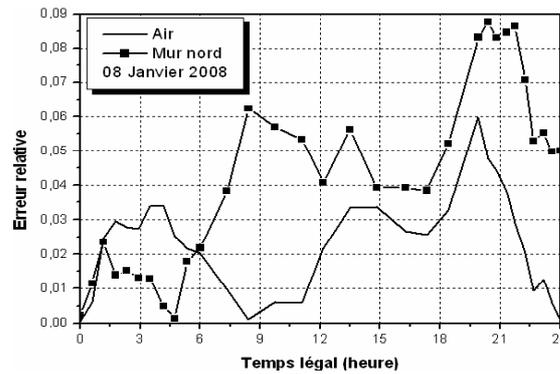


Fig.(3.25): Erreur relative commise sur les températures, Sans isolation, Ghardaïa le 08 Janvier 2008.

Du point de vue comparaison, on peut constater d'après ces relevés que l'écart entre les données théoriques et expérimentales est assez encourageant. En effet, la confrontation entre les valeurs obtenues par simulation et celles mesurées prouve que l'erreur relative cette fois-ci est inférieure à 9% pour la température du mur Nord et à 6% pour la température de l'air.

L'isolation peut être mise en place à l'intérieur ou à l'extérieur du mur. De nombreuses techniques d'isolation thermique sont disponibles. Elles ont en commun de maintenir un matériau isolant réparti sur la surface du mur (polystyrène) et de le protéger par une peau réalisée soit à l'aide de bardage soit à l'aide d'enduits appliqués sur l'isolant [24]. D'ailleurs, une isolation intérieure des deux murs exposés par une lame d'air de 2 cm et une autre couche de 6 cm de polystyrène dans cette étude expérimentale est mise en place. La figure (3.26) donne une vue générale du mur Sud isolé. Tandis que la figure (3.27) montre une photo du mur Nord composé de mêmes couches.



Fig.(3.26): Surface intérieure du mur Sud.



Fig.(3.27): Surface intérieure du mur Nord.

Dans cette situation, nous avons réussi de prédire les valeurs théoriques et expérimentales de la température des différentes surfaces ainsi que l'air intérieur. Les profils des températures qui sont présentés sur les figures (3.28), (3.29) et (3.30) confirment les mêmes remarques pour le mur Sud concernant les pics des températures et l'apport négatif de l'inertie thermique. Un calcul d'erreur relative (figure 3.31) sera indispensable pour voir l'efficacité de notre approche proposée.

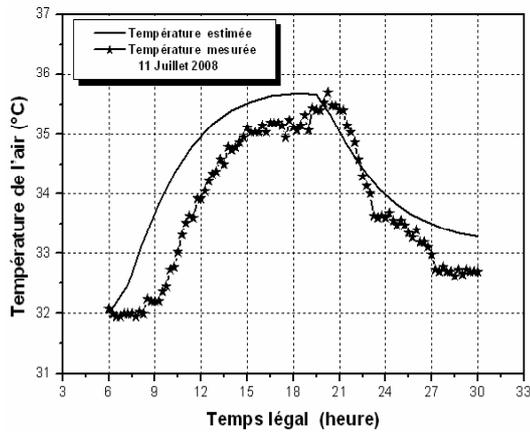


Fig.(3.28): Température de l'air intérieur de la pièce, Avec isolation, Ghardaïa le 11 Juillet 2008.

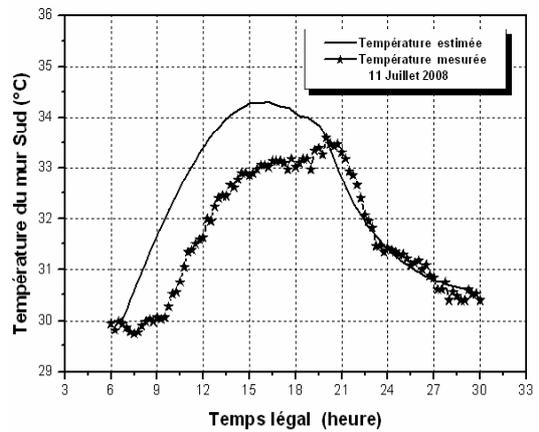


Fig.(3.29): Température du mur Sud de la pièce, Avec isolation, Ghardaïa le 11 Juillet 2008.

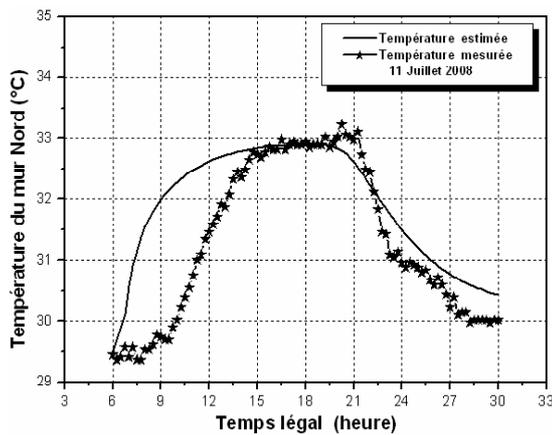


Fig.(3.30): Température du mur Nord de la pièce, Avec isolation, Ghardaïa le 11 Juillet 2008.

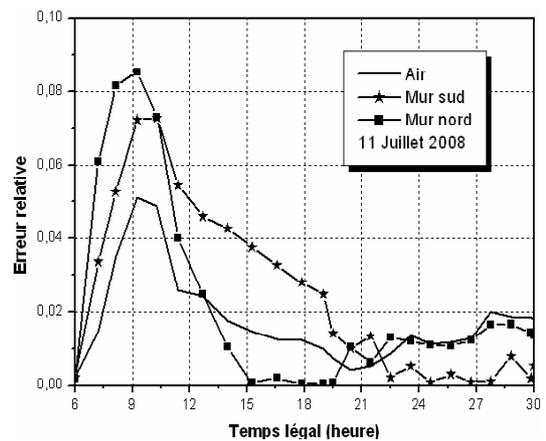


Fig.(3.31): Erreur relative commise sur les températures, Avec isolation, Ghardaïa le 11 Juillet 2008.

Les comparaisons des données se sont avérées souvent satisfaisantes pour la journée du 11 Juillet 2008 vue que l'erreur relative instantanée qui est un paramètre déterminant est globalement petite.

En ce qui concerne la journée du 08 Janvier 2008, les températures de l'air et du mur Nord sont enregistrées respectivement dans les figures (3.32) et (3.33). Comme il est de coutume, l'étude sera suivie par un calcul d'erreur relative (figure 3.34).

