

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU



**FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

Mémoire

*En vue de l'obtention du diplôme de magister en
Génie mécanique*

Option thermo-fluides (Energétique)

Présenté par :

Farida SAM

Sur le thème :

**REHABILITATION THERMIQUE D'UN LOCAL DANS UNE ZONE ARIDE
-CAS DE GHARDAIA -**

Devant le jury composé de :

M ^f KESSAL Mohand	Professeur	UMB/Boumerdes	Président
M ^f DAHLI Mohamed	Maitre de conférences A	UMMTO	Rapporteur
M ^f AIT AIDER Aomar	Maitre de conférences A	UMMTO	Examineur
M ^f BOUTOUDJ Mohamed Saïd	Maitre de conférences A	UMMTO	Examineur
M ^f KOUSSA Mustapha	Chargé de recherche	CDER/Bouzareah	Invité

Soutenu le : 04/03/2012

AVANT PROPOS.....	iv
LISTE DE FIGURES ET TABLEAUX.....	vii
NOMENCLATURE.....	ix
RESUME.....	xiii
CHAPITRE INTRODUCTIF.....	1
PARTIE 1 : REPERES THEORIQUES.....	8
PREMIER CHAPITRE : CONFORT THERMIQUE OBJECTIF DE TOUTE CONCEPTION ARCHITECTURALE.....	9
Introduction.....	10
1.1. EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE.....	10
1.1.1. <i>Température opérative Top</i>	10
1.1.2. <i>Utilisation du diagramme psychrométrique</i>	11
1.2. LES FACTEURS AGISSANT SUR LE CONFORT THERMIQUE.....	11
1.2.1. <i>L'orientation</i>	11
1.2.2. <i>La ventilation naturelle</i>	12
1.2.3. <i>Dimension des ouvertures</i>	13
1.2.4. <i>La forme et compacité</i>	13
1.2.5. <i>La couleur</i>	14
1.2.6. <i>Protection solaire et vents dominants</i>	15
1.2.7. <i>Isolation thermique</i>	16
1.2.8. <i>Inertie thermique</i>	20
Conclusion.....	22
PARTIE 2 : CAS D'ETUDES.....	23
DEUSIEME CHAPITRE : PRESENTATION DU PROJET ET SOLUTION BIOCLIMATIQUE ADOPTEE (ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE).....	24
Introduction.....	25
2.1. PRESENTATION DU PROJET.....	26
2.1.1. <i>Situation du projet</i>	26
2.1.2. <i>Diagnostic et instrumentation de mesure</i>	26

2.1.2.1. Commentaire sur les résultats de températures mesurés avant réhabilitation.....	27
2.1.2.2. Résultats de températures mesurés avant réhabilitation.....	28
2.2. APPLICATION A LA METHODE PSYCHROMETRIQUE.....	29
2.2.1. <i>Interprétation du diagramme psychrométrique.....</i>	29
2.2.2. <i>Propositions bioclimatiques.....</i>	30
2.2.3. <i>Solutions adoptées.....</i>	30
2.3. REHABILITATION DU LOCAL.....	31
2.3.1. <i>Travaux de réalisation sur terrains.....</i>	31
2.3.2. <i>Instrumentation de mesure.....</i>	32
2.3.2.1. Commentaire sur les résultats de températures mesurés après réhabilitation.....	33
2.3.2.2. Résultats de températures mesurés avant et après réhabilitation.....	36
2.4. ETUDE DE L'EVOLUTION DE TEMPERATUE AVANT ET APRES REHABILITATION POUR LES MOIS LES PLUS FROIDES DE L'ANNEE A DIFFERENTES SOURCES DE CHALEUR CONVENTIONNELLE.....	39
2.4.1. <i>Modèle mathématique adopté.....</i>	39
2.4.1.1. Bilan thermique en régime quasi-permanent.....	40
2.4.1.2. Bilan thermique en régime transitoire.....	42
2.4.2. <i>Commentaire sur les résultats de températures calculés avant et après réhabilitation....</i>	43
2.4.3. <i>Résultats de températures calculés pour une période froide de l'année.....</i>	44
2.4.4. <i>Valeurs de déperditions thermiques avant et après réhabilitation.....</i>	49
Conclusion.....	49
TROISIEME CHAPITRE : INTEGRATION D UNE INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE POUR LE CHAUFFAGE DU LOCAL (DIMENSIONNEMENT ET CALCUL DES PERTES THERMIQUES DE L INSTALLATION SOLAIRE – CALCUL DE LA TEMPERATURE DE CONFORT EN REGIME TRANSITOIRE SUIVANT LA METHODE NODALE.....	50
Introduction.....	51
3.1. ETUDE DE L'INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE.....	52
3.1.1. <i>Dimensionnement de l'installation solaire.....</i>	52
3.1.1.1. Méthode de degré-jours.....	52
3.1.1.2. Méthode de f-Chart.....	52
3.1.2. <i>Le gisement solaire.....</i>	54
3.1.3. <i>Application.....</i>	55
3.1.3.1. Les différents organes de l'installation lors de dimensionnement.....	55

3.1.3.2. Allure de dimensionnement de l'installation.....	55
3.1.3.3. Présentation générale de l'installation après dimensionnement	56
3.1.4. Bilan de l'installation.....	56
3.1.4.1. Bilan thermique de la plaque absorbante.....	56
3.1.4.2. Bilan thermique de la cuve de stockage.....	60
3.1.4.3. Etude de l'échangeur de chaleur.....	63
3.1.4.4. Bilan thermique du radiateur.....	64
3.1.2.5. Commentaires sur les résultats trouvés.....	65
3.1.2.6. Résultats de l'installation solaire.....	66
3.2. METHODE NODALE.....	69
3.2.1. Description de la méthode retenue.....	69
3.2.2. Mise en équation.....	69
3.2.2.1. Bilan d'énergie du local.....	69
3.2.2.2. Développement de l'équation générale dans une paroi.....	69
3.2.3. Analyse des différents modes de transfert.....	70
3.2.3.1. Echange radiatif.....	70
3.2.3.2. Echange convectif.....	72
3.2.3.3. Echange conductif.....	75
3.2.4. Application à la méthode nodale.....	75
3.2.4.1. Discrétisation.....	75
3.2.4.2. Système d'équation dans le local.....	76
3.2.5. Résolution numérique.....	79
3.2.5.1. Commentaire sur les résultats calculés.....	80
3.2.5.2. Résultats de températures calculés	81
Conclusion.....	82
CONCLUSION GENERALE.....	84
BIBLIOGRAPHIE.....	88
ANNEXE :.....	94
ANNEXE 1: FORMULE D'IRRADIATION GLOBALE SUR LE PLAN INCLINE.....	95
ANNEXE 2 : COEFFICIENT DE PERTE GLOBALE U_L DU CAPTEUR.....	96

Avant-propos

Ce mémoire soutenu à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou (département de Génie Mécanique), a été élaboré à partir d'une recherche bibliographique diversifiée et multidisciplinaire traitant du domaine de la thermique de l'habitat et à travers une partie d'un PNR (Projet National de Recherche) effectué à l'URAER¹. Les travaux de réalisation sur terrain ont été soutenus principalement par le CDER², afin de réaliser une maison d'hôte assurant un certain confort pour l'habitant. Notant, aussi, que le sujet traité, ne constitue qu'une suite et une continuité d'un thème déjà développé portant sur la modélisation solaire thermique d'une habitation. Cette expérience, nous a passionné et encouragé afin d'élaborer un sujet qui va dans le même sens, mais avec plus de détails et de recherche sur le volet traitant de la thermique de l'habitat.

Pour l'élaboration de ce mémoire, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail ainsi qu'à la réussite de cette formation. Les remerciements s'adressent à :

Monsieur Mohamed DAHLI, maître de conférences à l'université de Tizi-Ouzou, qui, en tant que directeur du mémoire, pour son encadrement et le suivi du sujet. Son orientation m'a beaucoup servi à mener à bien ce travail.

Monsieur Mustapha KOUSSA, chercheur au sein du CDER, qui m'a permis de travailler et de porter ma contribution sur une partie de son travail de PNR, et qui fait objet de mon travail de recherche. Il est pour beaucoup dans mon expérience sur terrain ainsi que la programmation. Son exigence, son expérience et sa rigueur, m'ont beaucoup aidé afin de développer un travail bien fini et qui me servira à l'avenir.

Monsieur Maouf BELHAMEL directeur général du CDER, de m'avoir encouragé depuis mes débuts en tant qu'employée au niveau du centre, et à effectuer des travaux traitant de la bioclimatique, afin d'approfondir mes connaissances en thermique de l'habitat.

Madame Samira Kerdjou CHADER, directrice de l'URAER, qui m'a bien encouragée afin de bien finaliser mon mémoire et ce juste après son installation au sein de l'unité.

Mes enseignants en post-graduation du département de Génie Mécanique (énergétique), Notamment Monsieur Saïd MAKHLOUF, qui est toujours soucieux de la réussite des ses étudiants. Sa conscience professionnelle et son inquiétude m'ont permis d'avancer et de m'intéresser de plus à mes travaux de recherche. Ainsi, Monsieur Nacer LAMROUS, qui m'a beaucoup appris durant son encadrement en graduation.

¹ URAER : Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable sise à Ghardaïa

² CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables sise à Alger/Bouzareah

Monsieur Arezki DJEBBAR, chef de département de Génie-mécanique, de m'avoir aidé à surmonter quelques difficultés administratives. Ainsi, à toute l'équipe chargée de poste graduation.

Tous le personnel de la station météorologique de Ghardaïa, en particulier Monsieur Abdelkader SALMI, premier responsable, ainsi que Messieurs Nourddine NAGNAGH et Mohamed DJAB ELLAH, chefs de sections, de m'avoir fourni toutes les données nécessaires pour mon travail. Je les remercie aussi pour l'accueil qu'ils me réservent à chaque sollicitation.

L'équipe du personnel de l'OPVM³, de m'avoir fourni de la documentation et cartes sur l'urbanisme et la construction de la région. Aussi, le personnel des forêts d'El Atteuf de m'avoir donné des connaissances sur les variétés de végétation adaptées à la région. Ainsi, le personnel du CNERIB⁴, pour les renseignements concernant les caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux de construction utilisés dans cette étude.

Tous les consultants et internautes rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Monsieur Mohand KESSAL, Professeur à l'université de Boumerdes, Messieurs Aomar AIT AIDER et Mohamed Saïd BOUTOUDJ, Maitres de conférences à l'université de Tizi-Ouzou, qui ont eu la gentillesse de lire et corriger ce travail, en espérant que leurs remarques, orientations et conseils me seront utiles pour la continuité de mon processus de formation.

Ma famille, en particulier ma mère, pour leurs encouragements et leur patience. Enfin, mes collègues de travail de l'URAER et du CDER, pour leurs soutiens, ainsi que mes amis (es), qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Ceux que j'ai oublié de citer sachent combien je leur serais toujours reconnaissante.

Merci à tous et à toutes.

³ OPVM : Office de Protection de la Vallée du M'Zab de Ghardaïa

⁴ CNERIB : Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiments sise à Alger

Liste des figures, photos et tableaux

Numérotation	Figures
Figure 2.1	Evolution de la température extérieure avec l'humidité relative avant réhabilitation pour la saison d'été
Figure 2.2	Evolution de la température intérieure avec la température extérieure avant réhabilitation pour la saison d'été
Figure 2.3	Evolution de la température intérieure du local avant réhabilitation du 23-25/07/2003
Figure 2.4	Evolution de la température extérieure avec l'humidité relative pour la saison d'hiver
Figure 2.5	Evolution de la température intérieure avec la température extérieure avant réhabilitation pour la saison d'hiver
Figure 2.6	Evolution de la température intérieure du local avant réhabilitation du 26-29/12/ 2003
Figure 2.7	Résultats de l'application au diagramme psychrométrique
Figure 2.8	Profil de température intérieure avec la température extérieure après isolation du 22/07/2004
Figure 2.9	Profil de température intérieure avec la température extérieure après isolation du 03/07/2008
Figure 2.10	Profil de température intérieure avec la température extérieure du studio isolé et celui accolé non isolé du 23/07/2004
Figure 2.11	Comparaison de la température de surface de toiture entre studio isolé et celui accolé non isolé du 23/07/2005
Figure 2.12	Evolution de la température intérieure du local isolé et celui accolé avec la température extérieure du 28/06/2004
Figure 2.13	Evolution de la température des différentes parois d studio (murs, toiture et fenêtre) avec la température extérieure du 26/06/2004.
Figure 2.14	Evolution de température à l'intérieure du mur ouest du local isolé des trois couches en : carreau de plâtre, polystyrène et la pierre du 26/05/2004
Figure 2.15	Evolution de la température à l'intérieure de la structure du mur ouest au local non isolé du 26/05/2005
Figure 2.16	Décalage horaire enregistré entre la surface extérieure et la surface intérieure au mur ouest du studio accolé non isolé du 23/07/2005
Figure 2.17	Décalage horaire enregistré entre la surface extérieure et la surface intérieure au mur ouest du studio isolé du 23/07/2005
Figure 2.18	Décalage horaire enregistré entre l'ambiance extérieure et intérieure du local isolé du 27/06/2005
Figure 2.19	Comparaison du profil de température ambiante intérieure après isolation avec le profil de température intérieure du local accolé non isolé de la journée 11/01/2005
Figure 2.20	Comparaison du profil de température intérieure au mur ouest après isolation avec le profil de température du mur ouest du local accolé non isolé du 06/01/2006
Figure 2.21	Comparaison de la température de surface intérieure à la toiture avant et après isolation du local accolé du 07/01/2006
Figure 2.22	Décalage horaire et profil de température intérieure après isolation avec la température extérieure du 12/02/2006
Figure 2.23	Evolution de température extérieure hivernale de l'année 2006
Figure 2.24	Evolution de température ambiante intérieure Tai avant et après isolation pour une source de chaleur de 500Watt.
Figure 2.25	Evolution de température ambiante intérieure Tai après isolation pour une source de chaleur de 2000Watt.
Figure 2.26	Evolution de température Tai après isolation sans et avec étanchéité pour une source de chaleur de 1500Watt
Figure 2.27	Evolution de température extérieure hivernale de l'année 2006

Figure 2.28	<i>Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation pour une source de chaleur de 1500Watt</i>
Figure 2.29	<i>Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation pour une source de chaleur de 2000Watt sans étanchéité</i>
Figure 2.30	<i>Evolution de température extérieure hivernale de l'année 2005</i>
Figure 2.31	<i>Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation sur un pas de 5 minutes pour une source de chaleur de 500Watt</i>
Figure 2.32	<i>Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation sur un pas de 5 minutes pour une source de chaleur de 2000Watt</i>
Figure 2.33	<i>Profil de température de la porte intérieure avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.34	<i>Profil de température de surface intérieure de la porte extérieure avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.35	<i>Profil de température de surface intérieure de la fenêtre ouest avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.36	<i>Profil de température de surface intérieure de la fenêtre Est avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.37	<i>Profil de température de surface intérieure du mur ouest avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.38	<i>Profil de température de surface intérieure du mur nord avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.39	<i>Profil de température de surface intérieure du mur intérieure avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.40	<i>Profil de température de surface intérieure du mur sud avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.41	<i>Profil de température de surface intérieure de la toiture avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.42	<i>Profil de température du plancher bas avec la température extérieure avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.43	<i>Profil de température de température de l'ambiance intérieure avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 2.44	<i>Profil de température du local non chauffé avec la température extérieure pour une source de 2000W</i>
Figure 3.1	<i>Appareil de type « Syntracker » mesurant l'irradiation diffus, direct et global</i>
Figure 3.2	<i>Schéma de l'installation solaire thermique</i>
Figure 3.3	<i>Schéma présentant la caractérisation de l'installation solaire thermique</i>
Figure 3.4	<i>Flux d'énergie dans un capteur plan</i>
Figure 3.5	<i>Schéma de la cuve de stockage</i>
Figure 3.6	<i>Schéma analogique de la cuve de stockage</i>
Figure 3.7	<i>Irradiation solaire calculé sur quatre mois (Décembre-Janvier-Février et mi Mars) de l'an 2005</i>
Figure 3.8	<i>Température de stockage et de la plaque calculées sur quatre mois avec la température extérieure (le débit est pris égale à 0.001kg/s à l'entrée)</i>
Figure 3.9	<i>Température de stockage avec la température extérieure pour un mois de Février (le débit est pris égale à 0.001kg/s à l'entrée)</i>
Figure 3.10	<i>Evolution de la température de l'installation (plaque et réservoir de stockage d'eau), de l'énergie utile et le cumul en énergie solaire et énergie stockée</i>
Figure 3.11	<i>Evolution de la température de la plaque avec la valeur mesurée pour trois journées du mois de Février</i>
Figure 3.12	<i>Evolution de la température de la plaque avec la valeur mesurée pour trois journées du mois de Février</i>

<i>Figure 3.13</i>	<i>Profil de température calculé de l'entrée et de sortie de l'air et de l'eau du radiateur avec l'installation solaire</i>
<i>Figure 3.14</i>	<i>Présentation de discrétisation selon la méthode Nodale (exemple sur le mur ouest et toiture)</i>
<i>Figure 3.15</i>	<i>Profil de température de confort calculé sur 12 jours avec une source de chaleur de 500Watt</i>
<i>Figure 3.16</i>	<i>Profil de température de toutes les façades du local calculé sur 12 jours avec une source de chaleur mesuré à 500Watt</i>
<i>Figure 3.17</i>	<i>Profil de température des ouvrants et du local non chauffé sur 12 jours avec une source de chaleur mesuré à 500Watt</i>

Numérotation	Photos
<i>Photo 2.1</i>	<i>Présentation du local d'étude avant réhabilitation</i>
<i>Photo 2.2</i>	<i>Système d'acquisition de données installé à l'intérieur du local</i>
<i>Photo 2.3</i>	<i>Isolation extérieure de la toiture</i>
<i>Photo 2.4</i>	<i>Isolation extérieure du mur ouest</i>
<i>Photo 2.5</i>	<i>Système de pergolas</i>
<i>Photo 2.6</i>	<i>Ombfrage et végétation</i>
<i>Photo 2.7</i>	<i>Emplacement des thermocouples à l'intérieur du local d'études</i>
<i>Photo 2.8</i>	<i>Emplacement des thermocouples à l'extérieur du local d'études</i>

Numérotation	Tableaux
<i>Tableau 1.1</i>	<i>Couleur de revêtement</i>
<i>Tableau 2.1</i>	<i>Propositions climatiques données par application au diagramme psychrométrique</i>
<i>Tableau 2.2</i>	<i>Valeurs de déperditions thermiques avant et après réhabilitation</i>

Nomenclature

Variables (caractères usuels)	Description	Unité
T_{ri}	Température résultante (ou de confort)	°C
T_{ai}	Température ambiance intérieure	°C
T_{rm}	Température moyenne émise par l'environnement	°C
T_i	Température intérieure de la paroi	°C
S	Surface de la paroi d'un local	m ²
K	Coefficient de conductivité thermique	W/m ² °C
h_e, h_i	Coefficient d'échange superficiel externe et interne	W/m ² °C
K_{op}, K_v	Coefficient d'échange des parois opaques et vitrages	W/m ² °C
k	Coefficient d'échange de transmission linéique	W/m°C
e	Épaisseur de la paroi ou d'un matériau	m
q_e, q_i, q_v	Débit d'air entrant, par infiltration et par ventilation	m ³ /h
Q_c	Déperdition surfacique par transmission	Watt
Q_l	Déperdition linéique	Watt
Q_r	Déperdition thermique par renouvellement d'air	Watt
a	Diffusivité thermique	m ² /s
b	Effusivité thermique	(W/°Cm ²) ^{1/2}
C	Capacité thermique d'un matériau	kJ/kg
C_p	Chaleur spécifique d'un matériau	Wh/kg°C
T_e	Température ambiante extérieure	°C
H_r	Humidité relative	%
T_{LNC}	Température du local non chauffé (WWC)	°C
T_{2L}	Température du local adjacent	°C
Q_m	Déperditions par transmission à travers les murs, plafond et sol	Watt
Q_f, Q_p	Déperditions par transmission à travers les fenêtres et portes	Watt
Q_{inf}	Déperditions par infiltration	Watt
C_{air}	Capacité thermique de l'air	Wh/m ³ °C
Q_i^{cd}	Puissance conductive de la paroi à travers les murs, plafond, le sol et ouvrant	W/m ²
Q_i^c, Q_{air}^c	Puissance convective de la paroi et de l'air intérieur au local	W/m ²
Q_i^r	Puissance radiative échangée entre différentes parois et absorbée par i	W/m ²
Q_{air}^r	Puissance radiative échangée entre les différentes parois	W/m ²
C_i	Capacité thermique de la paroi	Wh/m ³ °C
V_i, V_{air}	Volume de la paroi et de l'air du local	m ³
t	Temps	heure
Q_{Ti}, Q_{Tr}	Déperdition thermique avant et après réhabilitation	W/°C
J°	Degré-jours	°C
T_b	Température ambiante de base (18°C)	°C
Q	Déperditions thermique totale	W/°C
L	Charge de l'habitation (besoins thermiques)	W ou Joule

A_c	Surface de capteur solaire	m^2
F_R	Facteur de conductance de capteur thermique	-
U_L	Coefficient de perte globale d'un capteur thermique	$W/m^2\text{°C}$
T_{ref}	Température empirique de référence prise à (100°C)	$^{\circ}C$
G_n	Irradiation globale totale sur le plan incliné	J/m^2
N	Nombre de jours dans le mois	-
F'_R	Facteur de l'efficacité d'échangeur de chaleur (capteur-réservoir)	-
\dot{m}_v	Débit volumique du fluide caloporteur	l/s
F'	Facteur d'efficacité du capteur (paramètre géométrique)	-
V, V_s	Volume réel et volume standard de stockage (=75l/m ²)	l/m^2
F	Fraction de charge de chauffage annuelle couverte	%
f	Fraction de charge de chauffage totale mensuelle	%
U_L	Coefficient d'échange global du capteur thermique	$W/m^2\text{°C}$
U_{av}, U_{ar}	Coefficient d'échanges avant et arrière au capteur thermique	$W/m^2\text{°C}$
G	Intensité du flux solaire incident	W/m^2
T_{pm}	Température moyenne de la plaque absorbante	$^{\circ}C$
T_{fe}, T_{fs}	Température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur	$^{\circ}C$
\dot{m}	Débit massique du fluide caloporteur	Kg/h
K_p	Conductivité thermique de l'absorbant	$w/m^2\text{°C}$
e_p	Epaisseur de la plaque absorbante	m
F_a	Efficacité de l'ailette	-
ei	Epaisseur de l'isolant au capteur solaire thermique	m
A_{lat}	Surface latérale du capteur	m^2
Qu	Energie utile dans l'échangeur de chaleur (fluide entrant et sortant)	Joule
Q_t	Energie produite dans le réservoir	Watt
T_s	Température du stockage (réservoir d'eau)	$^{\circ}C$
R_{th}	Résistance thermique du stockage entre l'ambiance et le fluide	$m^2\text{°C}/W$
R_{thr}	Résistance thermique radiale du réservoir d'eau	$m^2\text{°C}/W$
R_{thc}	Résistance thermique sur les cotés du réservoir	$m^2\text{°C}/W$
R_{th1}	Résistance thermique de la cuve de stockage	$m^2\text{°C}/W$
R_{th2}	Résistance thermique de la virole du réservoir	$m^2\text{°C}/W$
R_{th3}	Résistance thermique de l'isolant dans la cuve de stockage	$m^2\text{°C}/W$
R_{th4}	Résistance thermique entre l'isolant et la tôle	$m^2\text{°C}/W$
I_{Grf}	Flux solaire global incident sur la surface i d'une paroi	Watt
$Q_i^{re} (Q_{s,i}^r, Q_{c,i}^r)$	Puissance radiative par infrarouge entre paroi-voûte céleste et le sol	W/m^2
Q_i^r	Puissance radiative transmis par infrarouge entre les différentes parois	W/m^2
$Q_{ae,i}^c$	Puissance convective à l'extérieur du mur	W/m^2
$Q_{ai,i}^c$	Puissance convective à l'intérieur du mur	W/m^2
$Q_{i,i+1,i-1}^{cd}$	Puissance conductive à l'intérieur du mur (entre deux couches)	W/m^2

Q_G	Puissance radiative du rayonnement de courtes longueurs d'onde	W/m ²
k_i	Coefficient de conductivité thermique entre deux couches de la paroi	W/m ² °C
$h_{ai,i}^c$	Coefficient convectif entre l'ambiance intérieure et la paroi intérieure	W/m ² °C
$h_{ae,i}^c$	Coefficient convectif entre l'ambiance extérieure et la paroi extérieure	W/m ² °C
$h_{i,j}^r$	Coefficient d'échange radiatif entre les parois d'indice i et j	W/m ² °C
$h_{c,i}^r$	Coefficient d'échange radiatif entre la paroi d'indice i et le ciel	W/m ² °C
$h_{s,i}^r$	Coefficient d'échange radiatif entre la paroi d'indice i et le sol extérieur	W/m ² °C
Q_c^r	Rayonnement absorbé directement par la paroi i provenant du ciel	Watt
Q_s^r	Rayonnement absorbé directement par la paroi i provenant du sol	Watt
$F_{i,c}$	Facteur de forme entre la paroi i et le ciel	-
$F_{i,s}$	Facteur de forme entre la paroi i et le sol	-
\hat{F}_{ij}	Facteur de forme d'une enceinte fermée	-
T_{ae}	Température de l'air extérieur	°C
T_{ciel}, T_{sol}	Température du ciel et du sol	°C
$C_r (\rho_r V_r C_p)$	Capacité thermique du radiateur	Wh/m ³ °C
T_r	Température du radiateur	°C
T_{ee}, T_{se}	Température de l'entrée et de sortie de l'eau dans le capteur	°C
T_{ea}, T_{sa}	Température de l'entrée et de sortie de l'air dans le radiateur	°C
C_{min}, C_{max}	Plus faible et plus grande capacités calorifiques horaires	Wh/m ³ °C
T_{eq}	Température d'équilibre à la paroi extérieure du local	°C

Variables (caractères grecs)	Description	Unité
α	Albédo du site	0.28
θ	Angle d'incidence du rayonnement direct par rapport à la normale	degrés
β	Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale	degrés
ϕ	Latitude du lieu	degrés
γ	Orientation (0 pour plein sud, négatif pour l'est)	degrés
θ_z	Angle Zénithale	degrés
λ	Coefficient de conductivité thermique d'un matériau	W/m°C
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
θ_{mi}	Température moyenne de la paroi de surface S	°C
θ_i	Température intérieure de chaque paroi de surface S	°C
$(\tau\alpha)$	Coefficient de transmittivité et d'absorptivité produit par le capteur	-
ϵ_L	Facteur d'efficacité d'échangeur de chaleur eau-air	-
Φ_u	Flux utile transmis par le capteur	Watt
Φ_s	Flux d'énergie solaire incident du capteur plan	Watt
Φ_a, Φ_r	Flux d'énergie absorbé et réfléchi par le capteur	Watt
Φ_{ar}, Φ_{av}	Flux d'énergie arrière et avant transmis par le capteur	Watt
$a (\tau \alpha)$	Coefficient qui dépend de l'angle d'incidence i	-
α	Transparence de la couverture transparente	-

τ	Coefficient d'absorption	-
η_c	Rendement instantané du capteur	%
$\lambda_p, \lambda_f, \lambda_i$	Conductivité thermique de l'absorbeur, de l'isolant et du fluide	W/m°C
μ_p	Viscosité à la température moyenne du fluide	(pa.s).
μ_a	Viscosité à la température des parois	(pa.s).
Φ_{av}	Pertes globale avant	Watt
$\varepsilon, \varepsilon_v$	Facteur d'émission de l'absorbeur et du vitrage	-
ε_r	Emissivité du radiateur	0.3

Groupements sans dimension (usuels)	Description
Nu	Nombre de Nusselt
Re	Nombre de Reynolds
Ra	Nombre de Rayleigh
Pr	Nombre de Prandtl
Gr	Nombre de Grashof

constantes	Description
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)
C_p	chaleur spécifique de l'air (1007 J/kg/K à 300 K)
g	accélération universelle (9.8 m.s^{-2})
ρ	masse volumique de l'air (1.177 kg/m^3 à 300 K)
μ	viscosité dynamique de l'air ($1.85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m/s}$ à 300K)
λ	conductivité de l'air (0.026 W/m/K à 300K)

Indices usuels	Description
i	Indice des nœuds entre les couches de la paroi du local
j	Indice des parois, toitures et ouvrants
k	Indice sur les différents nœuds et couches adjacents à chaque paroi

RESUME

L'habitat contemporain en Algérie ne répond pas aux exigences de confort en général et thermique en particulier. Ce constat est renforcé par la non prise en charge, dans la conception de départ, de plusieurs critères à savoir, une conception architecturale qui s'adapte au climat, une isolation thermique de l'enveloppe extérieure du bâtiment et enfin une inertie thermique stabilisatrice de l'ambiance intérieure au bâtiment.

La région de Ghardaïa se caractérise par un climat chaud et sec, et une amplitude thermique diurne très importante. En effet, les températures maximales peuvent atteindre 50°C le jour, pour l'amplitude diurne, elle avoisine 15°C. Ces conditions climatiques favorisent à leur tour l'inconfort et leur prise en compte dans la conception architecturale de départ est plus que souhaitable afin d'assurer non seulement un confort thermique aux occupants mais également d'éviter toute opération de réhabilitation thermique souvent très délicate et coûteuse.

Notre travail de recherche, vient s'inscrire dans une optique de réhabilitation thermique d'un local d'habitation dans la région de Ghardaïa afin d'assurer un certain confort thermique. Des principes de conception architecturale bioclimatique et d'isolation thermique de l'enveloppe seront appliqués. A cela s'ajoute pour la période la plus froide de l'année une intégration d'une installation solaire sous forme de capteurs plans à effet de serre.

Mots-clés : habitat, confort thermique, Ghardaïa, architecture bioclimatique, installation solaire.

ABSTRACT

In Algeria, the contemporary habitation does almost not answer to the comfort demand, in particular the thermal factor. This observation is reinforced by the unsupported, in the original design, of several criteria's, namely: An architectural design which adapts to the climate, a thermal isolation of the building external envelope and stabilizing thermal inertia of the internal building ambiance.

Ghardaïa region is characterized by hot, dry climate, and very large diurnal thermal amplitude. In fact, the maximum temperatures may be reaching the 50°C, for the diurnal amplitude is around 15°C. These climate conditions favorite the uncomforted buildings, then it will be more adopted in the architectural start design within the goal to insure not only the thermal comfort but avoid also any thermal rehabilitation operation that may often be very cost and delicate.

This work focuses on thermal rehabilitation of a building located in Ghardaïa region for the purpose to provide a certain thermal comfort. Principles of bio-climatic architectural design and thermal insulation of the building envelope have been applied. A addition, thermal solar installation under greenhouse plate collectors has been integrated during cold seasons of the year.

Keywords: habitation, thermal comfort, Ghardaïa, bio-climatic architectural, thermal solar installation.

CHAPITRE INTRODUCTIF

1. Introduction générale

La réhabilitation thermique, consiste principalement à améliorer le confort thermique par la réduction des pertes thermiques et des apports solaires, ainsi que l'accroissement du rendement énergétique. Elle est définie par la rénovation de l'existant et se fait selon le cas et le besoin. Il s'agit en fait de concilier les éléments de structure du bâti ancien et les matériaux de base avec les techniques actuelles. Toutefois, un diagnostic et une étude de faisabilité sur les structures de l'habitation est nécessaire et ce suivant la pratique à mettre en œuvre avant la réalisation. La réhabilitation thermique dans l'habitat présente donc une solution intéressante qui répond à l'exigence du confort avec une consommation modérée et rationnelle en énergie. Sachant que le secteur de l'habitat est doublement concerné par le réchauffement de la planète; ainsi par l'utilisation accrue de système de chauffage et de climatisation, cela peut engendrer des conséquences importantes sur l'environnement sous forme de rejets polluants mais aussi sur le climat urbain. A cet effet, il est souhaitable de trouver un compromis entre le confort, l'économie d'énergie et l'environnement. Par conséquent, les solutions doivent être en conformité avec les exigences de la réglementation thermique qui répond au respect de l'environnement puisque relevant d'une question pertinente et sensible à l'échelle planétaire (le changement climatique et l'effet de serre impose une autre vision de voir et une autre façon de faire).

