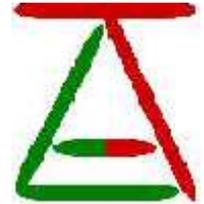


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAÏD – TLEMCEM
FACULTE DES SCIENCES Dr Tedjini HADDAM
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



THESE

Pour l'obtention du Diplôme de
Doctorat en Sciences Physiques
Option : Physique Electronique et Modélisation

Par

Mr HADDAM Muhammad Abdalkhalaq Chuayb

«Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat».

Devant le jury

Président	CHABANE SARI Nasreddine	Professeur à l'Université de Tlemcen
Directeur de Thèse	BENOUAZ Tayeb	Professeur à l'Université de Tlemcen
Co-Directeur de Thèse	BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	Maître de recherche, URAER Ghardaïa
Examineurs	BELGHACHI Abderahmane	Professeur à l'Université de Béchar
	HELMAOUI Abderrachid	Professeur à l'Université de Béchar
	MERAD Abdelkrim	Professeur à l'Université de Tlemcen
Invité	LASRI Boumediène	Professeur à l'Université de Saida

الرحيم

« يَغَيِّرُ يَغَيِّرُوا
يَأْنَفُسِهِمْ »

العظيم

« Dieu ne change rien a l'état d'un
peuple avant que celui-ci n'ait entrepris la
transformation de son âme »

«Allah will not change the condition of a
people until they change what is in
themselves.»

S.13-V.10

DEDICACES

A la mémoire de mon père Mokhtar HADDAM "Sidi Khay" à qui je dois l'essentiel de mon éducation.

A la mémoire de ma mère Yamina Chaouch Ramdan qui m'a donné tant de tendresse et de douceur.

A ma femme, qu'elle trouve ici toute ma gratitude pour son réconfort moral et son soutien constant .

A mes enfants: Soheyb, Hayet, Omar & Hadjer.

Aux amis qui me restent fidèles.

A tous ceux qui me sont chers.

A ceux qui m'ont soutenus de loin ou de près.

Et, à tous ceux qui, de bonne foi, ont sacrifié leur vie en rêvant d'une ALGERIE libre, fraternelle et juste.

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu le tout puissant qui m'a donné la foi, la santé et le courage pour pouvoir réaliser cette thèse.

Les travaux qui font l'objet de cette thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Automatique de l'université de Tlemcen (L.A.T.), sous la direction du Professeur Tayeb BENOUAZ. Je tiens à lui exprimer ici ma gratitude et ma reconnaissance pour avoir guidé mes travaux avec patience et assiduité tout le long de la préparation de cette thèse.

Qu'il veuille bien accepter l'expression de mon profond respect pour ses conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigué au cours de l'élaboration de ce travail.

Ma profonde et reconnaissante gratitude va aussi au Dr Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE, Maître de Recherche A à l'URAER Ghardaïa, pour l'aide, le soutien et les conseils fructueux qu'il m'a apporté au cours de l'élaboration des travaux de recherche et sans lesquels cette thèse n'aurait pu aboutir.

Je remercie vivement,

- Monsieur Nasreddine CHABANE SARI, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence de ce jury.

Mes remerciements vont aussi à:

- Monsieur Abderrahmane BELGHACHI, Professeur à l'Université de Bechar
- Monsieur Abderrachid HELMAOUI, Professeur à l'Université de Bechar
- Monsieur Abdelkrim MERAD, Professeur à l'Université de Tlemcen

Pour avoir accepté gracieusement d'examiner ces travaux.

Que notre invité Monsieur Boumediene LASRI, Professeur à l'Université de Saïda soit ici vivement remercié pour son encouragement tout au long de ce travail.

Enfin, mes remerciements les plus sincères à l'Equipe "Approximation et Stabilité des Systèmes non Linéaires" du Laboratoire d'Automatique et à l'ensemble des collègues enseignants de l'Université de Tlemcen tout particulièrement ceux d'entre eux qui m'ont aidé à mener à terme ce travail avec sympathie.

Abdalkhalaq

Table des Matières

Table des Matières.....	01
Nomenclature.....	03
Table des figures.....	06
Liste des tableaux.....	10
0. Introduction Générale.....	11
Références.....	14
1. Concept Energétique: Règles et Principes.....	16
1.1. Introduction.....	16
1.2. Période froide.....	19
1.2.1. Capter le soleil.....	19
1.2.2. Stocker la chaleur.....	23
1.2.3. Distribuer la chaleur.....	24
1.2.4. Conserver la chaleur.....	26
1.3. Période chaude.....	28
1.3.1. Minimiser les gains solaires.....	28
1.3.2. Ventilation naturelle.....	30
1.3.3. Déphasage des gains et ventilation nocturne.....	32
1.3.4. Eclairage naturel.....	33
Références.....	35
2. Modélisation, Approches Utilisées et Simulation du Comportement Thermique en Milieu Désertique	37
2.1. Introduction.....	38
2.2. Modélisation du système thermique.....	39
2.2.1. Analyse nodale & échange par conduction et couplage avec les échanges superficiels	39
2.2.2. Structure nodale et description de l'habitat.....	43
2.3. Validation expérimentale & confrontation des températures.....	48
2.4. Déphasage et facteur de décrémentation.....	53
2.5. Conclusion.....	57
Références.....	58
3. Principales Mesures Structurelles & Amélioration des Performances de l'Enveloppe des Bâtiments	60
3.1. Introduction.....	61
3.2. Échanges thermiques d'une paroi.....	62
3.2.1. Stockage et restitution de la chaleur.....	63
3.2.1.1. Capacité thermique.....	63

3.2.1.2. Effusivité.....	64
3.2.1.3. Diffusivité.....	64
3.2.2. Résolution numérique de l'équation de la chaleur.....	66
3.3. Propriétés et aide à l'amélioration des performances thermiques.....	68
3.3.1. Isolation thermique et techniques choisies.....	69
3.3.2. Mécanisme du transfert de chaleur dans une cavité d'air d'un élément de construction	74
3.3.3. Influence de l'épaisseur de la pierre sur les parois et sur l'air intérieur....	78
3.3.4. Orientation: les effets du soleil sur la température et les apports solaires	84
3.3.4.1. Température.....	85
3.3.4.2. Apports solaires.....	90
3.3.4.3. Intégration des brises soleil.....	95
3.4. Conclusion.....	99
Références.....	101
4. Une Démarche Complémentaire à la Voie Passive, Compacité et Débord de Toiture	103
4.1. Introduction.....	104
4.2. Modélisation thermo-aéraulique.....	105
4.2.1. Bilan enthalpique.....	105
4.2.2. Bilan massique d'air.....	105
4.2.3. Bilans sensible et latent.....	106
4.2.3.1. Bilan sensible.....	106
4.2.3.2. Bilan latent.....	107
4.3. Validation des résultats.....	107
4.4. Débord de toiture.....	114
4.5. Etude de compacité par TRNSYS 16.....	118
4.5.1. Qu'est ce que TRNSYS.....	118
4.5.2. Choix de TRNSYS.....	119
4.5.2.1. Données introduites.....	121
4.5.2.2. Résultats.....	121
4.5.2.3. Avantage.....	122
4.5.2.4. Inconvénients.....	122
4.5.3. Transferts thermiques dans TRNSYS.....	122
4.5.4. Simulation numérique.....	124
4.6. Conclusion.....	130
Références.....	130
5. Conclusion Générale	132

Nomenclature

Chapitre 2

C_w	: matrice diagonale de capacité thermique ($J K^{-1}$)
T_w	: température (K)
A_w	: matrice carrée de conductivité thermique ($W m^{-1} K^{-1}$)
B_w	: vecteur
e	: épaisseur (m)
n	: nombre de nœud
	: coefficient d'absorption
	: émissivité thermique
G	: éclairement solaire incident sur les surfaces ($w m^{-2}$)
S	: surface (m^2)
	: conductivité thermique ($W k^{-1} m^{-1}$)
C_p	: chaleur spécifique ($J kg^{-1} K^{-1}$)
	: densité ($kg m^{-3}$)
F	: facteur de forme entre les surfaces d'échange
	: constante de Stéphane-Boltzmann ($W m^{-2} K^{-4}$)
V_{vent}	: vitesse du vent ($m s^{-1}$)
h_{Conv}	: coefficient de flux de chaleur échangé par convection ($w m^{-2} K^{-1}$)
T	: température (K)
ρ_{air}	: densité de l'air ($kg m^{-3}$)
C_{air}	: la chaleur spécifique de l'air est supposée constante et estimée à $1008 (m^2 s^{-2} K^{-1}, j kg^{-1} K^{-1})$
V_{air}	: volume d'air (m^3)
$Q_{Chauffage}$: la puissance thermique fournie par un appareil de chauffage (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source d'énergie.
$Q_{Rafraîchissement}$: puissance thermique fournie par l'équipement de refroidissement (w), est égale à 0 lorsque le système est sans source de refroidissement.
Q_{Inf}	: gain de puissance thermique due à l'infiltration de l'air (p).
Q_{Vent}	: gain de puissance thermique due à la ventilation de l'air (p).
Q_{Surf}	: puissance thermique due à l'échange entre l'air et les murs surfaces intérieures (i), les fenêtres (ii) et les portes (w).
Q_{Gain}	: gain d'énergie solaire directe grâce à des ouvertures (w), il est supposé que les ouvertures sont fermées, par conséquent, elle est égale à 0.
\dot{m}_{Inf}	: débit d'air due à l'infiltration (kg / s)
\dot{m}_{Vent}	: circulation de l'air due à la ventilation (kg / s)

T_i	: température de l'air à l'intérieur du bâtiment (K)
T_{out}	: température de l'air à l'extérieur du bâtiment (K)
$T_{Vent,out}$: température de l'air à la sortie de ventilation (K)
$T_{Vent,in}$: température de l'air à la ventilation d'entrée (K)
T_{Surf}	: température air- surfaces intérieures des murs (K)
h_{Conv}	: coefficient de transfert convectif ($w m^{-2} K^{-1}$)
Gr	: nombre de Grashof
Pr	: nombre de Prandt
L	: longueur de la plaque (m)
ΔT	: différence de température entre les surfaces et l'échange de volumes (K)

Chapitre 3

	: la masse volumique de la pierre: $= 1670 \text{ kg} / \text{m}^3$
k	: la conductivité thermique de la pierre: $k = 1.436 \text{ W} / (\text{m} \text{ } ^\circ\text{C})$
C_p	: la chaleur spécifique de la pierre: $C_p = 881 \text{ J} / (\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C})$.
t	: le temps caractéristique
D_f	: la diffusivité qui s'exprime en m^2/s , exprime la profondeur à laquelle la chaleur a un effet après une période de temps donnée
E	: l'effusivité qui s'exprime en $\text{J K}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, détermine la capacité d'accumulation de chaleur.
	: la constante de temps (s)
e	: l'épaisseur du mur (m)
x	: la position (m)
g	: la source de la chaleur (W m^{-3})
Q_s	: l'apport thermique en Wh, la somme s'effectue sur toutes les orientations j
I_{sj}	: l'irradiation solaire pour l'orientation j , elle s'exprime en W/m^2
S_{sj}	: l'aire réceptrice équivalente d'orientation j en m^2
A	: la surface de la maison prise pour les calculs en m^2
F_s	: le facteur de correction pour l'ombrage
S	: le facteur solaire, représente la quantité totale d'énergie que laisse passer un vitrage par rapport à l'énergie solaire incidente
λ_{air}	: la conductivité thermique de l'air, $\lambda_{air} = 0.026 \text{ (W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
L	: l'hauteur du mur (m)
ϵ_c	: l'émissivité du ciel
I_s	: l'irradiation journalière incidente sur l'orientation considérée en Wh/m^2
τ_v	: taux de transmission de la partie transparente du capteur PV,

ξ	: semi-transparence du capteur PV (égale au rapport entre la surface transparente et la surface totale du capteur PV),
S_{cel}	: surface couverte par les cellules PV (m^2),
S_{tot}	: surface totale du capteur PV (m^2).

Chapitre 4

S	: surface (m^2)
j	: nombre de surfaces intérieures (murs, portes et fenêtres) dans la zone i
$NW(i)$: nombre total de surfaces intérieures (murs, portes et fenêtres) dans la zone i
$T_{\text{al}}(n)$: température de l'air de la zone n et entrant dans la zone i (K)
T_{sj}, T_A	: température de la surface j dans la zone i (K)
$r_s(i)$: humidité spécifique ($\text{Kg}_{\text{vap}}/\text{Kg}_{\text{as}}$ ou %)
H_r	: humidité relative (%)
P_{sat}	: pression de la vapeur saturée (Pa)
L_v	: chaleur latente d'évaporation (J kg^{-1})
C_v	: chaleur spécifique à volume constant ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
C_{as}	: chaleur spécifique de la masse d'air ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
H_s, H_L	: enthalpies sensible et latente de l'air humide (J)
$H^e(i)$: enthalpie de la masse d'air humide entrant dans la zone i (J)
$H^s(i)$: enthalpie de la masse d'air humide sortant de la zone i (J)
$Q_{\text{mas}}^{\text{trans}}(n, i)$: débit massique transitant de la zone n à la zone i (Kg/s)
$Q_{\text{mas}}^{\text{trans}}(i, n)$: débit massique transitant de la zone i à la zone n (Kg/s)
Ci_s, Cl_L	: Puissances intérieures sensible et latente dues aux appareils, occupants, éclairage... (W)
P_s, P_L	: Puissances intérieures sensible et latente dues à la climatisation (W)
$V(i)$: volume de la zone i (m^3)
$V_s(i)$: volume spécifique de l'air humide dans la zone i (m^3)
M_{as}	: masse molaire de l'air sec (g mol^{-1})
M_v	: masse molaire de la vapeur d'eau (g mol^{-1})
P	: pression totale (Pa)

Table des figures

Chapitre 1

- Figure 1.1 : principes physiques et stratégies de contrôle en architecture climatique
- Figure 1.2 : période froide: les 4 stratégies de base
- Figure 1.3: : orientation privilégiée des surfaces de captage
- Figure 1.4 : une surface de sol à haut pouvoir de réflexion devant les fenêtres capteurs verticales éclairées par le soleil d'hiver (Sud) augmente le gain solaire
- Figure 1.5: : différents types de capteur : Leur différenciation entre systèmes est plus liée à la capacité de laisser pénétrer la lumière et la chaleur qu'à leur performance
- Figure 1.6 : ces trois murs, avec un matériau identique et de même épaisseur à l'intérieur de l'enveloppe isolée, offrent un stockage équivalent
- Figure 1.7 : dimensionnement d'une ouverture servant à distribuer la chaleur d'un espace de captage vers un espace secondaire
- Figure 1.8 : des peaux légères ventilées diminuent l'impact du soleil sur les parois extérieures. Elles sont efficaces si la paroi qu'elles protègent est mal isolée

Chapitre 2

- Figure 2.1 : discrétisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé
- Figure 2.2 : discrétisation spatiale d'un mur et modèle de conduction
- Figure 2.3 : modélisation du bâtiment (a) : en 3D, (b) : en 2 D
- Figure 2.4 : simulation numérique des données
- Figure 2.5 : plan descriptif de la maison
- Figure 2.6 : types de nœuds et structure zonale
- Figure 2.7 : éclairage solaire incident
- Figure 2.8 : température ambiante de l'air extérieur
- Figure 2.9 : températures mesurées et simulées des surfaces intérieures du mur sud
- Figure 2.10 : températures mesurées et simulées des surfaces intérieures du mur nord
- Figure 2.11 : températures mesurées et simulées de l'air intérieur du séjour
- Figure 2.12 : températures mesurées et simulées des surfaces intérieures du mur nord
- Figure 2.13 : températures mesurées et simulées de l'air intérieur du séjour
- Figure 2.14 : températures simulées du mur sud
- Figure 2.15 : températures simulées du mur ouest
- Figure 2.16 : déphasage τ_{max} et τ_{min} des murs de type 1 et de type 2 à orientation sud pour une journée typique d'été, le 21 Juillet 2008
- Figure 2.17 : facteur de décrémentation f des murs de type 1 et de type 2 à orientation sud pour une journée typique d'été, le 21 Juillet 2008

Chapitre 3

- Figure 3.1 : comportement thermique d'une enveloppe selon sa constitution
- Figure 3.2: : échanges thermiques et schéma descriptif du mur
- Figure 3.3: : température du mur pour différentes profondeurs, conditions chaudes
- Figure 3.4: : température du mur pour différentes profondeurs, conditions froides
- Figure 3.5: : masse thermique, (a) Isolant disposé à l'intérieur de la masse thermique, (b) Isolant disposé à l'extérieur de la masse thermique, (c) Isolant disposé au milieu de la masse thermique
- Figure 3.6: : méthodes d'isolation de toiture
- Figure 3.7: : fondation en béton, isolation de la dalle sur terre pleine. (a) Isolation intérieure de la fondation en béton, (b) Isolation extérieure de la fondation en béton
- Figure 3.8: : température de l'air du séjour
- Figure 3.9: : coefficient de chaleur estimé en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air. Cas d'un matériau de construction ordinaire $\alpha = 0.9$
- Figure 3.10 : coefficient de chaleur estimé en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air. Cas d'une cavité délimitée par un matériau réfléchissant $\alpha = 0,05$
- Figure 3.11 : résistance thermique en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air
- Figure 3.12 : températures intérieures de l'air, 02 - 03 Juin 2008
- Figure 3.13 : température de l'air intérieure de la salle du séjour, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.14 : températures de la surface intérieure du toit, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.15 : températures de la surface extérieure du mur sud, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.16 : températures de la surface intérieure du mur sud, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.17 : température de l'air intérieure de la salle du séjour pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.18 : températures de la surface intérieure du toit pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.19 : températures de la surface extérieure du mur sud pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.20 : températures de la surface intérieure du mur sud pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.21 : température de l'air intérieure de la salle du séjour, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.22 : températures de la surface intérieure du toit, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.23 : températures de la surface extérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.24 : températures de la surface intérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.25 : température de l'air intérieure de la salle du séjour, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013

- Figure 3.26 : températures de la surface intérieure du toit, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.27 : températures de la surface extérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.28 : températures de la surface intérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013
- Figure 3.29 : variation du gain solaire journalier moyen mensuel
- Figure 3.30 : intégration de type brise-soleil
- Figure 3.31 : dimension de l'avancée suivant le temps légal