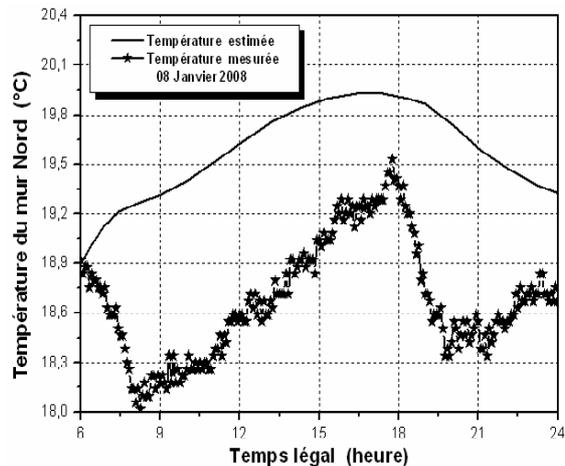
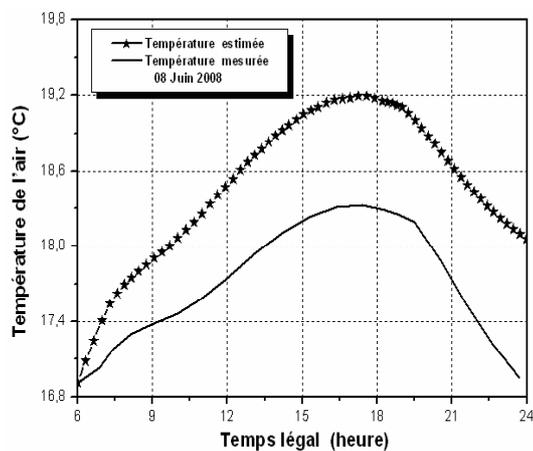


Fig.(3.32): Température de l'air intérieur de la pièce, Avec isolation, Ghardaïa le 08 Janvier 2008.

Fig.(3.33): Température du mur Nord de la pièce, Avec isolation, Ghardaïa le 08 Janvier 2008.

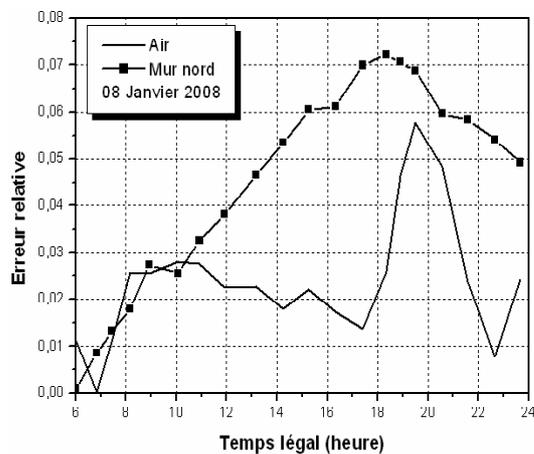


Fig.(3.34): Erreur relative commise sur les températures, Avec isolation, Ghardaïa le 08 Janvier 2008.

D'après ces relevés, on peut remarquer que la façon d'évolution et les scénarios des courbes expérimentales subit parfois des changements par rapport aux allures des courbes obtenues par simulation numérique. Heureusement, les différences des températures dans le pire des cas est de l'ordre de 1.2 °C. Ces observations ont été justifiées par le calcul d'erreur relative traduit par la figure (3.34). Les valeurs calculées montrent que cette erreur ne dépasse pas 7.2 % pour la température du mur Nord et 6 % pour la température de l'air.

3.5 Conclusion

Les différentes applications des systèmes énergétiques à conversion thermique de l'énergie solaire nécessitent l'exploitation de nouveaux modes de connexion et techniques de gestion optimisant leurs efficacités. Pour soulever ce problème, il faut choisir des modèles adéquats et qui peuvent être jugés acceptables lors de la détermination des paramètres des contrôleurs basés sur ces techniques. Les résultats du modèle testé sont confrontés aux valeurs expérimentales.

Les modèles mathématiques sont validés expérimentalement, la fonction de ces modèles est de calculer les différentes températures délivrées sous l'effet des conditions climatiques et environnantes disponibles. La comparaison a permis de savoir que les résultats du modèle étaient dans l'ensemble satisfaisants. Le programme réalisé nous indique que ces outils numériques sont aptes dans notre cas pour donner les températures moyennes. Le modèle mathématique proposé reproduit de manière satisfaisante la réalité physique des phénomènes. Les écarts qui existent sont dus d'une part, aux erreurs de mesures, à l'inertie thermique, aux hypothèses imposées et aux perturbations du système. Mais ils ont aussi permis de mieux cerner les limites du programme.

Chapitre IV

Isolation Thermique et Effet de l'Orientation de l'Habitat sur ses Températures

Chapitre 4

Isolation Thermique et Effet de l’Orientation de l’Habitat sur ses Températures

4.1 Introduction

Le cadre bâti a toujours été influencé par le contexte climatique auquel il appartient, et souvent la conception architecturale s’évertue afin de présenter la meilleure adéquation avec l’environnement. A ce niveau une question se pose: quels seront les outils architecturaux passifs susceptibles de provoquer cette alliance? Nous proposons deux solutions dans ce présent travail à savoir l’orientation du bâtiment et l’isolation thermique [39].

Le développement des villes du Sud Algérien a été fait à l’instar des villes du Nord, marginalisant ainsi les caractéristiques climatiques très rudes de ces régions. Depuis de nombreuses années, suite à une crise due à une forte demande de logements, l’Etat se trouve victime de cette démarche qui ne reflète pas les aspirations socioculturelles du citoyen algérien et ne répond pas aux exigences climatiques et économiques de ces régions: des bâtiments avec des orientations arbitraires, et des façades comprenant des baies vitrées n’importe comment, du choix inadapté de l’utilisation des matériaux de construc-

tion [40], de l'exposition des bâtiments aux contraintes solaires (non utilisation des brises soleil), la majorité des gens construisent leur propres maisons à leur manière, etc.

Cette contribution confirme que l'isolation thermique est la solution la plus simple et la plus courante pour limiter les déperditions de chaleur et favoriser les gains solaires d'hiver et de se protéger des surchauffes d'été [41]. Nous allons étudier aussi l'influence de l'orientation du bâtiment sur les températures intérieures, en été ou en hiver.

4.2 Solaire Passif

L'utilisation passive de l'énergie solaire est un thème qui a été très étudié. Cette technique permet de faire diminuer les besoins de climatisation. Quelques règles techniques architecturalement assez simples ont été élaborées [42].

Une règle importante (en considérant au préalable que le bâtiment est orienté au Sud) consiste à mettre plus de vitrage sur la façade Sud que sur la façade Nord du bâtiment, avec du vitrage à faibles pertes thermiques. Il est également souvent plus avantageux de concevoir un bâtiment avec plus de vitrage sur la façade Est que sur la façade Ouest pour limiter les surchauffes de l'été. De même, pour éviter un apport de gain solaire trop important l'été par le vitrage de la façade Sud, il faut installer des brises soleil opaques au-dessus de ces vitrages afin de laisser passer le soleil en hiver et de protéger les vitrages l'été. Rappelons également qu'une des règles indissociables de la conception bioclimatique est de prévoir une isolation thermique suffisante pour avoir de faibles besoins de chauffage, par l'extérieur des parois si l'on veut profiter de l'inertie de l'enveloppe du bâtiment [42].

Une méthode qui permet également de diminuer les besoins de chauffage est celle de la zone tampon. Par exemple, placée du côté Nord, une zone telle qu'un garage à voiture permet de faire diminuer les pertes du bâtiment vers l'extérieur. En façade Sud, une véranda, en plus permet de jouer également le rôle de zone tampon, peut permettre de préchauffer de l'air si le rayonnement solaire est suffisant. Il faut par contre bien veiller à concevoir la véranda pour éviter une surchauffe l'été.

D'autres techniques à peine plus sophistiquées existent également. La technique de la double peau, ou du mur rideau consiste à rajouter par-dessus l'enveloppe une paroi transparente, en laissant un certain espace d'air entre cette paroi et le bâtiment. La lame d'air permet de rajouter une résistance thermique entre l'enveloppe et la bâtiment (ce qui revient à jouer le rôle de zone tampon), de préchauffer ou chauffer l'air du bâtiment en hiver, de créer une ventilation naturelle l'été, et de servir de barrière acoustique. Enfin, la technique du mur Trombe consiste à chauffer une paroi à forte inertie, et de restituer par la suite la chaleur emmagasinée. Ce mur Trombe est en général protégé de l'extérieur par un vitrage isolant ou un isolant semi transparent.