Le climat constitue un des facteurs indéniable et inéluctable dans l'étude de la réhabilitation thermique du bâtiment, car il existe une approche de conception thermique appropriée pour chaque type de climat. Par conséquent, il est nécessaire de classer le projet d'étude dans un type climatique distingué et approprié à la région. Toutefois, le climat de l'Algérie est de type méditerranéen (continental, maritime et montagnoux) au Nord du pays, et sec et chaud (désertique) dans le sud. La région de Ghardaïa, lieu d'implantation de notre projet d'étude, se situe dans l'une des zones du sud avec un climat saharien.

La construction ancienne à base de matériaux locaux est adaptée à l'environnement climatique et économique quoi quelle fût artisanale. Par les vieilles recettes traditionnelles, les anciens bâtisseurs savaient utiliser au mieux les données climatiques (protection au vent, ouverture au sud, atténuation du gradient thermique par l'inertie des matériaux, ombrage par des systèmes d'arcades, l'utilisation des couleurs claires, etc.). Actuellement, la construction dite moderne a pris le pas sur cette architecture ancestrale saine et économe, alors qu'il suffit de l'adapter en apportant plus de confort thermique. Des techniques scientifiques actuelles

peuvent être utilisées pour restaurer les vieilles maisons ou pour la réalisation des maisons bioclimatiques inspirées des modèles anciens. Concernant le choix du matériau de construction, le bâtisseur de la région de Ghardaïa adopte la construction en pierre, car elle permet une construction solide, durable et plus confortable. Autrefois, le liant est généralement mélangé avec de la paille, les feuilles et les dérivés de palmier et du fumier, pour la solidité, la cohésion et aussi pour l'isolation thermique.

Notre étude, s'inspire du savoir faire local. Le confort thermique est assuré en procédant à l'isolation des murs et toiture, à l'étanchéité des ouvrants et par le choix de type d'installation de chauffage et de climatisation. Et, dans le but d'avoir un meilleur confort thermique, l'isolation de l'extérieure est mieux adaptée, car non seulement elle offre une meilleure performance énergétique (minimise mieux les déperditions en hiver et les apports solaire en été), mais permet aussi d'éviter les ponts thermiques et de gagner de l'espace puisque le volume intérieur reste inchangé. Dans le cas des surchauffes, les protections solaires sont assurées par des systèmes d'arcades, de pergolas, de la végétation et l'utilisation de la couleur claire principalement sur la toiture. Il s'agit finalement d'une architecture bioclimatique dont on a suggéré une amélioration du point de vue énergétique avec une intégration d'un système actif par l'utilisation des capteurs solaire profitant ainsi du potentiel solaire considérable.

De part sa position géographique, et de sa superficie qui s'étend à 2 381 741 Km², l'Algérie dispose d'un gisement solaire exceptionnellement élevé. La moyenne annuelle d'insolation dépasse les 2000 heures pour atteindre près 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara [1]. La moyenne en éclairement solaire est de 6 kWh/m² dans le grand sud et entre 4 à 5 kWh/m² dans les autres régions. L'Algérie est constituée par des quatre cinquième du territoire par des zones arides et semi-arides. Ghardaïa est une région aride située à 600 Km de la capitale Alger. Le recours à l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable dans les zones arides à forts taux d'ensoleillement, et avec une construction moderne, confortable dans le cadre de la préservation de l'environnement et dans le respect du cachet architectural, contribuera à stabiliser les conditions climatiques. L'énergie solaire constitue donc une solution séduisante, puisqu'elle est aussi inépuisable, non polluante et gratuite, pour peu qu'on puisse la capter et surtout la stocker. La condition première pour une utilisation efficace de ce dispositif, est de pouvoir optimiser l'habitat dans lequel sont intégrés ces systèmes, concernant soit les besoins en chauffage, en conditionnement de l'air ou encore en éclairement. Ceci ne peut se faire que par un choix judicieux de plusieurs paramètres en l'occurrence le choix des matériaux de construction, l'isolation, l'ombrage, création d'espaces

verts et de miser sur des couleurs claires des régions du sud pour diminuer au maximum l'effet du rayonnement solaire, etc., ce qui nous introduit dans le concept bioclimatique et en même temps dans la logique d'un développement durable.

2. Problématique générale

Notre travail s'inscrit dans l'optique globale de recherche sur l'amélioration de l'aspect qualitatif, notamment le confort thermique dans l'habitat, sachant que la demande en logement est de plus en plus croissante. Ainsi, la problématique principale est liée à l'absence du confort thermique dans certaines constructions. Dès lors, le secteur de l'habitat se trouve victime d'une façon de faire qui ne reflète aucunement les aspirations de l'habitant en termes de confort thermique, tout en ignorant les exigences climatiques, environnementales et économiques des régions concernées (sachant que, selon les pays, le secteur du bâtiment est responsable de 30 à 40% des rejets de gaz à effet de serre et de 40 à 50% de la consommation d'énergie [2]). Il a été alors produit des bâtiments non confortables, aux orientations arbitraires de ses façades, voire à l'utilisation de matériaux de constructions inadaptés.

Depuis des années l'Algérie a consenti des efforts importants pour offrir un toit et une habitation aux différentes couches sociales en construisant plusieurs millions de logements. Une action poursuivie de nos jours suivant différentes formules pour l'acquisition de logements ainsi que la facilitation d'accès à la propriété. Malheureusement la qualité de l'habitat est pauvre, principalement en termes de confort thermique, et ne répond plus aux préoccupations actuelles en termes de protection de l'environnement et moins encore en termes d'efficacité énergétique, car il y a bien absence en concepts de bioclimatisme pris en considération autrefois par les anciens bâtisseurs qui savaient adapter et composer au mieux l'habitat avec l'environnement climatique. Et non seulement les constructions sont dépourvues des techniques anciennes, mais on construit sans se soucier ni des normes liées à la réglementation thermique [3-4], qui consiste à réduire l'impact sur l'environnement de par l'amélioration du rendement thermique, ni de la promulgation d'une réglementation précise sur la thermique imposée et adaptée à chaque région et sur la maîtrise de l'énergie [5], source de pollution et de réchauffement climatique.

Par rapport à toutes ces vérités et constatations, les grandes questions qui méritent d'être posée sont :

-Est-il possible de concevoir aujourd'hui des habitations confortables thermiquement et économes en énergie avec le minimum d'impact sur l'environnement?

- *Comment réconcilier la construction nouvelle avec son contexte physique et le savoir-faire local, et composer les techniques scientifiques actuelles avec le savoir faire ancestrale ?*

- *Quelle approche serait plus efficace pour réaliser cette réhabilitation thermique de l'habitat, en associant tous les acteurs concernés ?*

3. Problématique spécifique

Ghardaïa, cette majestueuse ville du sud de l'Algérie tant connue de part son urbanisme exceptionnel, présente depuis toujours un modèle intéressant de l'architecture bioclimatique principalement dans la vallée de M'Zab. Malheureusement, aujourd'hui, on assiste à des constructions dépourvues, du savoir-faire local dont les anciens bâtisseurs savaient utiliser au mieux les vieilles recettes traditionnelles avec les données climatiques.

On doit attirer l'attention aussi sur l'installation presque généralisée des climatiseurs dans la plupart des nouvelles habitations. Néanmoins, on constate quelques constructions adaptées à l'ancienne, en utilisant quelques matériaux locaux principalement la pierre calcaire dure; voir, aussi respect de quelques méthodes ancestrales. L'idée, certes est bonne et intéressante, mais reste que la technicité est insuffisante du point de vue confort thermique.

Enfin, notre intérêt scientifique, consiste à savoir comment atteindre un confort thermique de l'habitat, toute en tenant compte de la complexité climatique du site. Toutefois, la question qui mérite d'être posé est la suivante :

- *Comment approcher analytiquement et d'une manière cohérente, la complexité climatique, en vue d'améliorer son confort thermique?*

4. Hypothèses

Pour répondre à la problématique posée dans notre travail de recherche, nous avons construits les hypothèses principales suivantes :

- ✓ La prise en charge du local existant par le biais d'une bonne maîtrise de la réhabilitation thermique serait l'option la plus pertinente pour améliorer les conditions de confort des occupants ;
- ✓ La réinterprétation des principes de l'architecture bioclimatique peut participer fortement à l'amélioration des performances thermiques du local d'étude ;
- ✓ Recours aux énergies renouvelables, peut être une solution à l'amélioration du confort thermique.

5. Objectifs

L'objectif principal de notre travail de recherche consiste à améliorer le confort thermique de notre local d'étude. Ainsi, créer pour l'occupant les meilleurs conditions de confort physiologiques en (température, humidité et air neuf), et lui offrir un milieu sain et durable avec une consommation plus faible en énergie, et ce à travers :

- ✓ Une opération de réhabilitation thermique du local qui prend en charge les principes fondamentaux d'une architecture bioclimatique, l'isolation thermique et enfin l'inertie thermique pour le stockage de l'énergie ;
- ✓ Une utilisation des énergies renouvelables, énergie solaire thermique.

6. Méthodologie adoptée: Diagramme psychrométrique

Dans notre cas d'étude, nous adoptons une méthode énoncée par (V.Olgyay [6]), avec une approche pour les climats chauds. Il s'agit d'une méthodologie largement utilisée dans le domaine bioclimatique, et proposée comme procédure systématique pour l'adaptation de la conception des bâtiments aux exigences humaines et aux conditions climatiques.

La méthode, ainsi proposée, se présente sous forme de diagramme dit «psychrométrique» sur lequel sont répartie les données météorologiques en température et humidité relative. Il permet de déterminer une zone qui permettra à son tour selon les critères à prévoir et à choisir les différents matériaux et équipement qui conduiront à améliorer l'ambiance intérieure, par conséquent, minimiser les dépenses relatives à l'installation de compensation en matière d'apport ou d'extraction de chaleur. A partir des solutions proposées de ce diagramme, nous allons mettre en évidence le comportement thermique du local, au cours du temps.

7. structure du mémoire

Le présent mémoire est structuré en deux grandes parties, dont trois chapitres en plus du chapitre introductif et la conclusion générale.

- La première partie est à caractère théorique. Elle est constituée d'un chapitre traitant des rappels de base sur le confort thermique, son évaluation et les facteurs agissants à savoir : les concepts bioclimatiques, l'isolation et l'inertie thermique.
- La deuxième partie, répartie sous deux chapitres (2 et 3) et traite le cas d'étude. Dans le chapitre 2, nous avons procédé à la présentation du local, suivant son implantation, ces repères conceptuels et un diagnostic quant à l'inconfort ressentie dans cette habitation

avant sa réhabilitation, et ce à travers des mesures prises localement pour la saison estivale et hivernale. Entre autre, nous avons adopté une démarche d'application sur le diagramme psychrométrique suivant les données du site et ce dans le but de dégager des propositions bioclimatiques et thermiques pour la réhabilitation du local. En conjuguons avec toutes les réponses et indications données par le diagramme, nous avons procédé aux travaux de réalisation sur terrains à savoir: l'isolation des murs et toiture, étanchéité des ouvrants, ombrage en ayant recours aux systèmes d'arcades, réalisation des systèmes de pergolas, plantation de la végétation et enfin peinture de l'enveloppe extérieure avec de la couleur claire et la surface extérieure de la toiture par de la chaux aérienne blanche. Après les travaux de réhabilitation thermique, une étude expérimentale à été entamée. Elle consiste à prélever des mesures de température régnante à l'intérieure du local pour la saison d'été et d'hiver. Nous avons par la suite, développé un modèle de calcul portant l'évolution de température intérieure avant et après réhabilitation suivant différentes sources de chaleurs conventionnelles pour la saison d'hiver avec le calcul des déperditions thermiques sur l'ensemble de l'habitation. Une étude qui nous guidera vers le chapitre qui suit.

- Le troisième chapitre propose l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage du local pour les périodes les plus froides de l'année, ainsi la production d'eau chaude sanitaire. A cette proposition, nous avons procédé au dimensionnement de l'installation solaire thermique, pour le calcul des besoins thermiques et la surface de captage afin de couvrir les charges thermiques. Après réalisation de l'installation, on a procédé au traitement du bilan thermique de l'ensemble (capteur et réservoir de stockage d'eau). Un modèle mathématique de calcul destiné à ce dispositif solaire à été élaboré. Il simule le calcul de la température obtenue sur les différents organes de l'installation à savoir : la température de la plaque absorbante, de la cuve de stockage, la température d'entrée et de sortie d'eau et de l'air dans l'échangeur de chaleur reliant la cuve de stockage d'eau et l'habitation, suivi d'un calcul au gisement solaire. Par ailleurs, nous avons développé un modèle mathématique de calcul en régime transitoire suivant la méthode nodale. Ce modèle, consiste à introduire les phénomènes de transfert de chaleur, par une série d'équations différentielles appliquées sur toutes les couches de la structure du local. La résolution du modèle mathématique par la méthode numérique de Runge-kutta, nous permettra de déterminer l'évolution de la température intérieure du local d'étude. Pour la simulation numérique, nous avons mis en œuvre un programme de calcul écrit sur MATLAB.
- Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

PARTIE 1
REPERES THEORIQUES

PREMIER CHAPITRE

**CONFORT THERMIQUE OBJECTIF DE
TOUTE CONCEPTION ARCHITECTURALE**

Introduction

L'amélioration du confort thermique qui constitue l'objectif principal de la réhabilitation thermique, consiste à mettre en évidence le comportement thermique d'une habitation au cours du temps, et ce à partir de la prédiction des températures ambiantes intérieures.

Toutefois, la maîtrise des phénomènes d'ambiance dans l'étude du confort thermique fait appel aux informations relatives à la conception globale du bâtiment, à l'isolation thermique et enfin l'inertie thermique.

Bien entendu, chaque site a ces spécificités climatiques qu'il faut exploiter [6], ainsi il existe une approche de réhabilitation thermique appropriée pour chaque type de climat.

Dans ce contexte, selon le zonage mondial (K. Geiger [7]), classe la région de Ghardaïa dans la zone spécifique au grand sud de l'Algérie appelé BWh avec un climat désertique sec et chaud. Notons que du Nord au sud et de l'Est à l'ouest, l'Algérie offre une diversité de climat.

Et, selon les travaux détaillés de (L'ONM¹ et CCM²[8]), Ghardaïa, se situe dans l'une des trois zones du sud de l'Algérie appelé zone E avec un climat sec et chaud et même pénible en été, et un climat froid et rude en hiver avec de grands gradients de températures entre le jour et la nuit spécialement en hiver.

Finalement, Il sera donné dans ce qui suit, l'évaluation du confort thermique et les différents facteurs agissant sur ce confort, retenues de part les travaux des auteurs principalement pour le cas des régions chaudes.

1.2. Evaluation du confort thermique

L'évaluation du confort thermique fait généralement recours à l'étude thermique qui permet de définir les conditions d'ambiances acceptables et de quantités d'énergie à fournir pour les équipements d'ambiance, et ce dans l'objectif de donner des recommandations les plus adaptées dans le domaine de l'habitat [9-10].

Les principaux indicateurs pour l'évaluation du confort thermique se résument comme suit :

- **Température résultante (opérative), T_r**

Le calcul de la température résultante, présente un indice de confort intégrant l'effet de la convection et du rayonnement pour des vitesses de l'air peu élevées ($<0.2\text{m/s}$) [11-12] :

¹ ONM : Office National de la Météorologie

² CCM : Centre Climatique National

$$T_{ri} = \frac{T_{ai} + T_{rmi}}{2} \quad (1.1)$$

Et d'après, A. MISSENARD [50]

$$T_{rm} = \frac{\sum_i S_i T_i}{S_i} \quad (1.2)$$

Avec,

T_{ai} : température de l'air (°C) ;

T_{rmi} : Température radiante moyenne émise par l'environnement intérieure (°C) ;

T_i : Température intérieure de chaque paroi d'un local, de surface S_i , mesurée en (°C).

▪ Utilisation du diagramme psychrométrique pour la détermination de la zone de confort

La zone de confort est une zone où les conditions sont confortables pour l'homme. Ainsi, les paramètres permettant de la déterminer sont les suivants [13-14] :

- Température de l'air T_a (°C) ;
- Température radiante moyenne des parois T_{rm} (°C) ;
- Humidité de l'air H_r (%) ;
- Vitesse de l'air V_a (m/s).

Ajoutant à ces paramètres, ceux propres à l'habitant comme le vêtu et l'activité. Pour déterminer ainsi la zone de confort, V. Olgyay [15], a élaboré un diagramme appelé « psychrométrique » ou « bioclimatique », utilisé dans les travaux destinés au calcul du confort dans l'habitat spécialement pour les zones chaudes.

Sur ce diagramme, il sera établie une variation de position climatique, dont la zone de confort se trouve au centre avec les plages d'hiver et d'été indiquées séparément.

1.2. Différents facteurs agissant sur le confort thermique

1.2.1. L'orientation

B. Givoni [44], place le concept de l'orientation au centre des éléments influant sur les ambiances intérieures d'un bâtiment. Il définit, l'orientation d'un bâtiment par la direction vers laquelle sont tournées ces façades. Ce facteur est soumis à de nombreuses considérations, telles que la vue, les déperditions possibles, l'aération et la nature du climat. En effet,

l'orientation des bâtiments détecte la qualité de l'habitat en affectant son ambiance intérieure de deux manières et ce par la régulation de deux facteurs climatiques distinctes :

- Le rayonnement solaire et ses effets d'échauffement sur les murs et pièces orientées selon différentes directions ;
- La ventilation en rapport avec la direction des vents dominants et l'orientation de la construction.

Ainsi, les différentes orientations des façades d'un bâtiment se présentent comme suit [16-17]:

- L'orientation sud est généralement génératrice de chaleur et de lumière, les espaces orientés vers cette direction seront les pièces de vie consacrées aux activités de jour, comme le salon, salle à manger, cuisine et bureau. Ces pièces doivent posséder de grandes ouvertures vitrées pour mieux capter le rayonnement solaire. Toutefois une attention particulière devra être portée quant aux apports solaires. Ainsi, l'intégration de protection solaire est indispensable.

- Les pièces peu utilisées et à faible température sont à placer de préférence côté Nord de l'habitat, il s'agit de zones tampons. Elles sont moins utilisées, mais jouent un rôle protecteur vis-à-vis du froid. La mise en place de ces zones permet de réduire jusqu'à 30 % la déperdition thermique totale. La salle de bain, le garage, la buanderie, les escaliers, le cellier, les couloirs, etc. constituent des zones tampons idéales.

- A l'est et au sud-est, les chambres profitent du soleil levant, source d'éblouissement lumineux.

- A l'ouest et au sud-ouest, ces pièces bénéficient du soleil couchant, mais elles subissent des surchauffements difficiles à contrôler en fin de journée.

* Dans la réhabilitation thermique, lorsque cela est possible, un réaménagement ou redistribution des activités et espaces intérieurs de manière à ce qu'ils correspondent au mieux à une stratégie d'architecture qui tient compte du lieu d'implantation ; ainsi, les espaces intérieurs seront réorganisés en fonction de l'usage, de manière à ce que l'ambiance thermique corresponde aux activités et aux heures d'utilisation [18].

1.2.2. La ventilation naturelle

La gestion du confort d'été passe par la possibilité de ventiler avec de l'air frais une habitation. La capacité de rafraîchissement est disponible comme de jour ou de nuit.

En hiver, cette option n'est valable que si un jour fait bon pour aérer la maison. L'air mobile est très favorable à des déperditions de chaleur. Par conséquent, l'impact de la ventilation sur un bâtiment n'est pas à négliger, car elle augmente les pertes par convection [19-16].

* Dans les climats chauds en favorise la ventilation nocturne, car les températures à l'intérieure sont très hausses et l'air extérieur est frais. A Ghardaïa, les températures journalières en été atteignent en moyenne 40 à 45°C, la variation mensuelle enregistrée sur 30ans (depuis 1977 à 2006) varie entre 20.8°C et 23.5°C [34], et le gradient de température entre le jour et la nuit avoisine 15°C [20].

1.2.3. Dimension des ouvertures

Les parois transparentes (vitrages) de l'enveloppe d'une habitation participent activement dans les échanges thermiques entre les environnements intérieurs et extérieurs des bâtiments (apports et déperditions thermiques). Toutefois, une attention particulière quant aux dimensions de ces ouvertures est recommandée selon l'orientation et la conception. En effet :

- Les vitres verticales orientées au sud présentent le double avantage d'être très bien exposées au soleil d'hiver, et faciles à protéger du soleil d'été.
- Pour les vitres orientées à l'Est ou à l'Ouest, il n'est pas souhaitable de leur donner de grandes dimensions au seul plan d'énergie solaire, car elles reçoivent très peu d'énergie solaire en hiver [21]. Il faut aussi éviter de surdimensionné les fenêtres orientés ouest pour risque de surchauffe [22]. On ne dimensionne les ouvertures Est et ouest qu'en fonction de la vue et de l'éclairage. En été, elles sont, par contre, largement exposées (le matin pour les fenêtres Est, l'après-midi pour les fenêtres ouest). La température extérieure étant plus élevée l'après-midi, les ouvertures ouest produisent des surchauffes plus difficiles à éliminer [21].
- Les ouvertures vitrées orientées au nord, sont celles qui reçoivent le moins d'énergie solaire, car, c'est souvent du nord que viennent les vents les plus froids, donc ses ouvertures doivent être réduites [21]. Mais à cause du problème de surconsommation en éclairage artificiel il faut éviter de trop réduire ces ouvertures [22].

* Dans la région de Ghardaïa, la plupart des fenêtres sont très petites, on trouve aussi des ouvrants sous forme de fentes bien orientées, et des ouvrants horizontaux couvrant des régions du sud sur la toiture de la maison. Mais actuellement des grandes fenêtres commencent à apparaître dans les nouvelles constructions. Elles sont protégées par des stores vénitiens aux normes internationales, sans autant dénaturer l'architecture ancestrale [23-24].

1.2.4. La forme et compacité

Une habitation confortable ne peut être que de forme simple et compacte [25-26]. Toutefois, la forme du bâtiment influe sur :

- ✓ Le bilan global de l'éclairage énergétique du soleil ;
- ✓ Le taux de déperditions thermiques ;
- ✓ L'écoulement des flux aux abords des bâtiments.

Ainsi, selon (V. Olygay (1963) [15]), la forme optimale d'un bâtiment correspond à celle qui permet de perdre un minimum de chaleur en hiver et d'en gagner un minimum en été. Il précise que :

- La forme allongée dans la direction est-ouest, donne de meilleurs résultats pour tous les climats.
- Par contre le carré, n'est pas optimale quelle que soit la localisation de la construction.
- Et toutes les formes allongées dans la direction nord-sud sont encore moins efficaces que la forme carrée.

* A Ghardaïa, la texture des villes est extrêmement serrée et dense. Les maisons généralement épaisses et imbriquées les unes dans les autres, elles créent ainsi de grands volumes habitables par rapport à la surface du mur exposée au soleil, cet état de fait influence sur le confort intérieur [27].

2.5. La couleur

Du point de vue thermique, la teinte des couleurs influence fréquemment le comportement thermique des murs extérieurs par conséquent, sur le rendement énergétique de l'habitat. Des essais poussés ont montré que les températures superficielles dues à l'action directe des rayons du soleil varient fortement en fonction de la couleur. Par conséquent, il faut un choix judicieux des matériaux et de leur couleur au moment de la construction ou de la réhabilitation thermique [28].

Des couleurs différentes absorbent des quantités variables de lumière naturelle. Ainsi, dans le (Tableau 1.1), il sera donné les coefficients d'absorption selon leurs catégories.

Tableau1.1 : Facteur d'absorption en fonction de la couleur (Source : J.L. Izard, 1993)

Catégorie	Claire	moyenne	sombre	noire
Absorptivité	$\alpha < 0.5$	$0.5 < \alpha < 0.7$	$0.7 < \alpha < 0.9$	$\alpha > 0.9$
Couleurs	Blanc, Crème, Orange, Rouge clair	Rouge sombre, Vert clair, Bleu clair	Brun, Vert sombre, Bleu vif, Bleu sombre	Noir, Brun sombre

*A Ghardaïa, on trouve des couleurs claires comme : bleu, rose, jaune, blanc, suivant l'enduit qui les recouvre dans la construction. Notant que, la couleur claire réfléchit mieux les rayons solaires, principalement la couleur blanche. Qui dans son utilisation, primitivement est sous forme de lait de chaux [23].

1.2.6. Protection solaire et vent dominant

Les dispositifs de protections solaires ont pour but de minimiser la surchauffe et de contrôler l'éblouissement lumineux. Ils peuvent, soit s'intégrer structurellement à l'architecture par des (porches, vérandas, brise-soleil, débord de toiture), ou s'appliquer à l'enveloppe (stores, peirciennes, volets). Ils peuvent également être fixes ou mobiles, intérieures ou extérieures, verticales ou horizontales. Les protections solaires peuvent être aussi, liées à l'environnement, autant naturel ou construit, comme la végétation, le relief ou même des masques provoqués par des bâtiments voisins [29-30].

Izard J-L [17], signale aussi que les orientations sont choisies à partir de l'utilisation que l'on désire, ainsi, les parois exposées aux vents porteurs de pluie, de sable ou autre doivent être protégées, alors que celles exposées aux vents doux peuvent être modérément ouvertes afin d'utiliser l'évaporation comme moyen de rafraîchissement.

Toutefois, les façades Est et ouest sont celles qui devant être plus protégées, car selon (P. Fernandez [19]) l'inclinaison des rayons solaires est important sur ces façades ce qui accroît leur facilité de traverser les ouvertures vitrées et réchauffe ainsi les façades. Notant que ces façades bénéficient du soleil levant et couchant en toute saison.

-La façade sud est celle qui capte plus de rayon solaire dans l'année. Cette façade perçoit le rayonnement solaire lorsque le soleil est le plus haut dans le ciel. Une protection contre le soleil est toutefois recommandée [31]. Seulement et paradoxalement, cette façade n'est pas celle qui capte le plus de rayon en été, car les rayons étant moins inclinés, l'absorption est donc moindre que sur les façades Est et ouest, c'est également cette particularité qui fera de la façade sud la plus aisée à protéger [32].

-Les façades orientées au nord, sont celles qui reçoivent le moins d'énergie solaire, car, c'est souvent du Nord que viennent les vents les plus froids. Ainsi, pour cette orientation, les protections solaires horizontales sont les plus efficaces, notamment celles intégrées à l'architecture, telles que les auvents, les débords de toiture, les retraits, les pergolas, etc.

* Dans les régions arides, on utilise des protections à la fois pour vaincre du soleil intense et des vents froids, mais également pour vaincre sable et poussière. A Ghardaïa, les vents de direction Sud-ouest sont parfois violents, transportant sable et poussière, surtout en mois de Mars, avril et mai. De direction Nord-ouest, ces vents sont froids et relativement humides, et ils sont forts et chauds de direction Nord -Est [20]. Pour l'ensoleillement, il est intense durant la plus grande partie de l'année. La valeur moyenne enregistrée est de 9.4 heure calculée sur

10 années [20]. L'irradiation moyenne journalière dépasse les 7000Wh/m² en particulier durant les mois de mars à aout [33]. Ainsi pour vaincre l'agressivité climatique provenant de l'effet vent et du soleil intense et toutes les contraintes survenues, des mesures de protection seront nécessaire pour les habitations. Par ailleurs, les modes de protections utilisés dans cette région sont les systèmes d'arcades et le palmier tels qu'ils sont notés dans le manuscrit du grand auteur connaisseur de cette région (André. Ravereau [24]).

1.2.7. Isolation thermique

Pour avoir un confort thermique, une isolation thermique est plus que nécessaire.

En hiver, l'isolation donne une bonne sensation de confort tout en limitant sa note de chauffage.

En été, le confort sera obtenu en associant les atouts de cette isolation à une forte inertie thermique de la maison ainsi la température intérieure sera maintenue stable et la plus fraîche possible sans recours à la climatisation [39-35].

En effet, d'après (P. de Haut (2007) [36], une maison chauffée perd continuellement une partie de sa chaleur. Les grosses fuites de chaleur s'effectuent par les surfaces : toiture, murs et vitrages. Ces points sensibles d'une habitation peuvent générer jusqu'à 60 % des déperditions en chaleur, les joints entre les parois laissent également fuir la chaleur appelée « ponts thermiques ³ ». Ces derniers peuvent participer de 5 à 25 % à la fuite de chaleur.

Les déperditions thermiques peuvent être surfaciques par transmission à travers les parois opaques et vitrages, linéiques à travers tous les angles de l'habitat et ponts thermiques ou encore des déperditions par renouvellement d'air.

Les caractéristiques principales de l'isolation thermique

Dans le traitement de problème thermique et énergétique du bâtiment en rapport avec les matériaux isolants, deux principaux paramètres thermo-physiques interviennent :

- **La conductivité thermique (λ)**

Il s'agit d'une donnée intrinsèque à chaque matériau, qui caractérise uniquement ses performances isolantes. Le coefficient de conductivité thermique (λ) d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Ainsi, plus λ est grand, plus le matériau est conducteur de chaleur ; et plus λ est petit, plus le matériau est isolant thermiquement [57].

³Les ponts thermiques sont définis par des pertes liées aux discontinuités de la structure d'un local

▪ **La résistance thermique ($R=1/K$) ou coefficient de conductance (K)**

La résistance thermique est le rapport de l'épaisseur d'un matériau à sa conductivité thermique (e/λ). Elle s'exprime en mètre carré et en degré Celsius par watts ($m^2\text{°C/W}$). Plus R est élevée, meilleure est la performance d'isolation, ce qui diminue les déperditions en hiver et les apports thermiques en été (transfert de chaleur par les parois et vitrages) [57].

Dans un mur constitué de plusieurs couches de matériaux d'épaisseur thermique différente, la relation donnant la relation de résistance thermique se présente comme suit :

$$\frac{1}{K_i} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \quad (1.3)$$

Où :

$1/h_e + 1/h_i$: Somme des coefficients d'échanges superficiels interne et externe en ($m^2\text{°C/W}$) ;

$R_i = 1/K_i$: Somme des résistances thermiques en ($m^2\text{°C/W}$).

* En régime permanent, les coefficients d'échanges superficiels prennent des valeurs conventionnelles selon la position de la paroi. Ce qui n'est pas le cas pour le régime transitoire ou ces coefficients tiennent compte des paramètres de facteurs de forme dus à l'interaction entre toutes les surfaces internes à l'habitat avec un échange par rayonnement infrarouge et de leurs émissivités. Ils dépendent aussi des émissivités et d'absorptivités de la voûte céleste et du sol par rapport à la surface externe. Les deux coefficients sont donnés en détail, dans le dernier chapitre qui fait objet d'une étude au régime dynamique et réel.

Les déperditions thermiques

a) Déperditions surfaciques par transmission

L'ensemble de ces déperditions se font par conduction à l'intérieure des parois ou vitrages, par convection et rayonnement sur les surfaces internes et externes aux parois. La formule reliant ces pertes est donnée comme suit :

$$Q_c = \sum_i K_i S_i \Delta T_i \quad (1.4)$$

Où :

K_i : coefficient de transmission surfacique en ($W/m^2\text{°C}$) ;

S : surface intérieure de la paroi en (m^2) ;

$\Delta T = (T_{ri} - T_e)$: Différence de température entre l'intérieure et l'extérieure (°C) ;

b) Déperditions linéiques

La relation nous permettant de calculer les déperditions linéiques est comme suit :

$$Ql = \sum_i k_i L_i \Delta T_i \quad (1.5)$$

Où :

k : coefficient d'échange de transmission linéique de la liaison en (W/m°C) ;

L : Longueur intérieure de la liaison en (m).

c) Déperditions par renouvellement d'air

On distingue deux cas de pertes par renouvellement d'air : celles dues au débit d'infiltration et à celui de ventilation spécifique. Tous les deux doivent être pris en compte. Ainsi les déperditions par renouvellement d'air s'expriment comme suit [46] :

$$Q_r = \sum 0.34 q_e \Delta T_i \quad (1.6)$$

Ou

$$q_e = q_i + q_v \quad (1.7)$$

Et, pour les infiltrations du côté des locaux non chauffés:

$$q_i = \sum m A_m e_m + \sum f l_f e_i \quad (1.8)$$

Avec,

q_e, q_i, q_v : respectivement débit entrant, par infiltration et débit par ventilation [m^3/h] ;

M : coefficient de perméabilité des ouvrants (portes et fenêtres) en [$m^3/hm^2pa^{2/3}$] ;

f : coefficient de perméabilité des ouvrants des fentes en [$m^3/hm^2pa^{2/3}$] ;

A_m : surface des ouvrants [m^2] ;

l_f : longueurs des fentes [m] ;

e_m : coefficient d'exposition au vent et au tirage thermique [$pa^{2/3}$] ;

e_i : coefficient d'exposition au seul tirage thermique [$pa^{2/3}$] du local non chauffé.