Chapitre 4

- Figure 4.1 : photo générale décrivant la position du bureau
- Figure 4.2 : photo prise pour les stations météorologiques : (a) anémomètre, (b) Consol.
- Figure 4.3 : visualisation des données mesurées en temps réel
- Figure 4.4 : température de l'air ambiant intérieur et extérieur du 15 (vers 12 :00) au 20 (à 13 :00) décembre 2014
- Figure 4.5 : l'humidité relative extérieure et intérieure du bureau du 15 (vers 12 :00) au 20 (à 13 :00) décembre 2014
- Figure 4.6 : confrontation des températures prédites et mesurées de l'air intérieur du bureau, Ghardaïa le 22 décembre 2014
- Figure 4.7 : confrontation des humidités relatives prédites et mesurées de l'air intérieur du bureau, Ghardaïa le 22 décembre 2014
- Figure 4.8 : calcul de la longueur d'une protection horizontale idéale dans le sud de la France
- Figure 4.9 : éclairage solaire global et diffus incident sur la paroi Sud de la façade, Ghardaïa le 28 Août
- Figure 4.10 : température ambiante, Ghardaïa les 25-30 Août 2013
- Figure 4.11 : vitesse du vent, Ghardaïa les 25-30 Août 2013
- Figure 4.12 : humidité relative, Ghardaïa les 25-30 Août 2013
- Figure 4.13 : température de la pièce 1, Ghardaïa les 25-30 Août 2013
- Figure 4.14 : humidité spécifique de la pièce 1, $H_{r_{moyenne}} = 30\%$, Ghardaïa les 25-30 Août 2013
- Figure 4.15 : interfaces du logiciel TRNSYS
- Figure 4.16 : interfaces du logiciel TRNSYS
- Figure 4.17 : modèle de simulation sous TRNSYS
- Figure 4.18 : donnée climatique extérieures : (a) la température ambiante, (b) la vitesse du vent et, (c) l'humidité relative, Bechar du 02 au 05 Janvier
- Figure 4.19 : températures intérieures des quatre cellules, Bechar du 02 au 05 Janvier
- Figure 4.20 : donnée climatique extérieures : (a) la température ambiante, (b) la vitesse du vent et, (c) l'humidité relative, Bechar du 09 au 13 Juillet

Figure 4.21 : températures intérieures des quatre cellules, Bechar du 09 au 13 Juillet

Figure 4.22 : températures intérieures des quatre cellules, Bechar du 02 au 05 Janvier

Liste des tableaux

Chapitre 2

- Tableau 2.1 : expression des coefficients de transfert convectifs
- Tableau 2.2 : couleurs et type de nœuds
- Tableau 2.3 : propriétés thermiques, épaisseurs des murs et caractéristiques de l'enveloppe
- Tableau 2.4 : propriétés thermiques, épaisseurs et caractéristiques du verre pour fenêtres

Chapitre 3

- Tableau 3.1 : épaisseurs optimales des isolants de toiture pour le confort d'hiver et d'été
- Tableau 3.2 : composition, épaisseurs et coefficient de transmission thermique global, caractérisant l'enveloppe du bâtiment
- Tableau 3.3 : valeurs du coefficient de transmission thermique de verre (verre unique)
- Tableau 3.4 : synthèse des grandes techniques disponibles pour l'isolation des toitures
- Tableau 3.5 : synthèse Critères de sélection d'un mode d'isolation des murs
- Tableau 3.6 : irradiances solaires journalières, totales mensuelles et moyennes, incidentes sur un capteur vertical orienté en plein Sud
- Tableau 3.7 : irradiances solaires journalières, totales mensuelles et moyennes, incidentes sur un capteur vertical orienté vers le Nord
- Tableau 3.8 : irradiances solaires journalières, totales mensuelles et moyennes, incidentes sur un capteur vertical orienté vers l'Est et Ouest

Chapitre 4

- Tableau 4.1 : Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques
- Tableau 4.2 : Relation entre TRNSYS et le mode réel
- Tableau 4.3 : Dimensions des différentes configurations proposées

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur du bâtiment est aujourd'hui l'un des premiers postes de consommation énergétique et l'un des principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre. Derrière ce constat, les enjeux environnementaux en termes d'épuisement des ressources et de changement climatique sont très importants. Pour ces raisons, de nombreux efforts de recherche portent sur l'efficacité énergétique des bâtiments et plus précisément sur la réduction de leur consommation énergétique. Cette volonté conduit à deux voies de recherche distinctes [01]:

- Un axe de recherche centré sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques du bâtiment.
- Un deuxième axe porte sur l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment.

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans ce secteur constitue un axe de progrès prioritaire. Parmi les solutions d'amélioration dites "passives"; de nombreux travaux de recherche [02-12] ont mis l'accent sur ces aspects.

La conception d'enveloppes, capables de valoriser les gains énergétiques gratuits tout en limitant les pertes, doit contribuer à diminuer les besoins énergétiques sans nuire au confort intérieur. L'enveloppe devient alors un véritable échangeur thermique qu'il est possible de gérer et d'adapter aux environnements intérieur et extérieur. La diminution des besoins énergétiques, comme le confort thermique intérieur, passe par une adaptabilité de l'enveloppe aux contraintes climatiques. Le recours aux éléments actifs est alors réduit et les énergies disponibles localement sont mieux utilisées [13].

La modélisation a prouvé que les bâtiments les plus performants montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par ces techniques passives. En effet, la notion de modèle comme norme abstraite se développe en physique. Le modèle dans ces situations est un intermédiaire à qui les physiciens délèguent la fonction de connaissance, de réduction de l'encore énigmatique à du déjà connu, notamment en présence d'un champ d'études dont l'accès est difficilement praticable.

L'objectif de cette thèse est de contribuer au développement de bâtiments économes. Nous nous basons sur des modèles mathématiques de transfert de chaleur à l'intérieur d'un espace multizone. Ces modèles seront fondés sur les approches multizones existantes destinés à la description du comportement des températures intérieures d'un habitat. Nous cherchons à limiter la surface d'échange par rapport au volume intérieur de l'habitat. Dans un modèle multizone, nodal et en réseau, le bâtiment est représenté par un ensemble de nœuds. Un nœud représente une zone caractérisée par des variables d'état uniformes. Ces zones sont reliées entre elles par des connexions

représentant le chemin emprunté par l'air (ouverture de portes et fenêtres, entrée d'air, défauts d'étanchéité de l'enveloppe...).

Une analogie électrique consiste en la représentation du bâtiment par un réseau électrique où les chemins empruntés par l'air représentent différents types de résistance (porte ouverte ou fermée, fissure) à l'air et où la pression est imposée à chaque nœud.

Ainsi, la principale discipline à laquelle fait appel cette étude est la thermique de l'habitat. Le présent axe de recherche porte sur l'utilisation de l'outil de simulation numérique pour appréhender le comportement thermique des murs et de l'air soumis à des sollicitations variées. Les paramètres principaux qui seront testés au cours de cette thèse sont au nombre de six :

- Niveau d'inertie
- Matériaux de construction
- Niveau d'isolation thermique des parois opaques (toit et murs)
- Orientation
- Compacité
- Stratégies du chaud et du froid

Pour ce faire, nous avons élaboré cette thèse en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons les concepts énergétiques, les règles et les principes d'une maison à basse consommation énergétique.

Le second chapitre est consacré à une étude théorique et expérimentale détaillée en effectuant une modélisation mathématique d'un habitat multizone situé à l'URAER Ghardaïa. La méthodologie présentée dans ce chapitre est basée sur le calcul de certains indicateurs de performance bioclimatique (déphasage et facteur de décrémentation) issus de simulations numériques dans diverses conditions climatiques.

Le troisième chapitre traite à la fois de la prédiction et du contrôle des températures et des gains solaires dans une construction multizone sous un climat Saharien. Nous prenons en compte quelques mesures structurelles qui seront établies aux enveloppes. Les efforts ont été focalisés sur l'amélioration de l'isolation thermique pour deux types de mur, l'inertie thermique, l'apport de l'orientation selon le niveau de compacité et les brises soleil.

Dans le dernier chapitre, nous proposons un autre modèle plus performant destiné à la description thermo-aéraulique d'une construction multizone. Sur la base de calcul des températures et des humidités spécifiques, on examinera dans quelle mesure on pourra avoir l'avantage accru des débords (avancées) de toiture. Nous procéderons

ensuite à l'étude de la compacité en utilisant cette fois-ci l'environnement de simulation TRNSYS 16.

Finalement, une conclusion générale clôturera notre travail.

Les travaux réalisés lors de cette thèse ont fait l'objet d'une communication internationale à l'occasion du premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables SIENR 2010 qui s'est tenu à Ghardaïa, les 11-12 Octobre 2010. L'intitulé de la communication porte sur : impact de l'inertie thermique de la pierre sur les températures intérieures d'un habitat situé au Sahara Algérien.

Une autre partie des travaux a été concrétisée par une publication internationale en 2014 sous le titre : Integration of eaves and shading devices for improving the thermal comfort in a multi-zone building, dans le journal Thermal Science.

Références

- [01] : L. Chesné, Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques, thèse de doctorat, Centre de Thermique de Lyon, 2012.
- [02] : S. Thiers, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 252 p, 2008.
- [03] : Z. Wang, Y. Ding, G. Geng, N. Zhu, Analysis of energy efficiency retrofit schemes for heating, ventilating and air-conditioning systems in existing office buildings based on the modified bin method, *Energy Conversion and Management* 77 (2014) 233–242.
- [04] : M. Rastogi, A. Chauhan, R. Vaish, A. Kishan, Selection and performance assessment of Phase Change Materials for heating, ventilation and air-conditioning applications, *Energy Conversion and Management* 89 (2015) 260–269.
- [05] : J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [06] : S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, Juin 2009.
- [07] : M.A.C Haddam, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M. K. Cherier, N. Benamran, Integration of eaves and shading devices for improving the thermal comfort in a multi-zone building, *Thermal Science*, 2014, doi: 10.2298/TSCI140422117H
- [08] : S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, *Construction and Building Materials* 52 (2014) 59 – 70.
- [09] : R. Albatici, F. Passerini, Bioclimatic design of buildings considering heating requirements in Italian climatic conditions, a simplified approach, *Building and Environment* 46 (2011) 1624-1631.
- [10] : P. Depecker, C. Menezo, J. Virgone, S. Lepers, Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment* 2001; 36(5):627-635.

- [11]: S. W. Whang, S. Kim, Determining sustainable design management using passive design elements for a zero emission house during the schematic design, *Energy and Buildings* 77 (2014) 304–312.
- [12]: E. Yasa, V. Ok, Evaluation of the effects of courtyard building shapes on solar heat gains and energy efficiency according to different climatic regions. *Energy and Buildings* 73 (2014) 192–199.

Chapitre 1

Concept Energétique:

Règles et Principes

CHAPITRE 1

CONCEPT ENERGETIQUE: REGLES ET PRINCIPES

1.1. Introduction

Un bâtiment, qu'il soit à usage d'habitation ou tertiaire, est un environnement complexe, de par sa géométrie et ses sollicitations nombreuses et fluctuantes dans le temps, et de par la nature multiple des transferts de masse et de chaleur dont il est le siège. Sauf exceptions, chaque bâtiment est un prototype unique pour lequel l'étude expérimentale de sa conception est irréalisable en pratique. Par conséquent, la conception des bâtiments, et plus précisément l'évaluation de ses performances doit être assistée par la modélisation des phénomènes physiques [1].

Un bâtiment réussi est un bâtiment adapté au site, au climat et aux vœux du maître de l'ouvrage. Ce chapitre s'adresse aux professionnels et architectes praticiens et apporte certaines connaissances et outils de travail simples et performants qui leurs permettront d'intégrer dès la conception du projet les composantes climatiques du lieu d'implantation de la future construction. L'ambition est de stimuler l'architecte à être curieux et intéressé par son environnement. L'architecture climatique équilibrée a longtemps été vue comme une caricature appelée "architecture solaire". Les données climatologiques et environnementales doivent s'intégrer naturellement à la démarche du projet [2].

La première découverte du site, pour lequel l'architecte élabore son projet, est subjective. Il appréciera plus ou moins la vue, la végétation et les constructions qui entourent son site, les routes qui passent à proximité, etc. La prise en compte de tous ces points est fondamentale pour la bonne intégration de son projet, mais ils ne sont pas suffisants. Il est tout aussi essentiel que le climat soit intégré à son projet. La notion de confort thermique peut paraître très subjective! Telles conditions seront confortables pour un individu et inconfortables pour un autre. Des études très poussées ont été faites par Fanger [3] pour déterminer quels sont les paramètres du confort et ce qui différencie les individus.

En Algérie, les conditions climatiques ne correspondent pas souvent aux zones de confort. On utilise alors différents moyens afin que le climat intérieur se différencie du climat extérieur et assure le confort. Avant de recourir au chauffage ou à la climatisation, de nombreuses possibilités sont utilisables: utiliser les gains internes,

favoriser les apports solaires passifs, augmenter la masse thermique du bâtiment, ventiler la nuit... [2].

Les principes d'utilisation de l'énergie solaire passive et de la prise en compte du climat dans la conception d'un bâtiment doivent être intégrés dans un processus logique. L'analyse du site, du climat, du programme et de ses exigences doivent aider le concepteur à choisir une stratégie: le concept énergétique du projet. Ce concept met en œuvre des principes qui seront présentés dans ce chapitre. Seuls quelques uns de ces principes seront utilisés dans un concept. Les premières analyses devraient orienter le choix des principes applicables, l'architecte décidant finalement lesquels il désire intégrer dans son projet.

Les stratégies de contrôle du climat font appel à des principes physiques simples qui sont énumérés dans la figure 1. Les phénomènes d'échange thermique ont lieu sous forme de conduction, convection, rayonnement et évaporation. Selon la saison et le climat on utilisera chacun de ces principes de base pour élaborer une stratégie de contrôle propre au projet architectural.

			Conduction	Convection	Rayonnement	Evaporation
Stratégies de contrôle	Hiver	Favoriser les gains		Minimiser la vitesse d'air sur la peau externe	Favoriser les gains solaires	
		Résister aux pertes	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air		
	Eté	Résister aux gains (se protéger)	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air	Minimiser les gains solaires	
		Favoriser les pertes (évacuer)	Favoriser les échanges avec le sol (terre)	Favoriser la ventilation	Favoriser le refroidissement par rayonnement	Favoriser le refroidissement par évaporation

Figure 1.1: Principes physiques et stratégies de contrôle en architecture climatique [4].

L'aspect dimensionnement de base (prédimensionnement) est volontairement accentué dans la présentation de ces principes. Pour choisir les principes adéquats et les dimensionner on distingue deux périodes : l'hiver et l'été. En pratique on ne pourra pas aussi facilement séparer ces principes : le choix d'un concept pour la période froide aura des conséquences directes sur le comportement du bâtiment en période chaude.

1.2. Période froide

L'énergie solaire peut être une contribution importante au chauffage d'un bâtiment. Pour atteindre ce but, il faut maîtriser les quatre principes de base:

- **Capter le soleil:** le rayonnement solaire est collecté et transformé en chaleur.
- **Stocker la chaleur:** l'énergie captée est stockée pour une utilisation différée.
- **Distribuer la chaleur:** la chaleur captée et stockée est distribuée aux parties du bâtiment qui requièrent du chauffage.
- **Conserver la chaleur:** la chaleur distribuée est retenue dans le bâtiment.

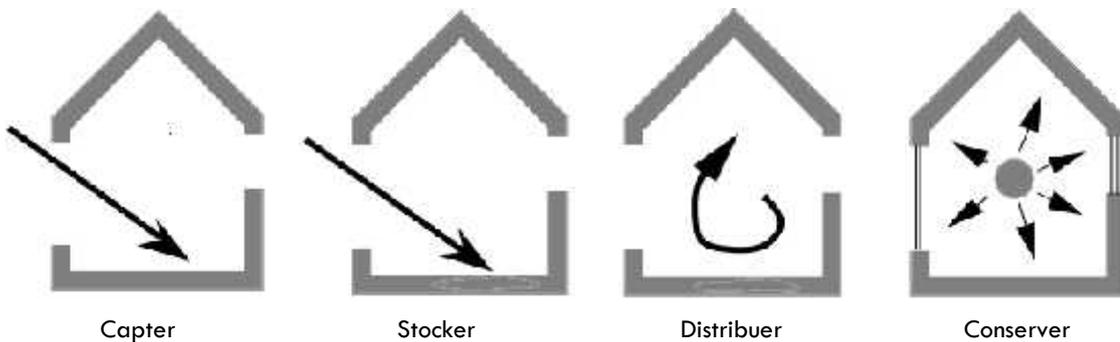


Figure 1.2: Période froide: les 4 stratégies de base.

On fait une première distinction: selon le mode de captage/stockage/distribution de la chaleur on parle de systèmes solaires passifs à gain direct ou à gain indirect. Il n'est pas possible de compenser une faible conservation de l'énergie (enveloppes mal isolées) par un fort captage de l'énergie solaire. Ceci devient vrai aux latitudes plus basses, au niveau de la Méditerranée par exemple [5].

1.2.1. Capter le soleil

Le captage se fait principalement par des surfaces vitrées, qu'elles correspondent à des fenêtres, des murs-capteurs ou des collecteurs solaires. L'énergie solaire interceptée par une surface opaque isolée (murs, toit) ne pénètre pas vraiment dans le bâtiment, mais est en majorité rediffusée vers l'extérieur : cet apport peut être négligé en hiver. En tant qu'élément de captage seul, la dimension des fenêtres doit correspondre à la disponibilité du soleil (site, orientation, inclinaison) et à la demande de chaleur (pertes du bâtiment : transmission et renouvellement d'air).

Seule une étude du bilan gains /pertes permettra de bien dimensionner une surface de captage. Dans les gains, on intégrera les gains internes dus au dégagement de chaleur des appareils et des personnes. Pour des bâtiments ou des zones de bâtiment présentant des gains internes importants, il n'est pas judicieux de prévoir des surfaces de captage supplémentaires. On se tiendra au minimum nécessaire à l'éclairage naturel.

- Pour permettre un captage optimal, le site devrait être dégagé (libre d'obstacles proches)
- En façade Sud, un réflecteur horizontal d'une longueur de 1 à 2 fois la hauteur du capteur (fenêtre) augmente le rayonnement hivernal de 20 à 40%.
- La surface de captage (surface vitrée) devrait représenter de 20 à 30% de la surface de plancher pour du logement et du bâtiment administratif [06-10].
- Le 75% de cette surface devrait se trouver dans des orientations allant du Sud-Est au Sud-ouest ($\pm 30^\circ$ du Sud).
- La préférence devra toujours être donnée à des systèmes à gain direct. Par faible ensoleillement, ce sont les seuls à conserver de bonnes performances.
- Si la surface de captage dépasse les 30%, il faut déphaser le gain du jour sur la nuit et distribuer l'énergie captée à des locaux éloignés des façades [2].

Les surfaces de captage devront se situer principalement sur l'arc ensoleillé d'hiver. Leur situation intégrera l'effet des masques proches et lointains mis en évidence dans l'analyse du site. L'aménagement extérieur dégagera la zone de captage: $\pm 30^\circ$ à 45° à l'Est et à l'Ouest du Sud.

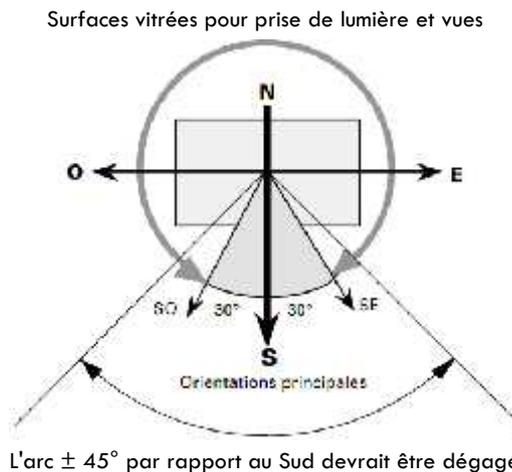


Figure 1.3: Orientation privilégiée des surfaces de captage [7].