Enfin, il ne faut pas oublier que la conception bioclimatique, en plus de prendre grandement en considération le solaire passif, se doit de prendre en compte les ressources solaires, la présence de masques proches ou lointains et l'exposition au vent, et de manière générale le climat. Une conception d'un bâtiment se situant dans un pays chaud sera tout à fait différente que celle se situant dans un pays au climat froid ou tempéré. Il faut dans ce cas essayer de prendre en compte le rafraîchissement possible grâce à la ventilation naturelle, technique qui est tout aussi valable dans les climats tempérés [42].

4.3 Confort Thermique

C'est la sensation de bien être physique résultant de l'équilibre thermique du corps. Or le corps échange de la chaleur avec son environnement par convection, rayonnement et évaporation. Améliorer le confort thermique passe par un diagnostic des bâtiments et des installations de chauffage pour l'hiver et des installations de climatisation pour l'été. Des spécialistes (architectes, entreprises, bureaux d'études) sont susceptibles d'effectuer ces diagnostics et de préconiser des solutions. Quelques réflexes permettant d'orienter les choix parmi les mesures proposées:

-Commencer par isoler les combles (s'ils existent) avant les parois verticales en maison individuelle (la majeure partie des pertes de chaleur se fait par le toit).

- Isoler les murs en contact avec l'extérieur (résultat qui peut être obtenu soit en plaçant un matériau isolant à l'intérieur ou à l'extérieur du logement).
- Veiller à maintenir ou à rétablir la circulation d'air dans le logement en cas de changement de fenêtres (il ne suffit pas que les nouvelles fenêtres présentent des entrées d'air, il faut aussi que l'air puisse ressortir du logement).
- Remplacer de simples vitrages par des vitrages doubles.
- Mettre en place une régulation du système de chauffage.
- Examiner les possibilités de changement de mode de chauffage ou d'énergie utilisée.

Les moyens les plus employés pour se protéger de la chaleur estivale sont :

- La ventilation par ouverture des fenêtres lorsque cela est possible (zone peu bruyante, pas de risque d'intrusion).
- La mise à profit de l'inertie thermique du bâtiment, c'est-à-dire profiter de la capacité que possède le bâtiment à pouvoir stocker la fraîcheur de la nuit pour limiter l'élévation de la température le jour. Pour un bâtiment existant, l'inertie peut être augmentée par la pose d'une isolation thermique par l'extérieure.
- La limitation des apports solaires à travers les ouvertures (portes et fenêtres), à l'aide de volets ou de stores [43].

4.4 Isolation Thermique

Le rôle principal de l'isolation est de limiter la conduction de la chaleur, et quelque fois le rayonnement thermique. Un bon isolant est évidemment un mauvais conducteur de la chaleur. En général les matériaux les plus légers sont de meilleurs isolants. Plus le matériau est dense, plus les atomes sont proches les uns des autres, ce qui signifie que le transfert d'énergie d'un atome à un autre est plus facile [43].

Afin de réduire la consommation d'énergie dans le secteur des bâtiments, les recherches s'accroissent pour viser une meilleure isolation de l'enveloppe et minimiser les pertes thermiques à travers les murs, les planchers, la toiture et les parois vitrées du bâtiment

quand l'intérieur est chauffé ou climatisé. Pour cela et afin de limiter la propagation de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur et vice-versa, il est indispensable de recourir à l'usage des isolants thermiques. Les isolants traditionnels, dits "de masse", sont les plus courants. Les isolants fibreux minéraux (laine de verre, laine de roche) et les produits plastiques alvéolaires (polystyrène, mousse de polyuréthane) en sont des exemples. Ces isolants, utilisés au niveau de la toiture, des murs et des planchers, limitent le transfert thermique uniquement par conduction grâce à leurs faibles conductivités thermiques [44].

4.5 Orientation

L'orientation d'un édifice répond à sa destination : les besoins en lumière naturelle, l'intérêt d'utiliser le rayonnement solaire pour chauffer le bâtiment ou, au contraire, la nécessité de s'en protéger pour éviter la surchauffe, l'existence de vents pouvant refroidir le bâtiment en hiver ou le rafraîchir en été sont autant de paramètres importants dans le choix de l'orientation [44].

Elle est en fonction des espaces du bâtiment :

- Les espaces orientés au Nord : ils bénéficient toute l'année d'une lumière égale et du rayonnement solaire diffus. Il est judicieux de placer des ouvertures vers le Nord lorsque l'espace nécessite une lumière homogène, peu variable ou diffuse, et les apports internes sont élevés.
- Les espaces orientés à l'Est : ils profitent du soleil le matin mais le rayonnement solaire est alors difficile à maîtriser car les rayons sont bas sur l'horizon. L'exposition solaire y est faible en hiver mais elle permet d'apporter des gains solaires au moment où le bâtiment en a le plus besoin. Par contre, en été, l'orientation Est présente une exposition solaire supérieure à l'orientation Sud, ce qui est peu intéressant.
- Une orientation Ouest présente un risque réel d'éblouissement et les gains solaires ont tendance à induire des surchauffes. En effet, les vitrages tournés vers l'Ouest apportent des gains solaires L'après-midi, au moment où le bâtiment est depuis longtemps en régime.

- Une orientation Sud entraîne un éclairage important. De plus, les pièces orientées au Sud bénéficient d'une lumière plus facile à contrôler. En effet, en hiver, le soleil bas (environ 17°) pénètre profondément dans le bâtiment, tandis qu'en été, la hauteur solaire est plus élevée (60°) et la pénétration du soleil est donc moins profonde. En été, les apports solaires sur une surface verticale sont également nettement inférieurs au Sud qu'à l'Est ou à l'Ouest car ils sont diminués par un facteur égal au cosinus de l'angle d'incidence [39].

4.6 Eclairages Solaires et Temperature Ambiante

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement présent sur le site concerné, de l'orientation des surfaces réceptrices, de l'ombrage permanent et des caractéristiques de transmission et d'absorption des surfaces réceptrices. Les surfaces qui captent l'énergie solaire sont principalement les parois et les planchers intérieurs des surfaces ensoleillées, les parois situées derrière un revêtement transparent ou une isolation transparente, et même toute surface opaque exposée au soleil (de [44] à [50]).

En effet, cette section consiste à simuler les différents éclairages solaires incidents sur chaque surface réceptrice. C'est pour cette raison que nous avons tracé les courbes dans les figures (4.1) et (4.3) qui représentent les variations instantanées des éclairages solaires incidents sur le toit et sur les murs de l'habitat pour différentes orientations. L'évolution horaire du rayonnement donne de précieuses indications. Elle permet de connaître à quelle heure, et avec quelle intensité, le soleil apparaîtra sur une façade donnée. Ces valeurs sont respectivement relatives aux journées du 01 Août et du 02 Janvier pour un ciel totalement clair. Pour la figure (4.3), on remarque qu'une façade Nord ne reçoit que du rayonnement diffus et que, vu la faible hauteur du soleil, la façade Sud ne reçoit qu'un tiers du rayonnement solaire d'une surface horizontale. Par contre, la figure (4.3) représente l'évolution du rayonnement solaire d'une journée d'été. Tandis que les figures (4.2) et (4.4) représentent la variation instantanée de l'éclairage solaire

incident sur les différentes surfaces de l'habitat pour les mêmes journées associées aux orientations suivantes: le Sud-est , le Sud-ouest , le Nord-est et le Nord-ouest.