* les valeurs (m, f et e) sont données par des tableaux normalisés suivant les règles Th-G [50].

Type d'isolation

Il existe trois façons d'isoler une habitation, Isolation en double cloison [38], isolation de l'intérieur et isolation de l'extérieure. Dans une habitation existante, le choix est évidemment porté sur l'isolation de l'intérieur ou de l'extérieur.

a) Isolation de l'intérieur

Elle présente l'avantage d'être maîtrisée par tous les intervenants du bâtiment, mais elle est loin d'être la plus courante. Les isolants intérieurs plus ils sont performants, plus l'influence relative des ponts thermiques s'accroît. Rappelons aussi qu'une isolation intérieure, même performante, présente toujours une faible inertie thermique [39-35].

b) Isolation de l'extérieur

L'isolation de l'extérieure est la plus intéressante, puisqu'elle présente des avantages multiples et importants [39-35] :

- L'isolation extérieure permet de renforcer la protection des murs contre les dégradations du temps et les intempéries.
- Elle permet de supprimer la majorité des ponts thermiques, tels que : abouts de plancher ou de refends, encadrements de baie (avec certaines précautions), etc.
- Elle protège les gros œuvres contre certaines contraintes thermiques et limite les risques de condensation dans la maçonnerie à l'intérieur du volume chauffé. Ceci améliore considérablement le confort thermique de l'habitation qu'elle que soit la saison.
- Elle permet de placer les murs porteurs (lourds) du côté intérieur et donc de renforcer l'inertie thermique du logement, source de confort pour les occupants, car les murs lourds régulent la chaleur et l'humidité. En hiver et demi-saison, ces murs intérieurs éclairés par le soleil accumuleront ces rayonnements pour les diffuser en soirée. En été, si vous ventilez bien la maison durant les heures fraîches de la nuit, ces murs lourds restitueront cette fraîcheur dans la journée.
- L'isolation par l'extérieure est beaucoup plus facile à réaliser par soi-même que l'isolation par l'intérieur, car, les panneaux isolants pour l'extérieure sont légers et il suffit de les poser bien bord à bord. Il est préférable de choisir des matériaux isolants pouvant être directement crépis. Toutefois, la pose d'un crépi sur un isolant extérieur est plus technique que sur un mur maçonné.
- Elle a aussi l'avantage de ne pas modifier les surfaces habitables.

Entre une maison faiblement isolée et une maison très bien isolée, le coût du chauffage peut être divisé par 3 ou par 4. Sachant que le coût d'une isolation est généralement amorti entre trois et cinq ans [40-39].

* Autre fois à Ghardaïa, les parois sont exécutés en moellons de pierre mélangé avec de la paille, fumier dérivés de dattes et autre ce qui rend le mur poreux et isolé [23]. Mais, reste que dans les pays chauds, l'utilisation des isolants classiques réagit assez mal devant l'intensité du rayonnement solaire. Pour remédier, trois systèmes de compensation sont recommandés :

- la principale est, l'isolation primaire, soit par réflexion en teintant de couleur très claire (blanc) les parois exposées aux rayons,
- soit par ombrage pour éviter la condensation du rayonnement solaire, en étalant des voilages (des arcades pour la tradition des régions du Sud Algérien),
- ou en plantant des écrans de végétation ; soit par orientation en présentant le moins possible de surfaces au rayonnement perpendiculaire (maisons orientées, toit incliné au nord, etc.).

1.2.8. Inertie thermique

Dans les matériaux de construction couramment utilisés, l'inertie thermique d'un bâtiment se juge en première approximation par la masse interne du matériau mis en œuvre. Toutefois le rôle et les principaux paramètres sont énoncés comme suit :

En été, plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte est faible et plus les variations de température jour/nuit sont faibles. L'inertie thermique permet donc de lisser les flux thermiques et les températures extrêmes. L'utilisation de matériaux lourds, contribue à donner au bâtiment une forte inertie. Elle évite les surchauffes et aide à la stabilisation de la température [61-62].

En hiver, l'inertie thermique joue également un rôle important, principalement dans le cas de chauffage intermittent. Le refroidissement est plus lent dans un local dont les parois sont lourdes. Les coupures de chauffage, visant à faire des économies d'énergie, sont d'autant moins intéressantes que la structure est plus inerte, car plus lourde [62].

Les principales caractéristiques de l'inertie thermique sont :

▪ La diffusivité thermique

La diffusivité thermique "a" exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage, par conduction, dans un corps. Plus la diffusivité est grand, plus le matériau s'échauffe ou se refroidit rapidement. Tandis que, plus elle est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Elle s'exprime selon l'équation suivante [41] :

$$a = \lambda / \rho.C \quad (1.9)$$

Ou :

a: Diffusivité en (m²/s) ;

λ : Conductivité thermique en (W/mC) ;

ρ : Masse volumique en (Kg/m³) ;

C : Chaleur spécifique en (kJ/kg).

▪ L'effusivité thermique

L'effusivité thermique "b" exprime l'aptitude de la surface d'un matériau à stocker ou restituer de la chaleur. Elle caractérise, donc, la capacité des matériaux à réagir plus ou moins rapidement à un apport de chaleur au logement. Elle croit avec la conductivité et la capacité thermique. Elle s'exprime en ((W/°Cm²)^{1/2}) et donnée par la formule suivante [42] :

$$b = \sqrt{\lambda.\rho.C} \quad (1.10)$$

En général, pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois d'enveloppe devront présenter une faible diffusivité et une forte effusivité.

* Dans le contexte de la démarche bioclimatique, une inertie très lourde, associée à une bonne gestion des apports solaires (captage l'hiver et protection l'été) devient un critère décisif de la construction, notamment pour le confort d'été, qu'il s'agisse des températures maximales atteintes ou des variations de températures jour/nuit [43]

Conclusion

Le confort thermique abordé dans ce chapitre, nous apprend que avant de réhabiliter un habitat existant, il est impérativement nécessaire de faire une vision globale du lieu et de conception de départ de notre habitation, notamment, le respect des concepts bioclimatiques, l'isolation de l'enveloppe extérieure et les matériaux de base utilisés dans la structure. Il nous apprend aussi que, l'isolation de l'extérieur présente la solution la plus satisfaisante, principalement dans les régions chaudes moins pluvieuse. Et, l'inertie thermique joue un rôle important dans l'habitat et contribue à l'isolation, puisque présente un des facteurs influant par le choix de matériau avant de procéder à l'isolation.

Finalement, les différents points clés, retenues de part les travaux des auteurs cités principalement pour le cas des régions chaudes, peuvent être énumérés de la sorte :

- L'orientation Nord-sud à privilégier ;
- La forme allongée dans la direction est-ouest à privilégier à la forme carrée ;
- La compacité pour réduire la surface exposée à l'extérieur ;
- Parois lourdes pour stocker la chaleur (inertie thermique)
- Isolation de l'extérieur ;
- Limitation de ventilation dans la journée pour limiter la pénétration de chaleur à l'intérieure des pièces ;
- Ventilation nocturne important pour le rafraîchissement des surfaces de l'habitat ;
- Diminution des dimensions d'ouvertures, juste pour assurer l'éclairage naturel ;
- L'utilisation de la couleur claire pour éviter l'absorption de la chaleur ;
- Utilisation des protections solaires, (isolants, écrans, arcades et végétation...etc.) ;
- Utilisation des protections contre les vents dominants amenant sable et poussières (arcades et végétation...etc.) ;

Enfin, les concepts bioclimatiques, l'isolation et l'inertie thermique, jouent un grand rôle dans la réhabilitation thermique et répond généralement au mode de vie de l'habitant sur sa consommation en énergie et sur sa rentabilité.

PARTIE 2
CAS D'ETUDES

DEUXIEME CHAPITRE

PRESENTATION DU PROJET ET

SOLUTION BIOCLIMATIQUE ADOPTEE

-ETUDE EXPERIMENTALE ET SIMULATION NUMERIQUE-

Introduction

Ce chapitre présente une réponse quant à la problématique posée dans notre cas d'étude. A la base, il suit les recommandations de la méthodologie proposée qui consiste à l'application du diagramme psychrométrique.

Avant toute opération de réhabilitation du local d'étude, il sera donné une présentation générale de ce dernier, suivi d'un diagnostic quant à l'inconfort thermique ressenti par l'occupant. Pour ce faire, nous avons procédé premièrement à la vérification des repères conceptuels cités en rappels, par la suite nous avons mesuré les valeurs de températures intérieures à l'habitation. Ainsi, des thermocouples sont placés à l'intérieure du local, et banchés sur un appareil de mesure physique connecté sur un enregistreur automatique de donnée. L'évolution du profil de température sera à chaque fois commentée.

En parallèle, après les résultats donnés suivant l'application de la méthode du diagramme psychrométrique, un tableau de proposition est dressé, il donne les différentes solutions adéquates pour chaque période de l'année. Ces solutions sont données selon les critères à prévoir et à choisir les différents matériaux et équipement qui conduiront à améliorer l'ambiance intérieure.

En conjuguons les solutions bioclimatiques avec les concepts architecturaux, nous avons procédé à la réhabilitation de notre habitation. Grace à un appareillage de mesure, nous avons mesuré les différentes températures du local. Ainsi, des graphiques expérimentaux après réhabilitation sont donnés et comparés avec celles trouvés avant réhabilitation pour la saison d'été et d'hiver. Il est aussi donné l'évolution au comportement de température au niveau des différentes façades intérieures et extérieures à la structure, enfin l'étude à l'inertie thermique suivi d'un commentaire quant aux résultats trouvés.

Il sera développé par la suite, pour les périodes les plus froides de l'année, un modèle mathématique appliqué par simulation numérique visant à calculer les différents profils de températures intérieures au local établis sur plusieurs mois, suivant différentes sources de chaleur conventionnelle. Ce modèle est écrit sous deux régimes : un régime quasi-permanent régit des équations d'échanges de chaleur, avec utilisation des formules et des règlements de la méthode appliquée par le DTU, et un régime transitoire utilisant les équations différentielles. Des résultats en température intérieure seront par la suite enregistrés et commentés. Nous précisons que cette étude présente un préliminaire pour le chapitre qui suit, utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur renouvelable et économe. Enfin il sera donné les valeurs de déperditions thermiques totales sur l'ensemble du local.

2.1. Présentation du projet

2.1.1. Situation du projet



Photo 2.1. Présentation du local avant réhabilitation (l'habitation à droite est concerné par l'étude)

Le projet est implanté sur un terrain situé à l'URAER (Unité de Recherche appliqué en Energies Renouvelables), dans la région de Ghardaïa. Il s'agit d'un studio accolé à d'autres studios d'une même architecture (**photo 2.1**) et composé : d'une chambre, salle de séjour, cuisine et sanitaire.

L'habitation repose sur des semelles en béton et l'ensemble (sol, arcades et murs) est peint d'une couleur claire. Les parois sont exécutées en moellons de pierre local.

2.1.2. Diagnostic et instrumentation de mesure

A l'exception de la couleur claire de l'enveloppe extérieure et de l'ombrage du côté Est, le local présente, des carences conceptuelles générées principalement par la mauvaise orientation de ces façades. Pour justifier, ainsi, l'inconfort thermique ressenti par l'occupant (auteur du mémoire), des températures ambiantes intérieures seront enregistrées. Ainsi, le dispositif de mesure expérimental (**photo 2.2**) sur lequel seront effectuées les mesures comprend essentiellement :

- L'appareillage de mesure physique ;
- un enregistreur automatique de données placées à l'intérieur du local ;
- Ordinateur pour stocker les données.

La métrologie mise en place, permet de connaître les évolutions des paramètres suivants :

- Températures ambiante intérieure ;
- Humidité relative à l'intérieur du local ;

Ainsi, des valeurs de température ambiante intérieure et extérieure, de l'humidité relative sont collectés sur des journées représentatives au mois de décembre pour la saison d'hiver et juillet pour la saison estivale. Dans ce qui suit, sont donnés les différents profils de température enregistrés pour les deux saisons de l'année. Notant que, faute de trous dans les données engendrés par des contraintes techniques parmi les coupures d'électricité, les mesures étaient limités à trois voir quatre journées successives.



Photo 2.2. Système d'acquisition de données installé à l'intérieur du local (Enregistreur de type Fluke à 20 voies sur lequel sont placés les thermocouples branché à

2.1.2.1. Commentaire sur les résultats de température ambiante intérieure mesurés avant réhabilitation du local

a) Saison estivale

Avant de commenter les valeurs de température mesurés à l'intérieure du local, nous avons effectués des mesures présentant le couple (température/humidité relative) donné ci-après en **figure (2.1)** et le couple (température extérieure/température intérieure) de la **figure (2.2)**. Nous constatons sur la **figure (2.1)**, des valeurs basses en humidité relative variant entre **15 à 30%**, et ce pour des températures élevées variantes entre **25°C à 40°C**, cette information, montre l'effet du climat sec en cette période de l'année. Quand à la **figure (2.2)**, elle montre la cohérence entre les deux profils de température intérieure et extérieure. Ainsi, la courbe de température intérieure prend le profil de la courbe de température extérieure. Dans ce cas, nous constatons que les valeurs entre l'extérieure et l'intérieure sont très proches, on a même prélevé des températures intérieures supérieures variantes entre **2°C à 9°C**, cela est dû à la chaleur accumulée dans le temps à l'intérieure de la structure lourde (pierre) du local.

Finalement, les valeurs de température enregistrées dans la **figure (2.3)**, sur des journées du mois de juillet (mois le plus chaud de l'année), sont hausses. Dans la plus part du temps, ces valeurs dépassent les **35°C**, et peuvent même atteindre des valeurs de plus de **40°C**.

b) Saison hivernale

Même scénario pour la saison hivernale. La **figure (2.4)**, présente le couple (température/humidité relative), dont les valeurs sont entre **25 à 68%** pour des valeurs basses en températures variant entre **10°C à 17°C**. Dans la **figure (2.5)**, la courbe prend le profil de la température extérieure avec. Les valeurs de température enregistrées dans cette figure sont proches des valeurs des températures extérieures, elles varient dans la plus part du temps entre **1°C et 5°C**.

Enfin, la **figure (2.6)**, montre que les températures intérieures mesurées sur chaque 30 minute, pendant 4 journées successives du mois de décembre considéré comme le mois le plus froid de l'année, sont basses. Toutefois, les valeurs de température calculées, ne dépassant pas les **17°C**, avec une chute brusque pour arriver à des valeurs de moins de moins de **13°C**.

* En plus des valeurs de températures enregistrées et commentées, des carences conceptuelles relevées dans le local accentue et justifie la baisse et l'augmentation de température par rapport à la normal pour les deux saisons. Ainsi, pour remédier à toutes ces carences, on doit se référer aux recommandations qui seront déduites à partir de l'application du diagramme psychrométrique dont lequel les lignes de conception bioclimatique seront définies.

2.1.2.2. Résultats de températures intérieures mesurées avant réhabilitation

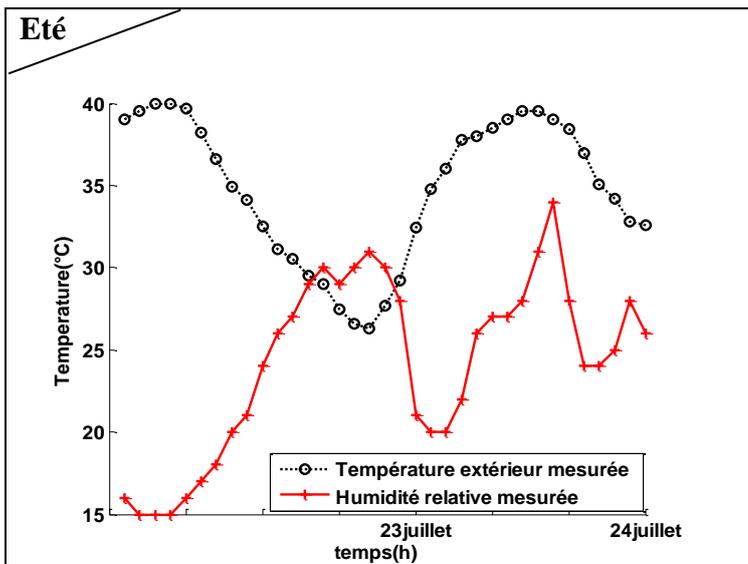


Figure 2.1 : Evolution de température extérieure estivale avec l'humidité relative (27-29/07/2003)

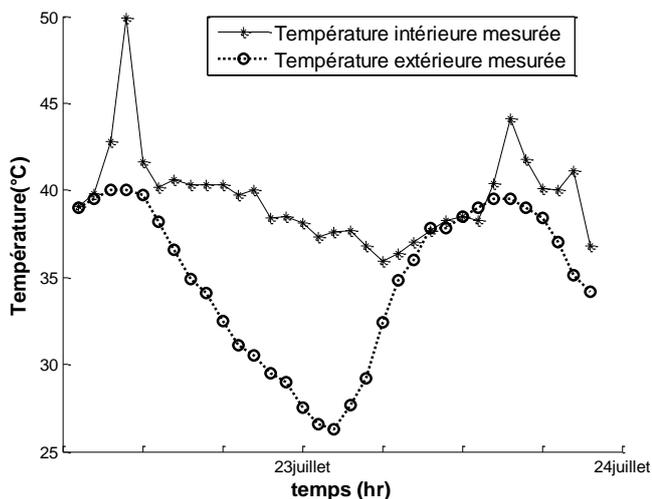


Figure 2.2 : Evolution de température intérieure avec la température extérieure (23-24/07/2003)

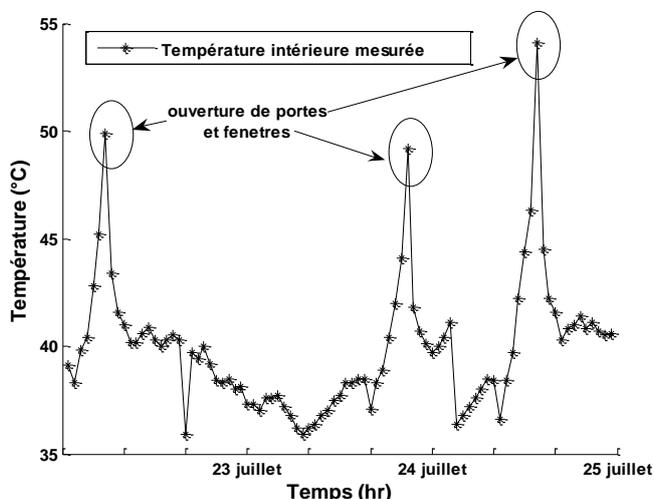


Figure 2.3 : Evolution de température intérieure pour 3 journées successives (23-25/07/2003)

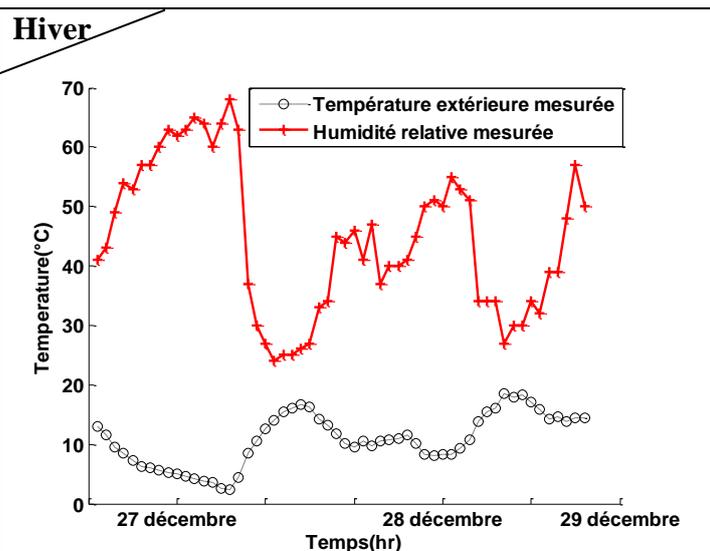


Figure 2.4 : Evolution de température extérieure hivernale avec l'humidité relative (27-29/12/2003)

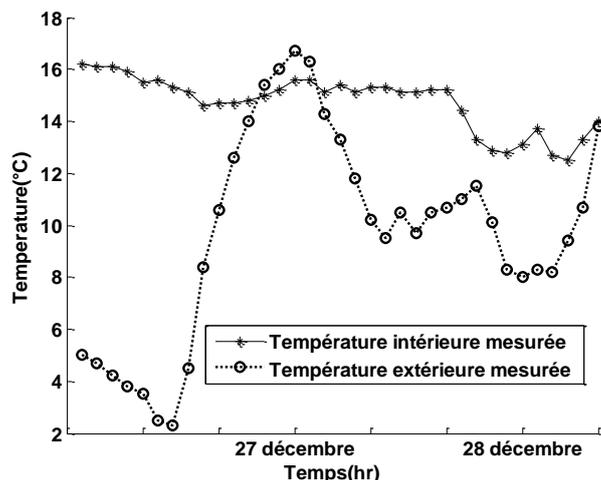


Figure 2.5 : Evolution de température intérieure avec la température extérieure (27-28/12/2003)

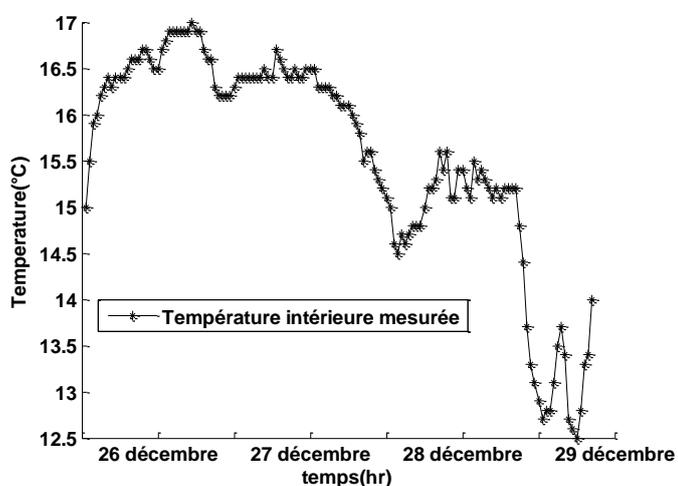
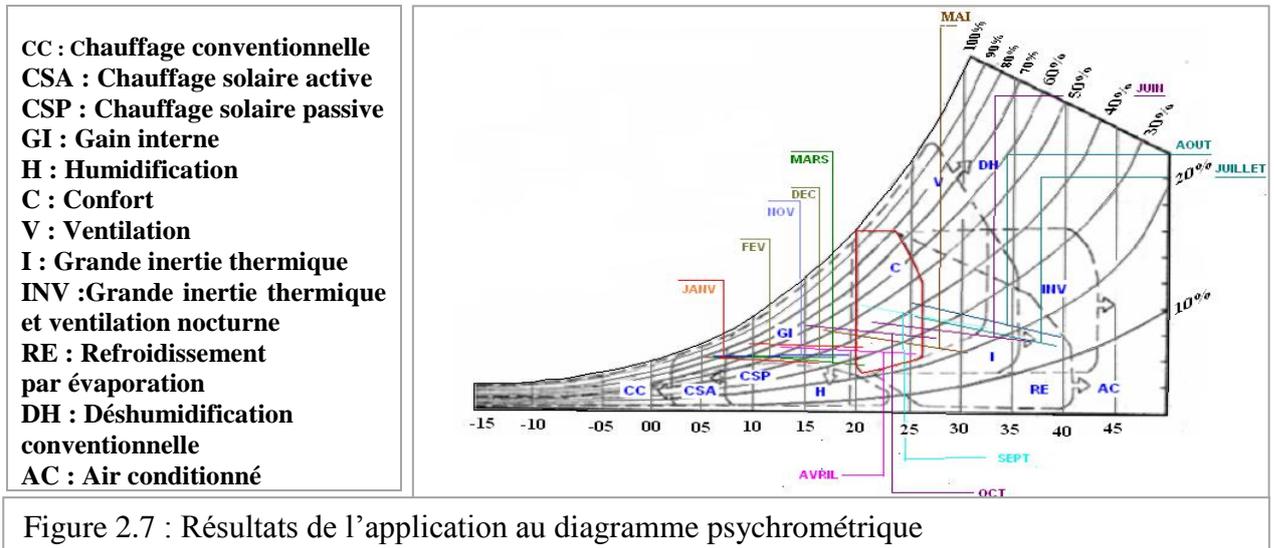


Figure 2.6 : Evolution de température intérieure pour 4 journées successives (26-29/12/2003)

2.2. Application à la méthode psychrométrique

La méthode consiste à apporter les différentes données climatiques en température extérieure et humidité relative sous forme de segment. Il suffit alors, de lire et traduire ces segments suivant les différents classifications décrite dans le diagramme (voir, figure 2.7), afin de savoir comment s'approcher le plus possible de la zone de confort.



2.2.1. Interprétation du diagramme

1. Les zones

La zone de confort se trouve au centre du diagramme avec les plages d'hiver et d'été indiquée séparément ($21^{\circ}\text{C} < T < 26^{\circ}\text{C}$). Cette zone divise les conditions climatiques en deux catégories : l'air situé au-dessus de cette limite, comme période de « sur-échauffement », et au-dessous c'est la période « sous-échauffé ». Les différentes zones énergétiques sont indiquées comme suit :

a) Zone de sous-chauffe : $T < 21^{\circ}\text{C}$

Cette zone occupe plus de cinq mois de l'année (Novembre, décembre, janvier, février, mars, avec une exception de quelques jours du mois d'octobre et d'avril).

b) Zone de confort : $21^{\circ}\text{C} < T < 26^{\circ}\text{C}$

Cette zone s'étend sur le début septembre, sur la majeure partie du mois d'octobre, et début novembre ainsi que la fin du mois d'avril et sur le mois de mai.

c) Zone de surchauffe : $T > 26^{\circ}\text{C}$

Cette partie, se prolonge sur cinq mois de l'année (vers la fin du mois de mai, juin, juillet, août, quelques jours du mois de septembre).

2.2.2. Les propositions climatiques

Les différentes propositions du diagramme sont regroupées dans le tableau suivant :

	CC	CSA	CSP	GI	H	C	V	I	INV	RE	DH	AC
Janvier		X	X	X								
Février		X	X	X								
Mars												
Avril				X	X	X						
Mai							X	X				
Juin							X	X	X	X		
Juillet							X	X	X	X		X
Aout						X	X	X	X	X		X
Septembre						X	X	X				
Octobre						X						
Novembre				X	X	X						
décembre		X										

Tableau 2.1 : Différentes propositions climatiques trouvées par le digramme bioclimatique

2.2.3. Les Solutions apportées pour chaque saison

En conjuguant avec les propositions du tableau et les concepts bioclimatiques énoncés dans le premier chapitre, nous aboutissons aux solutions suivantes pour chaque saison :

- pour la saison de chauffe, en plus du chauffage solaire passif (**CSP**), et le gain thermique dû à la masse thermique du matériau, une installation en chauffage solaire actif (**CSA**), principalement pour les mois les plus froids de l'année (**décembre, janvier et février**) est nécessaire. Pour le système passif concernant le (**CSP**), on propose **l'isolation** et **l'ombrage** de la paroi orientée vers le nord pour vaincre le froid et le vent dominant venant de cette direction.
- pour la saison estivale, la ventilation (**V**) sur les quatre mois (**fin mai, mi juin, début juillet et Aout**) est plus que nécessaire, principalement la ventilation nocturne. Avec, la grande inertie thermique (**I**) du aux parois épaisses, on propose une **isolation** et **l'ombrage** de la paroi du côté ouest pour diminuer des rayons du soleil couchant, et étalé sur la toiture une **couche de peinture aérienne blanche** pour réfléchir le rayonnement solaire; un refroidissement par évaporation (**RE**) sur les trois mois de l'année (**fin juin, juillet et Aout**), et de l'air conditionné (**AC**) pour les deux mois **juillet** et **fin Aout**.
- L'humidification (**H**) pour le mois d'**Avril** est nécessaire pour la raison suivante, ce mois devient plus sec à cause phénomène de sirocco.
- Sinon le confort (**C**) existe pour le **début** du mois de **Mai**, pour la majeure partie du mois **d'octobre, début septembre** et **fin Novembre**.

2.3. Réhabilitation du local

2.3.1. Travaux de réalisation

Après l'étude au préalable du projet compte à l'inconfort thermique, et les solutions proposées à travers le diagramme de Givoni, nous avons procédé à la réhabilitation de notre local d'études. Les travaux réalisés sont présentés ci-après :

- La première phase consiste à l'isolation thermique du mur ouest exposé au soleil, du mur nord exposé au vent dominant ainsi que l'isolation de la toiture, (**voir, photos ci-après**).



Photo 2.3 : isolation extérieure de la toiture



Photo 2.4 : isolation extérieure du mur ouest

Le matériau isolant utilisé est le polystyrène vu sa disponibilité à l'échelle nationale, son coût faible, et sa grande résistance thermique. Le polystyrène avec une épaisseur de 8cm est collé à une plaque de plâtre de 7cm d'épaisseur, munie d'un crépie d'une couche de ciment de 3cm d'épaisseur. Et, pour diminuer au maximum l'effet du rayonnement solaire sur le studio, on peint avec de la chaux aérienne blanche de production locale la surface extérieure de la toiture. Dans cette phase, nous avons aussi procédé à l'étanchéité des ouvrants.

- La deuxième phase consiste à l'ombrage des murs nord et ouest par des systèmes d'arcades, une technicité inspirée du savoir faire local. Installation, d'un point d'eau (robinet) et implantation de la végétation sous forme de lierre tout autour, voir photo ci-après.



Photo 2.5 : système de pergolas



Photo 2.6 : Ombrage et végétation

- La troisième phase est consacrée à l'installation d'un système de pergolas, qui à pour objectif de faire passer le rayonnement solaire en hiver et diminuer de son intensité en été.

2.3.2. Instrumentation de mesure

- Appareillage de mesure installé à l'intérieur du local



Photo2.7 : différents thermocouples placés à l'intérieur du local d'étude et système d'acquisition de données branché à un PC pour le stockage de donnée

- Emplacement de thermocouples à l'extérieur du local



Photo 2.8 : Différents thermocouples placés à l'extérieur du local (toiture extérieure, mur ouest extérieure, au niveau des différentes profondeurs au mur, sur la surface extérieure du mur ouest au local adjacent pour une étude comparative).

Au cours de réhabilitation de notre local d'étude, nous avons procédé à l'étape de recueil de donnée en température des murs, toiture, et ouvrants.

L'instrumentation de mesure est constitué d'un appareil d'acquisition de données piloté par à un ordinateur servant à lire et à stocker les valeurs mesurées.

Pour véhiculer ces mesures, nous avons placé des thermocouples sur toutes les façades du local, que soit sur les surfaces extérieures, intérieures ou encore à l'intérieur de la structure de la paroi, voir même au niveau de la façade ouest au local adjacent, **(voir, photos 2.7 et 2.8)**

Nous signalons, que tout au long du projet, quelques anomalies et lacunes nous ont retardées dans l'enregistrement de données, à savoir : les coupures d'électricité, et des thermocouples parfois non fonctionnels. Ainsi, pour ces raisons, nous n'avons pas pu donner des profils de figures étalés sur plusieurs journées.