Le traitement de la surface du sol extérieur devant les surfaces de captage, permet d'augmenter le rayonnement incident par réflexion (figure 4).

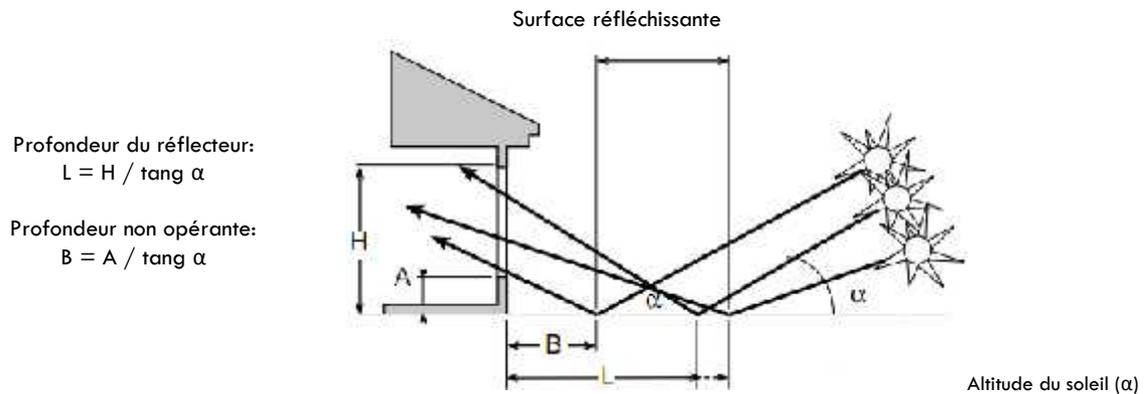


Figure 1.4: Une surface de sol à haut pouvoir de réflexion devant les fenêtres capteurs verticales éclairées par le soleil d'hiver (Sud) augmente le gain solaire [4].

On essaiera toujours de privilégier les orientations Sud et les positions verticales de captage. On maximise ainsi le soleil incident durant l'hiver tout en minimisant les problèmes de surchauffe en été. Les ouvertures en toiture devraient autant que possible éviter de prendre le soleil horizontalement, le captage étant maximal en été. On tentera de privilégier le captage vertical Sud. En dehors de l'orientation Sud-est à Sud-ouest ($\text{Sud} \pm 30^\circ$), les surfaces de captage ne sont plus efficaces: on parlera de fenêtres nécessaires aux prises de jour ou de dégagement pour la vue mais plus de capteurs solaires.

Un capteur se réduit la plupart du temps à une fenêtre classique. Le choix de la qualité thermique (coefficient k) de la fenêtre devrait être fait sur la base d'un bilan gains /pertes de chaleur global (fenêtres, murs, sols, toitures, etc.). Les systèmes à gain indirect ont des performances (énergie utile au mètre carré de surface de captage) plus faibles que les systèmes à gain direct. Ce sont par contre les seuls systèmes qui permettent des taux de couverture solaire dépassant 25 à 45% de la demande d'énergie de chauffage. Leur complexité et leur coût les rendent par contre peu compétitifs.

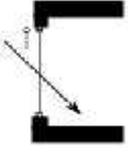
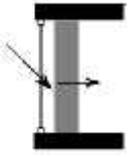
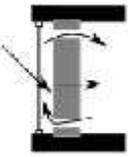
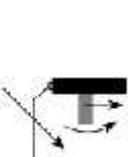
	Types de capteur	Configurations	
Gain direct	Fenêtre		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mode de captage le plus simple, déphasage faible. ▪ Fluctuation importante de la température intérieure jour/nuit. ▪ Stock dans l'enveloppe interne des locaux: contrainte. ▪ Performance élevée provenant du fait que tout rayonnement solaire, aussi faible soit-il, est utilisé (pas de rayonnement de seuil). ▪ Faible coût. ▪ Difficile de dépasser 15 à 20 % de surface de captage rapportée à la surface de plancher sans générer des surchauffes en été et en hiver aussi. ▪ Forte exposition des meubles et des objets soumis au rayonnement solaire (risque de dégradations dues aux UV). ▪ Point faible: perte nocturne engendrée par le vitrage en contact direct avec les locaux chauffés, en partie soluble avec les vitrages à haute performance actuels. ▪ Pénétration de la chaleur captée sur une profondeur de 6 à 10 m selon le mode de distribution interne (surface de passage, nombre de niveaux).
Gain indirect	Mur massif		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capteur - stockeur: la chaleur est restituée aux locaux adjacents avec un déphasage de quelques heures. ▪ Fluctuations de température limitées dans les locaux adjacents mais importantes dans la zone de captage.
	Mur trombe: mur massif + circulation d'air		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Performance plus faible que celle d'un gain direct (jusqu'à deux fois). ▪ Systèmes souvent utilisés en complément d'un gain direct pour assurer des taux de couverture solaire supérieurs.
	Mur massif + isolation transparente		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Confort des locaux adjacents plus élevé que dans le cas d'un gain direct. ▪ Perte du contact direct avec l'extérieur. ▪ Coût nettement plus élevé que celui d'un gain direct. Surcoût en partie compensé pour la serre (mise à disposition d'un espace supplémentaire partiellement chauffé).
	Double-peau Serre		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Point faible: la perte de chaleur à travers le vitrage. Problème résolu par l'utilisation d'une isolation transparente pour les murs massifs, d'un verre performant pour les serres. Les murs massifs avec ou sans circulation d'air n'offrent pas des performances suffisantes sans dispositif isolant supplémentaire. ▪ Profondeur limitée de pénétration de la chaleur dans les locaux.

Figure 1.5: Différents types de capteur : Leur différenciation entre systèmes est plus liée à la capacité de laisser pénétrer la lumière et la chaleur qu'à leur performance [6, 8, 11-17].

Seule une étude du bilan gains/pertes permettra de bien dimensionner une surface de captage. Ce contrôle ne peut s'effectuer que lorsque le concept de base

(captage – stockage - distribution) est définie. Le dimensionnement tiendra compte des locaux réellement chauffés par les surfaces de captage mises en œuvre.

1.2.2. Stocker la chaleur

Selon le mode de couplage entre le capteur solaire et l'espace à chauffer on distingue principalement deux types de systèmes :

Le gain direct: le captage est lié directement à l'espace à chauffer qui stocke lui-même la chaleur en excès. Le stock est représenté principalement par les parois et les dalles constituant l'enveloppe du local. Même si une partie du rayonnement capté chauffe directement le stock (le sol par exemple), on parle de gain direct.

Le gain indirect: le captage est lié indirectement à l'espace, l'énergie captée transite par le stock.

Le choix entre les deux systèmes se fait sur des critères de confort, de performance et de taux de couverture des besoins par le soleil :

- Un gain direct subit des amplitudes de température plus élevées qu'un gain indirect du fait que l'occupant habite le capteur et marche sur le stock.
- Un gain direct est plus performant qu'un gain indirect : à surface de captage équivalente un gain direct couvre une part plus importante des besoins en chaleur. La majorité des surfaces de captage d'un gain direct servant aussi de fenêtres (lumière, ventilation, contact visuel) leur coût n'est à imputer que partiellement au système solaire.
- Il n'est guère possible de dépasser un taux de couverture des besoins en chaleur de 40% avec un gain direct sans entraîner, en toutes saisons, des surchauffes difficilement maîtrisables.

On rencontre toutes les combinaisons possibles entre ces deux systèmes. Pour un système à gain indirect (mur, serre), on admet habituellement que la surface de stockage doit être équivalente à la surface de captage (surface frontale de la serre par exemple). Dans un système à gain direct, la distribution des masses dans un espace n'a pas une grande importance: les masses peuvent se trouver au sol, au plafond ou dans les murs [7]. La masse participant au stockage doit se trouver à l'intérieur de l'enveloppe isolée du local, la distribution des masses n'ayant par contre pas une grande importance. La surface de stockage doit être libre par rapport au local.

Tous les éléments lourds et inertes situés à l'extérieur de la peau isolée ne participent pas au stockage de la chaleur captée.

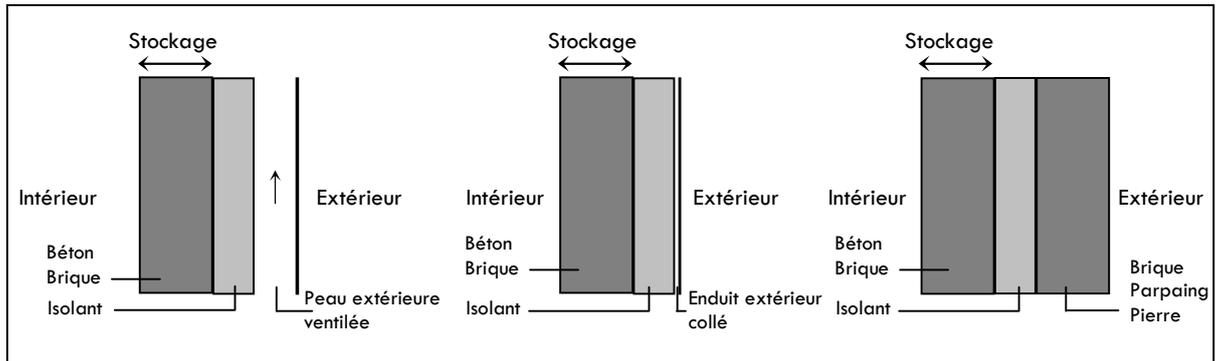


Figure 1.6: Ces trois murs, avec un matériau identique et de même épaisseur à l'intérieur de l'enveloppe isolée, offrent un stockage équivalent.

Plusieurs paramètres déterminent le dimensionnement d'un stockage: la surface de stockage rapportée à la surface de captage, l'épaisseur de la paroi, les caractéristiques thermiques du matériau.

On limite habituellement le stockage à un déphasage jour-nuit, c'est-à-dire 12 heures de stockage et 12 heures de déstockage. Un des moyens de mieux utiliser la capacité de stockage d'un local est d'augmenter les amplitudes de température jour-nuit : réduction nocturne de la consigne de chauffage, acceptation de températures plus élevées la journée. Ces amplitudes plus marquées ne sont pas toujours compatibles avec tous les modes d'utilisation des espaces.

1.2.3. Distribuer la chaleur

Idéalement un bâtiment solaire passif devrait distribuer la chaleur directement aux zones où elle sera utilisée, sans nécessiter un système de distribution. Ceci n'est pas toujours possible: dans une zone au Nord du bâtiment, la chaleur devra souvent y être amenée. La distribution de la chaleur nécessite souvent un déplacement dans l'espace (distribution) et dans le temps (déphasage).

- Dans un système à gain direct autonome (l'espace capteur-stockeur ne chauffe que lui-même), la distribution de la chaleur se fait sur le même principe que le captage - stockage.
- Dans un système à gain direct excédentaire (l'espace capteur-stockeur chauffe d'autres locaux n'ayant pas un accès direct au soleil), si la distribution de la chaleur se fait par un échange convectif naturel (mouvement d'air), la section de passage entre l'espace primaire (chauffé directement) et l'espace secondaire (chauffé par le premier) représentera environ 10% de la surface de captage surnuméraire (voir figure 7).

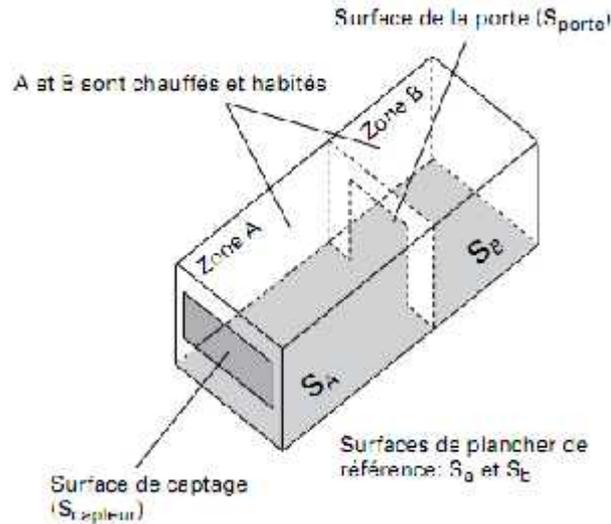


Figure 1.7: Dimensionnement d'une ouverture servant à distribuer la chaleur d'un espace de captage vers un espace secondaire.

La zone A est en façade, elle est équipée d'une surface de captage (fenêtre) direct. Cette surface dépasse la limite nécessaire au chauffage de la zone A. De la chaleur captée en A devra être transférée en B (zone Nord). On admet que la surface de captage nécessaire à A est de $0.25 \times S_A$. Le reste de cette surface de captage ($S_{\text{capteur}} - 0.25 \times S_A$) servira à chauffer B.

Le transfert de chaleur convectif nécessitera une surface totale de 10% de la surface de captage restante (attribuée à B). Cette surface est admise pour une différence de hauteur de 2 m entre entrée et sortie d'air (des ouvertures au raz du sol et au raz du plafond), des ouvertures équivalentes en surface et une différence de température ne dépassant pas 5° entre les zones A et B.

- Pour un système à gain indirect (mur ou serre), le mur interface avec l'espace à chauffer devrait présenter des ouvertures sur 3 à 10% de sa surface (différence de hauteur entre entrée et sortie $\Delta h = 2$ m). Les règles de proportionnalité s'appliquent [7].
- Les sections données pour les transferts convectifs devraient être respectées sur l'entier du trajet de l'air (aller et retour). Toute obstruction diminue fortement le débit d'air. Dans les systèmes à convection naturelle, les portes, couloirs, cages d'escalier, locaux servent à conduire cet air.
- Il est possible d'évaluer l'intérêt d'une distribution de chaleur d'une zone de captage à une autre en utilisant un programme de calcul.

Dans un premier temps on calcul séparément le bilan des deux zones (aucun transfert entre zones), dans un deuxième temps on regroupe les deux zones dans un seul calcul (transfert parfait entre les deux zones). La différence des deux bilans (somme des bilans des deux zones ou bilan d'une zone regroupant les deux) est la différence maximale à attendre d'un transfert. En réalité l'apport sera plus faible, le transfert nécessitant une légère surchauffe d'une zone par rapport à l'autre.

Dans un système à gain direct où le captage, le stockage et la distribution sont situés dans un même espace, la distribution de la chaleur s'effectue par convection naturelle et rayonnement infrarouge principalement. Les règles appliquées au stockage (surface, matériau, revêtement) sont les mêmes pour la distribution. Pour ne pas réduire l'échange radiatif, on évitera les revêtements métalliques sur les éléments de stockage (peinture métallique ou feuilles de métal brut). Un métal laqué n'est pas considéré comme un revêtement métallique.

Dans un système à gain direct (capteur habité) le dimensionnement des surfaces de transfert sur des espaces secondaires peut se faire selon la règle définie dans la figure 7. Pour des hauteurs, températures ou rapports de surfaces différents, les règles de proportionnalité définies ci-dessous s'appliquent.

Lorsque le transfert d'air s'effectue à travers une seule porte, la partie basse de la porte verra de l'air circuler dans un sens et la partie haute dans un sens opposé. On admet généralement que la porte peut être divisée en deux parties égales représentant chacune les ouvertures basses et hautes. La différence de hauteur de référence est la demi-hauteur de la porte (distance entre les axes des deux ouvertures). En réalité on observe une contraction du flux d'air dans la partie haute ce qui a comme conséquence que l'air circule plus lentement dans la partie basse.

1.2.4. Conserver la chaleur

Il n'est pas possible, sous nos latitudes, de compenser une perte importante de chaleur par une augmentation des gains solaires. L'enveloppe des bâtiments sera donc nécessairement bien isolée et étanche à l'air. Si l'on peut s'inspirer des techniques de l'architecture traditionnelle pour résoudre les problèmes de conservation de la chaleur, de nouvelles techniques de construction (double mur, isolation, verres avec couches à faible émissivité, etc.) permettent de se libérer de certaines techniques anciennes très contraignantes.

- La qualité minimale d'isolation thermique de tous les éléments de l'enveloppe des bâtiments est régie.
- La continuité de l'enveloppe isolée est un critère important de la conservation de la chaleur. Dans une enveloppe bien isolée chaque point faible perd presque autant de chaleur que l'ensemble isolé.
- Le facteur de forme (rapport surface d'enveloppe sur volume chauffé, A/V) n'est pas déterminant dans un bâtiment climatiquement équilibré et bien isolé.
- Tous les locaux habités, même occasionnellement, doivent jouir d'un renouvellement d'air naturel ou mécanique minimum pour évacuer les polluants qui s'y dégagent.
- Toutes les installations de ventilation assurant un renouvellement d'air seront équipées de récupération de chaleur.
- Dès qu'un mur est bien isolé (≥ 10 cm d'isolant), lui adjoindre un espace tampon ou l'enterrer n'améliore pas sensiblement sa résistance thermique [18].
- Toutes les ouvertures (fenêtres, portes) devraient être conçues en fonction des vents dominants froids d'hiver : leur disposition, leur protection et leur étanchéité [8].
- Une serre non chauffée ouverte sur le soleil (espace tampon dynamique) atténue les pertes des espaces contigus et génère des gains. Si elle doit un jour être chauffée ses vitrages auront un coefficient $k < 1.5 \text{ W/m}^2, \text{ K}$ [7].

L'analyse du site met en évidence des zones plus chaudes ou plus froides. L'implantation du bâtiment peut, si possible, exploiter ce zoning climatique. L'effet le plus marqué de la situation sur la conservation de l'énergie est l'influence du vent sur les déperditions du bâtiment. Par une situation appropriée ou la mise en place d'une protection contre les vents dominants d'hiver, l'effet du vent sur les façades, les toitures et surtout les ouvertures (inétanchéité) peut être réduit. La forme du bâtiment peut aussi se conformer aux flux d'air en les accompagnant plutôt qu'en essayant de lutter contre la pression du vent.

Le rapport de la surface d'un bâtiment rapportée à son volume est appelé facteur de forme. Dans une architecture, dont la performance énergétique est basée sur la conservation de la chaleur, réduire ce facteur est fondamental. Ce facteur joue aussi un rôle très important pour des bâtiments dont la peau est peu ou pas isolée. Il devient par contre secondaire avec des enveloppes bien isolées. Ce facteur de forme n'a même aucun sens lorsque l'on veut maximiser les gains solaires en hiver ou l'éclairage naturel. Dans des bâtiments avec de forts dégagements de chaleur interne la minimisation du facteur de forme pourrait même avoir comme conséquence le recours à une climatisation (trop grande compacité des locaux).