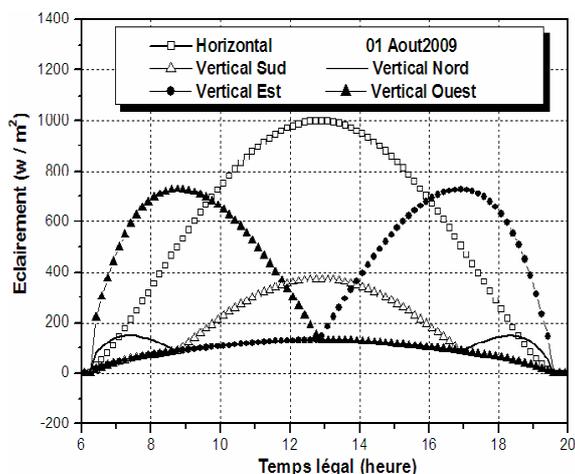


Fig.(4.1): Eclairages incidents, 01 Août 2009.

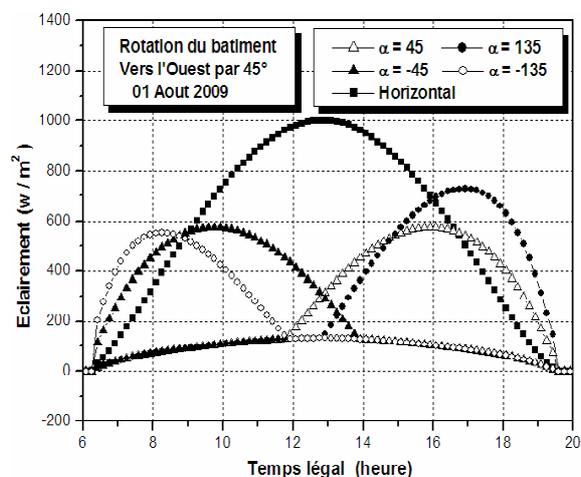


Fig.(4.2): Eclairages incidents, Rotation vers l'Ouest par 45°, 01 Août 2009.

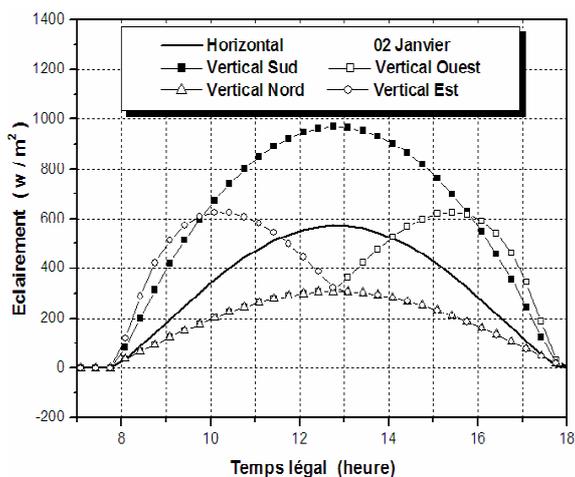


Fig.(4.3): Eclairages incidents 02 Janvier.

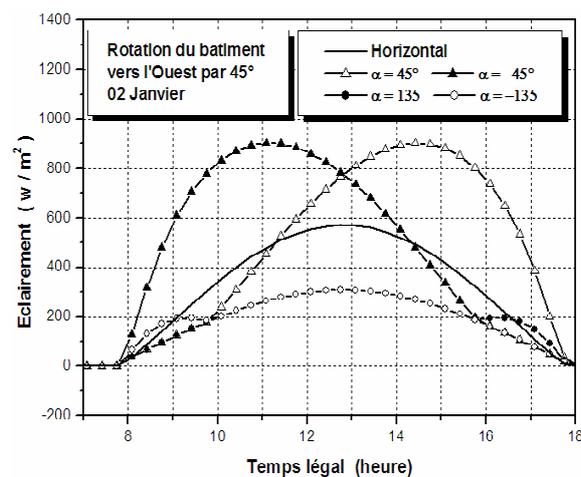


Fig.(4.4): Eclairages incidents, Rotation vers l'Ouest par 45°, 02 Janvier.

Cependant, pour la température ambiante on peut constituer des fonctions d'interpolation qui évaluent et estiment sa valeur en fonction du temps à travers des mesures établies expérimentalement le 01 Août et le 02 Janvier pour les injecter dans le programme de calcul comme le montre les figures (4.5) et (4.6). La variation de la tempé-

rature ambiante au cours d'une période de 24 heures dépend fortement de la couverture nuageuse et de la durée d'ensoleillement. Par conséquent, l'amplitude de variation sera plus importante en été qu'en hiver.

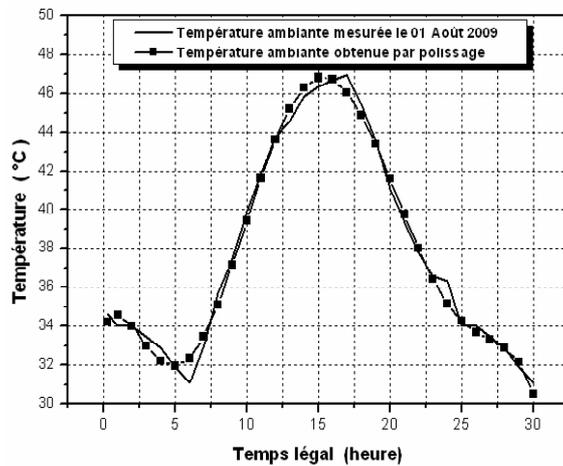


Fig.(4.5): Température ambiante Ghardaïa le 01 Août 2009.

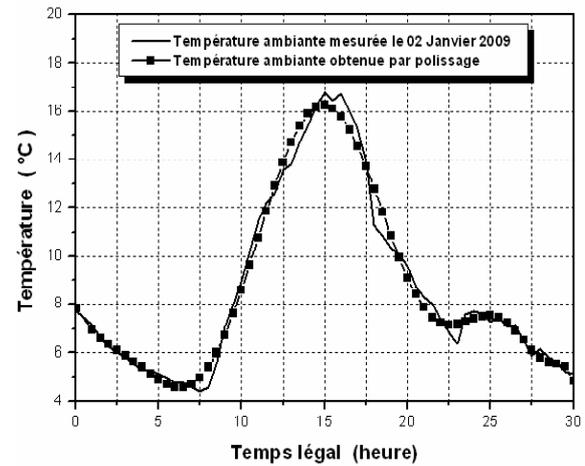


Fig.(4.6): Température ambiante Ghardaïa le 02 Janvier 2009.

4.7 Influence de l'Orientation du Bâtiment sur ses Températures

L'objectif primordial dans cette partie, consiste à prouver l'importance de deux moyens pour assurer au moins un niveau de confort thermique plus acceptable et avec une consommation énergétique plus réduite. Nous avons étudié l'influence de l'isolation et de l'orientation de l'enveloppe du bâtiment sur les températures de l'ambiance intérieure.