Dans ce qui suit, nous avons établie des courbes de température mesurées pour les deux saisons de l'année (hivernale et estivale). Les profils de température correspondent à la température de l'ambiance intérieure, aux différentes façades avant et après isolation ainsi aux températures à l'intérieure de la structure d'un mur et celles des ouvrants (portes et fenêtre). Une étude comparative avant et après isolation est établie, en se référons à chaque fois à la courbe de température extérieure et parfois aux courbes de température du local avoisinant de même architecture et non isolé pour les mêmes périodes de l'année.

2.3.2.1. Commentaire et étude comparative sur les résultats de température intérieure mesurée avant et après réhabilitation du local

❖ *Période estivale*

a) Courbe de température

Les **figures (2.8-2.13)**, ci-après, nous renseignent sur l'évolution de température ambiante intérieure et celles des façades de l'habitation (murs, toiture et ouvrant).

La **figure (2.8)**, décrit l'évolution de température ambiante dans le local après isolation, pour un jour du mois de **juillet**, depuis **11h à 23h**. Dans ce cas, nous avons relevé une différence de température entre l'extérieure et l'intérieure variant de **3.2°C à 9.4°C**. Or, la différence était seulement de **1°C**, voir **0°C** avant isolation, ou encore réduite à cause de la forte inertie thermique engendrée par le matériau pierre. Sinon, la température ambiante intérieure après isolation semble très stable avec une valeur de **32°C**. Or, elle enregistre une valeur de **36°C** et voir **plus** avec une valeur de **40°C à 42°C** avant isolation. Notons que cette valeur est enregistrée avant l'achèvement de tous les travaux de réhabilitation à l'an **2005**. En effet, dans la **figure (2.9)**, on a affiché une valeur très intéressante oscillant entre **28°C** et **29°C** en **2008** après finalisation des travaux.

Même scénario, se produit dans le cas de la **figure (2.10)**, dont la différence de température affiche une valeur de **9°C**, au maximum atteint. Avec une stabilité visible dans la courbe de température intérieure.

La **figure (2.11)**, affiche une différence de température variant de **2°C à 6°C** pour la face externe de la toiture entre le local isolé et celui non isolé accolé à celui-ci. Cette différence sera encore plus intéressante, puisque le local adjacent est de même architecture, même matériau de construction et possède moins de façades exposées à l'extérieur et situé entre deux studio de même architecture, donc plus confortable.

Sur la **figure (2.12)**, pour un jour du mois de **Juin**, depuis **6h à 24h**, la différence de température extérieure avec la température après isolation varie entre **4 à 9°C**, et ce vers **12h à 24h**. Le maximum de température atteint les **30°C** à l'extérieure, alors que l'intérieure affiche **21°C**, avec une stabilité dans la courbe du à l'effet de l'inertie thermique engendré par la structure du mur. Dans ce graphique, nous avons aussi affiché, les courbes de température intérieure au local accolé non isolé, et nous avons enregistré une différence de température,

allant de **1°C à 2°C** entre les deux courbes. Notons que cette différence augmentera de quelques degrés, du fait qu'il y a moins de façades exposées vers l'extérieur du local adjacent.

La **figure (2.13)**, nous donne des informations importantes sur l'évolution de température des différentes parois du local après isolation. Ainsi, nous relevons en premier lieu une différence de température de **6 à 10°C** entre l'extérieure et l'intérieure, même scénario s'est produit dans les **figures (2.8 - 2.10)**. Nous déduisons ainsi, que les températures des murs et toiture sont très proches de la température intérieure, d'où le confort thermique du local.

Sinon l'évolution de température des façades intérieures se résume comme suit :

T (toiture) < T(mur nord) < T(mur est) < T(mur ouest) < T(intérieure) < T(fenêtre ouest).

La température de la toiture est la plus inférieure, cela s'explique par le fait que cette partie de l'habitation est dense et bien isolé de l'extérieur. Signalons qu'on cette période la couche de peinture blanche n'est pas encore appliquée, sinon on enregistrera une température encore plus faible. Viens, par la suite, le profil de température du mur nord, isolé également de l'extérieur. Celui, du mur Est est ombré, puis on a la température du côté ouest isolé, considéré comme paroi très exposée au soleil. La température ambiante est légèrement élevée, cela s'explique, par le fait qu'elle est influencée par le rayonnement venant du vitrage.

b) Effet de l'inertie thermique

Dans les **figures (2.14 et 2.15)**, nous avons mis en évidence le comportement de température à l'intérieure de la structure, et nous avons comparé les différents profils de température entre le local isolé et celui non isolé (local accolé), pour le même jour du mois de mai.

Dans la **figure (2.14)**, le polystyrène joue le rôle de stabilisateur, plus c'est profond, plus les températures sont à leurs minimums. On a relevé les valeurs de **27.2 °C** à **6h** du matin et **28.6** à **24 heures** pour le polystyrène. Le profil de température en pierre est inférieur à celui enregistré par celui en plâtre, entre **6h** et **13h**, et reprend la même courbe le soir, entre **22h** et **6h** du matin. (Rappelons que la couche en pierre est la couche qui tire vers l'intérieure). Cette baisse de température affichée entre **22h** et **13h** s'explique par l'effet du à l'inertie thermique et le rôle joué par le produit isolant.

Dans la **figure (2.15)** à des différentes profondeurs dans la structure du mur ouest, les courbes de température varient de la même manière. On remarque que plus c'est profond, plus la température est à son maximum, on a enregistré une valeur de **34.9°C** vers minuit, et **38.6°C**

vers 6 heures du matin. Les températures baissent entre **12h et 16h**, mais la chaleur est vite restituée le soir sous l'effet de l'inertie thermique.

La lecture de la **figure (2.18)**, montre que la température intérieure offre une stabilité durant presque toute la journée avec une faible amplitude de **1.8°C** entre un maximum de **34.8°C** à **21heure** et un minimum de **33°C** à **10h** du matin. Alors que la température extérieure présente de forte amplitude de **8°C**. Une amplitude de **8.2°C** à été enregistrée après **5 heures** de temps entre la température extérieure et la température intérieure. Les apports ont été amortis et déphasés dans le temps. Ce phénomène de déphasage est dû à l'inertie par absorption qui se produit avec l'effusivité thermique et l'épaisseur du mur qui est de **58cm**.

Le même scénario se produit dans la lecture de la **figure (2.16)** dont le décalage est de **4heures** de temps avant isolation avec un amortissement de **10.2°C**. Ce décalage horaire est augmenté de **1heure** de temps après isolation dans la **figure (2.17)**. Il est évident que l'isolation de l'extérieure viens renforcer l'effet de l'inertie thermique.

❖ *Période hivernale*

a) Courbe de température

Les **figures (2.19-2.21)**, nous renseignent sur l'évolution de température intérieure au local, et de celles des parois isolées (mur ouest et la toiture), après isolation.

Ces courbes sont comparées avec celles enregistrées sur le local accolé et non isolé. Nous remarquons, cependant que la différence de température est nettement intéressante pour les trois cas de figures.

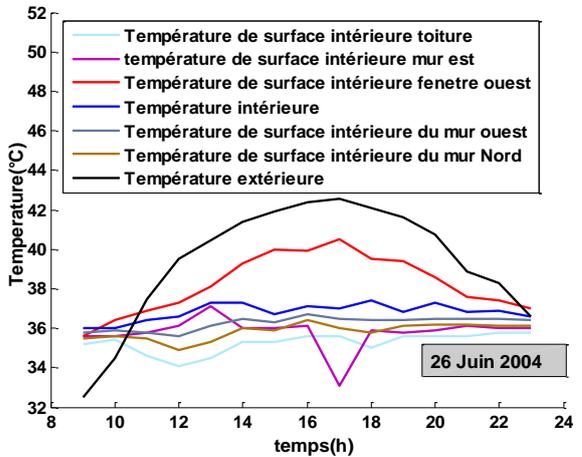
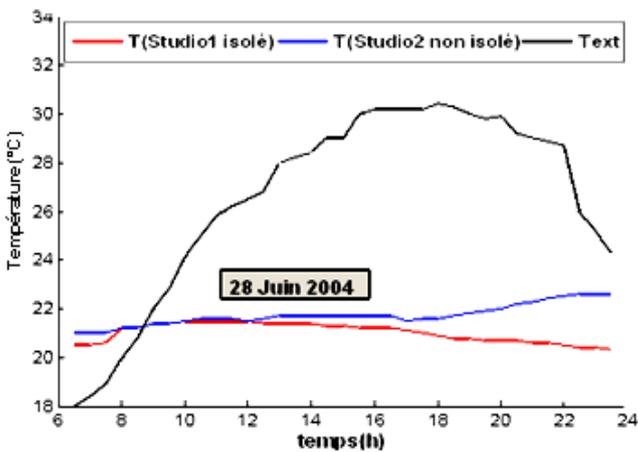
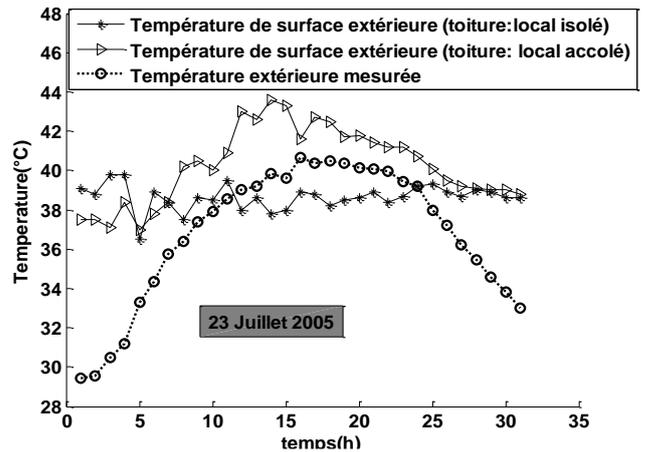
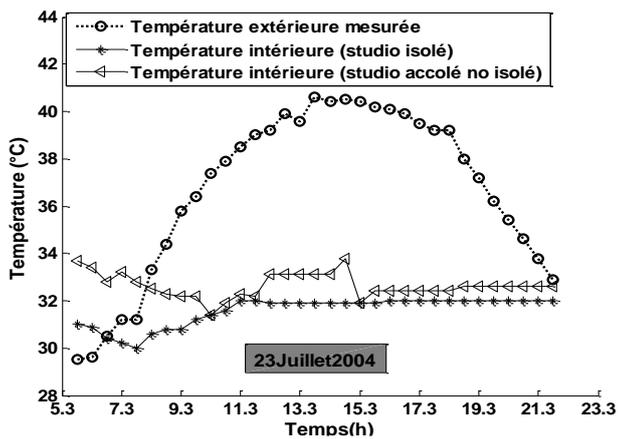
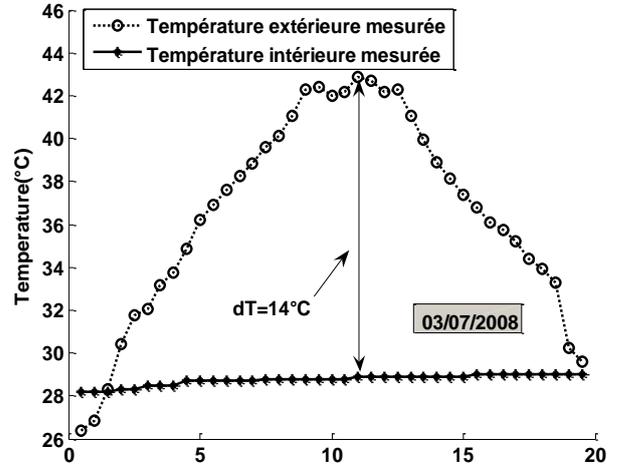
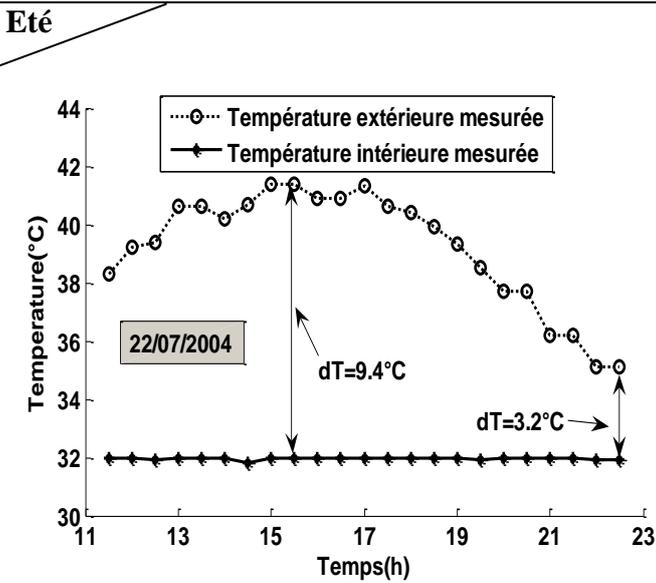
Sur la **figure (2.19)**, nous avons enregistré des températures dans l'ordre de **18°C**, avec une courbe plus au moins stable. Nous avons enregistré une différence de plus de **3°C** vers **17.30h** pour la température ambiante intérieure entre le local d'étude isolé, et celui accolé. La différence sera encore meilleure si la comparaison était établie avec le même local.

b) Effet de l'inertie thermique

La **figure (2.22)**, nous renseigne sur l'effet de l'inertie thermique dans la structure de notre local, le décalage horaire enregistré est de **5heures**. Le profil de température intérieure dans cette figure offre une stabilité le long de la journée avec une faible amplitude de **1.2°C** entre un maximum de **23.8°C** à **16h** et un minimum de **23.8°C** à **1heure** du matin.

2.3.2.2. Présentation des résultats de température après réhabilitation

a. Profil de température pour la saison estivale



b. Profil de température au niveau de la structure de la paroi et inertie thermique pour la saison estivale

Eté

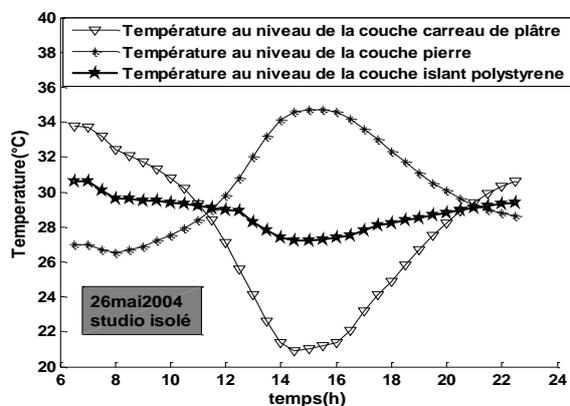


Figure 2.14 : Evolution de la température à l'intérieur du mur ouest du studio isolé (couche en plâtre, polystyrène et la pierre) du 26/05/2004

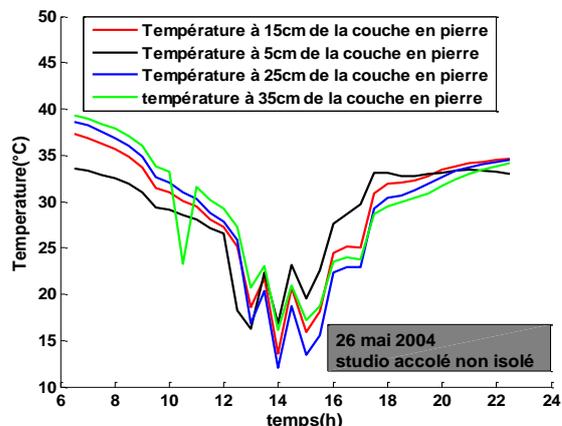


Figure 2.15 : Evolution de la température à l'intérieure de la structure du mur ouest du studio non et accolé du 26/05/2004

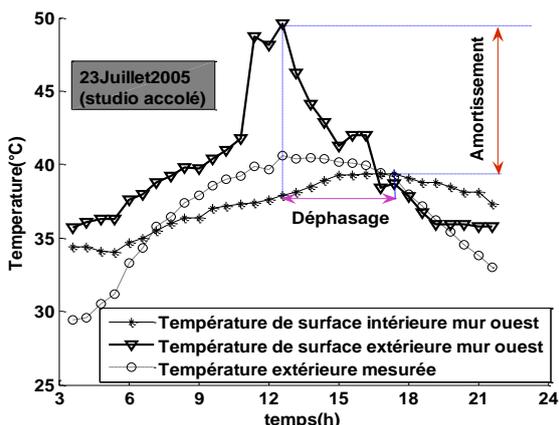


Figure 2.16 : Décalage horaire enregistré entre la surface extérieure et la surface intérieure au mur ouest du studio accolé non isolé du 23/07/2005

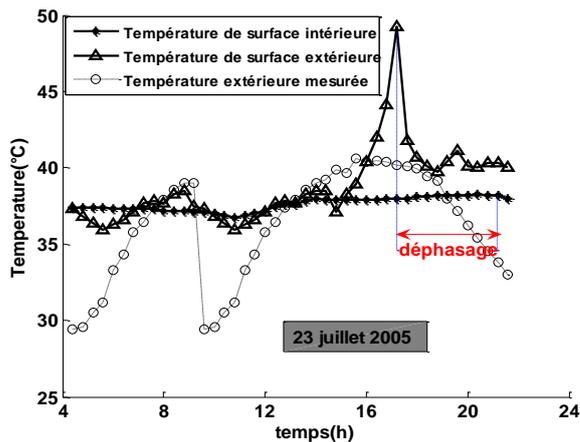


Figure 2.17 : Décalage horaire enregistré entre la surface extérieure et la surface intérieure au mur ouest du studio isolé du 23/07/2005

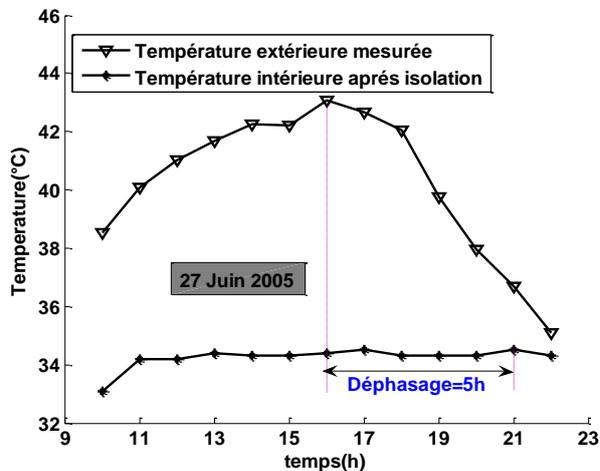
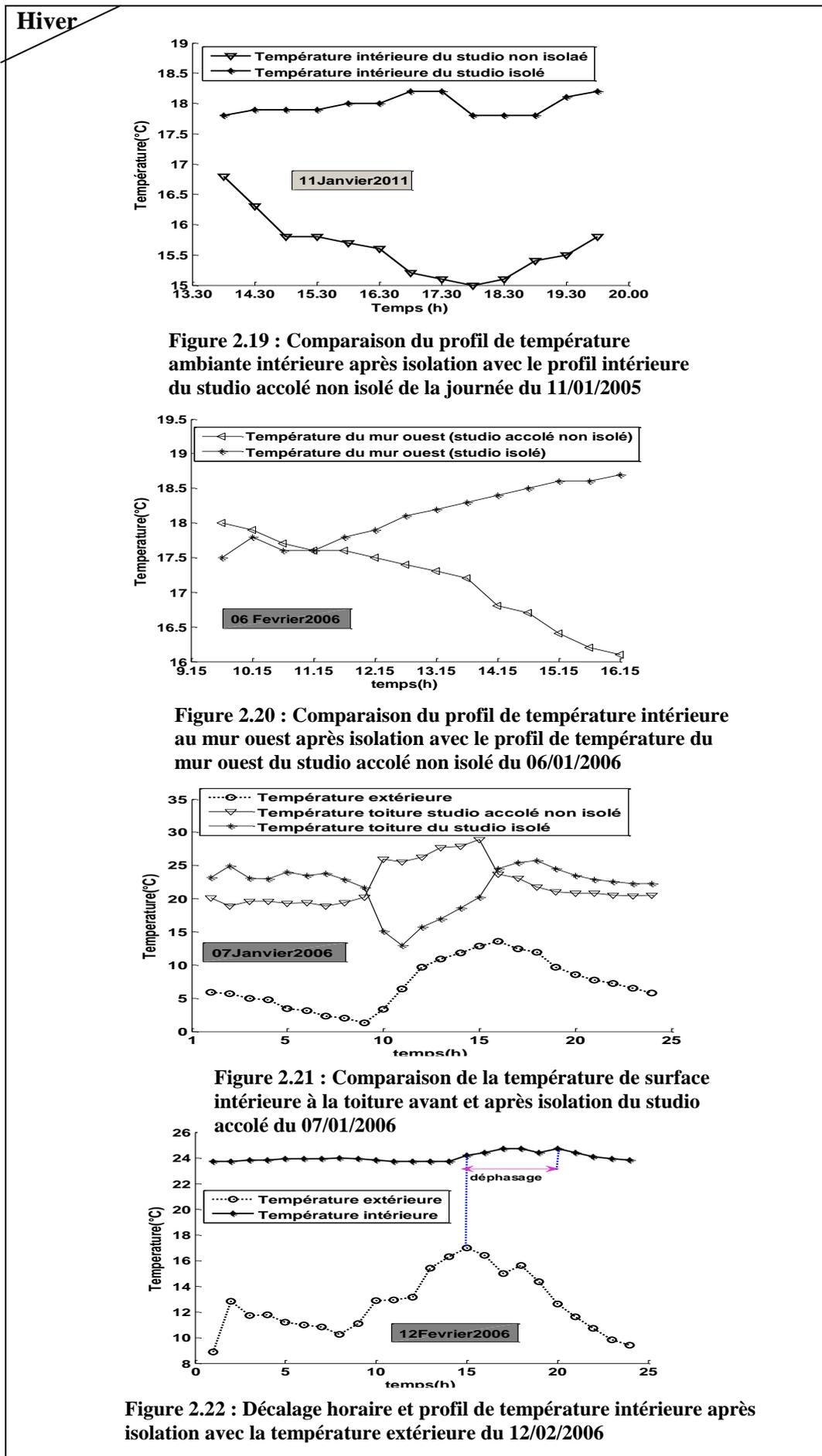


Figure 2.18 : Décalage horaire enregistrée entre l'ambiance extérieure et intérieure du studio isolé du 27/06/2005

c. Profil de température et inertie thermique pour la saison hivernale



2.4. Etude de l'évolution de température avant et après réhabilitation pour les mois les plus froides de l'année à différentes sources de chaleurs conventionnelles suivant une simulation numérique.

2.4.1. Modèle mathématique adopté

Régime permanent

La méthode adoptée consiste à établir un bilan thermique décrivant les différentes équations et systèmes d'échanges thermiques permettons de déterminer l'évolution de la température ambiante intérieure (**Tai**) du local d'étude. Les déperditions de base comprennent, les déperditions par transmission de chaleur à travers les parois et les déperditions par renouvellement d'air. Dans la méthode utilisée explicitée par le C.S.T.B dans le D.T.U [45-46], ces déperditions sont dues aux transmissions de la chaleur à travers les différentes parois constituant le local : par conduction et par convection.

Régime transitoire

En plus des échanges conductifs et convectifs, le régime transitoire admet l'échange radiatif. Dans son application, ce régime ne concerne que les échanges de chaleur. Il n'est pas donc pris en compte la stratification de l'air d'une zone, ni la diffusion d'eau dans les parois, les changements d'état ne sont pas non plus pris en compte, donc le stockage par la chaleur latente n'est pas traité, n'est l'effet des variations d'humidité. C'est donc exclusivement l'enveloppe qui est étudié. Pour ainsi élaborer le modèle mathématique, quelques hypothèses simplificatrices ont été établies :

a) Hypothèses

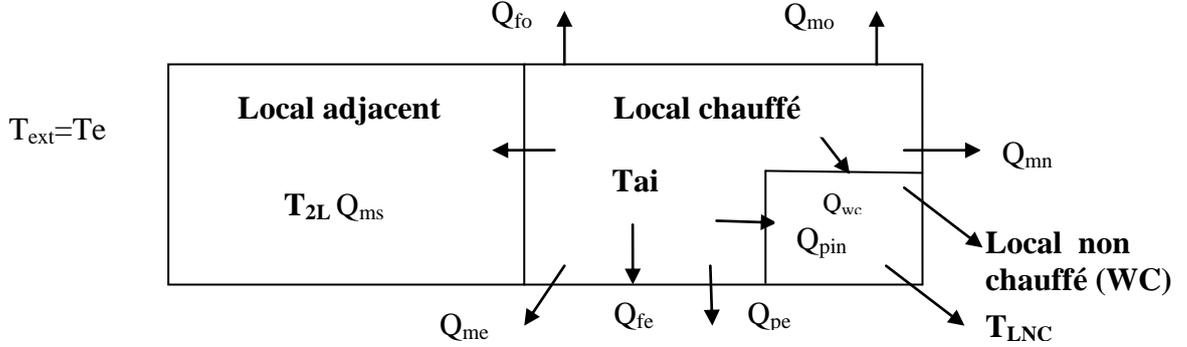
- L'écoulement est unidimensionnel à travers les différentes couches des murs ;
- La distribution de la température d'une paroi située sur chaque surface est uniforme ;

b) Méthode d'intégration numérique

Pour la résolution des systèmes d'équations régissant le fonctionnement de toutes les parois du local et ce du local global, nous avons choisi parmi les méthodes numériques celle de Runge-Kutta [47-48]. Et, à partir du bilan de puissance, nous mettons en œuvre un programme de calcul, permettant de simuler le comportement thermique des différentes composantes du local.

2.4.1.1. Bilan thermique en régime quasi-permanent

A partir des équations du bilan et de la méthode décrite par le DTU, on a établie l'équation générale (2.1) en Régime quasi-transitoire suivant le schéma ci-dessous :



$$C_{air} \frac{\Delta T_{air}}{\Delta t} = \sum \dot{Q}_c + \sum \dot{Q}_L + \sum \dot{Q}_r + \Phi \quad (2.1)$$

Où,

$$\sum \dot{Q}_c + \sum \dot{Q}_L = \sum \dot{Q}_m \quad (2.2)$$

$$\sum \dot{Q}_m = \dot{Q}_{mo} + \dot{Q}_{mn} + \dot{Q}_{wc} + \dot{Q}_{ms} + \dot{Q}_{me} + \dot{Q}_{pf} + \dot{Q}_{sol} \quad (2.3)$$

$$\sum \dot{Q}_r = \sum \dot{Q}_f + \sum \dot{Q}_p + \sum \dot{Q}_{inf} \quad (2.4)$$

$$\sum \dot{Q}_f = \dot{Q}_{fo} + \dot{Q}_{fet} \quad (2.5)$$

$$\sum \dot{Q}_p = \dot{Q}_{pint} + \dot{Q}_{pext} \quad (2.6)$$

$$\sum \dot{Q}_{inf} = \dot{Q}_{inf F} + \dot{Q}_{inf Por} \quad (2.7)$$

Avec,

\dot{Q}_c , \dot{Q}_L , \dot{Q}_r : Déperditions par conduction, linéique et par renouvellement d'air (W) ;

\dot{Q}_m : Déperditions par transmission à travers les murs, plafond et le plancher (W) ;

\dot{Q}_f , \dot{Q}_p , \dot{Q}_{inf} : Déperditions à travers les fenêtres, portes et par infiltration (W) ;

C_{air} : Capacité thermique de l'air (Wh/m³°C),

T_{air} : Température de l'air ambiant (°C) ;

Φ : Source de chaleur (W) ;

t : Temps en (h) ;

" n,o,e,f,p" : Respectivement indices des orientations des parois, fenêtres et portes.

Calcul des déperditions calorifiques thermiques

Les relations donnant les déperditions thermiques par conduction, par les liaisons et par renouvellement d'air sont données dans les formules (1-2 à 1-4) du chapitre 1. Ainsi que le coefficient de conductance K.

Dans notre cas d'étude la différence de température entre l'intérieure et l'extérieure au local, dépend du local avoisinant, de la pièce non chauffé au local et de l'air ambiant extérieure. Elle se présente comme suit :

- Avec le local avoisinant

$$\Delta T_i = (T_{ri} - T_{2L})$$

T_{2L} : Température correspondant au deuxième local, celle-ci est prise fixe.

- Avec l'extérieure

$$\Delta T_i = (T_{ri} - T_e)$$

T_e : Température extérieure mesurée en (°C).

- Avec le local non chauffé

$$\Delta T_i = (T_{ri} - T_{LNC})$$

T_{LNC} : Température du local non chauffé, est donné suivant la relation suivante [46-49] :

$$T_{LNC} = \frac{\sum (KSTe + kLTe + 0.34qeTae)}{\sum (KS + kL + 0.34qe)} \quad (2.8)$$

Avec,

T_{LNC} : température du local non chauffé (°C) ;

T_e : température extérieure à la paroi (°C) ;(qui peut être celle d'un local chauffé contigu).

qe : débit d'air [m^3/h] entrant à la température (T_{ae})

T_{ae} : température de l'air entrant (°C).

2.4.1.2. Formulation en régime transitoire

L'équation générale de l'air intérieur et des différentes parois fait intervenir les échanges radiatifs et les facteurs de formes. Ainsi, les équations différentielles sont élaborées en régime transitoire et appliquées pour un nœud sur les surfaces internes aux parois.

L'équation générale propre aux différentes parois est :

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = Q_i^{cd} + Q_i^c + Q_i^r \quad (2.9)$$

L'équation générale propre à l'air intérieure est :

$$C_{air} \frac{dT_{ai}}{dt} = Q_{air}^{cd} + Q_{air}^c + \Phi \quad (2.10)$$

Avec,

Q_i^{cd} : Puissance conductive de la paroi à travers les murs, plafond et le sol et ouvrants (Watt) ;

Q_i^c, Q_{air}^c : Puissance convective de la paroi et de l'air intérieur au studio (Watt) ;

Q_i^r : Puissance radiative à grande longueur d'ondes échangée entre les différentes parois et absorbée par i (Watt) ;

Q_{air}^r : Puissance radiative échangée entre les différentes parois et absorbée par l'air (Watt) ;

Φ : Source de chaleur (W) utilisée pour le chauffage ;

$T_{ai} \& T_i$: Température de l'air ambiant intérieur et de la paroi au studio en (°C) ;

C_{air}, C_i : Capacité thermique de l'air et de la paroi (Wh/m³°C), avec $C = \rho \dot{C}_p V$;

$\rho \dot{C}_p V$: Respectivement la masse volumique, la capacité thermique (Kg/m³, Wh/Kg °C) ;

$V(V_{air}, V_i)$: Volume d'air du local et de la paroi en (m³) ;

t : Temps en (heure).

*Les équations différentielles sont élargies et détaillées dans le **chapitre 3** par la méthode Nodale, en régime transitoire appliquées sur plusieurs nœuds.

2.4.2. Commentaire sur les résultats calculés

Les résultats de calculs trouvés des mois les plus froides et rudes de l'année (Décembre, Janvier et Février), appliqués à notre cas d'étude sont présentés sur les **figures (2.24-2.32)** en régime quasi-transitoire et en régime transitoire, sont à commentés comme suit :

Pour le régime quasi-permanent (figures 2.23-2.26), les résultats sont :

La **figure 2.24**, montre une différence de température, qui varie entre **1°C et 2°C** pour le mois de Décembre et Février, à une source de chaleur portée à **500Watt** avant et après isolation ; Elle est de **1°C à 3°C** en Janvier.

Dans la **figure (2.25)**, nous avons montré qu'avec une source de chaleur portée à **2000Watt**, la différence de température n'est pas loin de **3°C**, comparée à la source de chaleur prise égale à **500Watt** après isolation.

En prenant en compte l'étanchéité des ouvrants (fenêtres et portes) dans la **figure (2.26)**, la différence de température enregistre **2°C à 2.5°C** d'écart sans et avec étanchéité pour une source de chaleur portée à **1500Watt**.

Pour le régime transitoire, les résultats se présentent comme suit :

L'écart de température enregistrée dans les **figures (2.28-2.29)**, avant et après isolation est important et il varie entre **2°C à 3°C** pour les deux sources de chaleurs de **1500** et **2000W**.