1.3. Période chaude

On fera appel aux mêmes quatre grands principes physiques (conduction, convection, rayonnement et évaporation) pour contrôler le climat d'été. Simplement on utilisera souvent l'effet inverse par rapport à la stratégie d'hiver : par exemple on se protège du rayonnement solaire plutôt que de le laisser pénétrer dans le bâtiment.

Le choix d'une architecture plus ouverte sur l'extérieur augmente sa sensibilité aux éléments climatiques. Si la stratégie pour la période froide était de laisser entrer le soleil dans le bâtiment, et de limiter les pertes de chaleur, celle de la période chaude sera plutôt de minimiser tous les gains et de privilégier leur évacuation vers l'extérieur.

On applique les principes suivants :

- **Minimiser les gains solaires:** dès que la température extérieure excède la limite inférieure du confort, les gains solaires ne devraient pas rajouter à l'inconfort.
- **Minimiser les gains par transmission et infiltration:** retenir la chaleur à l'extérieur.
- **Favoriser la ventilation:** évacuer la chaleur captée en utilisant le renouvellement d'air par effet de cheminée ou par le vent, favoriser les échanges de chaleur entre le corps humain et l'air en augmentant les mouvements d'air.
- **Déphaser les gains du jour** si la nuit est fraîche même en été.

Le jeu de tous ces principes, à des degrés divers selon le projet, permet généralement de réduire les périodes de surchauffe à quelques jours par été.

1.3.1. Minimiser les gains solaires

La bonne maîtrise des gains solaires d'été permet dans la majorité des cas de se passer de tout système de refroidissement. Ouvrir généreusement une architecture sur le soleil d'hiver rend les bâtiments plus sensibles aux surchauffes. Un soin particulier doit être apporté dans l'étude de son exposition au soleil d'été. On peut agir à différents niveaux.

- Utiliser les masques du site: plantation, bâtiments adjacents, relief pour se protéger.
- Protéger du soleil le sol environnant le bâtiment par des plantations (arbres, treilles) ou des constructions pour minimiser sa température [4, 8].
- Utiliser des revêtements de sol clairs, ou végétaux [4].
- Utiliser des revêtements des murs et du toit clairs pour diminuer les flux solaires absorbés ou les couvrir de végétation à feuilles caduques [4].
- Mettre des peaux ventilées sur les murs et toitures mal isolés [4].
- Isoler les toits à pans ventilés avec 12 cm minimum, les toits plats avec 14 cm [2].

- Limiter l'utilisation des protections solaires fixes aux bâtiments où les gains internes dominant et dimensionner la protection pour la période de surchauffe seulement [8].

Par un choix judicieux de l'orientation des faces ou de leur importance relative (forme du bâtiment) on peut minimiser l'impact du soleil d'été. Selon l'orientation de la façade ou de la toiture, on devrait choisir des qualités de revêtement où des couleurs de parois opaques dans des gammes qui atténuent les gains solaires (facteur d'absorption faible) et favorisent l'émission de chaleur par rayonnement infrarouge (facteur d'émission élevé).

Pour limiter la surchauffe, seul le revêtement des faces exposées est sensible. La surchauffe d'une surface exposée au soleil risque d'augmenter le flux qui traverse la paroi et chauffe l'intérieur mais surtout chauffera l'air nécessaire à une ventilation naturelle du bâtiment. Un des moyens très efficaces de limiter la température de surface d'un mur est de le recouvrir de végétation.

Si les murs ou la toiture ne sont pas bien isolés, une peau extérieure, détachée de la paroi et ventilée naturellement, diminue le flux absorbé. En été, la toiture reçoit parfois plus du double du rayonnement solaire d'une façade Ouest ou Sud. Sa protection est donc de la plus haute importance. Si l'on dimensionne habituellement l'isolation des murs et dalles pour la période froide, on doit dimensionner celle de la toiture pour la période chaude.

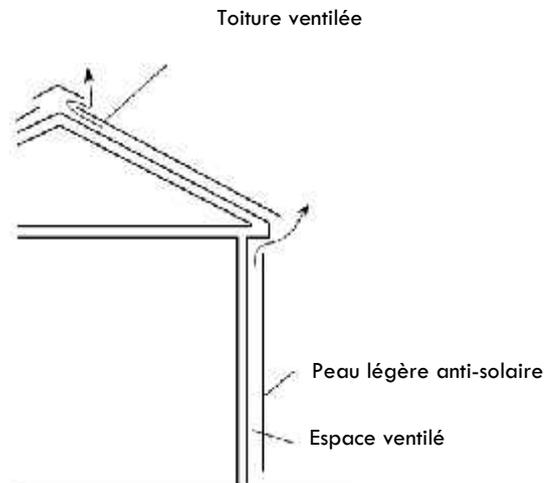
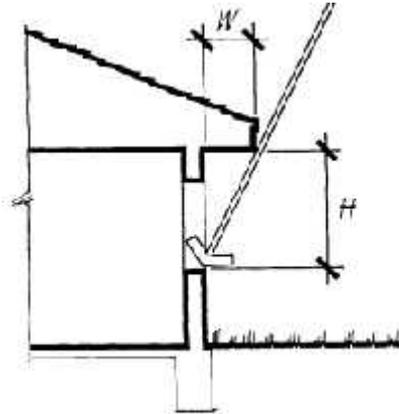


Figure 1.8: Des peaux légères ventilées diminuent l'impact du soleil sur les parois extérieures. Elles sont efficaces si la paroi qu'elles protègent est mal isolée [4].

Pour décider de l'opportunité de disposer une protection solaire fixe sur un bâtiment, il faut déterminer pour quelle période on désire protéger chaque façade. Pour cela, il faut analyser le type de bâtiment que l'on veut protéger pour distinguer les deux types principaux: bâtiments où les flux énergétiques entre l'intérieur et l'extérieur dominant, bâtiments où les flux énergétiques internes prédominent [8].

▪ Brise-soleil horizontal

La figure 9 donne des proportions de brise soleil horizontal habituellement utilisées. Si au sud, ces brise-soleil sont très efficaces, ils le sont beaucoup moins à l'est et à l'ouest où seules des lames verticales permettraient de se protéger efficacement du soleil bas sur l'horizon. Néanmoins un brise-soleil horizontal atténue le rayonnement solaire du milieu de la journée, le plus intense.



Brise-soleil horizontal :

$$W = \frac{H}{RO}$$

Orientation de la fenêtre	Rapport d'ombrage (RO)
Est	0.8
Sud - Est	1.0
Sud	1.8
Sud - Ouest	1.0
Ouest	0.8

Figure 1.9: Dimensionnement d'un brise-soleil horizontal standard W en fonction de la hauteur de fenêtre à protéger H et de l'orientation de la façade au moyen du rapport d'ombrage RO [4].

▪ Brise-soleil vertical

Sur les façades est, ouest et nord seules des lames verticales offrent une protection efficace contre la pénétration du soleil. On dimensionne ces lames en fixant un angle limite de pénétration. Les systèmes de brise-soleil à pose verticale rendent impossibles les regards indiscrets tout en assurant en même temps une très bonne visibilité vers l'extérieur. Les systèmes de brise-soleil posés à la verticale permettent d'occulter l'espace.

1.3.2. Ventilation naturelle

La ventilation naturelle remplit plusieurs fonctions :

- Renouveler l'air des locaux pour amener de l'air frais nécessaire à la respiration des occupants ou à l'évacuation des polluants internes : cette fonction est nécessaire aussi bien en hiver qu'en été.
- Evacuer la chaleur: les gains internes et solaires provoquent une élévation de la température interne. En été, cet excès doit être évacué.
- Améliorer l'échange de chaleur entre les personnes et l'air en augmentant la vitesse de l'air et donc l'évaporation cutanée.
- Evacuer, durant la nuit, la chaleur accumulée, durant le jour dans la masse interne.

On distingue deux types de ventilation naturelle: celle due à la pression du vent et celle due à la différence de densité (température) entre l'air chaud et l'air froid (effet de cheminée).

L'effet de cheminée est dû à la différence de pression engendrée par la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid: si l'air chauffe, une dépression se créera dans les zones basses d'un espace et une surpression dans les zones hautes. Si des ouvrants sont placés dans ces deux zones, les ouvrants bas aspireront de l'air extérieur plus frais et les ouvrants hauts expulseront vers l'extérieur de l'air intérieur plus chaud.

- On tentera toujours d'utiliser la pression du vent pour ventiler. Par rapport à l'effet de cheminée, l'utilisation du vent rend la ventilation naturelle plus efficace et permet de minimiser les ouvrants. Dans certains cas, on dimensionnera les ouvertures sans tenir compte du vent, les périodes de calme en été étant souvent importantes.
- Une ventilation transversale (vent) est deux fois plus efficace qu'une ventilation avec des ouvertures sur une seule face. Les ouvertures devraient donc se trouver sur des faces opposées ou adjacentes.
- L'orientation de la façade au vent ne devrait pas s'écarter du lit du vent de plus de 45°. La pression du vent reste néanmoins sensible jusqu'à un angle de 30° [8, 10, 16].
- En l'absence de données plus précises, les ouvertures nécessaires à une bonne ventilation estivale (évacuation de la chaleur) devraient représenter de 5 à 10% de la surface de plancher d'un local [10].
- Dans une ventilation par effet de cheminée, l'efficacité est directement proportionnelle à la surface des ouvrants et à la racine carrée de la différence de hauteur (un doublement de la hauteur n'améliore l'efficacité que de 40%) [2].
- Une ventilation dite de confort (augmentation de l'évaporation cutanée) pour les périodes chaudes et humides nécessite des ouvertures dont la surface représente de 10 à 20% de la surface de plancher des locaux [8].
- Dans une ventilation transversale, les grands locaux devraient se situer de préférence au vent.
- Tous les ouvrants devraient être divisés en plusieurs éléments pour permettre un dosage de la ventilation en mi-saison et en hiver.
- Les protections solaires ne doivent pas obstruer le passage de l'air par les ouvertures.
- Pour qu'une ventilation soit efficace, l'air doit pouvoir circuler à l'intérieur du bâtiment (plan libre, cloisonnement adapté au mouvement de l'air) [8].

1.3.3. Déphasage des gains et ventilation nocturne

Dans les périodes très chaudes (canicules), la température extérieure dépasse, durant une partie de la journée, des valeurs confortables (27 °C à 30 °C). Il n'est donc pas possible d'utiliser la ventilation naturelle pour évacuer la chaleur apportée par le soleil (même si celle-ci est très réduite par des protections solaires) ou celle dégagée par les occupants sans surchauffer les locaux.

Le principe est le suivant :

- on déphase les gains solaires et internes en les stockant dans la masse du bâtiment;
- on minimise les gains externes: protections solaires, fenêtres fermées, isolations de la peau externe;
- on évacue cette chaleur accumulée durant la journée par un renouvellement d'air nocturne (ventilation naturelle) : on profite des nuits plus fraîches.

Cette technique est traditionnellement utilisée dans tous les pays chauds durant l'été. Seule la combinaison de la masse nécessaire au stockage et de la ventilation nocturne est efficace.

- La masse thermique devrait représenter de 1 à 2 m² par m² de surface de plancher. Au-delà de 15 cm de béton ou de 20 cm de terre cuite, l'épaisseur de la masse n'est plus utile [7, 8, 9, 11, 12, 19].
- Plus la masse est importante, plus les performances sont élevées.
- Schématiquement : dans un logement, au minimum une dalle devrait être libre ou trois murs du local, dans un bâtiment administratif une dalle au moins (sol ou plafond) [2].
- Les règles développées quant aux revêtements appliqués sur les masses de stockage sont aussi valables ici.
- La surface des ouvertures nécessaires à la ventilation nocturne devrait représenter de 10 à 15% de la surface de plancher (somme des entrées-sorties). Un vent régulier durant la nuit de 1 m/s minimum et une ventilation traversante permettent de diviser ces surfaces par deux [8, 9].
- Le flux d'air extérieur nocturne doit passer sur les masses à refroidir [8].
- Ces ouvertures seront utilisées la nuit et fermées durant les heures chaudes de la journée [8, 9].

1.3.4. Eclairage naturel

La prise de conscience que l'énergie consommée par un bâtiment ne se limitait pas à de la chaleur pour son chauffage ou à de l'électricité pour son refroidissement date d'une dizaine d'années. La redécouverte de l'importance de l'éclairage dans le bilan énergétique d'un bâtiment a réhabilité l'éclairage naturel.

Les développements actuels vont plus dans la direction d'outils informatiques sophistiqués et d'essais sur maquettes sous ciel artificiel. Néanmoins on voit aussi apparaître des outils informatiques plus simples permettant de dimensionner les éléments de prise de lumière. Ces outils se situent dans la phase de consolidation du projet (avant-projet).

Cette section se limite à donner quelques règles pour dimensionner des prises de lumière en éclairage monolatéral, zénithal ou à travers un atrium.

- Pour un éclairage monolatéral, la pénétration maximale de lumière utile est de $2.5 H$, H étant la hauteur comptée de la surface à éclairer (sol, table) au sommet de la fenêtre. Au delà de cette profondeur il faut soit créer un second jour, soit changer les proportions du local.
- Un éclairage bilatéral ou d'angle offre une meilleure uniformité qu'un éclairage monolatéral.
- La lumière étant additive, on peut additionner les Facteur de Lumière du Jour FLJ donnés par plusieurs fenêtres dans un même espace.
- A surface vitrée équivalente, un éclairage zénithal est trois fois plus efficace qu'un éclairage latéral.
- Dans tous les locaux de travail ou de séjour, on doit pouvoir contrôler le niveau de l'éclairage naturel par des protections mobiles (store à lames, toiles).
- Utiliser des revêtements intérieurs avec des coefficients de réflexion le plus élevé possible: sol 0.30 à 0.50, murs 0.40 à 0.60, plafond 0.70 à 0.90 pour uniformiser l'éclairage intérieur.
- Un atrium présentant entre sa hauteur et sa largeur un ratio supérieur à 2:1 ne peut que s'éclairer lui-même (sol et coursive). Le ratio devrait être au maximum de 1:1 pour apporter aux locaux adjacents un éclairage supplémentaire sensible [2].

$$FLJ_{\text{moyen}} = 0.2 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

$$FLJ_{\text{minimum}} = 0.1 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$



Pénétration maximale de la lumière utile

Figure 1.10: Eclairage monolatéral, Facteur de Lumière du Jour FLJ en fonction des surfaces relatives et des proportions générales [16].

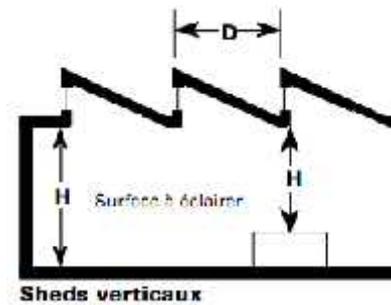
Ces règles sont valables pour les conditions suivantes:

- Toutes les surfaces internes du local ont un coefficient de réflexion élevé (sol: 0.30, mur: 0.60, plafond: 0.70).
- Pour les éclairages zénithaux, on se limite à donner un FLJ moyen car, si l'on respecte les critères d'homogénéité, le ratio entre l'éclairage de la zone la plus claire et celui de la zone la plus sombre ne dépasse pas 2:1.

Sheds verticaux

$$FLJ_{\text{moyen}} = 0.2 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 1.5 \times H$

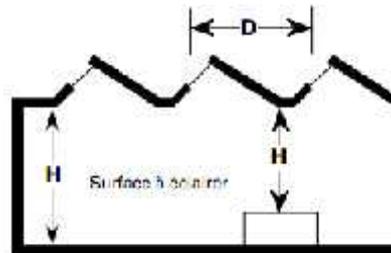


Sheds verticaux

Sheds inclinés (orientés au Nord)

$$FLJ_{\text{moyen}} = 0.33 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 2 \times H$

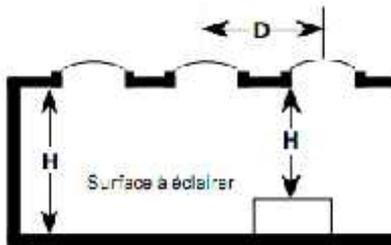


Sheds inclinés

Bande lumineuse

$$FLJ_{\text{moyen}} = 0.5 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 2 \times H$



Bandeau, coupole

Lucarnes ou coupoles

$$FLJ_{\text{moyen}} = 0.6 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 2 \times H$

Figure 1.11: Eclairage zénithal, Facteur de Lumière du Jour FLJ en fonction des surfaces relatives et des proportions générales [16].

- Toutes ces valeurs sont données pour des jours uniformément couverts. Pour des jours clairs, ces formules restent valables pour des orientations Nord, Est et Ouest. Pour le Sud ou pour des vitrages horizontaux, on peut diviser les constantes de chaque formule par un facteur 3.
- Le vitrage est un double verre isolant standard ($\tau = 81\%$). Si le vitrage a un coefficient de transmission inférieur, multiplier les valeurs trouvées par le ratio:

$$\tau_{\text{actuel}} / 81\%.$$

Des revêtements intérieurs à haut pouvoir de réflexion de la lumière permettent :

- D'uniformiser l'éclairage naturel dans un local, donc améliorer le confort visuel (diminution des contrastes entre les zones claires et les zones sombres);
- d'éclairer le fond du local par multiréflexion sur les parois et le plafond. Entre un local clair et un local sombre, l'éclairement du fond du local (à plus de 4 m de la façade en éclairage monolatéral) est doublé.

La source principale d'éblouissement dans un local éclairé naturellement est la fenêtre. Il existe plusieurs moyens pour diminuer cet éblouissement, on peut par exemple disposer de revêtements clairs qui atténuent les contrastes dans une pièce.