En faisant varier chaque fois l'orientation du bâtiment par 45° vers l'Est ou vers l'Ouest, nous allons sans doute obtenir un léger changement de température de l'air intérieur selon des travaux effectués auparavant par notre équipe de recherche. Cependant, l'importance de cette variation dépend du matériau de construction et de l'importance de la surface du mur par rapport au volume de la pièce. Enfin, pour passer aux solutions, il a fallu mieux proposer une variation de 90° plus claire et plus susceptible d'être appli-

quée. Cette étude a pour objet de voir les conséquences de l'orientation sur l'évolution des températures de l'air et sur les surfaces des parois de la pièce sans et avec isolation. En résumé, l'orientation de l'habitat par exemple vers l'Ouest par 90° , permet de rendre le mur Sud en Ouest, le mur Ouest en Nord, le mur Nord en Est et le mur Est devient en Sud.

4.7.1 Période chaude

La journée du 01 Août a été sélectionnée pour effectuer la simulation numérique qui donne l'influence de l'orientation de l'habitat sur ses températures intérieures. Deux cas possibles ont été testés; en absence et en présence de l'isolation thermique intérieure. La figure (4.7) décrit aussi les changements journaliers de la température de l'air intérieur de la pièce pour les trois autres rotations: vers l'Est, vers l'Ouest et vers le Nord.

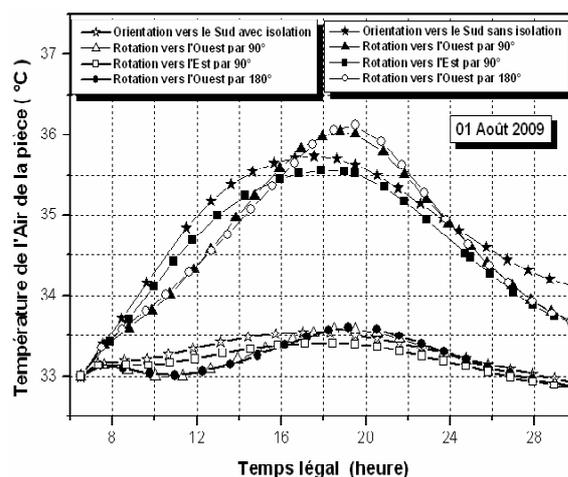


Fig.(4.7): Température de l'air intérieur de la Pièce avec différentes orientations, 01 Août 2009.

Nous déduisons tout d'abord que les températures intérieures de la pièce non isolée sont les plus élevées par rapport à celles de la pièce isolée pour toutes les positions envisagées. Les résultats présentés montrent l'effet de l'orientation de l'habitat sur la température de l'air intérieur de la pièce. Les valeurs obtenues à cet égard en absence d'isolation

montrent que les températures sont généralement plus élevées si le bâtiment est orienté vers le Nord ou vers l'Ouest à partir à peu près 17 heures. Elles sont par contre plus faibles par rapport aux autres valeurs trouvées dans les deux autres orientations et ceci avant presque 16 heures et demie. Ce qui engendre une consommation énergétique plus importante. L'écart maximum des températures pour toutes les orientations en absence de l'isolation ne dépasse pas l'ordre de 0.8 °C. Par opposition, l'écart maximum des températures intérieures de la pièce isolée ne dépasse pas la valeur de 0.3 °C. On remarque clairement que l'isolation thermique favorise une plus grande stabilité des températures; la différence entre la température minimale et maximale atteint la valeur de 0.6 °C. Par contre, en absence d'isolation thermique, la température maximale moins la température minimale est environ de:

3 °C pour des rotations vers l'Ouest et vers le Nord.

2.75 °C pour une orientation en plein Sud et;

2.5 °C pour une rotation vers l'Est.

Selon la figure (4.8), ces écarts entre les températures maximales et minimales observés sont suffisamment faibles par rapport à la différence (16 °C) entre les températures maximales et minimales de l'air ambiant extérieur présentées dans la figure (4.5). C'est tout simplement le précieux rôle de l'inertie thermique. Plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus les variations de température jour/nuit sont faibles. Ces résultats ne sont pas favorables au confort thermique pour cette construction qui se situe dans une zone aride. Les températures intérieures sont très élevées. En plus, cette journée présente un intérêt énergétique particulièrement accru.

L'opinion commune est que les murs épais et denses protègent naturellement des fluctuations importantes de température et n'ont donc pas besoin d'isolation. En principe, elles devront ralentir par l'inertie, l'entrée de la chaleur ou du froid qu'après un certain temps d'exposition. L'ambiance intérieure doit rester fraîche en été grâce aux 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 conducteur pour favoriser le stockage à condition qu'il existe des nuits fraîches.

Effectivement, c'est ça le problème dans ces régions: en été, les températures ambiantes extérieures restent presque tout le temps élevées même durant la nuit. L'inertie thermique consiste alors en une accumulation 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.

Le programme de calcul réalisé permet encore de révéler les températures des façades. Les figures (4.8), (4.9) et (4.10) décrivent respectivement l'influence de l'orientation sur les températures des murs exposés: Sud, Est et Ouest.

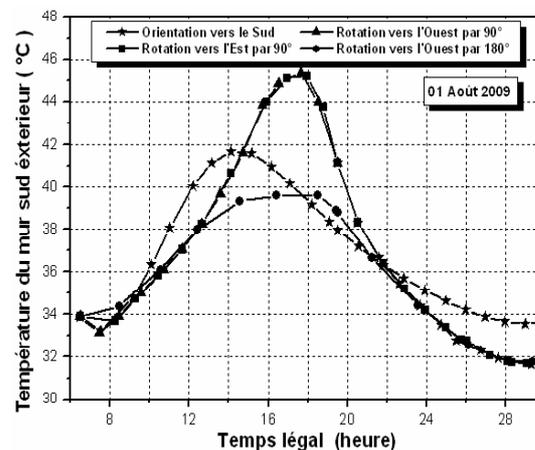


Fig.(4.8): Température du mur Sud extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2009.

On peut remarquer qu'en été, les tracés de la température de la façade Sud de la pièce pour les quatre orientations montrent des accroissements importants si le bâtiment est orienté vers l'Est ou vers l'Ouest, et ceci entre 14: 50 et 22: 00. Contrairement au cas où la pièce est orientée vers le Sud ou vers le Nord, l'élévation de la température obtenue pour l'orientation Sud est apparente entre 7: 15 et 14: 15, et reste la plus grande dans

la nuit par rapport aux autres orientations.

Les résultats obtenus tracés dans la figure (4.9) montrent que la température du mur Est extérieur de la pièce si l'habitat est orienté vers le Nord peut atteindre des valeurs record. Les autres scénarios ont été attendus, vue que l'orientation Sud permet d'évoquer des températures élevées le matin pour la façade Est.

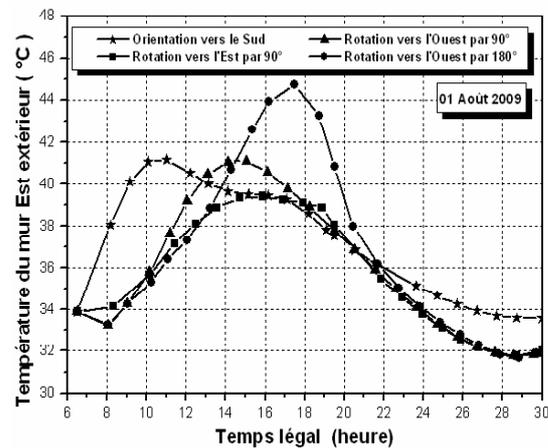


Fig.(4.9): Température du mur Est extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2009.