La lecture de la **figures (2.31)** simulée sur plus de trois mois avec un pas de temps de **5 minutes**, montre une différence de température variant entre **1°C à 2°C** pour les deux mois de Décembre et Janvier et d'environ **1°C** pour le mois de Février avec une source de chaleur portée à **500Watt** avant et après isolation. Dans la **figure (2.32)** la différence en température avant et après isolation est augmentée, elle est de **1.5 à 3°C** en décembre et janvier pour une source de chaleur portée à **2000Watt**, et entre **2°C à 2.5°C** en mois de février et entre **1°C à 2°C** à mi mars.

Les **figures (2.32-2.44)**, donnent les différentes allures et profils de température sur toutes les parois de notre local ainsi, que les profils de température des ouvrants, et du local non chauffé. Les profils de températures sont sinusoïdaux et suivent l'évolution de la température extérieure. Nous remarquons aussi l'écart de température très apparent, cela est du à l'effet de l'inertie thermique engendré par la structure des murs.

2.4.3. Résultats de température calculée avant et après réhabilitation pour la saison d'hiver

a-1) Profil de température ambiante intérieure avant et après isolation du local en régime quasi-permanent à différentes sources d'énergies sur 5 mois de l'année 2006.

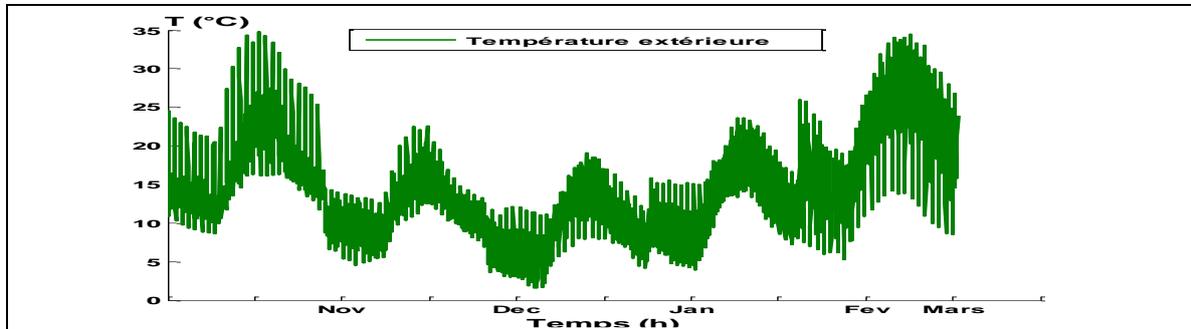


Figure 2.23 : Evolution de température extérieure hivernale de l'année 2006

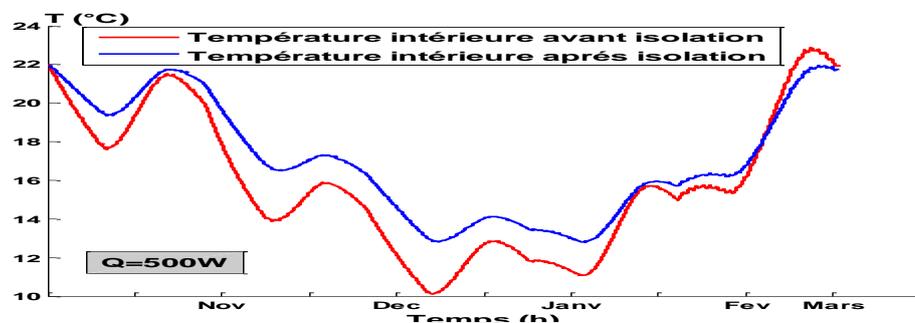


Figure 2.24 : Evolution de température ambiante intérieure Tai avant et après isolation pour une source de chaleur de 500Watt.

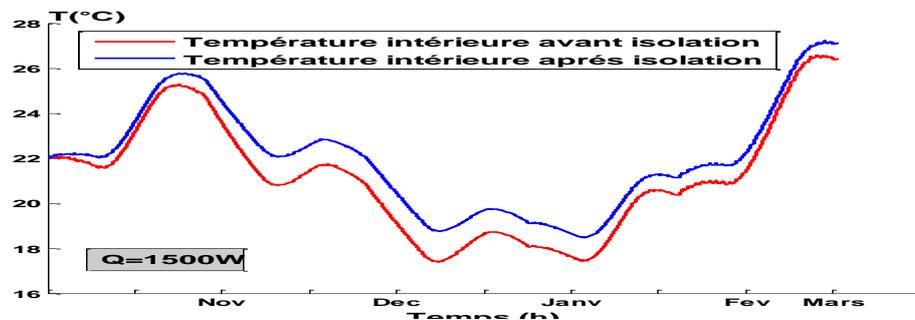


Figure 2.25 : Evolution de température ambiante intérieure Tai après isolation pour une source de chaleur de 2000Watt.

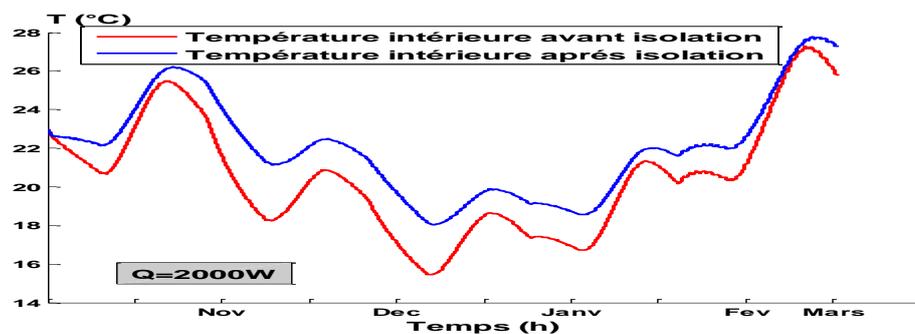


Figure 2.26 : Evolution de température Tai après isolation sans et avec étanchéité pour une source de chaleur de 1500Watt.

a-2) Profil de température ambiante intérieure avant et après isolation du local en régime transitoire.

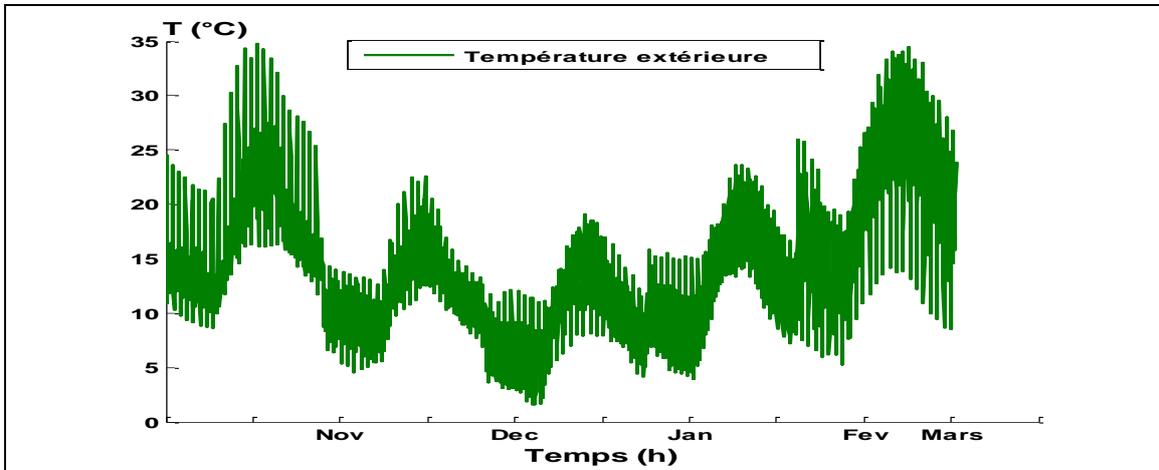


Figure 2.27: Evolution de température extérieure hivernale de l'année 2006

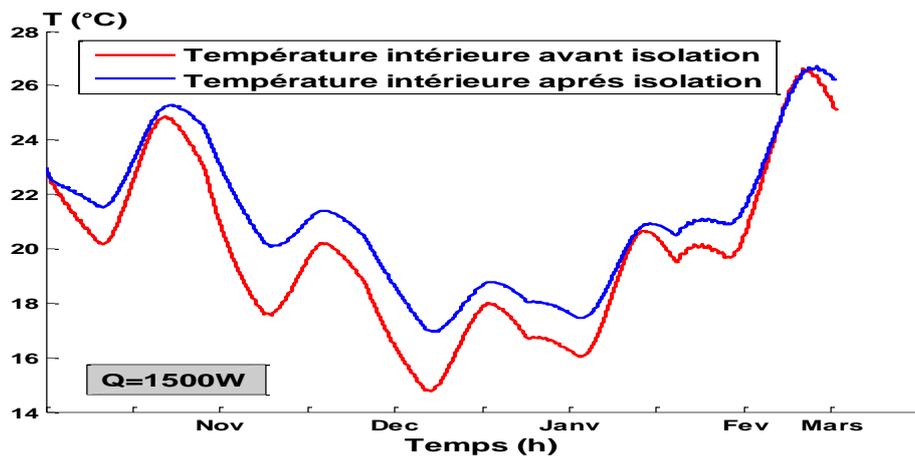


Figure 2.28: Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation pour une source de chaleur de 1500Watt

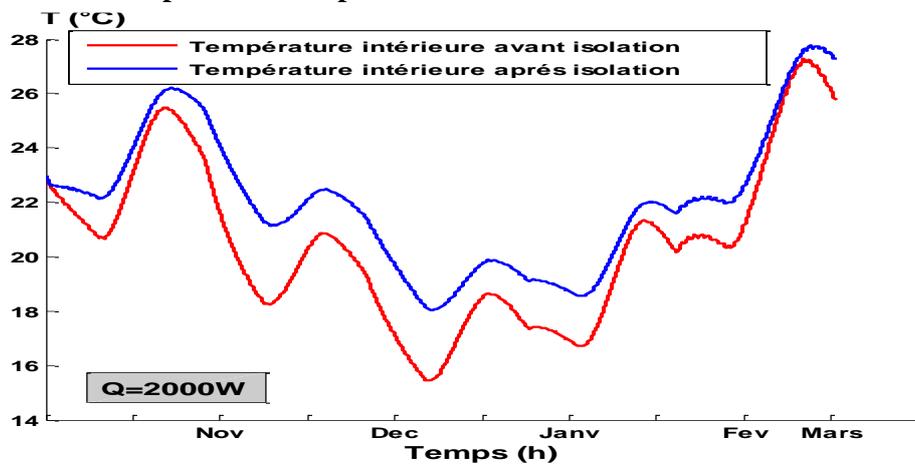


Figure 2.29 : Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation pour une source de chaleur de 2000Watt

a-3) Profil de température ambiante intérieure avant et après isolation du local en régime transitoire sur un pas de 5 minutes pour 105 jours.

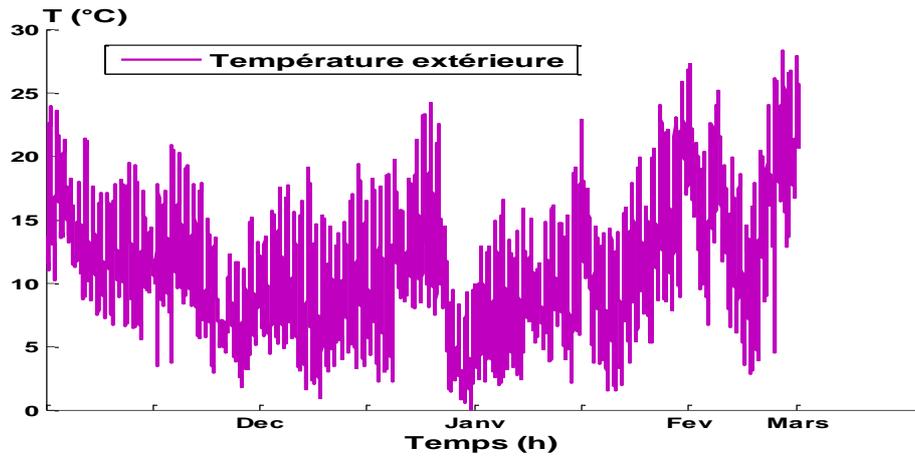


Figure 2.30: Evolution de température extérieure hivernale de l'année 2005

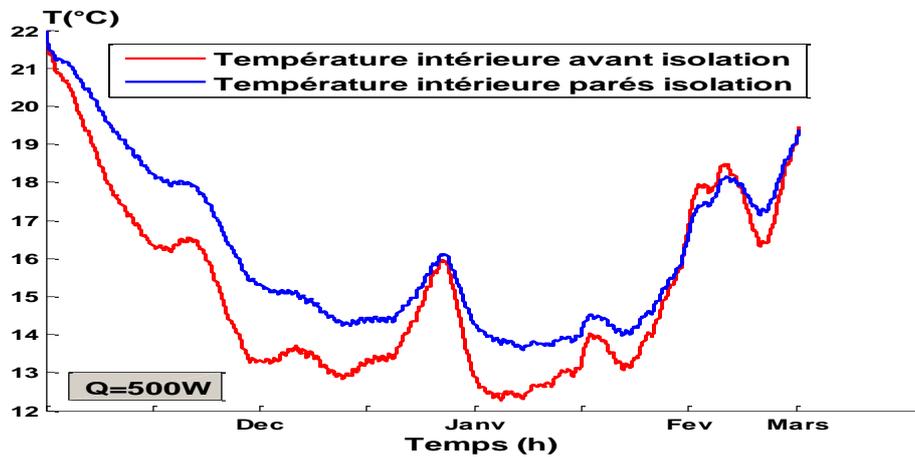


Figure 2.31 : Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation sur un pas de 5 minutes pour une source de chaleur de 500Watt

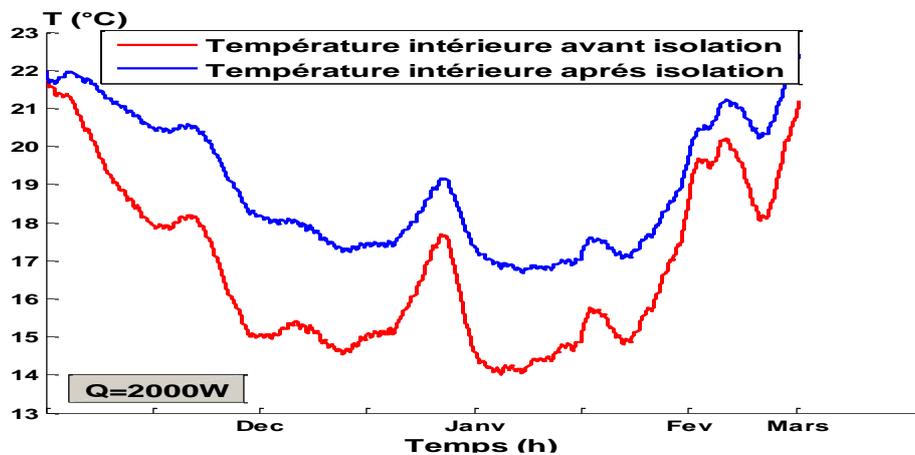


Figure 2.32 : Profil de température ambiante intérieure du local avant et après isolation sur un pas de 5 minutes pour une source de chaleur de 2000Watt

a-4) Allure et profil de température de toutes les parois du local en pierre après isolation en régime transitoire

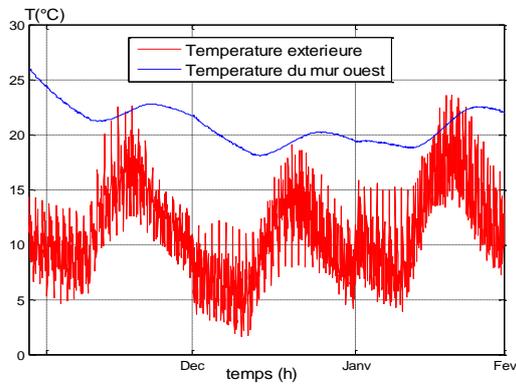


Figure 2.33 : Profil de température du mur Ouest avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

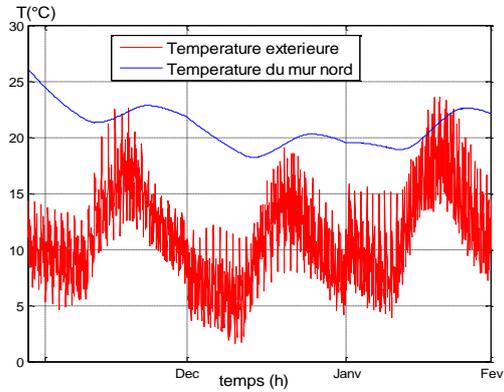


Figure 2.34: Profil de température du mur Nord avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

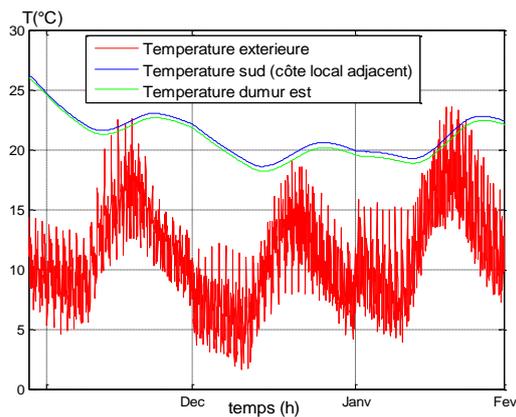


Figure 2.35 : Profil de température du mur Sud et est avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

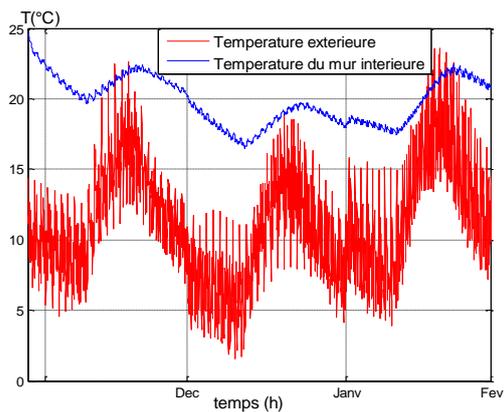


Figure 2.36 : Profil de température du mur Intérieure avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

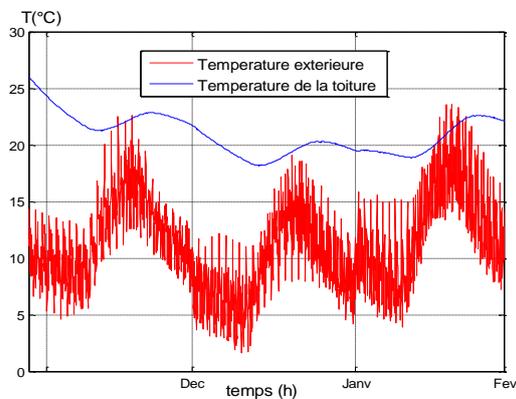


Figure 2.37: Profil de température de la toiture avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

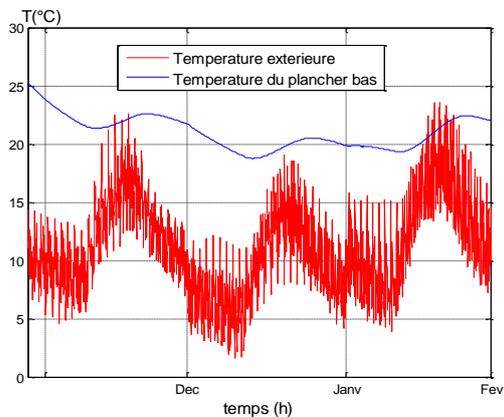


Figure 2.38 : Profil de température du plancher bas avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

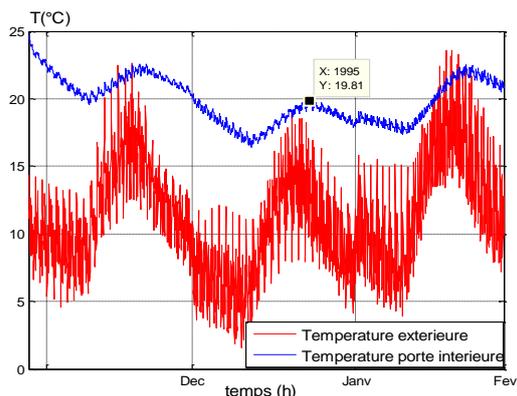


Figure 2.39: Profil de température de la porte intérieure avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

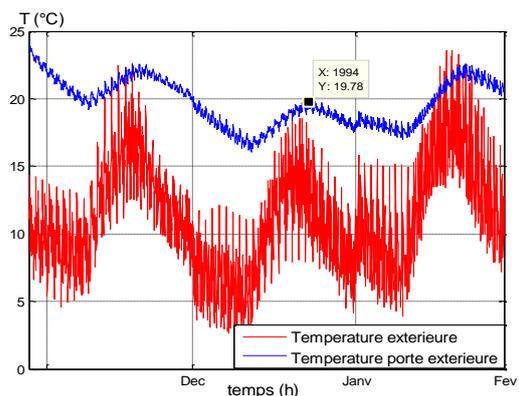


Figure 2.40: Profil de température de la porte extérieure avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

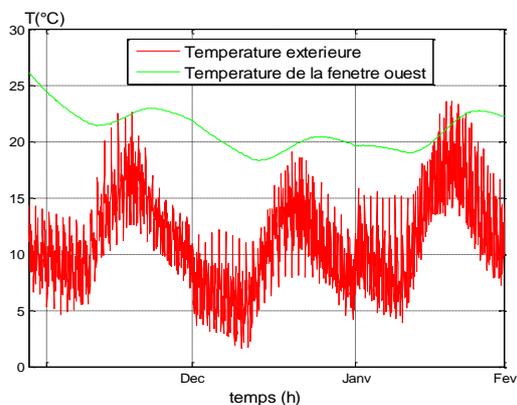


Figure 2.41 : Profil de température de la fenêtre ouest avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

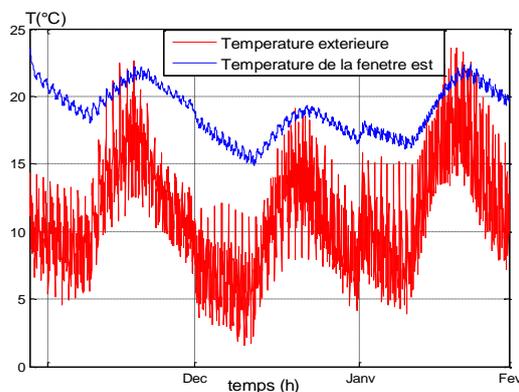


Figure 2.42 : Profil de température de la fenêtre est avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

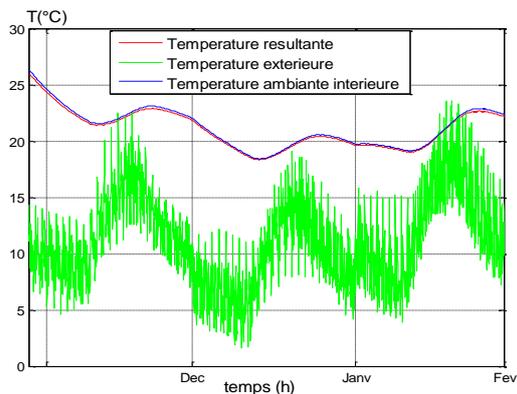


Figure 2.43 : Profil de température de l'ambiance intérieure et de confort avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

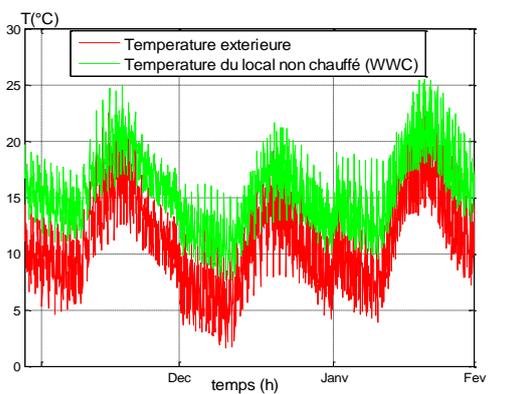


Figure 2.44 : Profil de température du local non chauffé avec la température extérieure pour une source de chaleur de 2000Watt

2.4.4. Valeurs de déperdition thermique avant et après isolation du local

Tableau2.2. Valeurs de déperditions thermiques avant et après réhabilitation

Déperditions totales avant réhabilitation		Après réhabilitation	
Désignation		Déperdition [W/°C]	Déperdition [W/°C]
Local	N°		
Séjour	1	132.57	110.05
S. de bain	2	96.12	84.08
Cuisine	3	134.64	123.01
Chambre	4	139.46	100.52
Déperditions totales initiales : (Q_{Ti})=502.79W/°C		Déperditions totales finales : (Q_{Tf})=417.66W/°C	

La valeur de déperdition thermique après réhabilitation (Q_{Tf}) est inférieure à celle calculée avant isolation (Q_{Ti}). Enregistre **85.13W** pour **1°C**, cette valeur est considérable, et elle est toutefois considérée comme gain thermique. Ainsi, (Q_{Tf}) sera utilisée dans le dimensionnement de l'installation de chauffage solaire traité dans le chapitre qui suit.

Conclusion

Dans le cas de notre étude, nous avons démontré l'avantage que procure la réhabilitation thermique pour le confort intérieur, que soit en été ou en hiver. Nous avons démontré aussi, qu'en plus de l'application des concepts bioclimatiques, une isolation de l'extérieur est nécessaire et ne fait que renforcer l'inertie thermique de la pierre.

Quant à la température de confort, nous avons enregistré en été une valeur stable de **32°C**, avec une différence de température allant de **4°C** à **9°C**, or elle n'était que de **0°C** à **1°C**. Ces résultats sont enregistrés en **2005** avant l'achèvement des travaux de réhabilitation.

Cette température est améliorée après finalisation des travaux sur terrains, dont on a enregistré les valeurs oscillant entre **28°C** et **29°C** en l'an **2008** pour la même saison. En hiver, elle affiche une valeur allant de **17°C** à **21°C**, et la différence dépasse les **3°C** avant et après réhabilitation.

Sinon, pour compenser les degrés manquons, en hiver, en plus d'utilisation du chauffage solaire passif, le chauffage solaire actif, est toutefois recommandé pour les mois les plus froids de l'année, vu que l'utilisation des installations conventionnelles demandent plus d'énergie, donc moins intéressant, que soit sur le plan économique ou environnemental.

TROISIEME CHAPITRE

**INTEGRATION D'UNE INSTALLATION SOLAIRE
THERMIQUE POUR LE CHAUFFAGE DU LOCAL**

**-DIMENSIONNEMENT ET CALCUL DES PERTES
THERMIQUES DE L'INSTALLATION SOLAIRE**

**- CALCUL DE LA TEMPERATURE DE CONFORT EN REGIME
TRANSITOIRE SUIVANT LA METHODE NODALE**

Introduction

Ce chapitre propose l'utilisation de l'énergie solaire comme source de chaleur pour le chauffage du local en hiver. Ainsi, depuis les résultats trouvés dans le chapitre précédent, nous avons constaté que le chauffage solaire par voie passive est possible ; Néanmoins, le chauffage solaire en utilisant le système actif est recommandé pour les mois les plus froids de l'année.

On a donc, conçu et réalisé une installation solaire thermique intégrée à l'habitation. Ensuite, On a élaboré le dimensionnement de l'installation qui consiste :

- au calcul de charges thermiques, avec la méthode de degré-jours qui utilise les valeurs de déperditions thermiques calculées sur l'ensemble du local.
- Et, au calcul de la surface de captage qui permettra de couvrir les charges thermiques par application à la méthode dite f-Chart.

Depuis, on a développé un bilan de l'installation pour le calcul de l'énergie utile en utilisant les paramètres de température extérieure, de vitesse du vent et le rayonnement solaire globale en association avec les différents paramètres calculés dans l'installation à savoir : le débit volumique, la surface de captage, le volume des cuves de stockage, le nombre de capteurs....etc.

Cependant, un modèle mathématique de calcul destiné à ce dispositif solaire à été élaboré, il simule le calcul de température obtenue sur les différents organes de l'installation comme, la température de la plaque absorbante, de la cuve de stockage et la température de sortie et d'entrée de l'eau et de l'air du système (stockage principal et l'habitation). Les résultats trouvés par simulation seront confrontés par la suite aux résultats expérimentaux. Sachant, que pour un bon dimensionnement de l'installation, les calculs doivent être développés sur une dizaine d'année, voir, cinq années au minimum.

Après dimensionnement de l'installation solaire, nous avons développé un modèle mathématique de calcul assez complexe, et utilisant les équations différentielles établies sur toutes les couches des différentes parois du studio pour le calcul de la température ambiante intérieure en injectant les résultats à la source de chaleur calculée au préalable. Ainsi, le modèle établi est capable de prédire le comportement dynamique du local, en approchant son fonctionnement réel par l'application de la méthode dite des nœuds par analyse nodale. Il s'agit au fait, de partager le système en plusieurs sous systèmes, d'établir les équations générales de ces nœuds en régime variable, dont on calculera le champ de température, et on établira pour chacun son bilan thermique à l'instant t , avant et après intégration du dispositif solaire. Il sera par la suite donné des graphiques de température de l'ambiance intérieure, et de chaque façade du studio suivi d'un commentaire. Et enfin, le chapitre est achevé par une conclusion.

3.1. Etude de l'installation solaire thermique

3.1.1. Dimensionnement de l'installation solaire

Pour dimensionner l'installation nous avons proposé deux méthodes, l'une qui consiste au calcul de charges thermiques, dite méthode de degré-jours (J°), et l'autre dite méthode de f-Chart qui consiste à calculer la surface de captage (A_c) qui permettra à collecter une quantité d'énergie solaire pour couvrir les charges thermiques. Ces deux méthodes seront définies comme suit,

3.1.1.1. Méthode de degré-jours

Pour connaître les charges thermiques (L) tout au long de l'année, il faut intervenir les degrés-jours (J°). Il s'agit de mesurer l'écart entre la température d'ambiance interne de base et la température extérieure heure par heure pour chaque jour durant tout les mois de l'année [51]. Selon le manuel de Duffie et Beckmann (1991) [52], la relation de J° est donnée par,

$$J^\circ = \sum_{\text{mois}} (T_b - T_e)^+ \quad (3.1)$$

Avec,

T_b : Température ambiante de base (18°C) ;

T_e : Température extérieure (°C) ;

$^+$: les valeurs doivent être positives.

Les besoins thermiques en chauffage de l'habitation sont obtenus par intégration, comme suit,

$$L = \int_{\text{mois}} Q(T_b - T_e) dt, L = QJ^\circ \quad (3.2)$$

Avec,

L : La charge de l'habitation (W) ;

Q : Déperditions totales en (W/°C).

3.1.1.2. Méthode de f-chart

La surface de captage (A_c) d'une installation solaire avec stockage peut être évaluée grâce à la méthode de calcul du taux de recouvrement solaire (fraction solaire f) dite méthode f-chart énoncée par Klein et al. (1977) [53], et détaillée dans le manuel de J. Duffie et W.A. Beckmann (1991) [52]. Cette méthode utilise les caractéristiques des capteurs et se calcul sur une base mensuelle en rayonnement solaire incident, en température ambiante et en charge de chauffage

La relation principale nous permettant de calculer (\mathcal{A}_c) est donnée comme suit,

$$\mathcal{F} = \sum_{\text{mois}} f L_i / \sum_{\text{mois}} L_i \quad (3.3)$$

Avec,

\mathcal{F} : Fraction de charge de chauffage annuelle couverte par l'installation ;

i : représente le nombre de mois dans l'année ;

L_i : Charge thermique (W) ;

f : Fraction de charge de chauffage totale mensuelle couverte par l'installation ; il s'agit d'une corrélation liant le paramètre f aux deux paramètres adimensionnels X & Y

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \quad (3.4)$$

Cette relation admet certaines limites strictes d'application. Ainsi, si f est négatif, une valeur de 0 est utilisée ; Si f est supérieure à 1, une valeur de 1 est utilisée. Pour atteindre la couverture maximale afin de combler toutes les déperditions, \mathcal{F} doit avoir la valeur avoisinant 1.