Références

- [01] : L. Mora, Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet, Thèse de doctorat en génie civil, université de la Rochelle UFR sciences fondamentales et sciences pour l'ingénieur, Septembre 2003.
- [02] : J. P. Eggimann, J.-L. Badoux, D. Chuard, J.-P. Eggimann, C. Scaler, Architecture climatique équilibrée, conception, démarche et dimensionnement, Programme d'action PACER, Energies renouvelables, Office fédéral des questions conjoncturelles, ISBN 3-905232-51-0, Copyright, Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, 1996.
- [03] : P. O. Fanger, Thermal Comfort, Robert E. Krieger, Publishing company, Malabar, Florida, 1982.
- [04] : D. Watson, K. Labs Climatic building design, energy-efficient building principles and practice McGraw Hill Book Company, New York 1983.
- [05] : Architecture et climat, centre de recherches en architecture, université catholique de Louvain (Belgique) Energy conscious design, a primer for architects Batsford Limited, London 1992.
- [06] : E. Mazria, Le guide de l'énergie solaire passive Editions Parenthèses, Roquevaire 1981.
- [07] : J. D. Balcomb, C.E. Kosiewicz, G.S. Lazarus, R.D. McFarland, W.O. Wray Passive Solar Design Handbook, volumes 1-3 DOE USA, Washington 1982.
- [08] : N. Lechner, Heating cooling lighting, Design methods for architects John Wiley & Sons,

- New York 1991.
- [09]: W. Weber, R. Contini Knobel, J.C. Enderlin, P. Galinelli, B. Lachal, H. Marti, P. Minder, P. Schweizer, *Soleil et architecture, guide pratique pour le projet OFQC PACER*, Berne 1991.
- [10]: G.Z. Brown, *Sun, wind, and light, architectural design strategies*, John Wiley & Sons, New York 1985.
- [11]: EPFL - ITB – LESO, *Le soleil, chaleur et lumière dans le bâtiment*, SIA D 056, Zürich 1990.
- [12]: M. Zimmerman, *Handbuch der Passiven Sonnenenergienutzung* SIA D010 Zürich 1986.
- [13]: P. Bardou, V. Arzoumanian, *Archi de soleil* Editions Parenthèses, Roquevaire 1978.
- [14]: J. L. Izard, A. Guyot, *Archi bio* Editions Parenthèses, Roquevaire 1979.
- [15]: N. K. Bansal, G. Hauser, G. Minke, *Passive building design, a handbook of natural climatic control*, Elsevier, Amsterdam 1994.
- [16]: B. Stein, J.S. Reynolds, W.J. McGuinness, *Mechanical and electrical equipment for buildings*, John Wiley & Sons, New York 1986.
- [17]: W. Weber, R. Contini Knobel, J.C. Enderlin, P. Galinelli, B. Lachal, H. Marti, P. Minder, P. Schweizer, *Soleil et architecture, guide pratique pour le projet OFQC PACER*, Berne 1991.
- [18]: A. Eggenberger, *Thermische Messungen am erdgeschützten Wohnhaus in Wald mit verglaster Veranda BEW + Eggenberger Bauphysik AG*, Bern 1989.
- [19]: S. Yannas, *Solar energy and housing design*, 2 volumes Architectural Association, London 1994.

Chapitre 2

Modélisation, Approches Utilisées et Simulation du Comportement Thermique en Milieu Désertique

CHAPITRE 2

MODELISATION, APPROCHES UTILISEES ET SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE EN MILIEU DESERTIQUE

2.1. Introduction

L'expérience a acquis une place prépondérante, au point que la vérification expérimentale est devenue un moment essentiel du "rationalisme appliqué". Dès la seconde moitié du XIXème siècle, cependant, et notamment à partir de Maxwell, la détermination d'objets scientifiques repasse par la construction de modèles théoriques permettant d'aborder des champs nouveaux sur des bases formelles identiques. Aujourd'hui, un pas de plus est franchi puisque la simulation informatique des tests expérimentaux fait perdre son empiricité à l'expérience et tend à la réinstaller au sein du théorique.

La nécessité des expériences est proportionnelle à l'avancement des connaissances. L'expérience, joue donc le rôle de combler l'écart entre le possible et le réel. La théorie, virtuellement hésitante et bifurquant, est alors restreinte à certaines voies déductives privilégiées. Une science fondée sur les faits expérimentaux et non plus sur des principes abstraits allait se substituer à la déduction cartésienne. Que devient alors la notion d'expérience une fois ce grand retournement opéré ? [1-3].

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

Selon Etienne Guyon, modélisation et simulation restent des démarches distinctes. La modélisation, vu ses outils, garde plus de latitude par rapport au réel que la simulation. Les conditions du mimétisme absolu ne sont pas respectées puisque le modèle opère une simplification du phénomène, ne retenant que les variables les plus caractéristiques. Ceci constitue une approximation, mais qui suffit souvent pour réussir.

En regard de cette modélisation, la simulation semble une approche plus coûteuse, puisqu'elle invite à conserver tous les paramètres du problème initial. Cette approche permet en outre l'expérimentation, le modèle numérique devenant un laboratoire virtuel dans lequel on peut

tester des hypothèses. Par exemple, on y fait varier certains paramètres (quantité d'énergie solaire reçue, vitesse de rotation de la terre...) pour en étudier les conséquences sur le climat. Ces modèles numériques permettent en outre d'affiner la prévision à court terme en injectant périodiquement dans le modèle de nouvelles valeurs de mesure. D'ailleurs souvent en physique, il faut d'abord fonctionner le modèle pour tester sa cohérence interne avant de le valider [1].

Les travaux effectués donnent une nouvelle approche pour la description et la modélisation des bâtiments multizones dans un climat saharien. Pour ce faire, la méthode nodale a été utilisée pour prévoir le comportement thermique de l'air soumis à des sollicitations diverses. Un couplage a été effectué entre les équations proposées par P. Rumianowski [4] et certaines équations du modèle thermique du bâtiment issu de la bibliothèque TRNSYS [5].

L'étude a été réalisée pour l'air et les murs d'une résidence à l'URAER Ghardaïa. Le comportement thermique transitoire, en particulier la température de l'air et des parois, a été surveillé durant deux semaines, une en été et l'autre en hiver [6-9].

2.2. Modélisation du système thermique

On peut relever dans la littérature un nombre important d'approches différentes pour la modélisation thermique des bâtiments multizones. La modélisation des flux thermiques est un axe important, les voies à explorer dans ce domaine restent nombreuses, on pourra notamment citer les paramètres de matériaux, les conditions aux limites, le niveau d'abstraction des modèles, le compromis coût/précision ou encore la réduction de modèle. Les éléments qui composent un habitat incluent de nombreux matériaux de construction aux comportements thermiques différents et pour certains non linéaires.

Quelle que soit la forme canonique du modèle thermique, il est important de réduire le modèle en temps et en espace pour correspondre au plus juste au problème posé. La réduction de modèle constitue une thématique très étudiée, la littérature est vaste concernant ce sujet: quelle que soit la méthode, l'objectif est d'enlever un maximum de termes ou fonctions tout en préservant une précision acceptable du modèle, c'est-à-dire en conservant la représentation des modes impliqués dans l'analyse.

2.2.1. Analyse nodale & échange par conduction et couplage avec les échanges superficiels

Nous supposons que nous avons deux températures qui sont des conditions aux limites de surface. Le cadre de l'étude est ensuite divisé en un nombre déterminé d'éléments supposés à chaque instant à température uniforme. La transposition du problème thermique de conduction dans un problème électrique est appelée analogie thermoélectrique. En effectuant cette analogie, la méthode nodale conduit à la mise en place d'un réseau électrique comme indiqué dans la

figure 1. Les nœuds qui se trouvent dans les sens électriques équipotentiels symbolisent des lignes isothermes. Ces derniers sont reliés les uns aux autres par la résistance analogique de la couche physique de la paroi qui les sépare. Par conséquent, chacun de ces nœuds permet d'obtenir un condensateur électrique traduisant le stockage thermique de la partie de la paroi correspondante et permettant la traduction des effets d'inertie thermique [6].

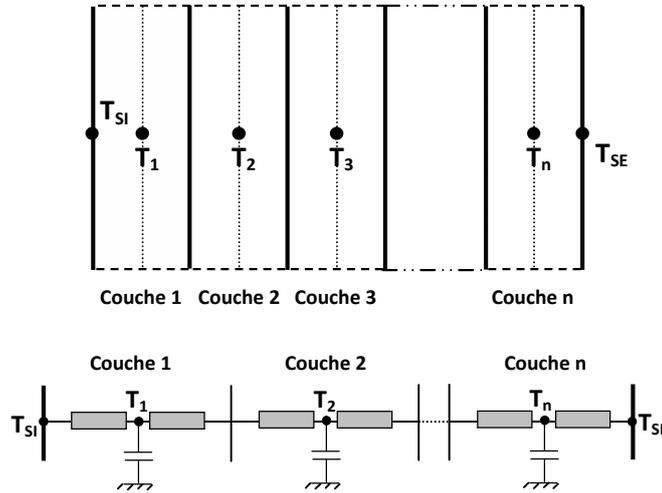


Figure 2.1: Discretisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé [6]

Le nombre 0 est attaché au nœud de la surface intérieure et $n + 1$ à la surface extérieure, le système peut s'écrire sous forme matricielle, cette matrice d'équations différentielles forme l'équation d'état de l'évolution du système en tenant compte de sa discrétisation [6].

$$C_w \frac{dT_w}{dt} = A_w T_w + B_w \quad (2.1)$$

L'indice n est utilisé pour les murs et les fenêtres. On se base sur une autre approche simplifiée qui permet de représenter le système multicouche par un modèle proposé par Rumianowski et al [4] en 1989 et repris par Con et al en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud à l'intérieur d'un mur. La figure suivante est une illustration du principe de décomposition.

Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes [4]:

$$n = n_A + n_B \quad (2.2)$$

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (2.3)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (2.4)$$

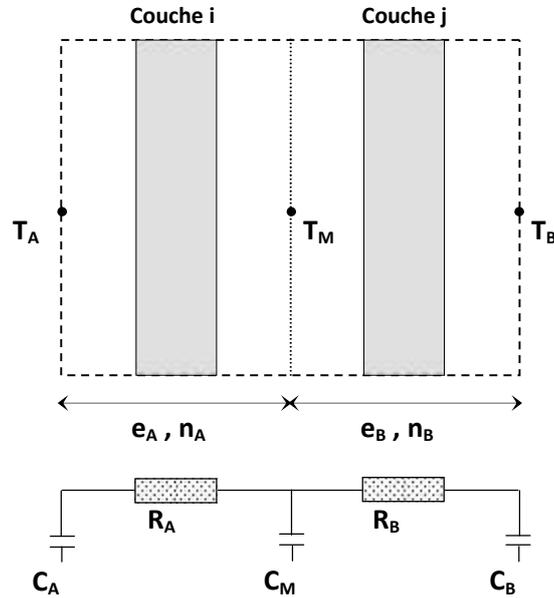


Figure 2.2: Discretisation spatiale d'un mur et modèle de conduction [4]

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit [4]:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho C_p e_i S_i (1 - \beta) \quad (2.5)$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j \delta_j \quad (2.6)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho C_p e_i S_i \beta + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (2.7)$$

$$\beta = \frac{\frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \quad (2.8)$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \quad (2.9)$$

Le bilan énergétique du bâtiment pour les surfaces est représenté par les équations [4]:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{\text{Surf-i}} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{\text{conv}} (T_{\text{air}} - T_A) \quad (2.10)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = r S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + v S \frac{1 - \cos S}{2} (T_{\text{sol-ext}} - T_B^4) + v S \frac{1 + \cos S}{2} (T_{\text{ciel}} - T_B^4) + S h_{\text{convamb}} (T_{\text{amb}} - T_B) \quad (2.11)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = - \frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (2.12)$$

$$h_{\text{convamb}} = 2.8 + 3.3 V_{\text{Wind}} \quad (2.13)$$

$$T_{\text{ciel}} = 0.0552 T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (2.14)$$

Le bilan énergétique d'une zone de l'habitat représenté par un nœud est un modèle de bilan de l'air de la zone, ce qui représente la capacité thermique du volume d'air de la zone. Le bilan de puissance de la construction d'une zone est représenté par l'équation ci-dessous qui constitue la variation de l'énergie de l'air de la zone dans l'intervalle de temps dt [4]:

$$\dots_{\text{air}} C_{\text{air}} V_{\text{air}} \frac{dT_{\text{air}}}{dt} = Q_{\text{Gain}} + Q_{\text{Surf}} + Q_{\text{chaud}} + Q_{\text{froid}} + Q_{\text{Inf}} + Q_{\text{Vent}} \quad (2.15)$$

Les conditions aux limites du système comprennent les nœuds de la surface intérieure, y compris les flux d'énergie radiative. Nous notons également que l'énergie d'une couche active et l'énergie stockée dans les murs ne font pas partie de ce bilan énergétique, mais ils font partie du bilan détaillé de surfaces.

Les taux de transfert d'énergie thermique de l'infiltration et de l'écoulement de l'air de ventilation sont respectivement calculés par les équations suivantes [4]:

$$\dot{Q}_{\text{Inf}} = \dot{m}_{\text{Inf}} C_{\text{air}} (T_{\text{air}} - T_{\text{ext}}) \quad (2.16)$$

$$\dot{Q}_{\text{Vent}} = \dot{m}_{\text{Vent}} C_p (T_{\text{Vent,ext}} - T_{\text{Vent,int}}) \quad (2.17)$$

L'énergie thermique due à l'échange entre l'air et les surfaces intérieures des murs est calculées par l'équation suivante [4, 6]:

$$Q_{\text{Surf}} = \sum S h_{\text{Conv}} (T_{\text{Surf}} - T_{\text{air}}) \quad (2.18)$$

La convection naturelle se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide (l'air). De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Le transfert thermique

dans une couche de fluide s'effectue par la conduction thermique et le mouvement du fluide.

Quand on commence à imposer un gradient thermique entre les surfaces de la couche, un gradient de la masse volumique s'installe. Expérimentalement, on observe qu'au bout d'un certain temps, le fluide se met en mouvement spontanément : c'est le démarrage de la convection. Celui-ci est déterminé par un nombre sans dimension appelé nombre de Rayleigh R_a sans dimension.

Description de la surface	Régime d'écoulement	Domaine de validité $R_a = Gr Pr$	Expression
Mur vertical	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1,42 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1,31 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface supérieure d'une plaque chaude horizontale ou surface inférieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1,32 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1,52 (\Delta T / L)^{1/3}$
Surface inférieure d'une plaque chaude ou surface supérieure d'une plaque froide	Régime laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 0,59 (\Delta T / L)^{1/4}$
	Régime turbulent	$Gr Pr > 10^9$	

Tableau 2.1: Expression des coefficients de transfert convectifs [6]

2.2.2. Structure nodale et description de l'habitat

Le modèle de notre étude est un bâtiment résidentiel de type semi-collectif qui se compose de deux blocs, chaque bloc retient 2 étages (RDC + 1^{er} étage) relie l'un à l'autre par une cage d'escalier (le 3^{eme} bloc), le bâtiment comprend quatre appartements de type F3. L'édifice a 4 façades (si on prend que les trois blocs, comme un seul immeuble). La construction est implantée sur une surface de 212 m², avec une surface de 95.74 m² pour chaque bloc 1 et 2 et une surface de 22.52 m² pour la cage d'escalier.

Chaque appartement à une surface de 95.74 m² avec un espace habitable de 71.3 m². Le système constructif est un système poteaux poutres, avec des planchers à corps creux. Il existe deux variétés de murs pour ce bâtiment, les murs d'extérieur qui se composent de plusieurs matériaux de construction (pierre, ciment, enduit, sable...etc.) Avec une épaisseur de 40 cm. À l'inverse, les murs d'intérieur (les cloisons) d'une épaisseur de 15 cm se composent de pierre, ciment, enduit, sable...etc.

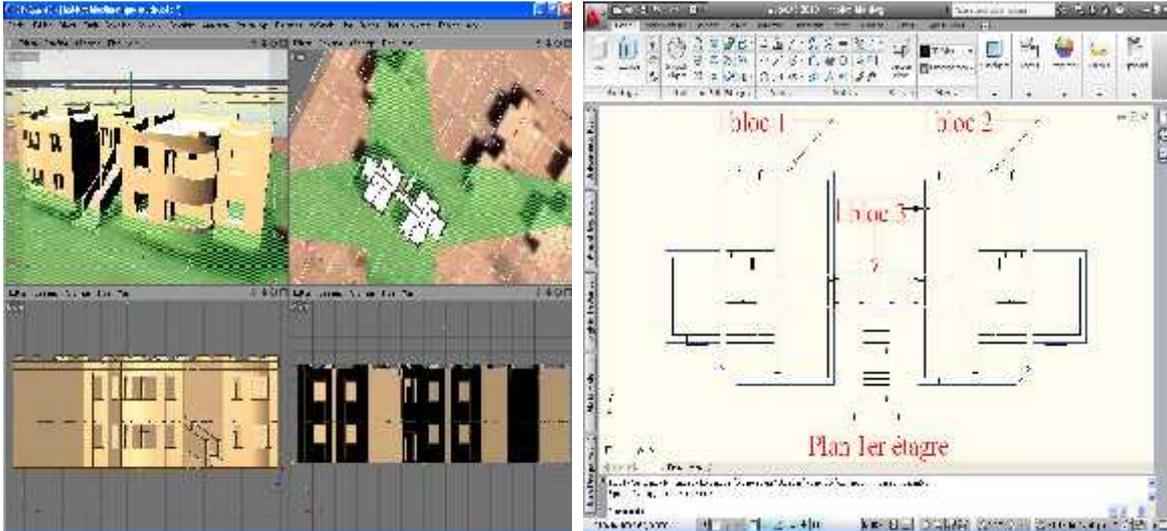


Figure 2.3: Modélisation du bâtiment (a) : en 3D, (b) : en 2 D.

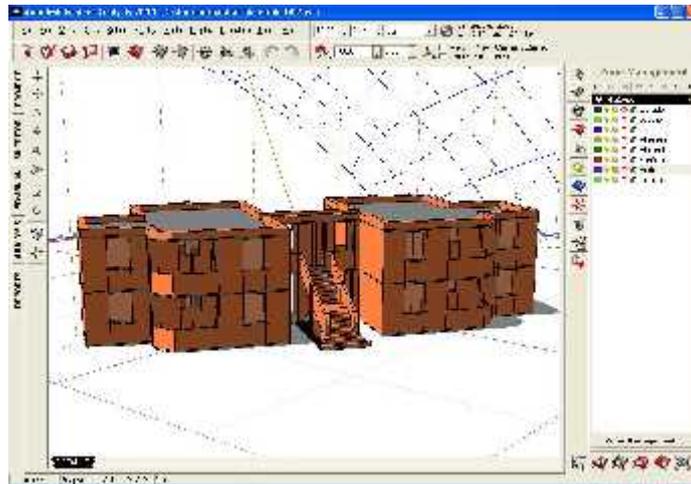


Figure 2.4: Simulation numérique des données

La construction proposée est composée d'un certain nombre de pièces, de parois, de portes et de fenêtres en verre. La scission de l'habitat en zones thermiques induit la création de nœuds de température par zone. Un certain nombre de champs d'information sont connectés à un nœud, traduisant par exemple l'affectation d'un nœud dans une zone ou encore de la topologie du réseau électrique global associé à la maison. Nous avons attribué un type à chaque nœud.

En effet, par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes différents. Par exemple, un nœud qui représente un mur va concerner les termes de conduction de la chaleur. Ce même nœud, en fonction de sa situation, peut également concerner des processus de convection. Sur la face externe de la paroi de l'enveloppe, le nœud de surface est affecté par les radiations extérieures et les échanges convectifs. Nous devons noter que la taille de cette structure peut rapidement devenir importante dans la mesure où ce bâtiment est divisé en

plusieurs zones et chaque zone possède plusieurs murs et fenêtres de verre. La taille de cette structure étant liée aux dimensions des systèmes à résoudre, la notion de temps de calcul ne doit pas être négligée.

Notre étude a été réalisée sur un habitat à Ghardaïa où l'enveloppe extérieure, en plus de contribuer aux économies d'énergie pendant toute la durée de vie du bâtiment, en contrôlant l'échange d'énergie entre l'espace intérieur et l'environnement, favorise également le développement d'un environnement intérieur confortable. Nous rappelons que la maison a une surface habitable de 71,3 m² et la hauteur des murs égale à 2,8 m, tandis que les autres dimensions sont représentées en détail dans sur la figure 2.5. Les fenêtres et les portes contribuent de manière significative à l'équilibre énergétique. Leurs contributions dépendent de plusieurs paramètres comme: le climat, l'orientation, le cadre et la surface relative locale (fenêtre-sol).