Concernant le salon, ce sont les murs Sud et Ouest qui ont été exposés aux différentes conditions climatiques. Donc, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée le matin par les murs exposés de la pièce est supérieure par rapport à celle absorbée par les murs exposés du salon et vice-versa. En restant toujours dans ce contexte, il est tout à fait légitime de trouver que les températures du mur Ouest exposé du salon sont plus grandes le soir que celles du mur Est et du mur Sud de la pièce. La rotation du bâtiment évoque des scénarios similaires si les façades ont la même orientation. En d'autres termes, si par exemple l'habitat est orienté vers le Nord, l'évolution des températures des surfaces extérieures du mur Est de la pièce subit le même scénario avec les températures du mur extérieur Ouest du Salon si le bâtiment est en plein Sud.

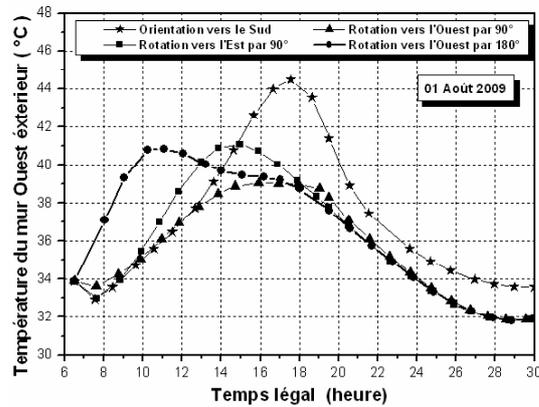


Fig.(4.10): Température du mur Ouest extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2009.

4.7.2 Période froide

En ce qui concerne la période froide, nous avons choisi le 01 Janvier qui est un jour indicatif pour l'illustration des résultats de la simulation numérique. Les mêmes démarches ont été suivies dans cette partie. La figure (4.11) illustre les résultats de la température intérieure de la pièce sans et avec isolation thermique pour les quatre orientations.

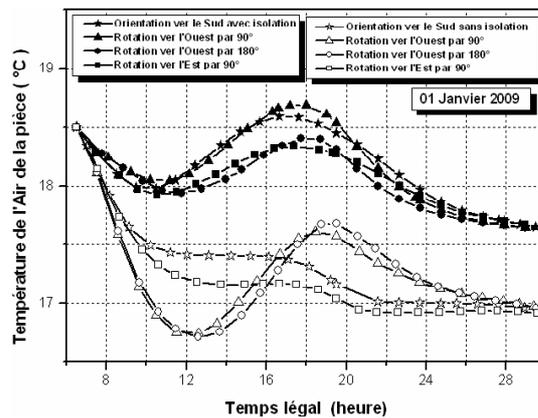


Fig.(4.11): Température de l'air intérieure de la Pièce pour différentes orientations, 01 Janvier 2009.

Pour démontrer convenablement l'apport de l'isolation thermique, nous avons utilisé les mêmes conditions initiales, climatiques et météorologiques pour achever la comparaison. Il fallait choisir des conditions environnantes plus au moins chaudes si on veut procéder à des remarques précieuses ; plus les températures intérieures augmentent, plus les déperditions thermiques augmentent.

On peut prouver par ces simples études que l'isolation thermique présente un intérêt énergétique extrêmement important puisque les différences des valeurs moyennes de la température enregistrée peuvent atteindre 1.5 °C.

Les températures intérieures de la pièce isolée pour différentes orientations sont plus élevées par rapport aux températures d'une pièce non isolée. Les courbes présentées dans la figure (4.11) montrent l'effet de l'orientation sur l'ambiance intérieure de la pièce isolée. Il est tout à fait clair que la température est plus élevée si le bâtiment isolé thermiquement est orienté vers le Sud ou vers l'Ouest. Alors la simulation numérique d'une pièce située en plein Nord ou en plein Est donne des valeurs plus inférieures. Nous avons remarqué effectivement que les différences entre les profils des températures n'accèdent pas la valeur de 0.35 °C si la pièce est bien isolée.

Cette différence est nettement inférieure par rapport au cas d'absence d'isolation vue que ces écarts de température ne dépassent pas la valeur de 1 °C cette fois-ci. Les valeurs des températures si le bâtiment est orienté vers le Sud ou vers l'Est, présentent une décroissance avec une marge de l'ordre de 0.5 °C. Elles restent stables la nuit à des températures de l'ordre de 17 °C. Cette stabilité et cet étroit domaine de variation de température sont causés par l'apport de l'inertie thermique que possèdent les murs en pierre. Cependant, le changement journalier de la température suit une évolution non régulière pour les deux autres orientations. Les évolutions montrent une décroissance durant les cinq premières heures (avant 12: 00) puis atteignent un maximum à 19: 00. Finalement, une nouvelle diminution de température apparaît qui se stabilise ensuite à 17 °C.

D'après les observations préliminaires expérimentales, nous avons remarqué que les

températures des surfaces intérieures qui se situent sur les murs exposés sont les plus inférieures. Ceci implique sans aucun doute, le précieux rôle de l'inertie thermique. Nous savons que la durée de la nuit durant l'hiver est d'environ 13 heures, elle est plus importante par rapport à la durée d'insolation. Ces conditions sont favorables pour absorber le froid la nuit. Mais le facteur influant est le matériau de construction qui est la pierre, elle a une haute capacité calorifique et un énorme pouvoir d'emmagasiner et de stockage du froid. Cette situation incite les surfaces intérieures à rester toujours froides malgré la présence des rayonnements solaires. La figure (4.12) donne un exemple qui montre l'influence de l'orientation sur les températures du mur Sud intérieur.

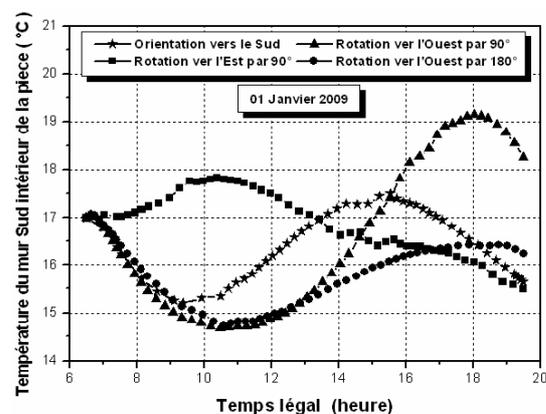


Fig.(4.12): Température du mur Sud intérieur de la Pièce pour différentes orientations, 01 Janvier 2009.

De même, la figure (4.13) prouve que le programme réalisé permet aussi de prédire les températures des surfaces extérieures exposées au soleil. Elle donne la possibilité de voir le comportement des températures de la paroi extérieure du mur Sud. On peut constater que l'énergie incidente sur la façade Sud varie selon l'orientation correspondante. La quantité absorbée de l'énergie solaire est la plus importante si l'habitat est orienté vers l'Est (le matin) et vers l'Ouest (le soir).