Les paramètres adimensionnels sont donnés comme suit,

$$X = [A_c F'_R U_L (T_{ref} - T_a) \Delta t] / L \quad (3.5)$$

$$Y = [A_c F'_R (\tau \alpha) G_n N] / L \quad (3.6)$$

Avec,

A_c : Surface de capteurs solaire (m²) ;

U_L : Coefficient global de pertes thermiques (W/m²°C) ;

T_{ref} : Température empirique de référence (100°C) ;

L : Charge de chauffage totale mensuelle en (joule) ;

G_n : Irradiation globale totale sur le plan incliné en (J/m²) ;

N : Nombre de jours dans le mois ;

$(\tau \alpha)$: Coefficient de transmittivité et d'absorptivité produit par le capteur ;

Δt : Nombre total de seconde dans le mois.

F'_R : Facteur de l'efficacité d'échangeur de chaleur capteur-réservoir de stockage ;

Correction sur X et Y : X et Y doivent être corrigés respectivement en fonction de la dimension du stockage et de l'échangeur de chaleur. Pour X, la méthode de f-Chart a été développée avec une capacité de stockage standard de **75** litres par m². Pour les autres capacités de stockage, X doit être multiplié par un facteur correctif X_c/X défini par :

$$X_c/X = (V/V_s)^{-0.25}, \text{ pour } 0.5 \leq (V/V_s) \leq 4 \quad (3.7)$$

Avec,

V : Volume réel de stockage en (l/m²) ;

V_s : Volume standard de stockage (=75l/m²)

Pour Y la correction se fait sur la dimension de l'échangeur de chaleur

$$Y_c/Y = 0.39 + 0.65 \exp [-0.139(Dp)/\epsilon_L C_{min}], \text{ pour } (0.5 \leq \frac{\epsilon_L C_{min}}{Dp} < 50) \quad (3.8)$$

Avec,

Dp : Coefficient global de pertes thermiques vers l'habitation ;

ϵ_L : Facteur d'efficacité d'échangeur de chaleur eau-air ;

C_{min} : Capacité minimum du fluide.

3.1.2. Le gisement solaire



Figure 3.1 : Appareil de type Synt Tracker mesurant l'irradiation diffus, direct et le global connecté à un enregistreur de type LPD12 6.10 et branché sur PC

La mesure de l'éclairement est effectuée à l'aide d'un appareil de type Synt Tracker, mesurant à la fois le rayonnement direct, diffus et le global sur un plan horizontal et incliné. Cet appareil est placé au niveau du site d'implantation du projet, il est connecté à un enregistreur de mesure de type LPD12 branché sur un PC. Les valeurs ainsi collectées sont très précises, car les données sont enregistrées sur chaque cinq minute. Le taux d'insolation calculé à Ghardaïa est très important (en moyenne **75 %**) et la moyenne annuelle de l'irradiation journalière globale mesurée sur un plan horizontal dépasse **6000 Wh/m²**.

3.1.3. Application

Avant de procéder au calcul de la surface de captage et du volume de stockage, nous avons calculé les valeurs de la charge L , de la température extérieure T_a , et le rayonnement global inclinée G mesurés et calculés pour chaque heure de chaque mois de l'année. Il est à préciser que pour un bon dimensionnement un minimum de 5 années est recommandé. Dans notre cas d'étude nous avons utilisé des données mesurées et traitées depuis **2004 à 2008**. Depuis, nous avons procédé au calcul visant le dimensionnement de notre installation suivant les étapes schématisées dans la (figure 3.2). Après calcul de la surface de captage et le volume de stockage, nous avons établis des allures illustrant la caractérisation de notre dispositif solaire donné en (figure 3.3).

3.1.3.1. Les différents organes utilisés dans notre installation solaire thermique

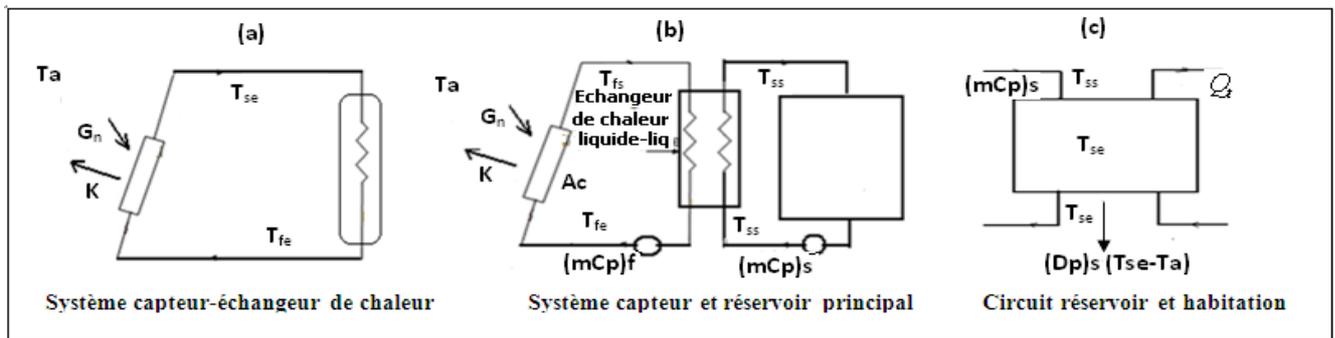


Figure 3.2 : Schéma de l'installation solaire thermique

3.1.3.2. Allure de dimensionnement de l'installation solaire thermique après application

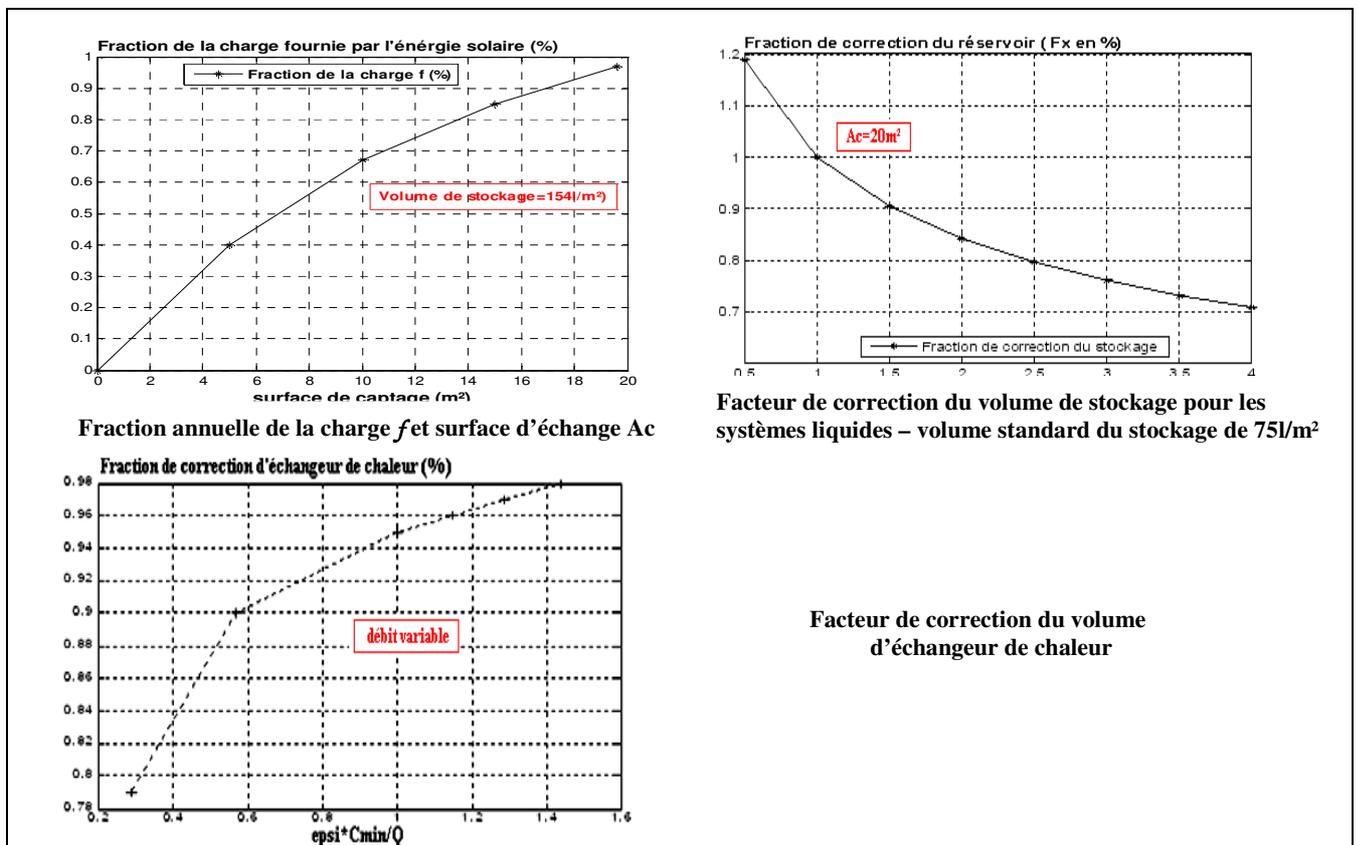


Figure 3.3 : Schéma présentant la caractérisation de notre installation solaire

3.1.3.3. Présentation générale de l'installation solaire thermique après dimensionnement

Les éléments de base constituant cette installation (voir, **photo 3.1**), sont : Un ensemble de capteurs plans d'une surface de captage trouvée égale à 20m², orienté vers le sud et incliné de



Photo 3.1 : Présentation de l'installation solaire thermique

32°, avec trois réservoirs d'eau dont le volume de stockage est trouvée égale à 1000 litres chacun. On utilise un système utilisant une solution d'antigel comme fluide caloporteur. Un échangeur de chaleur liquide-liquide est utilisé entre le capteur et le premier réservoir. Un échangeur de chaleur liquide-air est placé dans le troisième réservoir pour transférer la chaleur de stockage vers les pièces d'habitation. Les instruments de contrôle, de régulation, les soupapes de sécurité, les

pompes et conduites constituent le reste de l'équipement.

3.1.4. Bilan de l'installation

3.1.4.1. Bilan thermique dans la plaque absorbante

Il sera défini dans ce bilan l'énergie utile nécessaire pour couvrir les charges thermiques de l'habitation et les différentes températures de l'installation.

Les différents flux d'énergie dans un capteur sont représentés dans la (Figure 3.4).

L'énergie solaire (Φ_s) frappant le capteur n'est pas transmise en totalité à l'absorbeur. Une partie (Φ_r) est perdue sous forme de pertes optiques caractérisées par le rendement optique **a**. Une autre partie (Φ_a) de la quantité d'énergie absorbée (Φ_a) par la surface noire est dissipée de la manière suivante :

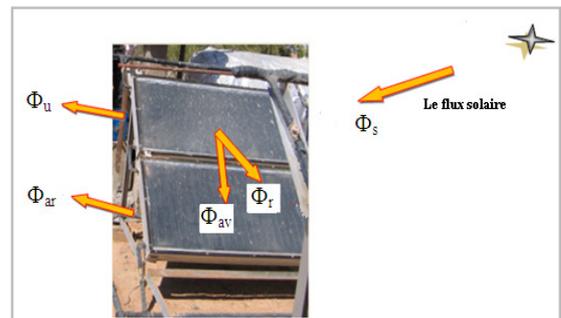


Figure 3.4 : Présentation du flux d'énergie dans un capteur plan

1- Pertes par conduction vers le fond et les côtés latéraux

2- Pertes par convection et rayonnement à travers le système de couverture (Φ_{av}).

La quantité restante d'énergie est transmise au fluide caloporteur et représente l'énergie utile du système. On obtient par conservation, l'énergie à la sortie du capteur (Φ_u)

$$\Phi_u = \Phi_s - \Phi_r - \Phi_{av} - \Phi_{ar} \quad (3.9)$$

Avec,

Φ_u = flux transmis (w) ;

Φ_s = flux d'énergie solaire incident (w) ;

Φ_r = flux d'énergie réfléchie (w) ;

$\Phi_{ar} + \Phi_{av} = \Phi_a$ = flux d'énergie absorbée et dissipée (w).

- **Le flux d'énergie dissipée**

$$\Phi_{ar} + \Phi_{av} = U_L (T_m - T_a) A_c \quad (3-10)$$

U_L : Coefficient d'échange global de l'absorbeur ($W/m^2°C$) ;

$U_L = U_{av} + U_{ar}$ (coefficients d'échanges avant et arrière de l'absorbeur (w/m^2c)) ;

T_m : température moyenne dans l'absorbeur ($°C$) ;

T_a : température de l'air extérieur ($°C$) ;

A_c : Surface du capteur.

- **Le flux d'énergie absorbée**

$$\Phi_a = a \cdot \Phi_s \quad (3-11)$$

Avec,

$a = \tau \alpha$ (transparence du vitrage et coefficient d'absorption de l'absorbeur).

- **Le flux d'énergie utile (transmis)**

L'énergie récupérée par le fluide caloporteur (énergie utile) après avoir traversée l'absorbeur est donnée par,

$$\Phi_u = [a G - U_L (T_m - T_a)]. A_c \quad (3-12)$$

G : intensité du flux solaire incident (w/m^2) ;

Il est très difficile de mesurer la température de l'absorbeur, car une chute de température se produit le long des veines du fluide [49]. D'où l'utilisation d'une autre relation qui fait intervenir la température moyenne du fluide dans le capteur en faisant introduire un facteur F' caractérisant l'efficacité d'échange de chaleur de l'absorbeur vers le fluide.

2^{ème} équation

$$\Phi_u = [a G - U_L (T_m - T_a)]. A_c. F' \quad (3-13)$$

F' = paramètre constructif (géométrie, matériaux) du capteur.

Où :

$$T_m = (T_{fe} + T_{fs}) / 2 \quad (3-14)$$

Avec :

T_{fe} = température d'entrée du fluide (°C)

T_{fs} = température de sortie au fluide (°C)

- **Calcul de la température de sortie du fluide**

Chaleur extraite communiquée au fluide caloporteur

$$\Phi_u = \dot{m} \cdot Cp (T_{fs} - T_{fe}) \quad (3-15)$$

Cette relation est la formule la plus classique pour le calcul de la puissance utile.

Avec,

\dot{m} = débit du fluide caloporteur (kg/ h)

Cp = chaleur spécifique du fluide (Kcal / Kg°C).

Chaleur perdue

$$\Phi_p = (T_{fe} + T_{fs} / 2 - T_a) \cdot U_L \cdot Ac = \Delta T_s U_L \cdot Ac \quad (3-16)$$

Chaleur recueillie s'écrit

$$\Phi_r = \Phi_u - \Phi_p \quad (3-17)$$

Avec

$$\Phi_r = G_n \cdot a \cdot \tau \cdot Ac$$

τ : Coefficient de transmission

Ac : surface de la plaque absorbante

En injectons les termes des formules de Φ_r et Φ_p dans la formule (3-15), on obtient la relation donnant la température de sortie du fluide :

$$T_{fs} = \frac{G \cdot Ac \cdot \tau \cdot a + T_{fe} \left(\dot{m} Cp - \frac{U_L Ac}{2} \right) + U_L Ac T_a}{\dot{m} Cp + U_L Ac / 2} \quad (3.18)$$

Une troisième formule utilisant la température d'entrée du fluide et qui introduit le facteur de conductance du capteur F_R permet de calculer Φ_u [54-55]

$$\Phi_u = [aG - U_L (T_{fe} - T_a)] F_R \cdot A_c \quad (3-19)$$

Avec :

F_R = Quantité de chaleur réelle extraite/quantité de chaleur recueillie si l'absorbeur est à la température T_{fe} .

*Le coefficient de perte U_L [52] du capteur est donné en annexe 3.1.

- **Température moyenne du fluide**

L'expression de la température moyenne du fluide intérieure du capteur de l'installation selon Duffie et Beckmann (1974) [52], se présente par :

$$T_{fm} = T_{fe} + (Q_u / A_c)(1 - F_r) / F_r U_L \quad (3.20)$$

Avec,

$$F_r = F_R / F'$$

En égalisant avec les relations et expressions précédentes, en aboutit à l'équation suivante,

$$T_{fm} = T_a + (aG_n A_c - Q_u / F') / U_L$$

- **Température moyenne de la plaque absorbante**

La température de la plaque absorbante se présente selon le manuel de Beckmann [52] par :

$$T_{pm} = T_{fe} + [(Q_u / A_c)(1 - F_r)] / F_r U_L \quad (3.21)$$

Finalement, en aboutit à l'équation suivante :

$$T_{pm} = T_a + (aG_n A_c - Q_u) / U_L \quad (3.22)$$

3.1.3.2. Bilan thermique de la cuve de stockage

La température de l'eau dans la cuve de stockage se calcul suivant le modèle brassé. Ce dernier consiste à supposer que la température dans la cuve est uniforme. Le régime est considéré transitoire et le flux total de la chaleur perdue dans la cuve est égal à la somme des flux radiaux Q_r plus le flux qui traverse les fonds bombés. La puissance récupérée par le fluide caloporteur est définie comme étant la différence entre l'énergie solaire incidente et les pertes thermiques [56]. Les différents flux utilisés dans le réservoir sont présentés dans la (figure 3.5), ci-après.

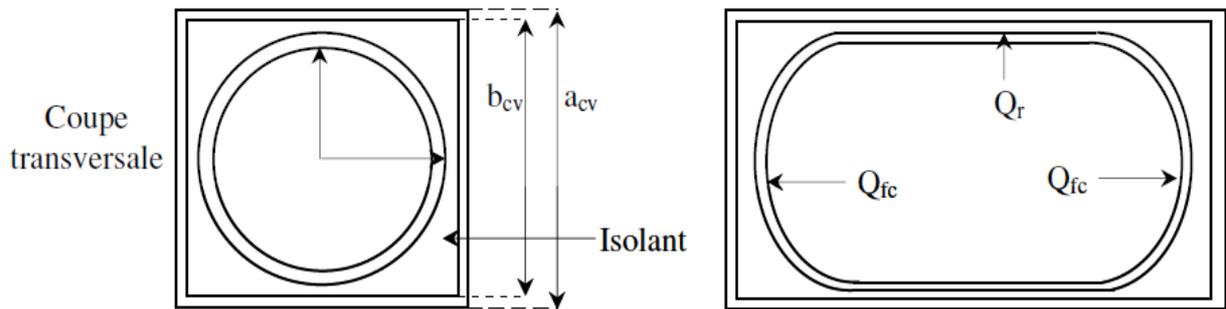


Figure 3.5 : Schéma de la cuve de stockage

Les relations nous permettant de calculer le coefficient de perte, et l'énergie dans le réservoir, ainsi que la température du stockage sont :

$$Q_t = K_s (T_s - T_a) = \frac{1}{R_{th}} (T_s - T_a) \quad (3.22)$$

Ou,

$$K_s = 2\pi r_1 L c v \sum \frac{1}{R_{thr}} + 2\pi r_1^2 \sum \frac{1}{R_{thc}} \quad (3.23)$$

Avec,

T_s, T_a : sont respectivement la température du stockage et la température ambiante ($^{\circ}\text{K}$).

R_{th} : résistance thermique de la cuve de stockage entre le milieu ambiant et le fluide stocké.

R_{thr} : résistances thermiques radiales.

R_{thc} : résistances thermiques sur les cotés.

Pour déterminer la résistance thermique du stockage de la cuve, on utilise le schéma analogique équivalent donné dans la (Figure 3.6).

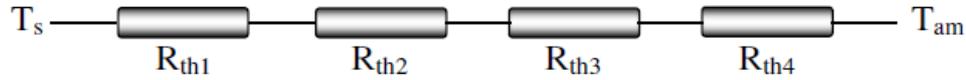


Figure 3.6 : Schéma analogique de la cuve de stockage

- R_{th1} : *résistance thermique de la cuve.*

$$R_{th1} = \frac{1}{2\pi L_{cv} r_1 h_{cv}} \quad (3.24)$$

Avec,

L_{cv} : longueur de la cuve (m) ;

r_1 : rayon intérieur de la cuve (m) ;

h_{cv} : coefficient d'échange de la chaleur par convection, il est calculé par la relation de Nusselt dans le cas de la convection naturelle par,

$$h_{cv} = Nu \frac{\lambda}{D} \quad (3.25)$$

Ou,

$$Nu = 0.52 K_s (GrPr)^{0.25} \quad (3.26)$$

- R_{th2} : *résistance thermique de la virole.*

$$R_{th2} = \frac{1}{2\pi L_{cv} \lambda_{ac}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.27)$$

Avec,

r_2 : rayon extérieur de la virole (m) ;

λ_{ac} : conductivité thermique de la virole ($W m^{-1} \text{ } ^\circ K^{-1}$).

- **R_{th3} : résistance thermique de l'isolant.**

$$R_{th3} = \frac{1}{2\pi L_{cv} \lambda_{isc}} \ln\left(\frac{0.54 b_{cv}}{r_2}\right) \quad (3.28)$$

Avec,

λ_{isc} : conductivité thermique de l'isolant (W m⁻¹ °K⁻¹).

- **R_{th4} : résistance thermique entre l'isolant et la tôle.**

$$R_{th4} = \frac{0.785}{2\pi L_{cv} \lambda_t} \ln\left(\frac{a_{cv}}{b_{cv}}\right) \quad (3.29)$$

Avec,

λ_t : conductivité thermique de la tôle. D'où :

$$K_s = 2\pi r_1 L_{cv} \left[\frac{1}{h_{cv}} + \frac{r_1}{\lambda_{ac}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{r_1}{\lambda_{isc}} \ln\left(\frac{0.54 b_{cv}}{r_2}\right) + \frac{0.785 r_1}{\lambda_t} \ln\left(\frac{a_{cv}}{b_{cv}}\right) \right]^{-1} \quad (3.30)$$

$$+ 2\pi r_1^2 \left[\frac{1}{h_{cv}} + \frac{e_{ac}}{\lambda_{ac}} + \frac{e_t}{\lambda_t} + \frac{e_{isc}}{\lambda_{isc}} \right]^{-1}$$

En égalant la variation de l'énergie stockée dans la cuve à l'énergie captée par le collecteur moins l'énergie perdue vers l'espace environnant et l'énergie puisée, on peut écrire le bilan thermique de la cuve de stockage sous la forme suivante [56-54].

$$(MCp)_s \frac{dT_s}{dt} = AcFr [(\tau\alpha)G_n - U_L(T_s - T_a)] - K_s(T_s - T_a) - \dot{m}(T_s - T_{Lr}) \quad (3.31)$$

Avec,

e_{ac} , e_t , e_{isc} : sont respectivement les épaisseurs de l'acier, du tube et de l'isolant de la cuve.

T_{Lr} : Température de soutirage (°K).

3.1.4.3. Etude de l'échangeur de chaleur (air-eau) entre le réservoir et l'habitation [57]

A partir, de l'efficacité de l'appareil utilisé et des capacités calorifiques des écoulements, on calculera les deux températures de sortie des deux fluides.

1) Calcul de la température de sortie de l'eau (T_{se})

La méthode de calcul de la température de sortie de l'eau, qui ne comprend que les températures d'entrées, se fait en introduisant l'efficacité de l'échangeur de chaleur ε . La formule est donnée comme suit :

$$T_{se} = T_{ee} + \varepsilon(T_{ea} - T_{ee}) \quad (3.32)$$

Avec,

T_{se} : Température de sortie de l'eau (°C) ;

T_{ee} : Température d'entrée de l'eau (°C) ;

T_{ea} : Température d'entrée de l'air à partir du local (°C).

2) Calcul de la température de sortie de l'air (T_{sa})

La méthode de calcul de la température de sortie de l'air, qui ne comprend que les températures d'entrées, se fait en introduisant la grandeur relative des capacités calorifiques horaires :

$$T_{sa} = T_{ea} + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} (T_{ee} - T_{sa}) \quad (3.33)$$

Où :

C_{\min} : Plus faible capacités calorifiques horaires (Wh/m³°C) ;

C_{\max} : Plus grande capacités calorifiques horaires (Wh/m³°C) ;

T_{sa} : Température de sortie de l'air (°C).

* Le calcul à partir de la formule donnée est itératif.

A partir de calcul des différentes températures d'entrée et de sortie de l'eau et de l'air, on déduit le flux ou la puissance utilisée. Ainsi, la formule utilisée est la suivante.

$$\phi = \dot{m}_e C p_e (T_{se} - T_{ee}) = \dot{m}_a C p_a (T_{ea} - T_{sa}) \quad (3.34)$$

3.1.4.4. Bilan thermique du radiateur installé dans l'habitation [57]

L'expression générale au système du radiateur est donnée comme suit,

$$C_r \frac{dT_r}{dt} = \dot{m}_e C_{p_{eau}} (T_{ee} - T_{se}) - \dot{m}_a C_{p_{air}} (T_{ea} - T_{sa}) - \sum_i \sigma \epsilon_r (T_r^4 - T_i^4) \quad (3.35)$$

Avec :

$C_r = \rho_r V_r C_{p_r}$: Capacité thermique (Wh/m³°C) ;

ρ_r : Masse volumique du radiateur (Kg/m³) ;

$V_r = A_r L_r$: Volume du radiateur (m³) ;

A_r : Surface d'échange d'air ou du radiateur (m²) ;

L_r : Largeur du radiateur (m) ;

\dot{m}_e : Débit volumique de l'eau (Kg/h) ;

\dot{m}_a : Débit volumique de l'air (Kg/h) ;

C_{p_r} : Chaleur spécifique du radiateur (Wh/kg° C) ;

$C_{p_{air}}$: Chaleur spécifique de l'air (Wh/kg° C) ;

$C_{p_{eau}}$: Chaleur spécifique de l'eau (Wh/kg° C) ;

T_R : Température du radiateur (°C) ;

T_{ee} : Température de l'entrée de l'eau (°C) ;

T_{se} : Température de sortie de l'eau (°C) ;

T_{ea} : Température de l'entrée de l'air (°C) ;

T_{sa} : Température de sortie de l'air (°C) ;

ϵ_r : Emissivité du radiateur (0.3).

3.1.4.5. Commentaire sur les résultats trouvés

Les **figures (3.8-3.13)**, nous renseignent sur les différentes évolutions de températures calculées et mesurées de l'installation solaire thermique.

Les températures de stockage et celle de la plaque de la **figure 3.8**, sont simulées pour un pas de 5 minutes et étalées sur 4 mois correspondant aux mois de Décembre, janvier, février et mi- mars. L'évolution de température est sinusoïdale, croissante et suit le profil de la température extérieure. Les profils de température de l'installation sont calculés suivants différentes variables, à savoir : le débit volumique et la capacité de la cuve de stockage et le nombre de vitrage et de capteur dans le capteur. Dans cette figure, nous constatons que l'évolution de température est intéressante, mais elle peut toutefois enregistrée des valeurs plus intéressantes en tenant compte de la méthode de stratification dans les calculs effectués.

Dans la **figure 3.10**, nous remarquons un décalage horaire important au niveau de la cuve de stockage détecté à partir de la courbe de l'irradiation solaire. Un retard engendré par l'inertie thermique dans la structure de l'installation réalisé. Cette figure donne aussi l'évolution de température de l'installation, de l'énergie de stockage et l'énergie utile avec l'irradiation solaire et cumulé correspondant. La couverture est intéressante, car la courbe de l'énergie utile ainsi que l'énergie du stockage se confonde. A travers, la figure nous déduisant aussi qu'à partir de la courbe de l'irradiation solaire avec celle de l'énergie utile que le rendement de notre capteur est de 30%, et ce pour une couverture à 1 vitrage. Cette valeur, sera améliorée en augmentant le nombre de vitrage et en faisant varier le débit volumique.

La **figure 3.11**, montre l'évolution de la température du stockage et de la plaque mesurée sur trois journées du mois de février. Les valeurs du stockage sont intéressantes puisqu'elles avoisinent les 50°C, et dépassent les 70°C pour les valeurs de la plaque. Ainsi le profil de température suit la courbe de température extérieure avec un retard dans le temps du à l'effet de l'inertie thermique. Quant à la **figure (3.12)**, elle montre une comparaison entre les valeurs de températures de la plaque expérimentales et les celles simulées. Le profil est similaire et intéressant, les valeurs sont moins importantes, mais cela s'explique par le fait du non prise en compte de la stratification des cuves de stockage dans les calculs effectués.

La **figure (3.13)**, donne les différentes évolutions de températures de notre système solaire, depuis la cuve de stockage jusqu'à l'échangeur de chaleur installé dans le local. Nous remarquons sur ce graphique que les profils de température de sortie de l'eau et celui de l'air sont très proches, cela prouve que nos calculs sont juste et que ces résultats sont intéressants.

3.1.4.6. Résultats de l'installation solaire

a) Profil de différentes températures de l'installation établies sur trois mois de décembre, Janvier, février et 15 jrs du mois de mars de l'année 2005.