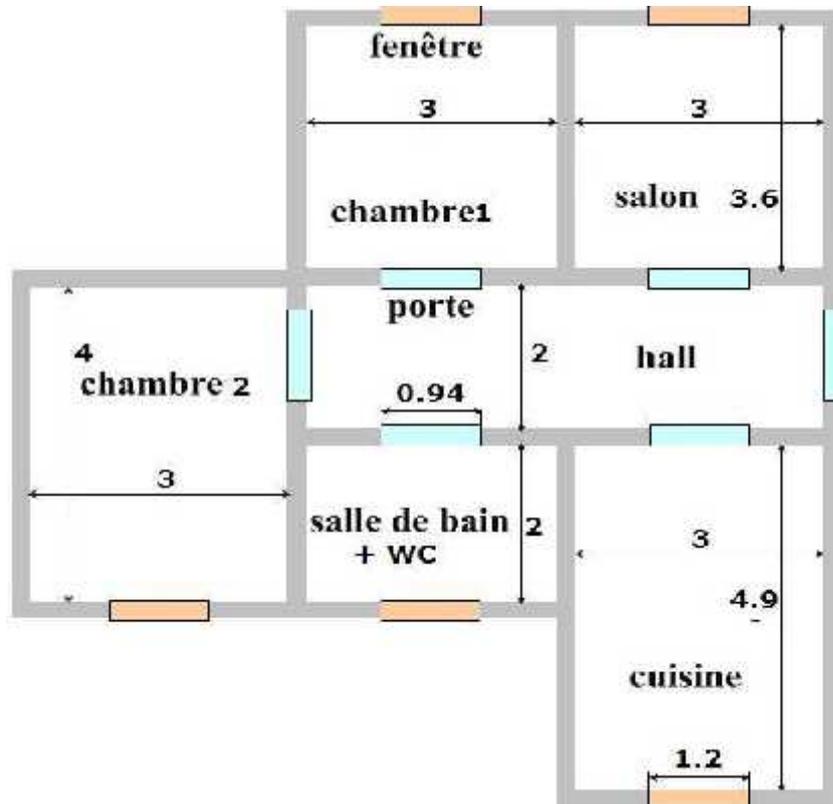


Figure 2.5: plan descriptif de la maison

Un certain nombre d'information sont connectés à un nœud type, traduisant par exemple l'affectation de ce nœud dans une zone ou encore de la topologie du réseau électrique global associé. En effet, par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes différents. Ensuite, il apparaît nécessaire d'attribuer un type à chaque nœud. Le tableau 2.2 indique les types de nœuds rencontrés.

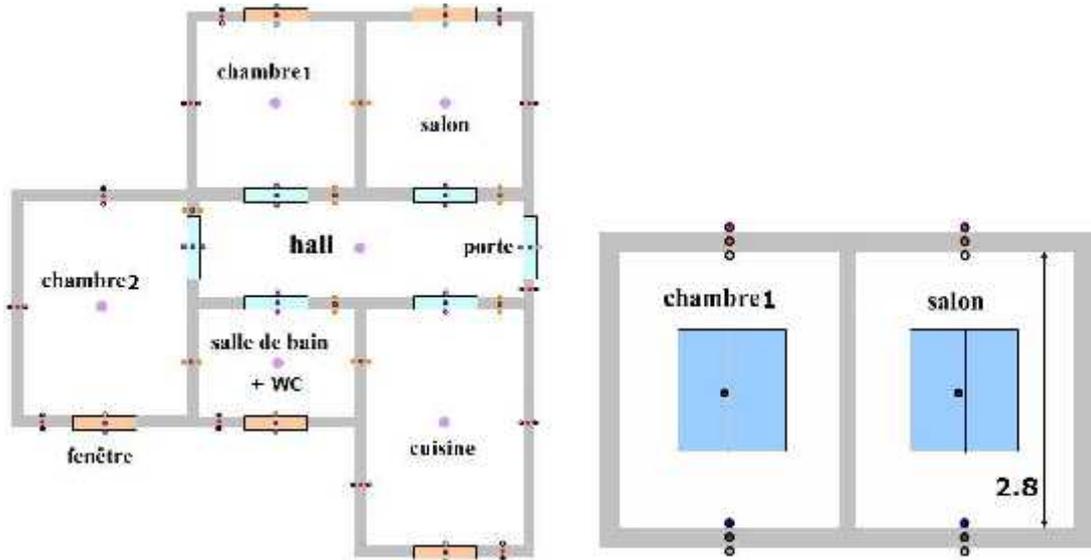


Figure 2.6: types de nœuds et structure zonale

Noeud	Type
●	surface extérieure du mur extérieur
●	interne de la paroi du mur extérieur
○	surface intérieure de la paroi du mur extérieur
●	surface extérieure de la fenêtre
●	interne de la fenêtre
○	surface intérieure de la fenêtre
○	surface intérieure de la porte à l'intérieur et à l'extérieur
○	surface extérieure de la porte de l'intérieur
○	surface extérieure de la porte de l'extérieur
●	interne à l'intérieur et à l'extérieur de la porte
●	surface extérieure de la porte extérieure
●	air sec intérieur
●	surface extérieure et intérieure du mur intérieur
○	interne du mur intérieur
●	surface de terrain (sol intérieur)
●	interne de terrain (sol intérieur)
○	relatif à une profondeur imposée au dessous du nœud interne
○	surface extérieure du toit exposé
○	interne du toit exposé
○	surface intérieure du toit exposé

Tableau 2.2: couleurs et type de nœuds

Pour un bâtiment donné, lorsque la structure de nœud est établie, il est facile de remplir chaque élément du modèle mathématique. En effet, il suffit de balayer la structure de nœuds et d'attribuer les termes pertinents.

Pour cette habitation, l'enveloppe de la paroi extérieure est constituée d'une structure lourde en pierre (40 cm d'épaisseur) entourée de deux couches ayant une épaisseur de 1,5 cm de ciment de mortier. La face interne est revêtue d'une couche de plâtre de 1 cm d'épaisseur. Les parois internes (ou murs de séparation) sont considérées comme structures lourdes en pierre de 15 cm de largeur, entourées de deux couches de mortier de ciment de 1,5 cm d'épaisseur et deux couches d'1 cm d'épaisseur de plâtre.

Les fenêtres doivent être conçues de façon à supprimer les fuites d'air. Les caractéristiques utilisées sont indiquées dans le tableau 3.

Si l'on considère que l'habitat est mal isolé, nous utilisons la valeur U dans le premier cas et si l'isolation thermique est renforcée, nous utilisons les valeurs du deuxième cas. Pour notre étude, nous considérons que la composition de fenêtre comprend en plus de la configuration donnée dans le tableau 4, les stores en bois habituellement séparés de la configuration précédente par un espace d'air de 2 cm. Nous supposons que les transferts de chaleur à travers les murs, les portes et les fenêtres sont unidirectionnels et perpendiculaires à ces parois.

		Matériel et composition des murs	L m	λ Wm⁻¹K⁻¹	ρ kg m⁻³	Cp J kg⁻¹ K⁻¹
Murs extérieurs	mur type 1	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
		Pierre	0,4	2,3	2000	1000
		Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
		Plâtre	0,01	0,56	1400	1000
	mur type 2	Plâtre	0,015	0,56	1400	1000
		Brique Plâtre argile	0,3 0,005	0,81 0,45	1800 1200	835 840
Murs intérieurs	mur type 1	Mortier de ciment	0,015	1,41	1800	1000
		Plâtre argile	0,01	0,45	1200	840
		Pierre	0,15	2,3	2000	1000
		Plâtre argile	0,01	0,45	1800	1000
	mur type 2	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
		Plâtre argile Brique Plâtre argile	0,01 0,2 0,01	0,45 0,81 0,45	1200 1800 1200	840 835 840
Rez-de-chaussée (sol)	Carrelages	0,025	6,14	2300	875	
	Ciment	0,02	1,4	1800	1000	
	Béton dense	0,2	2,4	2400	800	
Toiture (plafond)	Plâtre	0,015	0,56	1400	1000	
	Béton léger	0,12	0,33	800	719	
	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000	

Tableau 2.3: Propriétés thermiques, épaisseurs des murs et caractéristiques de l'enveloppe [10]

Type de Verre		U-Valeur
Verre plat Cas 1: sans isolation thermique	Vitrage simple, clair Pour toutes les fenêtres	5.91
Verre double Cas 2: avec isolation thermique	Double vitrage, claire, 12,5 mm d'espace entre vitres Pour WC et salle de bain	3.18
	Double vitrage, avec revêtement à faible émissivité de $e = 0,20$ pour les salles 1 et 2, cuisine et salon	2.21

Tableau 2.4: Propriétés thermiques, épaisseurs et caractéristiques du verre pour fenêtres [10]

Cependant, les portes sont en bois d'une épaisseur de 2 cm: $\lambda = 0,14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho = 500 \text{ kg m}^{-3}$ et $C_p = 2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. (λ , ρ et C_p étant respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique) [10].

2.3. Validation expérimentale & confrontation des températures

Cette étude a été réalisée sur une maison à l'URAER Ghardaïa. Les figures précédentes sont des ébauches de plan des parties du bâtiment. La région de Ghardaïa (32.4° N, 3.8° E) est située à 600 km de la côte, à une altitude de 450 m au dessus du niveau de la mer. Elle est influencée par un climat sec caractérisé par de très faibles précipitations (160 mm/an), des températures très élevées en été et basses en hiver (glaciales de décembre à mi-février). Le climat est chaud et sec en été avec des températures variant entre un maximum d'environ 45°C et un minimum de 20°C, donnant ainsi une grande variation de température diurne.

Les températures hivernales varient entre un maximum de 24°C et un minimum de 0°C. La température normale en Janvier est de 10,4°C et de 36,3°C en Juillet. L'amplitude annuelle moyenne est d'environ 12,2° calculée sur la base des amplitudes mensuelles. Les écarts de température sont plus modérés en hiver qu'en été (moyenne 11°C en hiver contre 13,5°C en été). Les amplitudes maximales mensuelles sont plus grandes en été qu'en hiver. Elles oscillent autour de 20°C. Le rayonnement solaire mesuré sur la surface horizontale est intense tout au long de l'année avec un maximum de 700 Wm² en hiver et en été 1000 Wm² [10].

La mise en œuvre de la loi générale de conservation de l'énergie nous fait aboutir à un système régi par 141 équations différentielles ordinaires non linéaires. C'est pourquoi, il est indispensable d'utiliser des méthodes numériques qui calculent les températures caractérisant chaque nœud. Conçu pour résoudre ces problèmes, la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4 a été utilisée pour prévoir le comportement thermique des murs et de l'air soumis à des sollicitations diverses. Les programmes interactifs élaborés ont permis une meilleure compréhension du phénomène de transfert de chaleur des murs et de l'air. Les fenêtres et les portes sont restées

fermées durant toute l'étude. Les températures instantanées des surfaces des murs et de l'air ont été calculées en introduisant les données météorologiques mesurées.

Pour bien mener cette phase, nous avons utilisé une unité d'acquisition de type Fluke Hydra Séries II qui, malgré sa grande précision, accumule des petites erreurs qui ne sont pas considérables. Les thermocouples calibrés de type K ont été utilisés pour mesurer les températures, le principe de mesure étant basé sur l'effet Seebeck. Pour l'enregistrement des températures des murs Sud et Nord, cinq thermocouples ont été placés dans différents endroits. En outre, les températures de l'air ambiant interne ont été enregistrées en plaçant cinq autres thermocouples dans différents points. Les valeurs expérimentales des températures tracées sont celles correspondant à la moyenne de celles enregistrées.

Nous avons introduit les thermocouples de telle sorte que:

- Le premier thermocouple est situé au centre de la salle de séjour.
- Le deuxième et le troisième sont placés sur l'axe médian du plan horizontal à 1,4 m de hauteur de telle façon que chaque thermocouple se trouve à 20 cm des murs Sud et Nord.
- Les autres thermocouples ont été insérés dans la ligne normale qui passe par le premier thermocouple. Ils ont été implantés de manière que la distance entre les thermocouples et les parois (le toit et le plancher) soit d'environ 10 cm.

En effet, nous avons jugé que cinq thermocouples sont largement suffisants car les gradients de température ne sont pas vraiment significatifs. En période estivale et pour un plan vertical, les mesures ont indiquées que l'écart maximum entre la température de l'air en un point situé à proximité de la toiture et un autre point sur la même normale et à proximité du sol ne dépasse pas la valeur de 0,85 °C. De même, pour n'importe quelle hauteur, la variation maximale de température est d'environ 1 °C entre deux points se trouvant sur le même axe et le même plan horizontal, l'un près du mur Sud et l'autre près du mur Nord.

Ensuite, pour mesurer les températures des murs, nous avons introduit les cinq thermocouples sur les surfaces des murs en respectant les mêmes distances. Le premier se trouve au centre, le second et le troisième sont sur la ligne verticale qui passe par le centre, les derniers thermocouples se situent sur la ligne horizontale qui passe par le centre. Les données ont été recueillies à des intervalles de 30 minutes.

L'un des principaux problèmes de la plupart des bâtiments à Ghardaïa, est que l'enveloppe n'est pas conçue pour résister au climat extrême de l'été. En été l'air chaud de l'extérieur pénètre dans le bâtiment et augmente la charge de refroidissement. Les murs extérieurs accumulent de la chaleur à la surface de la paroi intérieure, qui ensuite rayonne dans la pièce. La période allant du 20 au 21 Juillet 2008 a été marquée par des journées ensoleillées

avec une irradiation solaire élevée (figure 7). La température de l'air extérieur a oscillé entre 30,55 °C et 46,75 °C, avec une valeur moyenne autour de 37,98 °C (figure 2.8).

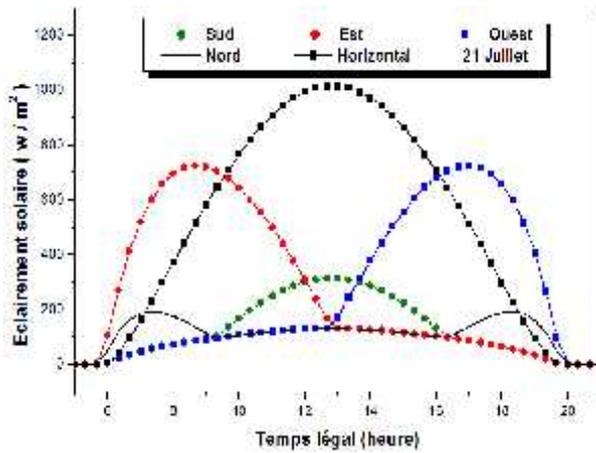


Figure 2.7: éclairage solaire incident

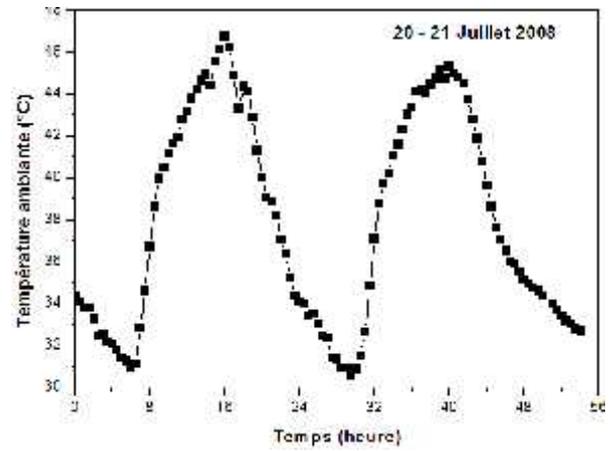


Figure 2.8: température ambiante de l'air extérieur

Les profils des températures des surfaces intérieures d'un mur orienté en plein Sud se trouvent dans la figure 2.9 pour les murs de type 1. La simulation et les températures expérimentales à l'intérieur du mur Nord et la température de l'air à l'intérieur du séjour sont représentées respectivement dans les figures 2.10 et 2.11 pour le même type de murs.