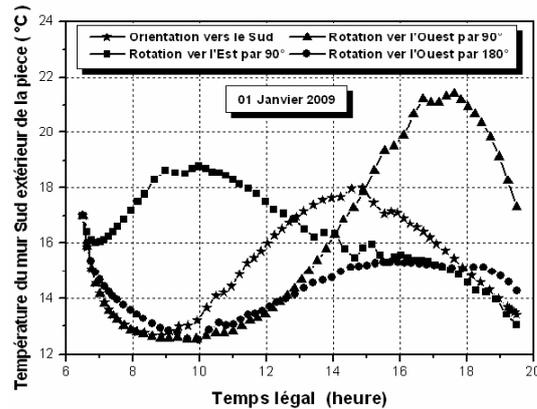


Fig.(4.13): Température du mur Sud extérieur de la Pièce pour différentes orientations, 01 Janvier 2009.

4.8 Conclusion

Les résultats de ce chapitre ont mis en évidence trois notions de la conception bioclimatique (l'orientation, l'isolation thermique et l'inertie thermique) qui ont un impact sur l'adaptation climatique de l'habitat contemporain. On peut conclure que:

La mesure d'amélioration la plus justifiée économiquement est l'isolation thermique.

Ces orientations ne sont jamais favorables, elles conduisent toujours à des surchauffes en été et à des déperditions en hiver. Leurs influences dépendent des planchers et des parois extérieurs à savoir les matériaux de construction, le niveau d'isolation et l'application des règles indissociables de la conception bioclimatique.

L'orientation d'une habitation bien isolée thermiquement n'influe pas considérablement sur la température intérieure.

L'inertie thermique de ces constructions peut donc générer de l'inconfort. Il s'avère qu'une bonne utilisation de l'inertie thermique de la pierre joue un rôle essentiel dans le confort thermique d'une habitation

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ces travaux permettent de montrer l'intérêt de l'utilisation d'une plateforme de simulation numérique dans l'étude du comportement énergétique d'un habitat situé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa. Nous avons étudié l'influence de l'isolation et de l'orientation et l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment sur les températures de l'ambiance intérieure. On peut conclure que:

- La mesure d'amélioration la plus justifiée économiquement est l'isolation thermique.
- Ces orientations ne sont jamais favorables, elles conduisent toujours à des surchauffes en été et à des déperditions en hiver. Leurs influences dépendent des planchers et des parois extérieurs à savoir les matériaux de construction, le niveau d'isolation et l'application des règles indissociables de la conception bioclimatique.
- L'orientation d'une habitation bien isolée thermiquement n'influe pas considérablement sur la température intérieure.
- L'inertie thermique de ces constructions peut donc générer de l'inconfort. Il s'avère qu'une bonne utilisation de l'inertie thermique de la pierre joue un rôle essentiel dans le confort thermique d'une habitation.
- Les approches adaptatives proposées ont été basées sur des constatations et des lois connues en thermique. Elles prouvent que l'enveloppe est, naturellement, le lieu privilégié des relations entre espaces intérieurs et extérieurs. Il s'agit, alors, de gérer simultanément le rôle que joue la paroi du bâtiment, et celui qu'elle assure comme élément de contrôle des échanges intérieurs/extérieurs. Dans ces études, la présente recherche consiste donc à montrer l'apport de ces éléments de conception bioclimatiques, en l'occurrence; l'orientation, l'isolation et l'inertie thermique du bâtiment.
- Comme élément acteur dans le confort des bâtiments, il faut réorganiser la relation entre l'architecture et son milieu, le confort thermique dans un bâtiment dépend principalement du comportement thermique de son enveloppe soumise aux contraintes climatiques. L'en-

veloppe échange perpétuellement des flux avec l'environnement extérieur et les ambiances intérieures.

Parmi les prolongements possibles de notre travail, nous citons à titre indicatif:

- Proposition d'autres études qui incitent à s'interroger à nouveau sur les motivations liées au choix de l'orientation de l'habitat selon les matériaux de construction utilisés (le parpaing, la brique creuse).

-L'étude de l'organisation intérieure et extérieure de l'habitat qui reflète l'importance accordée aux différents aspects de la vie en dégageant les aspects majeurs des transformations.

-La question de l'orientation de l'habitat mobile peut faire l'objet de nombreuses études par les professionnelles et les décideurs à Ghardaïa.

Nous souhaitons enfin, que ce travail puisse contribuer à sensibiliser davantage les étudiants sur l'intérêt de ce thème, et que notre modeste mémoire trouvera sa place dans les laboratoires de notre université

Bibliographie

- [1] L. Wang, J. Gwilliam and P. Jones, Case Study of Zero Energy House Design in UK, Energy and Buildings 41 (2009) 1215-1222.
- [2] 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.
- [3] A.F. Tzikopoulos, M.C. Karatza and J.A. Paravantis, Modeling Energy Efficiency of Bioclimatic Buildings, Energy and Buildings 37 (2005) 529-544.
- [4] F.F. Al-Ajmi and V.I. Hanby, Simulation of Energy Consumption for Kuwaiti Domestic Buildings, Energy and Buildings 36 (2004) 710-719.
- [5] E. Gratia and A.D. Herde, Greenhouse Effect in Double-Skin Facade, Energy and Buildings 39 (2007) 199-211.
- [6] N. Fezzioui¹, 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.
- [7] Z. Chelghoum et A. Belhamri, Habitat a Bas Profil Energétique, Revue des Energies Renouvelables, Journées de Thermique 2001, p 59 - 64.
- [8] E. Gratia and A.D. Herde, Design of Low Energy Office Buildings, Energy and Buildings 35 (2003) 473-491.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] B.Moujalled, Modélisation Dynamique du Confort Thermique dans les Bâtiments Naturellement Ventilés, Thèse de Doctorat en Génie Civil, L'Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 19 janvier 2007.
- [12] K .Benhalilou, Impact de la Végétation Grimpante Sur le Confort Hygrothermique Estival du Bâtiment Cas du Climat Semi aride, Thèse de Magistere en Architecture Bioclimatique, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [13] J. Demartini, La Thermique: Chaleur & Température, IUT de Nice Département Génie Electrique et Informatique Industrielle, 14 Septembre 2003.
- [14] J.L.Barras, Cours de Physique, Collège du Sud, Bulle, Avril 2001.
- [15] A. Bejan , A. D. Kraus,Heat Transfer Handbook ,Department of Mechanical Engineering, Duke University, Durham,North Carolina,Publié par John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey,2003.
- [16] D.Poulikakos, Advances in Heat Transfer, Academic Press, Inc, A Division of Harcourt Brace et Company,San Diego,California 1996.
- [17] G. Ritoux, Evaluation numérique des facteurs de forme, *Revue Physique, Appl*, 17, 1982,503-515.
- [18] J.F. Sacadura, Initiation aux Transferts Thermiques, Technique et documentation, Paris 1978, Chapitre 4, Transfert de chaleur par convection.
- [19] A.Ricaud, Gisement Solaire, Cythelia Sarl, Septembre 2009.

- [20] E.Torlaschi, Phénomènes Radiatifs dans L'atmosphère Terrestre, cours de Physique de L'atmosphère, 2003.
- [21] K. Scharmer , J. Greif, The European Solar Radiation Atlas, Vol,01,Fundamentals and Maps, Les Presses de l'École des Mines Paris, 2000.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] S.M.A. Bekkouche,Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen. , Mai 2009.
- [25] 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 Totalement Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, 11 N°3, 2008, 423 - 436.
- [26] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Conception et Validation d'un Programme Sous Excel Pour L'estimation du Rayonnement Solaire Direct en Algerie , Revue Internationale D'héliotechnique N°39 , 2009, 50-55.
- [27] 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.
- [28] B.Ould Bilal, V. Sambou, C. M. F. Kébé, M. Ndong, 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.