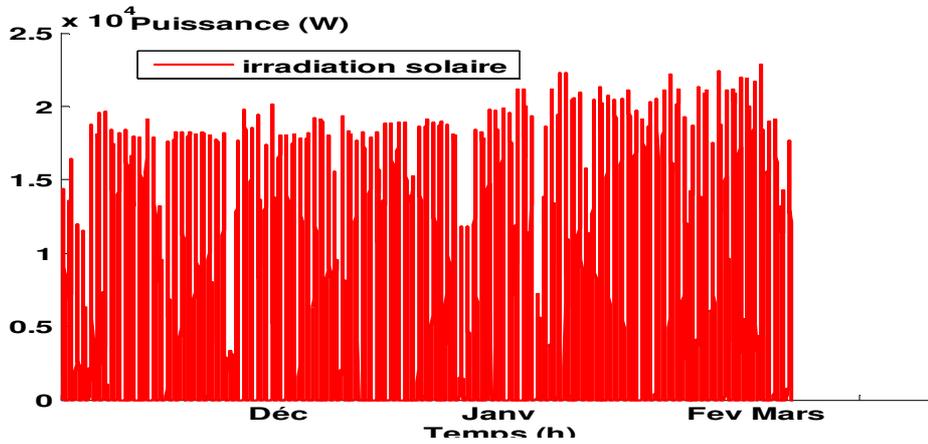


Figure 3.7 : Irradiation solaire calculée sur quatre mois (Décembre-janvier-février et mi mars) de l'année 2005

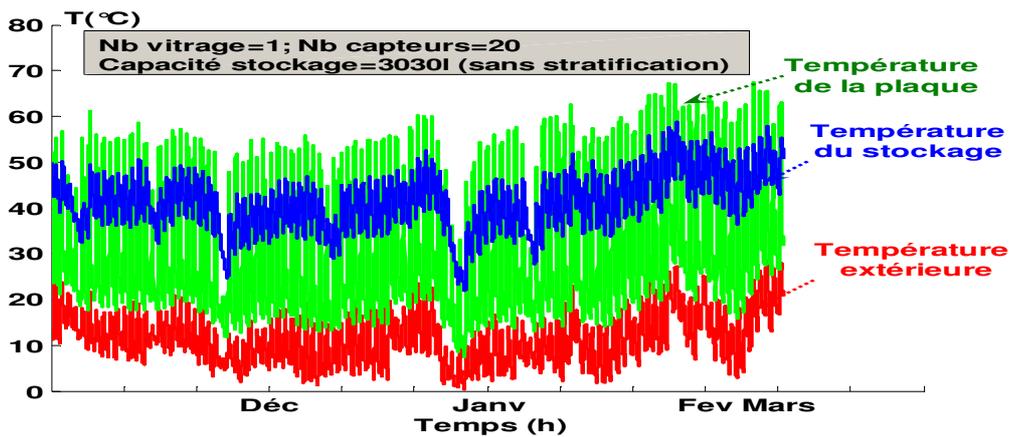


Figure 3.8 : Température de stockage et de la plaque calculées sur 4 mois avec la température extérieure (le débit est pris égale à 0.001kg/s à l'entrée)

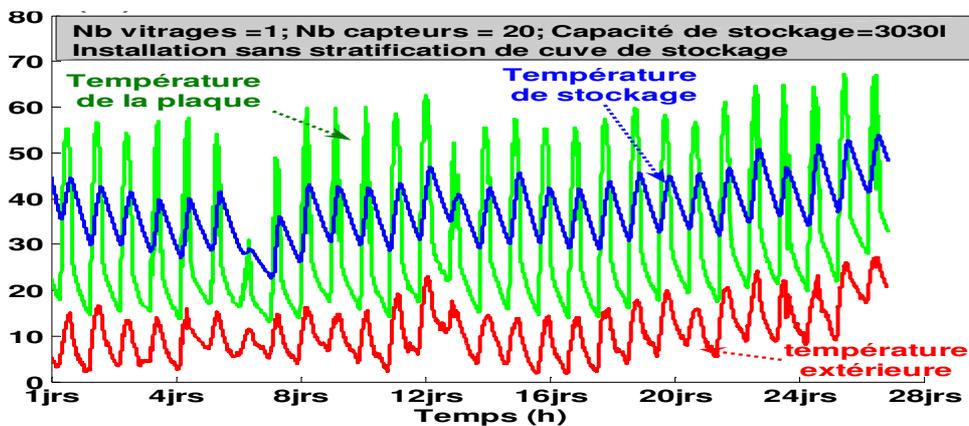
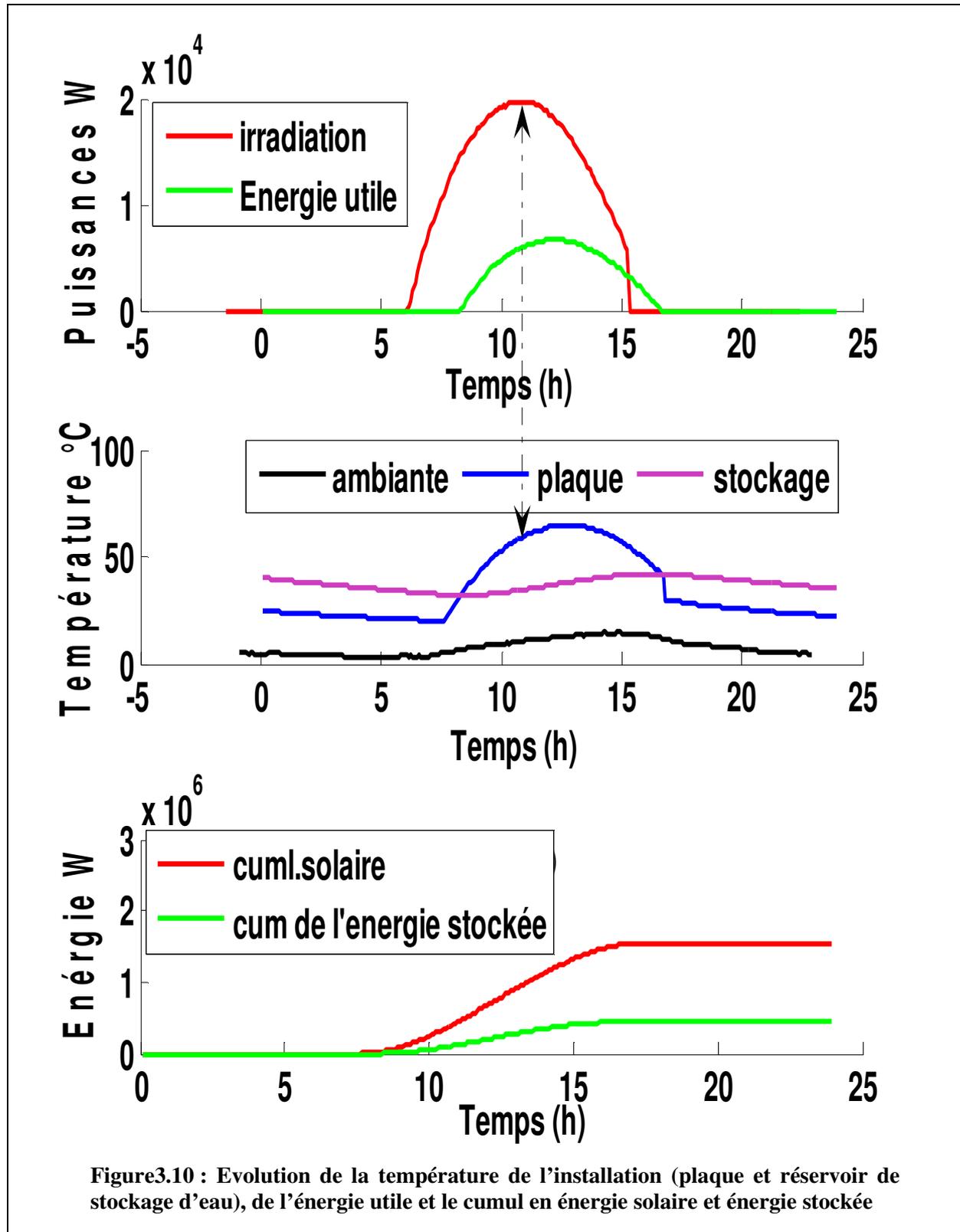
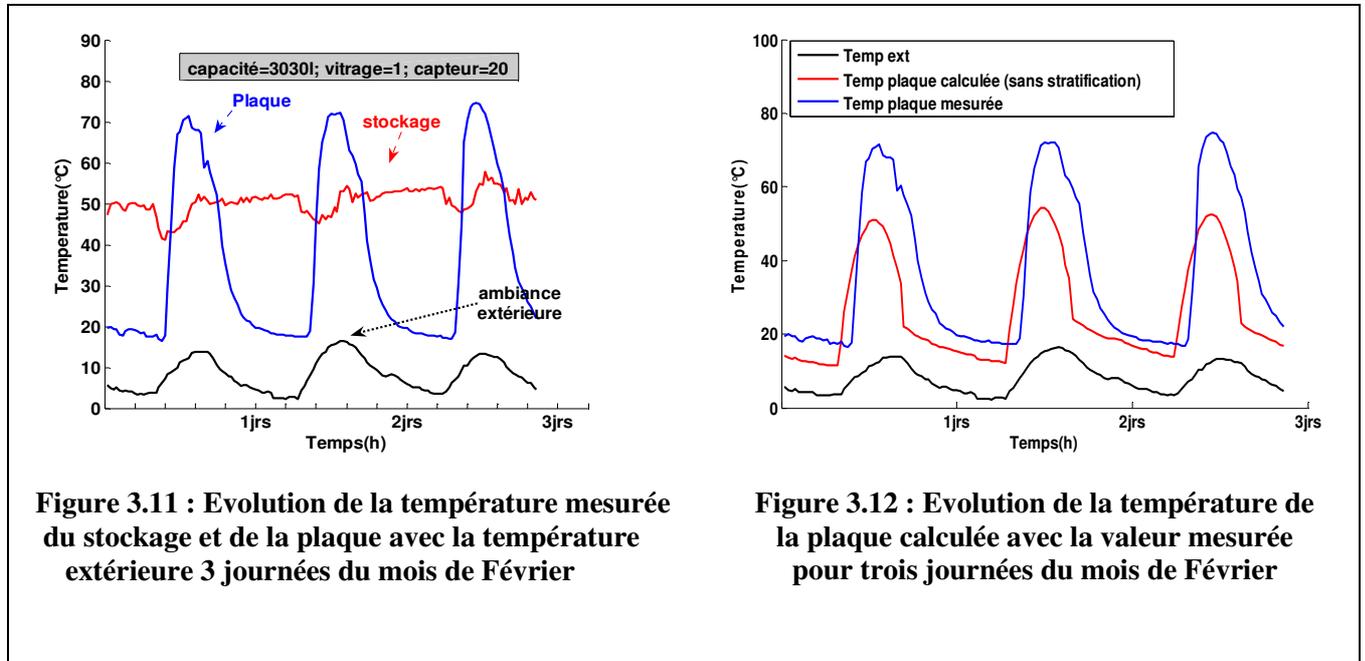


Figure 3.9 : Température de stockage avec la température extérieure pour un mois de février (le débit est pris égale à 0.001kg/s à l'entrée)

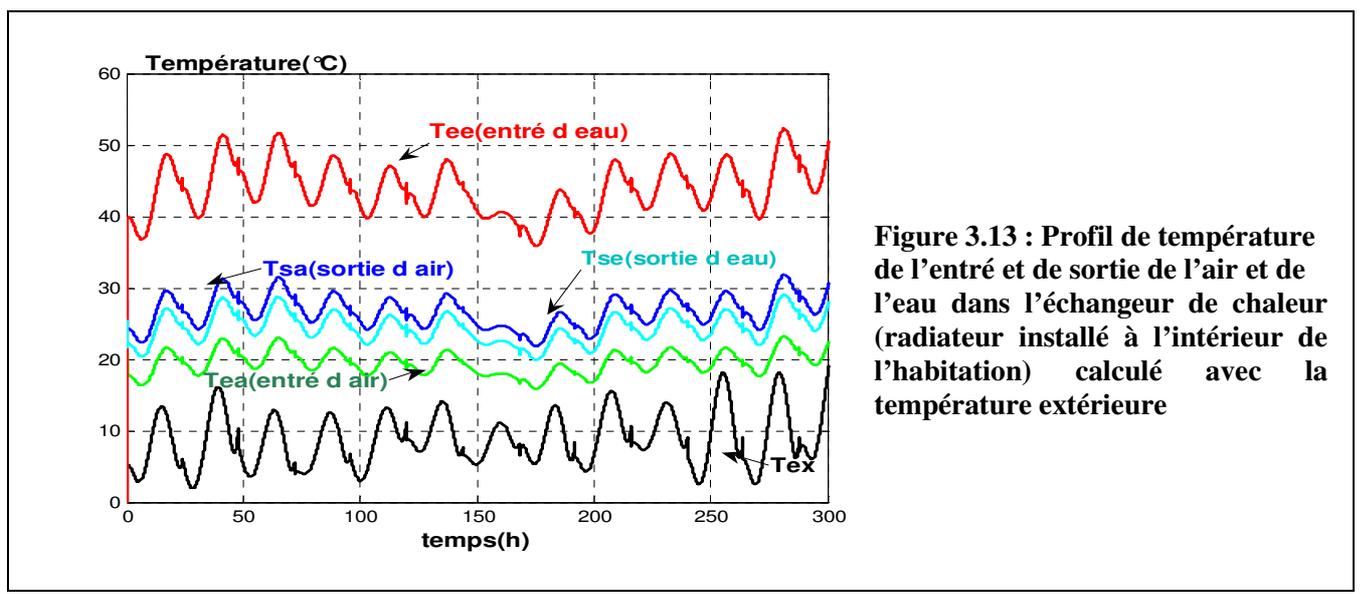
b) Evolution de la température du système, évolution de l'énergie utile et l'énergie stockée avec l'irradiation solaire correspondant ainsi que l'évolution du cumul solaire et de l'énergie stocker pour une journée du mois de Février 2005 à Ghardaïa.



c) Validation du modèle de calcul : Température de la plaque et du réservoir de stockage mesurée, et comparaison de la température de la plaque mesurées avec la température calculées pour les journées du mois de Février sans tenir compte de la stratification des cuves de stockage.



d) Profil de température calculée dans l'échangeur de chaleur entre le réservoir principal et l'habitation : Profil de température de l'eau et de l'air entrant et sortant dans le radiateur installé à l'intérieur du local



3.2. Méthode Nodale pour le calcul de température de confort

3.2.1. Description de la méthode retenue

Il s'agit de la méthode des nœuds (Analyse nodale [58]) répondant à un modèle mathématique thermique. Cette méthode consiste à discrétiser le système, d'établir les équations générales du bilan de puissances régissant de ces nœuds en régime variable, dont on calculera le champ de température, et on établira pour chacun son bilan thermique à l'instant t. Pour cela, il faudra avoir déterminé l'ensemble des liens entre les divers nœuds, les conditions aux limites externes s'appliquant sur chacun, les dissipations thermiques et la masse calorifique du nœud [53-58].

3.2.2. Mise en équation

3.2.2.1. Bilan d'énergie du local

Chaque élément du système peut être présenté par une équation du bilan d'énergie présenté sous forme mathématique, comme suit,

Soit i un nœud représentant un volume de masse M_i (kg), de chaleur spécifique à pression constante C_{pi} (J/Kg°K) et de température T_i (°K) comme variable d'Etat considérée.

$$\sum_i Q_i - \sum_s Q_s = M_i C_{p_i} dT_i / dt = \sum_{j \in J_i} \frac{1}{R_{ij}} (T_i - T_j) + I_i \quad (3.36)$$

Avec,

J_i : Ensemble des nœuds j connectés au nœud i,

R_{ij} : Représente les résistances thermiques,

I_i : source de chaleur

3.2.2.2. Développement de l'équation générale dans une paroi

L'équation générale du bilan aux nœuds dans une paroi s'écrit, comme exprimé dans le système précédent :

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{A_i}{C_i} \left[k_i (T_j - T_i) + h_{a,i}^c (T_{a,i} - T_i) + h_{ae,i}^c (T_{ae,i}^c - T_i) + h'_{c,i} (T_c - T_i) + h'_{s,i} (T_s - T_i) + \sum_{j=1}^n h'_{i,j} (T_j - T_i) + \alpha G \right] \quad (3.37)$$

Avec,

α : Coefficient d'absorptivité pour paroi et ouvrants ;

I_{Gif} : Flux solaire global incident sur la surface i (Watt) ;

k_i : Coefficient de conductivité thermique entre les parois i+1, i, i-1 (W/m²°C);

$h_{ai,i}^c$: Coefficient d'échange convectif entre l'ambiance intérieure et la paroi intérieure (W/m²°C). La valeur diffère suivant la paroi est verticale ou horizontale ;

$h_{ae,i}^c$: Coefficient d'échange convectif entre l'ambiance extérieure et la paroi extérieure (W/m²°C) ;

$h_{i,j}^r$: Coefficient d'échange radiatif entre les parois d'indice i et j (W/m²°C). Il est donné par,

$$h_{i,j}^r = \varepsilon_i \varepsilon_j \hat{F}_{ij} \sigma (T_i^2 - T_j^2) (T_i + T_j) \quad (3.38)$$

Avec,

$h_{c,i}^r$: est le coefficient d'échange radiatif entre la paroi d'indice i et le ciel (W/m²°C).

$h_{s,i}^r$: est le coefficient d'échange radiatif entre la paroi d'indice i et le sol extérieur (W/m²°C). Il est calculé d'une façon similaire au précédent, avec $T_c = T_s$

3.2.3. Analyses des différents modes de transfert

3.2.3.1. Echanges radiatif

Nous distinguons deux classes d'échanges radiatifs,

- Le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (0.2 μ m à 2.5 μ m), séparé en un type directionnel (éclairage direct) et en un type isotrope (éclairage diffus)
- Le rayonnement infrarouge thermique émis par l'environnement (voûte céleste, sol extérieur) et par l'enceinte elle-même qui se situe entre 2.5 μ m et 100 μ m

Nous considérons que les surfaces sont grises en émission et diffusante en réflexion. Et, nous supposons que chaque paroi est isotherme.

• Expression de la puissance radiative thermique - Puissance radiative par rayonnement infrarouge [52]

Le flux thermique net sur la face interne de la paroi d'indice i peut être exprimé comme étant la différence entre le flux absorbé par la paroi d'indice i et le flux émis par cette même paroi,

$$Q_i^r = \left(\alpha_i A_i \sigma \sum_{j=1}^{j=N} \alpha_j \hat{F}_{ij} (T_j^4 - T_i^4) \right) \quad (3.39)$$

Pour déterminer les facteurs de forme d'une enceinte fermée, nous utilisons la formule suivante,

$$\hat{F}_{ij} = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \frac{1}{F_{ij}} + \frac{(1-\varepsilon_j)A_i}{\varepsilon_j A_j}} \quad (3.40)$$

Le flux thermique net échangé avec l'extérieur par la paroi est,

$$Q_i^{re} = F_{c,i} Q_c^r + F_{s,i} Q_s^r \quad (3.41)$$

Où,

$$F_{i,c} = \frac{1 + \cos \beta_i}{2} \quad (3.42)$$

$$F_{i,s} = \frac{1 - \cos \beta_i}{2} \quad (3.43)$$

Avec,

Q_c^r : Rayonnement absorbé directement par la paroi i provenant de la voûte céleste (Watt) ;

Q_s^r : Rayonnement absorbé directement par la paroi i provenant du sol extérieur (Watt) ;

$F_{i,c}, F_{i,s}$: Respectivement, facteur de forme entre la paroi i et le ciel, et entre i et le sol

β_i : est l'angle d'inclinaison de la paroi i par rapport à l'horizontale.

En supposons que la voûte céleste est un corps noir et que sa température équivalente est T_c donnée en fonction de la température ambiante par la formule de SWINBANK [52].

$$T_c = 0.0552(T_{ae})^{1.5} \quad (3.44)$$

Avec,

T_c, T_{ae} sont exprimées en degré Kelvin.

T_{ae} : Température de l'air extérieur [°K].

D'après, Stefan BOLTZMAN, le flux de chaleur atmosphérique est donné par l'expression suivante,

$$Q_c^r = \sigma T_c^4 \quad (3.45)$$

Et le flux terrestre s'exprime par,

$$Q_s^r = \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (3.46)$$

T_{se} : Température du sol extérieur environ égale à la température ambiante [°K],

σ : Constante de Stefan BOLTZMAN = $5.68 \cdot 10^{-8}$ [W/m².K⁴].

- **Puissance radiative par rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde Q_G**
 - **Irradiation globale sur une surface inclinée**

Des formules simples sont données pour décrire l'atténuation de l'irradiation globale par divers constituants de l'atmosphère. Dans notre cas on utilise les données expérimentales enregistrées par l'appareil 'Suntracker' installé au niveau du site d'étude, et on simule le modèle de calcul donné par BIRD et HULSTROM, par la relation suivante.

$$I_G = I \cos \theta + I_{dif} 0.5(1 + \cos \beta) + I_g 0.5\alpha(1 - \cos \beta) \quad (3.47)$$

Avec :

I_d : Irradiation direct

I_D : Irradiation diffus par le ciel et le sol.

Le détail sur cette équation et l'angle d'incidence sont donnés en **annexe 3.2** [52-59]

3.2.3.2. Echange convectif [57]

À l'intérieur du local,

$$Q_{ai,i}^c = A_i h_{ai,i}^c (T_{ai} - T_i) \quad (3.48)$$

À l'extérieur du local,

$$Q_{ae,i}^c = A_i h_{ae,i}^c (T_{ae} - T_i) \quad (3.49)$$

Les coefficients d'échange thermique du local sont déterminés à partir du nombre de NUSSELT. Par ailleurs, des nombres adimensionnels seront indiqués,

Nombre de NUSSELT

La combinaison de h (coefficient d'échange convectif), L (longueur caractéristique), et λ_f est appelée le nombre de NUSSELT,

$$N_u = \frac{hL}{\lambda_f} = f(Gr, Pr) \quad (3.50)$$

Une fois sa valeur calculée, nous pouvons déterminer le coefficient d'échange par convection, Par l'analyse dimensionnelle, nous pouvons déterminer les autres nombres adimensionnels tels que,

Nombre de PRANDTL

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{\lambda} \text{ avec } \mu = \rho \nu \Rightarrow \text{Pr} = \frac{\rho C_p \nu}{\lambda} \quad (3.51)$$

Avec :

ρ : masse volumique	[kg/m ³]
C_p : chaleur spécifique	[j/Kg K]
ν : viscosité cinématique	[m ² /s]
μ : Viscosité dynamique	[kg/m.s]
λ : conductivité thermique	[W/m K]

Nombre de REYNOLDS

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu} = \rho \frac{VL}{\mu} \quad (3.52)$$

Avec :

V : la vitesse d'écoulement du fluide en [m/s]

Le nombre de REYNOLDS permet de déterminer le régime de l'écoulement.

Nombre de GRASSHOF

$$\text{Gr} = \frac{\beta g L^3 (T - T_f)}{\nu^2} = \frac{\beta g L^3 (T - T_f)}{\nu^2 L^2} \text{Re}^2 \quad (3.53)$$

Avec :

β : coefficient de dilatation volumique [1/K]

g : la pesanteur ≈ 9.81 [m/s²]

$(T - T_f)$: l'écart de température.

Le nombre de GRASSHOF est défini comme étant le rapport entre la force de gravité et la force d'inertie.

Nombre de RAYLEIGH

$$\text{Ra} = \text{GrPr} = \text{GrPr} \left(g \beta \Delta T L^3 / \nu^2 \right) (\mu C_p / \lambda) \quad (3.54)$$

Où,

Gr : Nombre de GRASSHOF

Pr : Nombre de PRANDTL

Type de convection

La détermination du coefficient d'échange diffère selon le type de convection.

1. Convection naturelle

Pour ce type de convection, le nombre de NUSSELT est donné en fonction des nombres adimensionnels, GRASSHOF et PRANDTL par la relation suivante,

$$Nu = K(GrPr)^n \quad (3.55)$$

Avec :

K et n sont des constantes.

2. Convection forcée

Dans ce mode de convection, le nombre de NUSSELT est donné en fonction de deux nombres adimensionnels, le nombre de REYNOLDS et le nombre de PRANDTL par la relation suivante,

$$Nu = aRe^n Pr^m \quad (3.56)$$

a, n, et m sont des constantes qui peuvent être déterminées en fonction du régime de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

Relations les plus usuelles pour le calcul de h

Dans le cas le plus pratique, le (Tableau ci-dessous) illustre et définit les relations simplifiées du coefficient «h» pour l'air à pression atmosphérique des parois verticales et horizontales.

Géométrie	Laminaire $10^4 < GrPr < 10^9$	Turbulent $GrPr > 10^9$
Plaque verticale	$h = 1.42 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$	$h = 1.31 (\Delta\theta)^{1/3}$
Face supérieure d'une plaque horizontale chaude ou face intérieure d'une plaque froide (été)	$h = 1.32 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$	$h = 1.52 (\Delta\theta)^{1/3}$
Face inférieure d'une plaque chaude ou face supérieure d'une plaque froide (hiver)	$h = 0.59 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$	$h = 0.59 \left(\frac{\Delta\theta}{L} \right)^{1/4}$

$\Delta T = |T_{ai} - T_i|$: Cas de convection à l'intérieur du local

$\Delta T = |T_{ae} - T_e|$: Cas de convection à l'extérieur du local

3.2.3.3. Echange conductif

La conductivité du mur dépend de la structure physique de ces différentes couches. La puissance de conductivité est donnée par l'équation :

$$Q_{i,i+1,i-1}^{cd} = \lambda_i \frac{A_i}{e_i} (T_i - T_{i-1}) - \lambda_i \frac{A_i}{e_i} (T_i - T_{i+1}) \quad (3.57)$$

Avec :

λ_i : Coefficient de conduction (W/m²°C) ;

e_i : épaisseur de la couche (m) ;

A_i : Surface d'échange [m²].

3.2.4. Application à la méthode nodale

3.2.4.1. Discrétisation

Le modèle mathématique à été élaboré en se basant sur l'hypothèse suivante :

Chaque nœud représente un volume dont la température est relativement uniforme. Sur le schéma ci-dessous est représenté des exemples de discrétisation d'une paroi. Cela va être généralisé pour les autres parois (murs et ouvrants).

La mise en équation des échanges thermiques à été faite en se basant sur la méthode de l'analogie électrique ou :

- Les températures sont représentées par des potentiels électriques ;
- Les flux sont représentés par des intensités de courant ;
- Les résistances thermiques sont représentées par des résistances électriques ;
- Les capacités thermiques sont représentées par des condensateurs.

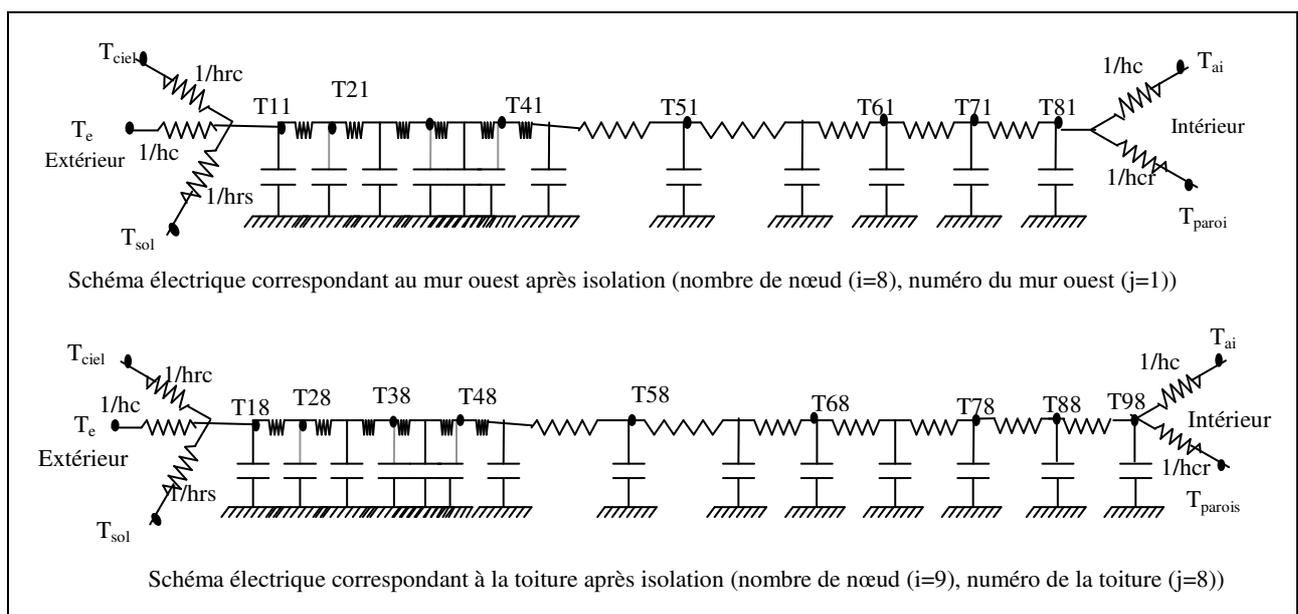


Figure 3.14. Schéma de discrétisation selon la méthode nodale (exemple sur le mur ouest et la toiture)

3.2.4.2. Système d'équation pour le calcul de la température de confort du local

- Système d'équation appliqué à la surface extérieure de chaque paroi (3.58)

1. Mur Ouest

$$(dT_{11} / dt) = A_1 / C_{01} [\alpha_1 G_1 + Q_{11}^{cd} + Q_{ae,11}^c + Q_{s,11}^r + Q_{c,11}^r]$$

2. Mur Nord

$$(dT_{12} / dt) = A_2 / C_{02} [Q_{12}^{cd} + Q_{ae,12}^c + Q_{s,12}^r + Q_{c,12}^r]$$

3. Mur Est

$$(dT_{13} / dt) = A_3 / C_{03} [\alpha_3 G_3 + Q_{13}^{cd} + Q_{ae,13}^c + Q_{s,13}^r + Q_{c,13}^r]$$

4. Mur Intérieur

$$(dT_{15} / dt) = A_5 / C_{05} [Q_{15}^{cd} + Q_{ae,15}^c + Q_{s,15}^r + Q_{c,15}^r]$$

5. Toiture

$$(dT_{18} / dt) = A_8 / C_{08} [\alpha_8 G_8 + Q_{18}^{cd} + Q_{ae,18}^c + Q_{s,18}^r + Q_{c,18}^r]$$

6. Porte extérieure

$$(dT_{pe1} / dt) = A_{pe} / C_{pe0} [\alpha_{pe} G_{pe} + Q_{1pe}^{cd} + Q_{ae,1pe}^c + Q_{s,1pe}^r + Q_{c,1pe}^r]$$

7. Porte intérieure

$$(dT_{pi1} / dt) = A_{pi} / C_{pi0} [Q_{1pi}^{cd} + Q_{ae,1pi}^c + Q_{s,1pi}^r + Q_{c,1pi}^r]$$

8. Fenêtre Est

$$(dT_{f11} / dt) = A_{fe} / C_{fe1} [\alpha_{fe} G_{fe} + Q_{1fe}^{cd} + Q_{ae,1fe}^c + Q_{s,1fe}^r + Q_{c,1fe}^r]$$

7. Fenêtre Ouest

$$(dT_{f31} / dt) = A_1 / C_{fo} [\alpha_{fo} G_{fo} + Q_{1f3}^{cd} + Q_{ae,1f3}^c + Q_{s,1f3}^r + Q_{c,1f3}^r]$$

- La température de la paroi sud (mur accolé) T_4 est supposée fixe.
- La température T_9 du sol est supposée aussi fixe avec une valeur de 18°C.

Les inconnues sont,

1° : T_{11} , T_{12} , T_{15} , T_{13} , T_{18} , pour les parois ;

2° : T_{fi1} , T_{fi3} , T_{pi3} , T_{pii3} , pour les ouvrants (portes et fenêtres).

• **Système d'équation à l'intérieure de la structure des parois (3.59)**

1. Mur Ouest

$$(dT_{i1} / dt) = A_1 / C_{i1} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

2. Mur Nord

$$(dT_{i2} / dt) = A_2 / C_{i2} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

3. Mur Est

$$(dT_{i3} / dt) = A_3 / C_{i3} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

4. Mur Intérieur

$$(dT_{i5} / dt) = A_5 / C_{i5} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

5. Toiture

$$(dT_{i8} / dt) = A_8 / C_{i8} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

6. Porte extérieure

$$(dT_{ipe} / dt) = A_{pe} / C_{ipe} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

7. Porte intérieure

$$(dT_{ipi} / dt) = A_{pi} / C_{ipi} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

8. Fenêtre Est

$$(dT_{ife} / dt) = A_{fe} / C_{ife} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

7. Fenêtre Ouest

$$(dT_{ifo} / dt) = A_{fo} / C_{ifo} \left[\sum_{i=2}^{n-1} Q_{i-1,i,i+1}^{cd} \right];$$

Les inconnues sont,

1° : $T_{i1}, T_{i2}, T_{i5}, T_{i3}, T_{i8}$, pour les parois, (i : indices des nœuds)

2° : $T_{fi1}, T_{fi3}, T_{pi3}, T_{pii3}$, pour les ouvrants (portes et fenêtres)

• **Système d'équation appliqué à la surface intérieure de chaque paroi (3.60)**

1. Mur Ouest

$$(dT_{81} / dt) = A_1 / C_{81} [Q_{71,81}^{cd} + Q_{ai,81}^c + \sum_{j=1}^n Q_{8j(j \neq 1)}^r]$$

2. Mur Nord

$$(dT_{82} / dt) = A_2 / C_{82} [Q_{72,82}^{cd} + Q_{ai,82}^c + \sum_{j=1}^n Q_{2j(j \neq 2)}^r]$$

3. Mur Est

$$(dT_{73} / dt) = A_3 / C_{73} [Q_{63,73}^{cd} + Q_{ai,73}^c + \sum_{j=1}^n Q_{3j(j \neq 3)}^r]$$

4. Mur Intérieur

$$(dT_{55} / dt) = A_5 / C_{55} [Q_{55,845}^{cd} + Q_{ai,55}^c + \sum_{j=1}^n Q_{5j(j \neq 5)}^r]$$

5. Toiture

$$(dT_{98} / dt) = A_8 / C_{88} [Q_{88,98}^{cd} + Q_{ai,98}^c + \sum_{j=1}^n Q_{9j(j \neq 8)}^r]$$

6. Porte extérieure

$$(dT_{p3} / dt) = A_p / C_{p3} [Q_{p2,p3}^{cd} + Q_{ai,p3}^c + \sum_{j=1}^n Q_{pe(j \neq p3)}^r]$$

7. Porte intérieure

$$(dT_{pi3} / dt) = A_{pi} / C_{pi3} [Q_{p2,pi3}^{cd} + Q_{ai,pi3}^c + \sum_{j=1}^n Q_{pij(j \neq pi)}^r]$$

8. Fenêtre Est

$$(dT_{f3} / dt) = A_{f3} / C_{f3} [Q_{ae,f3}^c + Q_{ai,f3}^c + \sum_{j=1}^n Q_{f3j(j \neq f3)}^r]$$

7. Fenêtre Ouest

$$(dT_{f1} / dt) = A_{f1} / C_{f1} [Q_{ae,f1}^c + Q_{ai,f1}^c + \sum_{j=1}^n Q_{f1(j \neq f1)}^r]$$

7. Echangeur de chaleur (air-eau)

$$T_{se} = T_{ee} + \mathcal{E}(T_{ea} - T_{ee}), \quad T_{sa} = T_{ea} + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} (T_{ee} - T_{sa})$$

8. Radiateur

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{1}{C_r} [m_e Cp_{eau} (T_{ee} - T_{se}) - m_a Cp_{air} (T_{ea} - T_{sa}) - \sum_i \sigma \mathcal{E}_r (T_r^4 - T_i^4)]$$

9. Température de confort

$$T_c = \frac{T_{ai} + \sum T_{ij}}{2}, \quad (i : \text{indices des nœuds}, j : \text{indices des parois})$$

Les inconnues sont :

1° : $T_{81}, T_{82}, T_{55}, T_{73}, T_{98}, T_{f1}, T_{f3}, T_{p3}, T_{pi3}$ pour les parois et ouvrants

3° : $T_r, T_{ea}, T_{ee}, T_{sa}, T_{se}, T_{ai}$: Température intérieure et celles des organes de l'installation.