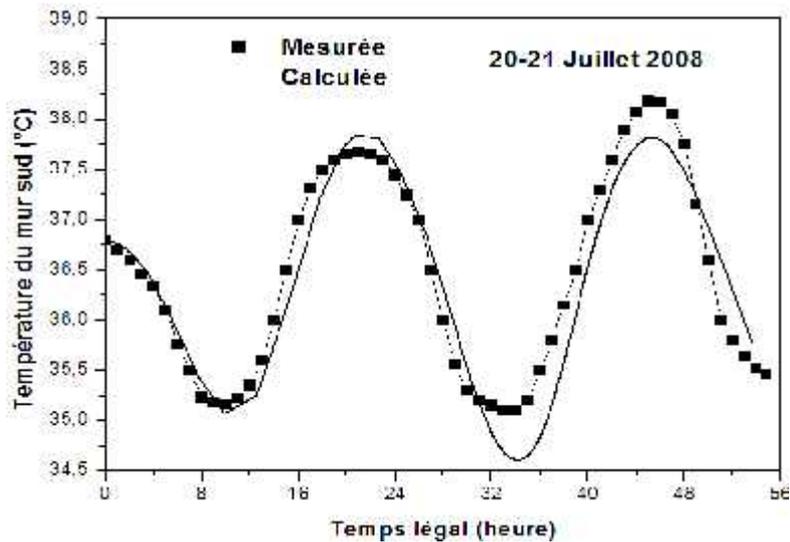


Figure 2.9: températures mesurées et simulées des surfaces intérieures du mur sud

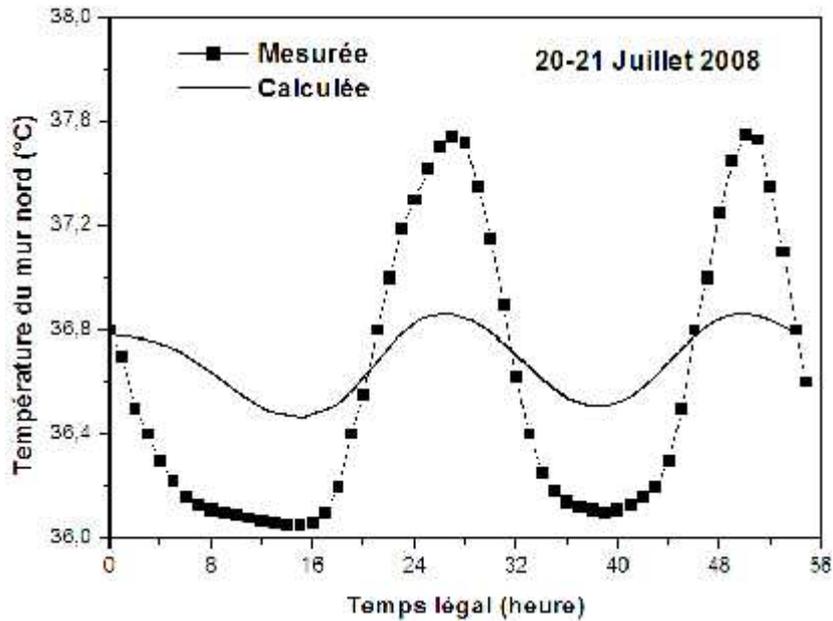


Figure 2.10: températures mesurées et simulées des surfaces intérieures du mur nord

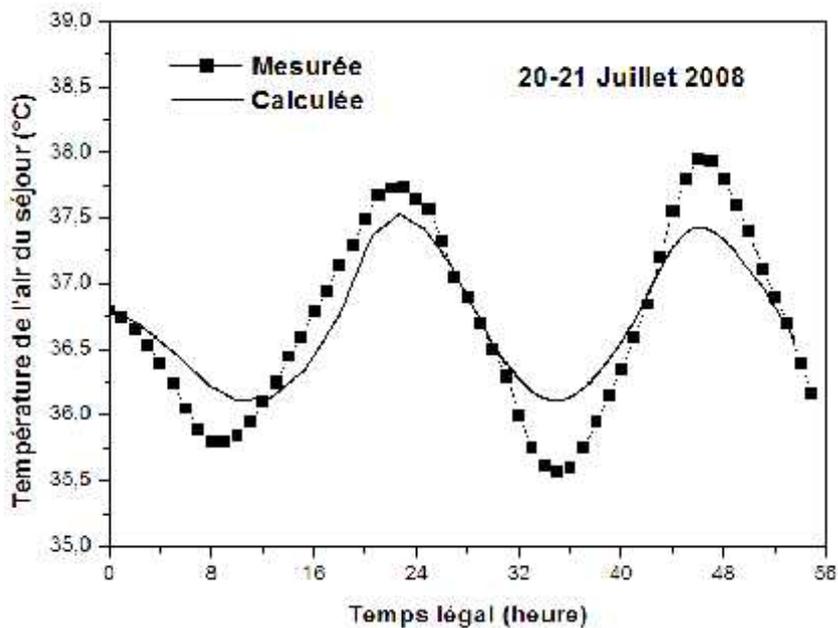


Figure 2.11: températures mesurées et simulées de l'air intérieur du séjour

Pour la journée du 20 Juillet, la température de la surface intérieure du mur sud atteint sa valeur maximale calculée $37,88^{\circ}\text{C}$ et sa valeur maximale mesurée $37,67^{\circ}\text{C}$ autour de 21h 00. Elle atteint sa valeur minimale calculée $35,06^{\circ}\text{C}$ et sa valeur minimum mesurée $35,17^{\circ}\text{C}$ autour de 10h 30. La température de la surface intérieure du mur nord varie de $36,46^{\circ}\text{C}$ à $36,87^{\circ}\text{C}$ pour les valeurs calculées et de $36,05^{\circ}\text{C}$ à $37,74^{\circ}\text{C}$ pour les valeurs mesurées. En ce qui concerne l'air, l'amplitude thermique moyenne était de 3°C pour les valeurs calculées et $2,79^{\circ}\text{C}$ pour les valeurs mesurées.

L'ensemble des données mesurées s'est révélé en bon accord avec les données simulées, avec une différence moyenne qui ne dépasse l'ordre de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température de l'air, de $0,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température de la paroi Sud et de l'ordre de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température de la paroi du mur Nord. Les résultats obtenus permettent de conclure que les modèles mathématiques sont assez bons pour prédire le comportement thermique effectif du bâtiment dans des conditions météorologiques réelles.

En effet, ce nouveau modèle a également été appliqué durant la saison hivernale. Les figures 2.12-2.13 donnent les températures mesurées et celles prédites par le modèle identifié, représentent respectivement les courbes de températures du mur Nord et de l'air intérieur. Toutes les courbes ont été fournies pour une période de 54 heures. Les données utilisées pour réaliser ces simulations ont été obtenues à partir de données mesurées du 07 Janvier 2009 à minuit au 10 Janvier 2009 à 06h 00. Ces journées correspondent à un ciel perturbé et une température ambiante comprise entre $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $14,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la vitesse du vent variant de façon aléatoire entre 3 m/s et 6 m/s.

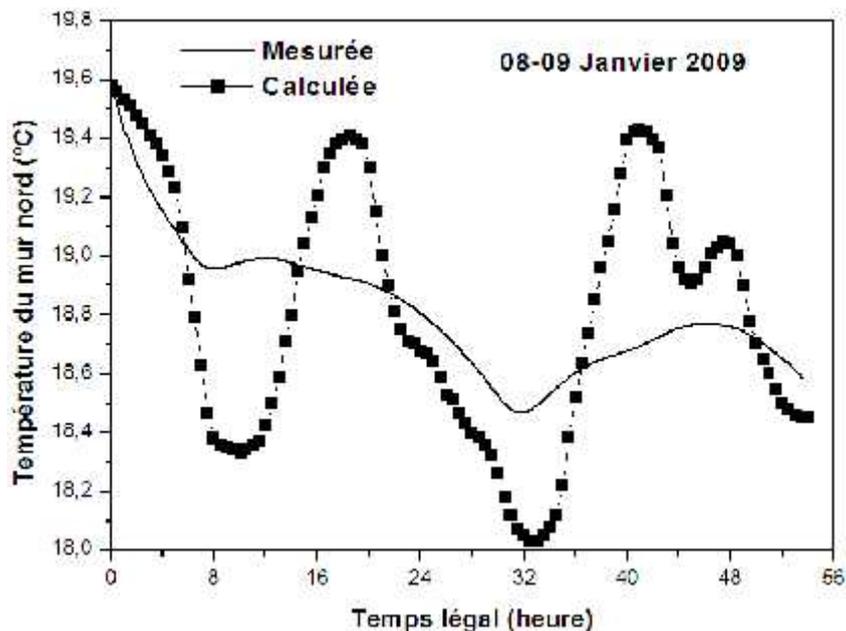


Figure 2.12: températures mesurées et simulées des surfaces intérieures du mur nord

Les résultats obtenus montrent que les températures mesurées du mur Nord sont entre $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ et entre $18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les températures simulées. Alors que dans le cas des températures intérieures, les températures enregistrées sont comprises entre $17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les températures mesurées et entre $17,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $19,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les températures simulées. La comparaison est dans l'ensemble acceptable, avec une différence moyenne qui ne dépasse l'ordre de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température de l'air et de l'ordre de $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour la température du mur nord. La marge d'erreur est plus grande pour cette période par rapport à l'été. Cette marge est

justifiée par les conditions climatiques instables, la vitesse du vent qui varie considérablement et le ciel qui se caractérise par des passages nuageux.

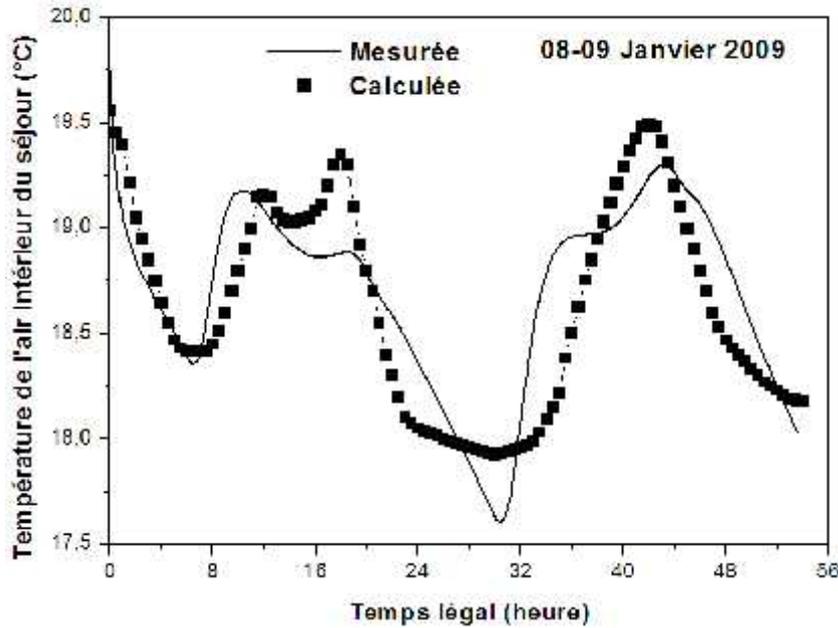


Figure 2.13: températures mesurées et simulées de l'air intérieur du séjour

Les données d'entrée, c'est-à-dire la température ambiante, le rayonnement solaire et la vitesse du vent ont été incluses dans le programme en déterminant une fonction d'interpolation (polissage polynômial) qui identifie chacun des paramètres en vue d'assurer une vitesse d'exécution du programme personnalisé. Dans cette situation le comportement aléatoire de ces paramètres ne permet pas d'établir des fonctions exactes qui se rapprochent correctement aux valeurs réelles.

2.4. Déphasage et facteur de décrémentation

Le déphasage thermique est le temps qu'il faut à la chaleur pour pénétrer à l'intérieur de l'habitat. Ce déphasage est notamment utile en été pour empêcher la pénétration de l'énergie du rayonnement solaire le jour et la rejeter la nuit.

Le déphasage ϕ et le facteur de décrémentation f , définis par Asan et Sancaktar [11] sont données par:

$$\phi_{\min} = t_{Ti,\min} - t_{To,\min} \quad (2.19)$$

$$\phi_{\max} = t_{Ti,\max} - t_{To,\max} \quad (2.20)$$

$$f = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_{o,max} - T_{o,min}} \quad (2.21)$$

Où

$t_{T_{o,min}}$, $t_{T_{i,min}}$, $t_{T_{o,max}}$, et $t_{T_{i,max}}$ sont les moments où les températures des surfaces intérieure et extérieure atteignent les valeurs minimales et maximales.

$T_{o,min}$, $T_{i,min}$, $T_{o,max}$, et $T_{i,max}$ sont respectivement les températures minimales et maximales des surfaces intérieures et l'extérieures.

Le déphasage ϕ est le temps requis par un maximum (ou un minimum) d'une onde de température de période P pour se propager à travers la paroi de l'extérieur vers la surface intérieure. Lorsque la température de surface imposée est sinusoïdale, ϕ_{min} et ϕ_{max} coïncident.

Le facteur de décroissance f est défini comme étant le rapport de l'amplitude décroissante de la température au cours du processus transitoire d'une onde traversant un élément solide. Le décalage et le facteur de diminution ont été largement étudiés dans la littérature de transfert de chaleur, ainsi que leur dépendance à l'égard de l'épaisseur de la paroi, des matériaux, des propriétés thermo-physiques, de l'absorption solaire, etc... [12-14].

La simulation numérique donne les figures 14-15 qui prévoient la variation de la température des surfaces interne et externe des parois Sud et Ouest pour le même jour.

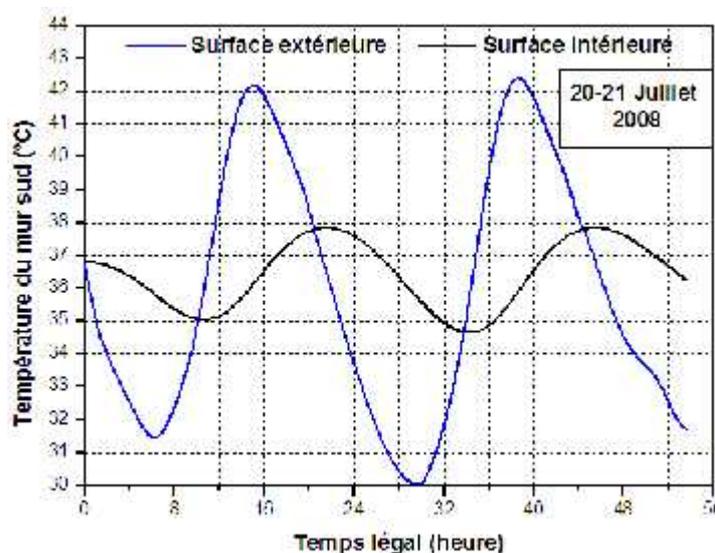


Figure 2.14: températures simulées du mur sud

La figure 11 montre que pour le mur de type 1, ϕ_{\min} est autour de 04h 36mn, avec ϕ_{\max} autour de 06h 51mn pour l'orientation Sud. Le facteur de décrémentation résultant de la simulation numérique est $f = 0,2584$. Cependant, le facteur journalier découlant de la simulation numérique pour ce mur de type 1 à l'Ouest (figure 14) est $f = 0,2165$, tandis que les décalages sont $\phi_{\max} = 04 \text{ h } 07 \text{ mn}$ et $\phi_{\min} = 04 \text{ h } 46 \text{ mn}$.

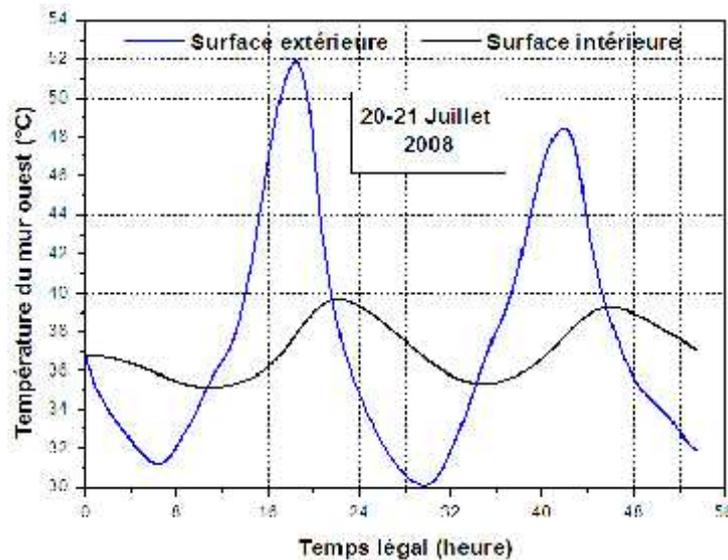


Figure 2.15: températures simulées du mur ouest

La différence entre les orientations devient plus évidente: la valeur maximale pour ϕ_{\max} correspond à la paroi orientée vers le Sud, tandis que la valeur minimale est atteinte par les parois orientées vers l'Ouest. Ces résultats confirment que le décalage dans le temps dépend de l'orientation du mur. Les mesures montrent que dans de bonnes conditions météorologiques, les décalages et les facteurs de décrémentation f des murs changent de valeurs en fonction des variations de la température extérieure, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire. L'estimation du temps de retard du mur et le facteur de décrémentation f montre qu'en raison de la température extérieure qui n'est pas sinusoïdale, les valeurs de ϕ_{\max} et ϕ_{\min} sont différentes.

Un autre type de paroi a été analysé. Il s'agit d'un mur de briques massives de 0,3 m d'épaisseur (mur de type 2), constitué d'une couche de plâtre sur le côté externe et une couche d'argile de plâtre d'épaisseur 0,005 m. Afin d'éviter de répéter les mêmes calculs précédents, on trace les histogrammes directement sur les figures 16-17 décrivant respectivement la variation des déphasages et le facteur de décrémentation selon le matériau de construction utilisé et l'épaisseur de la paroi.

L'isolation thermique renforcée de l'enveloppe du bâtiment se caractérise par de légers déphasages (ϕ_{\max} et ϕ_{\min}) et un faible facteur de décrémentation f . En été, un ϕ_{\min} élevé est préférable, donc les températures minimales des surfaces intérieures seront atteintes lorsque les conditions extérieures sont très chaudes. Aussi, les murs avec un faible facteur f sont privilégiés, ce qui fait que de ce point de vue le mur de type 2 est plus favorable que celui de type 1.

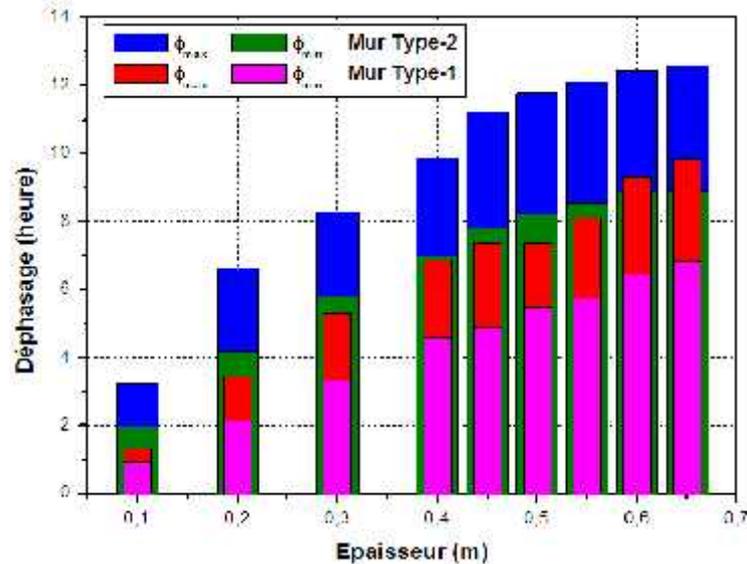


Figure 2.16: déphasage ϕ_{\max} et ϕ_{\min} des murs de type 1 et de type 2 à orientation sud pour une journée typique d'été, le 21 Juillet 2008.

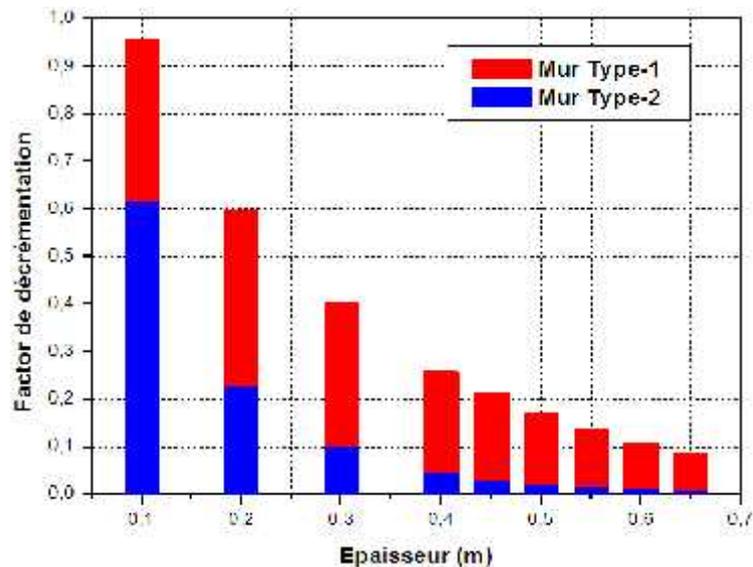


Figure 2.17: facteur de décrémentation f des murs de type 1 et de type 2 à orientation sud pour une journée typique d'été, le 21 Juillet 2008.

Une autre considération doit être soulignée: un faible facteur de décrémentation f n'est pas suffisant pour assurer le confort thermique intérieur. Autrement dit, une légère isolation peut avoir des valeurs aussi basses que $f = 0,008$, mais lorsque les conditions initiales correspondent à des températures très chaudes, la température de l'air intérieur pourrait augmenter au-delà des limites acceptables de confort.