- [29] A.Moumni, 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.
- [30] M. Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, vol1 et 2: Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [31] F. Linke, Transmissions, Koeffizient and Trübungs faktor, Beiträge Zur Physik Der Atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 - 103, 1922.
- [32] R. Dogniaux, L'influence de L'estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur L'évaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair, Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N°20, 1984.
- [33] J. Remund, L.Wald, M.Lefevre, T. Ranchin and J. Page, in press, Worldwide Linke Turbidity Information, Proceedings of The ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19 June 2003.
- [34] A. Louche, G. Peri et M. Iqbal, An analysis of Linke Turbidity Factor, Solar Energy, Vol,37, N°6, p, 393 - 396, 1986.
- [35] L. Diabaté, J. Remund, L. Wald, Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa, Solar Energy, 75, 2003, 111-119.
- [36] F. Yettou , A. Malek , M. Haddadi, et A. Gama, Etude Comparative De Deux Modèles De Calcul du Rayonnement Solaire Par Ciel Clair en Algérie , Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 331 - 346.
- [37] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuisson and L. Wald, Converting a Successful Research Project Into a Sustainable Service, The Case of the Soda Web Service, Environmental Modelling a Software, Vol, 21, N°11, pp, 1555 - 1561, 2006.

- [38] M.M. Hadjiat, S.M.A. Bekkouche, M.R. Yaiche, M. Hamdani, Effet de l'Orientation sur la Température Intérieure d'une Pièce d'un Habitat Située a Ghardaïa, Revue Internationale d'Héliotechnique Energie - Environnement - N° 39 (2009) 8 - 13.
- [39] D.Kaoula, M. C. Lehtihet, Construire avec le Climat : Réflexion Sur les Outils D'architectures en Climat Méditerranéen/Cas de la Ville de Jijel, 1st International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 12-14, 2009.
- [40] J.M. Chasseriau, Conversion Thermique du Rayonnement Solaire, Ed. Dunod, France, 273 p, 1984.
- [41] D.Medjelekh, Impact de L'inertie Thermique sur le Confort Hygrothermique et la Consommation Energetique du Batiment, Memoire de Magister en Architecture Bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2006.
- [42] P Achard, R Gicquel, European Passive Solar Handbook, Basic Principles and Concepts for Passive Solar Architecture, Commission of the European Communities, 1986.
- [43] N. Chami, Evaluation de L'impact des Isolants Minces Réfléchissants dans le Bâtiment L'école Nationale Supérieure des Mines de paris, 19 octobre 2009.
- [44] A.liebard, A. DeHerde, Traite Archi Urba Bioclimatiques, E.d.observer ,2005.
- [45] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Réglementation Thermique 2000, Décret N° 2000-1153, 29,11 Novembre 2000.
- [46] Pierre Tittlein, Environnements de Simulation Adaptés à L'étude du Comportement Energétique des Bâtiments Basse Consommation, Thèse de Doctorat en Spécialité Génie Civil et Sciences de l'Habitat, Université de Savoie, 9 décembre 2008.
- [47] A.Chatelet, P. Fernandez, et P. Lavigne, Architecture climatique, Vol, 2, Aix-en-Provence, Edisud, p160, 1998.

- [48] C.A.Roulet, Qualités D'usage des Bâtiments et Contraintes Energétiques: Synergie ou Antagonisme, Revue Economique et Sociale, N°04, Décembre 2007.
- [49] N.Morel, E.Gnansounou, Énergétique du Bâtiment, Septembre 2008.
- [50] M. N. Assimakopoulou, Développement et Evaluation des Systèmes et Stratégies de Contrôle de Régulation d'un Vitrage Electrochromique pour des Applications de Bâtiment, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 2004.

Résumé :

Le confort thermique constitue actuellement un enjeu majeur dans le secteur du bâtiment tant pour la qualité des ambiances intérieures que pour les impacts énergétiques et environnementaux dont il est responsable. A travers ce mémoire, nous avons étudié l'influence de l'isolation, de l'orientation et de l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment sur les températures de l'ambiance intérieure. Pour atteindre notre objectif, nous avons mis en oeuvre une démarche méthodologique adaptée par un modèle numérique développé sous le code de calcul « MATLAB ». Les résultats du modèle testé ont été confrontés aux valeurs expérimentales, les modèles mathématiques sont validés expérimentalement. La fonction de ces modèles est de calculer les différentes températures délivrées sous l'effet des conditions climatiques et environnantes disponibles. La comparaison a permis de savoir que les résultats du modèle étaient dans l'ensemble satisfaisants. On peut conclure que: La mesure d'amélioration la plus justifiée économiquement est l'isolation thermique. L'orientation d'une habitation bien isolée thermiquement n'influe pas considérablement sur la température intérieure. L'inertie thermique de ces constructions peut donc générer de l'inconfort. Il s'avère qu'une bonne utilisation de l'inertie thermique de la pierre joue un rôle essentiel dans le confort thermique d'une habitation.

Mots clés: Température - Isolation Thermique - Orientation - Confort Thermique - Modèle Mathématique - Simulation Numérique.

Abstract:

Thermal comfort plays a major factor in building infrastructure sector. It has a big impact on building interior temperature as well as on energy balance and environment. In the current theses the influence of thermal isolation, building orientation and thermal inertia of building envelop on interior ambient temperatures have been studied. To meet our objective, a methodological procedure has been followed. It consists of elaboration of computing program written in MATLAB code to simulate the proposed mathematical model. The main objective of the proposed mathematical model is to compute different delivered temperatures under real climatic and environment conditions. Confrontation of the results found through simulation with those found experimentally shows a clear consistence. Thus the theoretical model is experimentally validated. It can be concluded that: The most effective measure to achieve a better results is thermal insulation. The orientation of thermally isolated building doesn't have a considerable impact on interior temperature. Thermal inertia of buildings may thus generate thermal comfort. It was revealed that an adequate use of stone thermal inertia is essential to achieve a better building thermal comfort.

Key Words: Temperature - Thermal Insulation - Orientation - Thermal Comfort - Mathematical Model - Numerical Simulation.

ملخص:

تلعب الرفاهية الحرارية حاليا قضية رئيسية في قطاع البناء والتشييد فيما يخص درجة الحرارة الداخلية للمبنى وذلك لأهميتها في مسابرة الطاقة والبيئة. من خلال هذه المذكرة، درسنا تأثير العزل الحراري الداخلي والتوجيه والسكون الحراري لفضاء عمراي على درجات الحرارة الداخلية بمحاكاة تأثير الوسط الخارجي. قمنا بتنفيذ منهجية عن طريق تكييف نموذج عددي بواسطة برنامج MATLAB. إن نتائج المحاكاة المتحصل عليها قد تم مقارنتها بالقيم المتحصل عليها تجريبيا من أجل تقييم ردود درجات الحرارة وذلك في إطار الظروف المناخية المحيطة. ويمكننا أن نستنتج مايلي: مدى الأهمية الاقتصادية لتحسين العزل الحراري. عدم تأثير التوجيه بالنسبة لمنزل معزول جيدا على درجات الحرارة. السكون الحراري لهذه النوعية من المباني يسبب عدم الرفاهية، مع العلم أن الاستعمال الجيد للسكون الحراري للحجارة يلعب دور أساسي في الرفاهية الحرارية للمنازل.

الكلمات المفتاحية: درجة الحرارة - العزل الحراري - التوجيه - السكون الحراري - نموذج رياضي - محاكاة عددية.