3.2.5. Résolution numérique

La résolution des équations (3.58-3.60), nécessite la connaissance des différents paramètres et des coefficients intervenants. A cet effet et pour des raisons de clarté de la rédaction nous donnons brièvement la méthode de leur détermination et leur expression. Toutefois, la méthode numérique utilisée est celle de Runge-Kutta.

- Les systèmes différentiels, s'écrivant de la forme,

$$\frac{dT_{ji}}{dt} = f(t, T_{1j}, \dots, T_{nj}) \quad (3.61)$$

Ou :

$i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$ indice des nœuds ;

$j=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$ indice des parois, toiture et ouvrants ;

t : représente le temps tel que $t = k \cdot h$ avec k comme indice de temps.

Et dans un but d'alléger l'écriture du système d'équation, nous avons remplacé les différents paramètres par leurs valeurs numériques :

A (surface); G (rayonnement) ; K (conductivité) ; e (épaisseur) ; C_p (chaleur spécifique) ; α (absorptivité)...etc.

- Pour les conditions initiales et les conditions aux limites, nous avons procédé de la sorte :

- **Au niveau des parois extérieures et l'ambiance extérieure, nous avons supposé une fine couche d'air. A ce niveau, la relation de la température d'équilibre calculée dans la fine couche entre l'environnement extérieure et la surface de la paroi extérieure est donnée comme suit [50-60]**

$$T_{eq} = T_e + Q_s / h_e \quad (3.61)$$

Avec,

T_e : Température ambiante extérieure (°C) ;

T_{eq} : Température d'équilibre entre l'extérieure et la surface extérieure à la paroi (°C) ;

Q_s : Irradiation globale solaire (W) ;

h_e : Coefficient de convection extérieure (m²°C/W).

- **De même, nous avons supposé une très fine couche d'air, au niveau des parois intérieures et l'ambiance intérieure.**

3.2.5.1. Commentaire sur les résultats calculés

Les **figures (3.15-3.17)**, ci après dessous, nous renseignent sur l'évolution de la température du local en régime transitoire suivant la méthode nodale. Nous remarquons que, le profil de température est sinusoïdal et suit l'évolution de la température extérieure avec un décalage horaire apparent du à l'effet de l'inertie thermique engendré par la masse dense du matériau pierre utilisé dans la structure de notre habitation.

La **figure (3.14)**, donne le profil de température du confort dans le local. L'allure suit une évolution sinusoïdale, marque une stabilité dans le temps et affiche des valeurs allant de **20 à 24°C** pour des températures extérieure variant de **1 à 15°C** durant une douzaine de jours avec une source de chaleur renouvelable de **500Watts**, calculée selon des valeurs mesurées en températures de sortie de l'eau dans le réservoir principale. Nous remarquons aussi un décalage horaire apparent du à l'effet de l'inertie thermique.

L'évolution de la température des parois selon leur orientation ainsi que la toiture et la pièce non chauffé (sanitaire) après isolation sont données dans la **figure (3.16)**. Pour ces températures allant entre **20°C à 24°C**, la source de chaleur enregistrée est seulement de **500Watts**. Cette valeur est intéressante puisqu'elle est deux fois, voir plus faible par rapport aux valeurs trouvées en **figures (2.23-2.32)** correspondant au chapitre précédent.

Quand à la **figure (3.17)**, elle donne l'évolution de température sur les différents ouvrants de notre habitation avant et après isolation, ainsi que la température du local non chauffé qui représente les sanitaires.

* Nous soulignons que, lors de l'exécution de notre programme de calcul, nous avons utilisés les paramètres adimensionnels régissant nos équations à savoir : le Nombre de Nusselt (Nu), Prandtl (Pr), Reynolds (Re), Grashof (Gr), Rayleigh (Ra), déterminant principalement le régime de l'écoulement du fluide utilisé et le type de convection. En illustration, nous nous sommes limités aux allures de températures qui constituent l'objectif principal de notre étude.

3.2.5.2. Résultats de température de confort calculée sur une période froide de l'année, avec utilisation d'une source de chaleur renouvelable (solaire)

Profil de température des parois, ouvrants et la température résultante (confort)

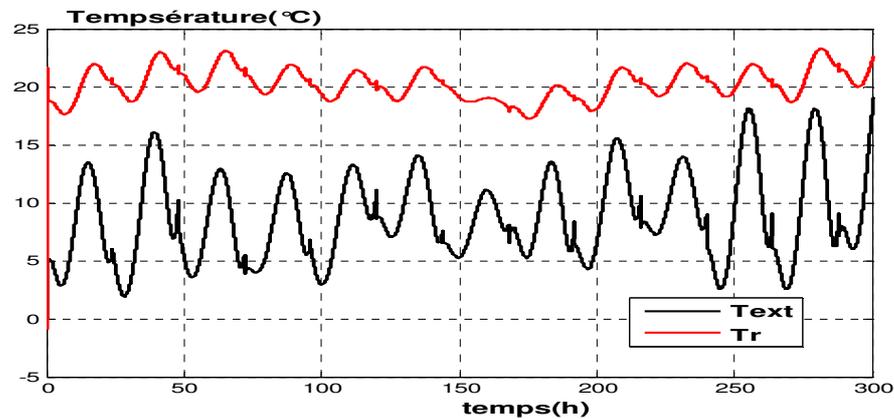


Figure 3.15 : Profil de température de confort calculé sur 12 jours du mois de février avec une source de chaleur trouvée égale à 500Watt

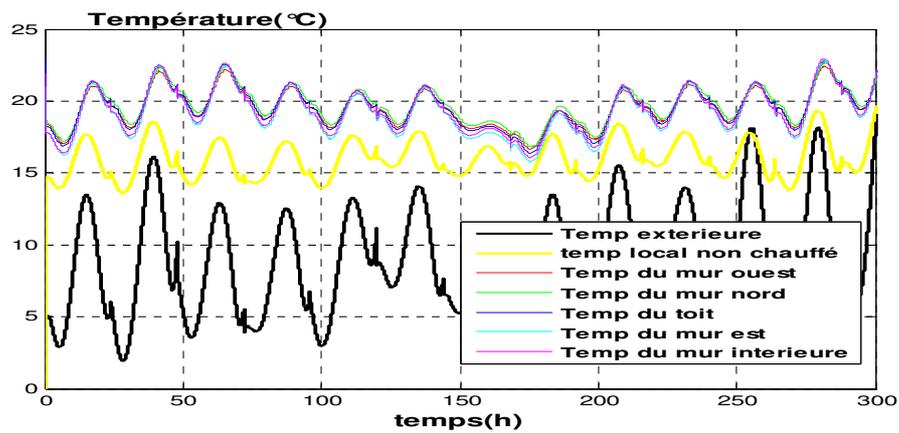


Figure 3.16 : Profil de température de toutes les façades du local calculé sur 12 jours avec une source de chaleur trouvée égale à 500 Watt

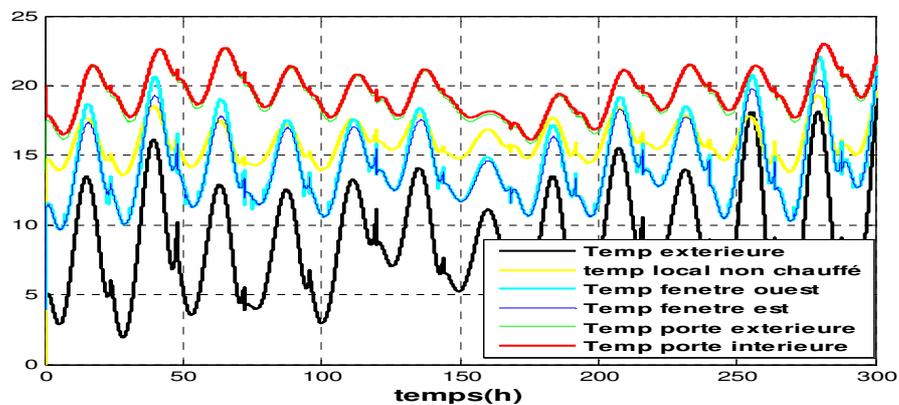


Figure 3.17 : Profil de température des ouvrants et du local non chauffé sur 12 jours avec une source de chaleur calculée de 500 Watt

Conclusion

La combinaison des systèmes solaires passifs et actifs pour le chauffage du studio procure un confort thermique satisfaisant avec une utilisation faible en énergie.

Le constat est vérifié sur les graphiques donnés et commentés dans ce chapitre. Le confort est bien assuré, et l'énergie utilisée est de l'ordre de 2 à 3 fois moindre que si l'installation utilisée est conventionnelle, tel qu'il est commenté dans le chapitre précédent.

L'installation solaire thermique ainsi réalisée dans ce chapitre, montre son efficacité dans son utilisation pour le chauffage domestique. Ainsi, à travers les résultats trouvés, une consommation de 500 W suffit pour élever une température ambiante intérieure du local à des valeurs avoisinant les 20°C et plus, sachant que les températures extérieures sont très basses.

Pour ce qui est des températures enregistrées dans la plaque elles sont de l'ordre de 60°C à 70°C ; Et pour le stockage qui constitue le réservoir d'eau lié directement au studio, il enregistre des températures allant de 45°C à 50°C, et ce sur une durée de 6 mois. Ces températures croissent, dans le temps, et elles seront encore plus élevées si nos calculs étaient simulés depuis un an. Sinon, les valeurs expérimentales enregistrées sont très intéressantes, elles sont de l'ordre de 70°C pour la plaque et montent, jusqu'au 50°C à 60°C dans le réservoir. Pour la durée de temps, l'installation ainsi intégrée dans le local est autonome pour une durée de 3 à 4 jours dans la semaine.

Quand à la méthode nodale utilisée en régime transitoire, adoptée dans ce chapitre, elle est jugée complète, sûre et exacte, puisque toutes les couches des parois de l'habitation sont prises en compte dans les calculs. Ainsi, en injectant les valeurs du rayonnement solaire dans les équations de bases, on obtient des températures confortables, ce qui répond bien au but fixé dans notre projet.

Nous soulignons aussi la stabilité du profil de température intérieure dans nos graphiques, cela démontre bien le rôle que joue le facteur inertie thermique dans une habitation.

Par ces résultats, nous pouvons conclure que, l'utilisation des dispositifs solaires passifs combinés aux systèmes actifs, dans une habitation existante, répond aux attentes de l'habitant qui cherche à économiser de l'énergie, à avoir une installation efficace énergétiquement et enfin un endroit, lui assurant un confort thermique acceptable pour son bien être.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude montre l'intérêt de la réhabilitation thermique d'une habitation existante. Les résultats trouvés sur chaque graphique dans tous les cas sont d'un apport important en termes de gain d'énergie et de confort thermique. Le climat présente un des facteurs primordial influant sur tous les calculs élaborés. Ainsi, la disponibilité de base de données météorologique est considérée comme un atout indispensable dans notre étude. Par ailleurs, un appareillage de mesure est installé au site d'implantation du projet, il est composé d'une station de météo mesurant les paramètres de température et d'humidité relative, et d'un appareil de type suntracker mesurant à la fois le rayonnement solaire direct, diffus et le rayonnement global. Nous avons utilisé aussi, des données météorologiques collectées au niveau de la station avoisinante quand cela est nécessaire.

Les calculs menés dans ce projet, traitent principalement l'effet de l'isolation et de l'inertie thermique, afin d'évaluer la température ambiante régnante à l'intérieur du local d'étude pour la saison d'hiver et d'été. Et, enfin, le dimensionnement de l'installation solaire thermique pour le chauffage du local pendant les périodes les plus froides de l'année suivi du calcul de température de confort en régime transitoire. Des mesures expérimentales et des calculs numériques ont été élaborés.

Au préalable, avant de procéder à la réhabilitation du studio, nous avons donc, mesuré la température ambiante à l'intérieure de celui-ci, et ce, pour la période hivernale et estivale. En effet, les valeurs en températures intérieures sont faibles en hiver et hausse en été, d'où l'inconfort installé à l'intérieure du local. Les valeurs de températures enregistrées à l'intérieure du local dépassent les 35°C et peuvent même atteindre les 40°C en été, et compte une différence de température très faible entre l'intérieure et l'extérieure, voir même des températures intérieures supérieures, cela est du à la forte inertie thermique du matériau pierre de la structure du mur. En hiver la température intérieure avoisine les 13°C, et la différence est de l'ordre de 4 à 5°C. La connaissance de ces données préliminaires, nous permet d'estimer les pertes et les gains thermiques.

Avec ces résultats, et ceux trouvés dans la courbe de la zone de confort (diagramme psychrométrique), aussi, à travers les consignes aux règles de concept bioclimatique, nous avons procédé à la réhabilitation du local. Ainsi, pour améliorer le confort thermique de celui-ci, nous avons procédé par deux voies, passive et active, afin de réaliser les travaux sur terrain, à savoir : l'isolation thermique, l'ombrage, plantation de la végétation et placement

des points d'eau, peinture de l'enveloppe extérieure et toiture en couleur clair. Toute, cette façon de faire détaillé dans le mémoire consiste en un système dit passif. Pour l'apport solaire en période les plus froides de l'année, nous avons adopté un système actif, par une réalisation d'une installation solaire thermique pour le chauffage et la production de l'eau chaude sanitaire. Pour ce faire, nous avons procédé au dimensionnement de l'installation, dont le calcul de la surface de captage trouvée égale à 20m², et le volume de stockage correspondant égale à 3000 litres. Au calcul de la température de la plaque qui avoisine les 70°C, et celle de la cuve de stockage d'eau dont les valeurs sillonnent entre 50 et 60°C. Ce qui nous conduit, directement, au calcul de l'énergie nécessaire pour le chauffage de l'habitation.

Pour le calcul de la température de confort thermique après réhabilitation, nous avons procédé en premier lieu aux mesures expérimentales, que soit pour la période d'hiver ou d'été. Ainsi, les profils de températures obtenus sont comparés avec les courbes enregistrées avant isolation en référence à la courbe de température extérieure pour des périodes différentes (jours et année). Sinon, elles sont comparées directement à celles mesurées dans le studio accolé de même architecture, pendant la même période. Les résultats obtenus sont satisfaisants, malgré les contraintes techniques survenues tout au long de notre étude (coupure d'électricité, vent de sable, coupure de fil de l'acquisition et autres). On terme de valeurs, nous avons enregistré en été une valeur stable de 32°C, avec une différence de température allant de 4 à 9°C, or elle n'était que de 0 à 1°C. Ces résultats sont enregistrés en 2005 avant l'achèvement des travaux de réhabilitation. En effet, la température intérieure est améliorée après finalisation des travaux sur terrains, dont on a enregistré les valeurs oscillant entre 28°C et 29°C en l'an 2008 pour la même saison. En hiver, la température affiche une valeur allant de 17°C à 21°C, et la différence de température dépasse les 3°C avant et après réhabilitation

Concernant, l'étude par simulation numérique, elle consiste au traitement et à la modélisation mathématique des bilans de puissances suivant un régime quasi-permanent, transitoire simplifié et transitoire. Ce dernier présente un calcul très long appliqué selon la méthode nodale traité par analogie électrique sur toutes les couches des différentes parois au local. Pour la résolution numérique, nous avons utilisé la méthode de Runge-Kutta, et à partir du bilan de puissance, nous avons mis en œuvre un programme de calcul écrit sur Matlab permettant ainsi de simuler le comportement thermique des différentes composantes du local.

La température de confort hivernale obtenue après réhabilitation affiche des valeurs allant de 18°C à 25°C, par calcul numérique en régime transitoire et énergie conventionnelle comme source de chaleur. En régime transitoire utilisant la méthode nodale, et le solaire comme

source de chaleur, le profil de température est plus stable, les valeurs sillonnées entre 20°C et 24°C et le gain d'énergie est important. Ainsi, pour élever la température de 2°C, on aura à utilisé une source de chaleur équivalente à 500Watts, or cette valeur est deux fois, voir plus supérieure dans le cas de l'utilisation de source conventionnelle.

Enfin, la réhabilitation thermique rend un grand service, que soit sur le plan énergétique en termes de confort thermique, mais aussi, sur le plan économique (facture de consommation et préservation de l'environnement). Ainsi, pour bénéficier d'un bon confort thermique, une isolation de l'extérieur est plus que nécessaire. Désormais, il est à signaler clairement que la qualité de l'habitat en Algérie est pauvre. L'isolation est pratiquement absente, encore moins la réhabilitation thermique et l'utilisation des produits isolants aux normes internationales.

Les résultats trouvés, illustrent l'intérêt de ce travail de recherche sur la thermique de l'habitat dans les zones arides en Algérie, et donnent plus d'indications aux utilisateurs du domaine. Delors, ces premiers essais nous permettent de recueillir suffisamment d'information sur les bénéficiaires qu'on pourrait obtenir de ce type de projet.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

1. Commission économique d'Alger, « *Les énergies renouvelables en Algérie* », système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001. Avril (2009).
2. J. Carassus, « *Changement climatique, énergie et bâtiment : la nouvelle donne* », Séminaire IHEDATE (Institut des Hauts Etudes de Développement et d'Aménagement des Territoires Européens), Paris. (2008).
3. Commission technique permanente, « *Règles de calcul des apports calorifiques* », Document Technique Réglementaire, CNERIB, (Aout 1998) Alger.
4. ASHREE, Handbook, « *Fundamentals, Residential cooling and heating load calculations* », USA, chapter.26.
5. M. AMIRAT, S.M.K. EL HASSAR, K. SILHADI, « *Contribution à l'élaboration d'une politique de maîtrise de l'énergie pour le secteur de l'habitat en Algérie* », in revue des énergies renouvelables, Proceedings (25-26 Mai 2003), tome 1, Bouzaréah, pp 1-5.
6. P. FERNANDEZ, « *Stratégies d'intégration de la composante énergétique dans la pédagogie du projet d'architecture* », Thèse doctorat, Ecoles des mines de Paris, (1996). p 98.
7. MARKUS KOTTEK, JÜRGEN GRIESER, CHRISTOPH BECK, BRUNO RUDOLF and FRANZ RUBEL, « *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated* », Article, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, No. 3, 259-263 (June 2006).
8. M. MEZRED, Centre climatologique National, Office National de la Météorologie, « *Une approche du zonage climatique de l'Algérie pour l'étude du comportement thermique des constructions* », Actes des Journées nationales sur les Applications et la Valorisation des Énergies solaires, Université de Batna, (10-11 mai 1997).
9. R.CANTIN et al, « *Complexité du confort thermique dans les bâtiments* », in actes du 6^{ème} congrès européen de science des systèmes, Paris, (du 19 au 22 septembre 2005).
10. Y. JANNOT et T. DJIAKO, « *Economie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale* », in revue "International journal of réfrigération", volume 17 n°03, France (1994).

11. B. MOUJALLED, « *Modélisation dynamique du confort thermique* », thèse de doctorat présentée à l'institut des sciences appliquées de Lyon (France), Janvier, (2007).
12. M. BRUANT, « *Développement et paramétrages de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance* », in conception en bâtiment et techniques urbaines, I.N.S.A (Institut National des Sciences Appliquées) de Lyon, France (1997).
13. Jean-Baptiste HOFFMANN (CosTic), « *Le confort thermique, ou en sommes-nous ?* », Revue de la climatique, tome 25 n°3, France, (Mai 1994).
14. Victor. CANDAS, « *Confort thermique* », *Revue de Génie Energétique, France, Doc. BE 9085*.
15. V. OLGAYAY, « *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism* », Princeton, University Press, N.J., U.S.A. (1963), page.185.
16. D.WRIGHT, « *Manuel d'architecture naturelle* », Traduction française et adaptation de P. Bazan, Edition Parenthèses. Paris (2005), p 219.
17. J. L. Izard, « *Architecture d'été – construire pour le confort d'été* », Edition Edisud, (1993).
18. J. P. OLIVA & S. COURGEY, « *La conception bioclimatique des maisons confortables et économes en neuf et en réhabilitation* », Editions Terre Vivante, France (2006).
19. P. FERNANDEZ, P. LAVIGNE, « *Concevoir des bâtiments bioclimatiques – Fondements et méthodes* », Editions Moniteur, Paris, (Novembre 2009).
20. ONM (Office National de la Météorologie), « *Atlas climatologique nationale* » partie 1: Recueil de données, station Ghardaïa. (1974 -1984).
21. Thierry CABRIOL- Daniel ROUX, « *Chauffage de l'habitat et énergie solaire* », tome 2, Edition Edisud, France (1984).
22. A. De HERDE & A. Evrard, « *béton et utilisation rationnelle de l'énergie* », Bulletin publié par : FEBELCEM – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, (2005), p 85a.
23. C. et P. DONNADIEU/ H. et J.M. DIDILLON, « *Habiter le désert – les maisons mozabites –* », architecture + Recherches/ Editeur : Pierre MARDAGA, Bruxelles 1977.

24. André RAVEREAU, « *Le M' Zab, une leçon d'architecture* », Éditions Sindbad, Paris, 1981.
25. C.A.U.E (Conseil en Architecture Urbanisme et Environnement), « *l'Architecture bioclimatique* », in revue d'architecture d'urbanisme et d'environnement de l'Ariège, France, (2005).
26. A. CHATELET, P. FERNANDEZ, P. LAVIGNE, « *Architecture climatique – une contribution au développement durable – Tome 2 : concepts et Dispositifs* », Edition Edisud, France, 1998.
27. Brahim. BENYOUCEF, « *Le M'Zab – espace & société* », in acta- Géo, n°47-48 Paris, 1982.
28. Kourad GATZ et Gerhard ACHTERBERG « *La couleur et l'architecture*», Editions Eyrolles - Paris, (1967).
29. F. HAUGLUSTAINE. Simon, J.M. BALTUS, C. et Liesse.S, « *La fenêtre et la gestion de l'énergie – Guide pratique pour les architectes. UCL – ULG. Ministère de la Région Wallonne – DG TRE* », (2002), p48.
30. C. DERNERS et A. POTVIN, « *Le brise-soleil : la dernière grande invention environnementale en architecture* », in revue "Le bulletin d'information de l'ordre des architectes du Québec", volume 15, numéro 5.
31. Lorraine FARRELLY, « *Les fondements de l'architecture* », Editions pyramid NTCV, (Paris 2008).
32. D. CARBIENER « *L'habitat durable, construire et rénover écologique et économique* », Edition Edisud, Paris (2008), page 51.
33. M. Koussa, et al, « *Validation de quelque modèles de reconstitution des éclairagements dus au rayonnement solaire direct, diffus et global par ciel clair* », in revue des énergies renouvelables, Volume 9 n°4, Bouzaréah, Alger. (2006), page 257.
34. Nadjid. TALEB, (ONM/direction régionale Sud-est Ouargla), « *Journée météorologique Mondiale*», Ghardaïa (21-23 Mars 2007).

35. Documentation française du bâtiment, « *L'isolation thermique par l'extérieur - béton Cellulaire Français* », 20, rue Cambon – 75001, Paris.
36. A. De HERDE & A. Evrard, « *béton et utilisation rationnelle de l'énergie* », Bulletin publié par : FEBELCEM – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, (2005), p 28a.
37. Jean-François SACADURA, « *Initiation aux transferts thermiques* », Editions Lavoisier, Paris (1978).
38. Pierre. AUGUSTE, « *Devenez un bon réalisateur d'isolation (Froid, chaleur, bruit, humidité)* », 3ème Edition, Revue et actualisée, Edition Eyrolles, Paris (1986).
39. Michel MATANA, « *Collection concevoir et construire, isolation* », Éditions Alternatives, 5, rue de Pontoise 75005, Paris.
40. WH Ball, « *Communication présentée à la réunion générale annuelle, Institut du génie du Canada* », publiée à l'origine en septembre (1967).
41. A. DEGIOVANI, « *Diffusivité et méthode flach* », in revue générale de thermique n°185, France 1977.
42. J. L. IZARD, « *Architecture d'été – construire pour le confort d'été* », Edition Edisud, (1993).
43. Solution Béton, « *Inertie thermique et confort d'été* », in revue construction moderne n°103, France (2000).
44. B. GIVONI, « *L'homme, l'architecture et le climat* », Éditions du Moniteur, Paris (1978).
45. POLE CONSTRUCTION, Organismes de Recherche scientifique et techniques, « *Le Millénaire II – 417* », rue Samuel Morse –Montpellier.
46. D.HERNOT et G.PORCHER, « *Thermique appliquée aux bâtiments* », Edition parisienne, CFP, Chaud-froid-Plomberie (1984).
47. Kurt ARBENZ et Alfred WOHLHAUSER, « *Analyse Numérique* », ISBN 978-2.88074-016-0, Office des publications universitaires, 1. Place Central de Ben AKNOUN, Alger, (Janvier 1990).

48. JHON H. MATHEWS, California State University, Fullerton « *Numerical Methods, For Mathematics, Science, and Engineering* », Second Edition, (1992).
49. Ch. CHAULIAGUET, « *Energie solaire dans le bâtiment* », Editions Eyrolles, Paris 1979.
50. Roger. CASAR, Guide des calculs des déperditions et charges thermiques d'hiver, « *Détermination des puissances de chauffage a installé dans les locaux* », collection des guides de l'AICVF, ouvrage de la commission technique coordonné, Edition (1989).
51. Peter J. LUNDE, « *Prediction of the performance of solar heating systems over a range of storage capacities* », in revue, "Solar energy", Vol. 23, pp.115-121, U.S.A. (1979).
52. J. DUFFIE, W.A. BECKMAN, « *Solar engineering of thermal processes* », Wiley interscience. Publication, New York (second edition), 1991.
53. Klein, S. A., W. A. Beckman, and J. A. Duffie, « A Design Procedure for Solar Air Heating Systems », in revue, Solar Energy, 19, 509 (1977).
54. J. E. BRAUN, S.A. KLEIN and J.W. MITCHELL, « *Seasonal storage of energy in solar heating* », in revue, "Solar energy", Vol. 26, pp.403-411, U.S.A, (1981).
55. S.M. HABALI, M.A.S. HAMDAN, B.A. JUBRAN and ADNAN I.O. ZAID, « *Optimization of insulation thickness in a long term solar storage system* », in revue, "Solar energy", Vol. 5, No 1, pp.75-82, U.S.A, (1988).
56. K. BOULAKHRAS, « *Etude comparative des performances d'un capteur solaire sous vide et d'un capteur solaire ordinaire* », Thèse de Magister en Energétique, Option photo-thermique, Université de Constantine, (1998).
57. Jean-François SACADURA, « *Initiation aux transferts thermiques* », Technique et documentation, Edition Lavoisier, Paris (1978).
58. Henri CORTES, Joseph BLOT, « *Transferts thermiques, Application à l'habitat, Etude par la méthode nodale* », Collection TECNOSUP, les filières technologiques des enseignements supérieures, ISBN 2-7298-7841-6. Edition : Ellipses Marketing, (1999).
59. M. IQBAL, « *An introduction to solar radiation* », Academic press, Toronto- New York London, (1983).

60. G. ATHANASSOULI and P. MASSOUROS, « *A model of the thermal restoration transient state of an opaque wall after the interruption of solar radiation* », in revue, “Solar energy”, Vol. 66, No. 1 pp.2&-31, U.S.A., (1999).
61. Collection technique CIMNETON, « *Béton et confort thermique* », revue technique du centre d’information sur le ciment et ses applications, n°B40, France, (2007).
62. A. De. HERDE, A. EVRARD, « *Béton et utilisation rationnelle de l’énergie* », Bulletin publié par : FEBELCEM – Fédération de l’Industrie Cimentière Belge (2005), page 4.

ANNEXE

Annexe 3.1. Coefficient de perte globale du capteur U_L ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) [52]

$$U_L = U_{arr} + U_{av} + U_{lat}$$

U_L : coefficient de perte thermique globale du capteur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

$U_{av} = K$: coefficient de perte thermique avant du capteur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

U_{arr} : coefficient de perte thermique arrière du capteur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

U_{lat} : coefficient de perte thermique vers les surfaces latérales du capteur en ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

$$U_{arr} = \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{arr}}}$$

e_i : épaisseur de l'isolant (m);

λ_i = conductivité thermique de l'isolant ($W/m \cdot ^\circ C$).

h_{arr} : coefficient d'échange arrière par convection.

$$U_{lat} = \frac{K_{isol} A_{lat}}{e_i A_c}$$

A_{lat} : surface latérale du capteur (m^2).

A_c : surface du capteur (m^2).

$$U_{av} = \left[\frac{N}{\left(\frac{c}{T_p}\right) \left(\frac{T_p - T_a}{N + f}\right)} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma (T_p + T_a)(T_p^2 - T_a^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_p + 0.00591 N h_w}\right) + \left(\frac{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p}{\varepsilon_g}\right) - N}$$

$N=1$ (Nombre de couver du capteur)

$$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \varepsilon_p)(1 + 0.07866 N)$$

$$c = 520(1 - 0.000051 \beta^2)$$

$$e = 0.430(1 - 100/T_p)$$

$$\sigma = 5.68 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4 \text{ (constant de Boltzmann)}$$

β = Angle d'inclinaison du capteur (degré)

ε_g = émissivité du vitrage (0.88)

ε_p = émissivité de la plaque absorbante

$$h_w = 9 + 3.5V \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ C)$$

V = vitesse du vent (m/s)

T_a = température de l'air ambiant (K)

T_p = température de la plaque absorbante (K)

Annexe 3.2. Calcul de l'irradiation globale horaire solaire sur le plan incliné selon la formule de Liu and Jordan [52-59]

$$I_G = \int_0^{24} (I_n \cos \theta + I_{dif} 0.5(1 + \cos \beta) + I_g \alpha 0.5(1 - \cos \beta)) dt$$

I_n = Eclairement direct sur la normal en (W/m^2)

I_{dif} = Eclairement diffus sur le plan horizontal en (W/m^2)

I_g = Eclairement global sur le plan horizontal en (W/m^2)

I_G = Irradiation global horaire sur le plan incliné en (Wh/m^2)

θ = Angle d'incidence calculé pour chaque paroi en (degré)

β = Angle d'inclinaison en (degré)

α = Albédo du lieu (α : 0.3)

L'angle d'incidence pour chaque paroi est donné par la relation de COFARI

$$\cos \theta = (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta + (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) (\cos \delta \cos \omega) + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

ϕ : Latitude du lieu

β : Inclinaison (angle entre le plan horizontal et le plan considéré)

γ : Orientation (angle entre la normale au plan considéré et le plan méridien). Compté zéro au Sud ; positif vers l'Ouest et négatif vers l'Est.

- Surfaces verticales ($\beta=90^\circ$): $\cos \theta = -\cos \phi \cos \gamma \sin \delta + \sin \phi \cos \gamma \cos \delta \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega$ (36)

- Surfaces horizontales ($\beta=0^\circ$),

$$\cos \theta = \cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega = \sin h$$

h : hauteur du soleil;

θ_z : angle zénithal (entre le rayon solaire et le zénith).

Cas particulier

✓ Paroi verticale orientée au sud ($\gamma=0$)

$$\cos \theta = -\cos \phi \sin \delta + \sin \phi \cos \delta \cos \omega$$

✓ Paroi verticale orientée vers l'Est ($\gamma = \pi / 2$)

$$\cos \theta = -\cos \delta \sin \omega$$

✓ Paroi verticale orientée vers l'Ouest ($\gamma = -\pi / 2$)

$$\cos \theta = \cos \delta \sin \omega$$

✓ Paroi verticale orientée vers le Nord ($\gamma = \pi$)

$$\cos \theta = \cos \phi \sin \delta - \sin \phi \cos \delta \cos \omega$$