La masse thermique d'une paroi de type 2 diminue considérablement l'alternance de la température extérieure avec un temps de retard acceptable. Sous des hautes températures initiales, l'augmentation de la température de l'air intérieur peut être provoquée par le stockage thermique. Le stockage thermique ou inertie thermique d'une paroi peut être définie comme le plus grand écart de la température de surface entre le minimum et le maximum (intervalle de variation de température).

La température d'un matériau à faible inertie thermique change de manière significative au cours de la journée, alors que la température d'un matériau à forte inertie thermique ne change pas radicalement. Il peut être également caractérisé par la différence entre le temps d'un maximum de température d'air à l'extérieur et l'heure de la température maximale de l'air à l'intérieur (différence de phase), un matériau ayant une grande inertie thermique déphase sensiblement. Les variations de température sont plus visibles dans les bâtiments à faible inertie thermique que dans les bâtiments à forte inertie thermique. La forte inertie thermique favorise une température intérieure stable et un déphasage élevé.

2.5. Conclusion

Une nouvelle approche de modélisation de bâtiments multizones en climat saharien a été introduite dans ce travail. La méthode nodale thermique a été utilisée pour appréhender le comportement thermique de l'air soumis à des sollicitations diverses. Un couplage a été effectué entre les équations proposées par P. Rumianowski et quelques équations d'un modèle thermique figurant dans le manuel TRNSYS. La prédiction de la température des parois de ce modèle est un pas en avant dans le processus de simulation qui permet la compréhension du comportement du bâtiment, l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et l'estimation des niveaux de confort à l'intérieur.

Les résultats ont confirmé que tout mur extérieur doit être construit à partir de matériaux qui ont une résistance thermique suffisante permettant de réduire le transfert de chaleur externe. Les mesures et les calculs effectués montrent que dans de bonnes conditions météorologiques, les déphasages et les facteurs de décrémentation f des murs changent de valeurs en fonction des variations de la température extérieure, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire.

Cette méthode simplifiée est une bonne approche pour la compréhension du comportement thermique des murs et de l'air dans un bâtiment réel. Ensuite, pour prédire le comportement thermique des murs et de l'air intérieur d'un bâtiment, il est essentiel de procéder à une phase de simulation précédant l'ensemble de la performance du bâtiment incluant les transferts de chaleur.

Le modèle numérique proposé est l'une des méthodes éprouvées qui prédit correctement la valeur expérimentale du déphasage dans le temps dans des conditions météorologiques stables et un ciel complètement clair. Les perturbations climatiques peuvent causer certains problèmes, en particulier concernant l'estimation du déphasage et du facteur de décrémentation. Cependant l'erreur entre les valeurs de température estimées et les valeurs mesurées sont acceptables.

Références

- [01] : S M A Bekkouche, modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, thèse de Doctorat, université de Tlemcen, Juin 2009.
- [02] : J.P. Demailly, analyse numérique et équations différentielles. manuel pour le second cycle de mathématiques, Presses Universitaires de Grenoble, Première édition sept. 1991.
- [03] : J. Huetz, J. P Petit, notions de transfert thermique par convection; Techniques de l'Ingénieur, A1540, 1998.
- [04] : P. Rumianowski, J. Brau, et J.J Roux, An Adapted Model for Simulation of the Interaction Between a Wall and the Building Heating System. In Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference Orlando, USA, p. 224-233, 1989.
- [05] : TRNSYS16, TRNSYS User Annual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison, USA, 2004.
- [06] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaiche et N Benamrane, Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate, Elsevier, Energy and Buildings vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [07] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, R. M Yaiche, R. Khanniche (2013), Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), International Scientific Journal, Thermal Science, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 349-364.
- [08] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. R. Yaiche, M. K. Cherier, M. Hamdani, F. Chellali, Introduction to Control of Solar Gain and Internal Temperatures by Thermal Insulation, Proper Orientation and Eaves, Elsevier, Energy and Buildings vol.43 (2011) pp. 2414–2421.
- [09] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz and A. Cheknane (2009), A Modelling Approach of Thermal Insulation Applied to a Saharan Building, Thermal Science: Vol. 13 (2009), No. 4, pp. 233-244.
- [10] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, Construction and Building Materials 52 (2014) 59–70.

- [11]: Asan H, Sancaktar YS, Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28(8): 59– 166, 1998.
- [12]: Asan H, Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *Energy and Buildings*, 32(2): 197–203, 2000.
- [13]: Asan H, Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*, 41(5): 615–620, 2000.
- [14]: Kontoleon KJ, Eumorfopoulou EA (2008). The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*, 33(7): 1652–1664.

Chapitre 3

Principales Mesures Structurelles

&

Amélioration des Performances de

l'Enveloppe des Bâtiments

CHAPITRE 3

PRINCIPALES MESURES STRUCTURELLES & AMELIORATION DES PERFORMANCES DE L'ENVELOPPE DES BATIMENTS

3.1. Introduction

Les règles actuelles de conception des bâtiments sont essentiellement basées sur la minimisation des déperditions thermiques. Pour l'enveloppe du bâtiment cela se traduit par une prédominance de son isolation thermique. Certaines technologies bioclimatiques, et surtout solaires, existent déjà mais leur utilisation n'est pas du tout généralisée à cause d'un manque de repère sur leurs performances. Pour que la démarche bioclimatique puisse être considérée, il est nécessaire de pouvoir évaluer à la fois la "qualité énergétique" de l'environnement et l'aptitude des bâtiments à exploiter cet environnement [1].

Les travaux présentés dans ce chapitre sont basés sur l'étude de quelques indicateurs de performance thermique issus des simulations numériques de bâtiments multizones sous certaines conditions climatiques. Nous aurons l'occasion de :

- Mieux connaître l'influence du climat et du site sur le bâtiment et son confort.
- Jouer avec le soleil pour faire pénétrer sa lumière et son énergie profondément dans le bâtiment en hiver et se protéger de sa chaleur en été.
- Donner une meilleure compréhension de quelques principes énergétiques fondamentaux.
- Donner à l'architecte une plus grande liberté. Il peut alors, dès les premières esquisses, choisir librement sa stratégie pour intégrer naturellement son projet dans le site et utiliser au mieux l'énergie solaire passive.

Les conséquences naturelles de cette démarche seront un confort accru pour l'utilisateur, une meilleure qualité d'éclairage de l'espace intérieur, une économie d'énergie et d'exploitation et la bonne conservation du bâtiment dans le temps.

En Algérie, en principe, une réglementation thermique devrait imposer des solutions techniques pour garantir un confort minimal. Néanmoins une réflexion en ce sens est entreprise au niveau du ministère de l'habitat. Celles-ci concernent principalement l'inertie, l'isolation thermique, les protections solaires des baies vitrées et la ventilation. Ces solutions se déclineront selon la zone climatique, pondérée par l'altitude du site et l'exposition aux bruits.

Dans la littérature [2], des travaux ont prouvé que les types de matériaux de construction utilisés sont en général ceux qui favorisent l'isolation thermique du bâtiment (paille par exemple), qui lui assure une inertie thermique pouvant entraîner un déphasage horaire des maxima de

températures extérieure et intérieure variant entre 6 à 8 heures, le maximum de température est alors atteint en début de nuit où la température extérieure est inférieure à celle de l'intérieur; toutes les fenêtres et portes sont alors ouvertes, un refroidissement rapide de l'intérieur du bâtiment y améliore le confort et réduit fortement l'absorption du rayonnement solaire.

3.2. Échanges thermiques d'une paroi

Un bâtiment est un ensemble complexe de matériaux en contact avec un environnement aux températures fluctuantes; des transferts de chaleur s'y produisent en permanence. C'est également un lieu que l'homme occupe plus de 80 % de son temps au cours de sa vie. Au delà des performances thermiques auxquelles un bâtiment doit répondre aujourd'hui, il doit s'intégrer parfaitement aux contraintes de son environnement tout en le respectant et offrir à ses usagers un confort optimum à chaque saison. Un bâtiment est une enveloppe composée d'une multitude de parois, opaques ou non, chacune d'elles étant l'assemblage de matériaux aux caractéristiques diverses : c'est cet ensemble composite qui lui confère ses caractéristiques thermiques [3].

Les principes de la thermodynamique énoncent que la chaleur ou l'énergie calorifique ne disparaît jamais. Elle ne fait que se déplacer ou se transformer sous une autre forme d'énergie. Au cours d'un échange de chaleur entre deux corps physiques, c'est toujours le plus chaud qui cède de l'énergie au profit du plus froid ; l'échange s'arrête lorsque les deux corps ont atteint la même température. D'un point de vue physique, le froid n'existe pas; on parle de froid lorsque la chaleur diminue. On peut seulement enlever de la chaleur à un corps jusqu'à ce qu'il atteigne la température du zéro absolu. Les transferts d'énergie se font selon trois modes: par conduction, convection et rayonnement [3].

À l'échelle d'un bâtiment, les trois modes de transmission se combinent: la chaleur transmise à une paroi en partie par convection et rayonnement s'y propage par conduction, si la paroi est solide (hors vide d'air). L'hiver, le chaud cherche à sortir de l'enveloppe du bâtiment; l'été, c'est l'inverse; le chaud cherche à y entrer. Lutter contre ces déperditions de chaleur (ou de froid) revient donc à limiter ce flux de chaleur par conduction à l'intérieur même de la paroi. Par ses propriétés intrinsèques, chaque matériau est plus ou moins conducteur. La conductivité thermique, exprimée en $W/m K$, traduit la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de $1\text{ }^{\circ}C$. Ce coefficient permet ainsi de comparer des matériaux entre eux. Plus la conductivité thermique est petite, plus le matériau freine le flux de chaleur et plus il est isolant. Afin de ramener la performance d'un matériau seul à la performance globale d'une paroi, il est nécessaire d'y intégrer les différents matériaux qui la composent mais aussi l'épaisseur de ces derniers [3].

3.2.1. Stockage et restitution de la chaleur

Si la capacité résistive d'une paroi est une composante essentielle dans la conception d'un bâtiment économe, d'autres propriétés intrinsèques aux matériaux caractérisent le comportement dynamique d'une enveloppe. Outre qu'ils freinent le flux de chaleur, les matériaux possèdent une capacité thermique leur permettant d'emmagasiner plus ou moins la chaleur. Il est donc intéressant de connaître comment la chaleur est stockée et à quelle vitesse; on parle alors de l'effusivité d'un matériau.

Autre propriété physique, la diffusivité indique la vitesse de diffusion de la chaleur à l'intérieur même du matériau. Ces notions, plus communément appelées inertie thermique, confèrent aux bâtiments des propriétés thermiques dynamiques qu'il convient de maîtriser dans la rénovation du parc existant ou pour la conception du bâti de demain. C'est le premier pas vers le bioclimatisme. Capter et maîtriser les apports solaires sont des éléments incontournables de la conception bioclimatique [4].

3.2.1.1. Capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau représente sa propension à emmagasiner de la chaleur en fonction de son volume. Elle est exprimée en $\text{kJ/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$. Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus ce matériau sera capable d'emmagasiner et de restituer de la chaleur en hiver ou de la fraîcheur en été. Le principal bénéfice d'une forte capacité thermique est de lisser les variations de température d'un bâtiment [4].

En hiver, la pointe de température la plus froide se produit en fin de nuit. Pendant cette période la plus froide, une forte capacité thermique permet de diffuser dans le bâtiment les calories emmagasinées la journée par l'apport solaire. Par ailleurs, cette diffusion de chaleur atténuant les effets des pics de froid pendant une période, elle permet d'éviter de nombreuses relances de chaudière, coûteuses en énergie. À l'inverse, en été, une forte capacité thermique permet d'emmagasiner le surplus de calories afin de les restituer pendant une période plus favorable à leur évacuation [4].

Cependant, si la capacité thermique peut être l'allié du confort et de la sobriété énergétique d'un bâtiment, elle peut être pénalisante dans certains cas. Dans un bâtiment de grande inertie dont l'utilisation est intermittente, tel qu'une résidence secondaire ou un bâtiment public, de longues périodes de mise en température de confort seront observées puisque les murs devront capter un grand nombre de calories avant d'atteindre une température idéale [4].

3.2.1.2. Effusivité

L'effusivité d'un matériau, appelé couramment chaleur subjective, est la vitesse à laquelle varie la température de surface d'un matériau.

Ce paramètre a pour unité le $J/m^2 S ^\circ C$. Si l'effusivité n'est pas prise en compte dans un bilan thermique, elle reste cependant un paramètre non négligeable du confort thermique :

- un matériau d'effusivité élevée absorbe rapidement une grande quantité d'énergie sans se réchauffer notablement;
- si son effusivité est faible, le matériau se réchauffe en surface en peu de temps.

C'est l'effusivité qui donne en hiver la sensation de mur froid, synonyme d'inconfort thermique. Si l'on pose la main contre une paroi en faïence (effusivité = $1100 J/m^2 S ^\circ C$), elle semble froide car ce matériau à forte effusivité absorbe rapidement la chaleur de la peau. Dans la conception d'une paroi, ce paramètre permet de choisir la qualité du revêtement en fonction du climat et de l'utilisation future de la pièce.

Par exemple, sous un climat froid, un parquet à chaleur subjective élevée sera utilisé dans les chambres ; à l'inverse, sous un climat chaud, un carrelage donnera une impression de fraîcheur à la chambre. L'effusivité peut permettre d'atténuer les inconvénients liés à un bâtiment à forte inertie en le rendant plus confortable dès le début de la période de chauffe [4].

3.2.1.3. Diffusivité

La diffusivité thermique d'un matériau caractérise la vitesse de diffusion de la chaleur en son cœur. Elle est exprimée en m^2/s . Plus la diffusivité est élevée, plus le matériau s'échauffe et se refroidit rapidement. La diffusivité est directement liée à la conductivité thermique, à la capacité thermique ainsi qu'à la masse volumique d'un matériau. Elle croît avec la conductivité thermique d'un matériau et décroît avec sa capacité thermique et sa masse volumique. Appliquée à un bâtiment, la diffusivité d'un matériau d'une paroi permet de gérer le temps de restitution de la chaleur. Par exemple, elle permet de dimensionner l'épaisseur d'un mur accumulateur qui capte des calories la journée et les restitue quelques heures plus tard vers une pièce de vie nocturne.

Le déphasage ainsi créé est un paramètre essentiel dans l'optimisation du confort d'été d'une habitation. Un fort déphasage permet de décaler dans le temps un pic de température. Une forte chaleur d'une journée d'été atteint l'intérieur du bâtiment 12 heures après avoir impacté les faces extérieures. Il est donc possible d'évacuer ce surplus de calories en surventilant le bâtiment et ainsi de limiter l'inconfort thermique dans les pièces (figure 3.1) [4].

Une forte inertie est recommandée pour stocker une partie des apports afin de les restituer au bâtiment lorsqu'il en a le plus besoin. D'autres traités d'architecture bioclimatique [5-

6] dressent les mêmes constats : dans les climats tempérés, les solutions privilégiées pour l'hiver et l'été s'opposent, mis à part l'utilisation de l'inertie du bâtiment comme déphaseur.

L'analyse globale ne permettant pas de visualiser les évolutions dynamiques, une analyse temporelle est nécessaire afin de mieux comprendre les phénomènes inertiels et de stockage d'énergie dans le bâtiment. Cette analyse doit également permettre de préciser les contours des besoins de stockage d'énergie à court terme pour une exploitation optimale des ressources de l'environnement.

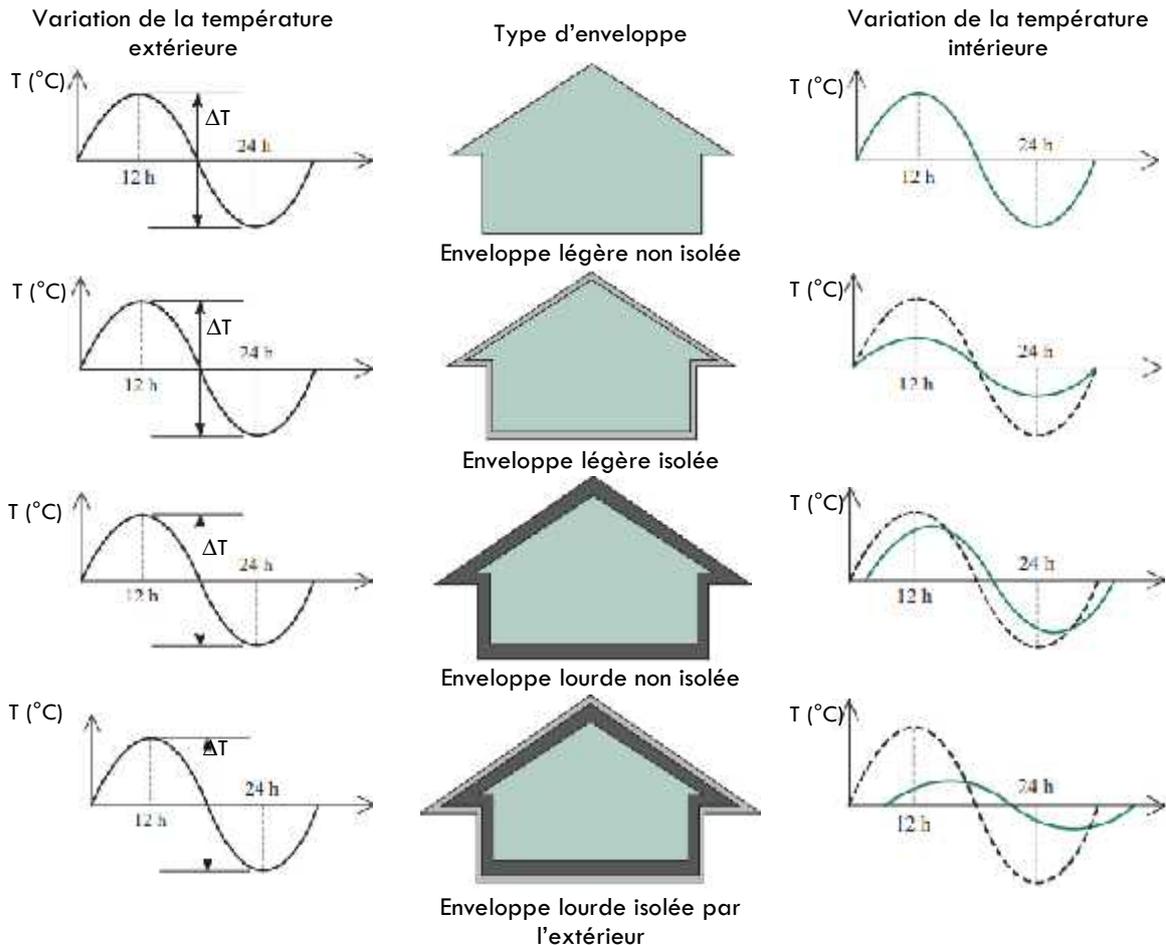


Figure 3.1: Comportement thermique d'une enveloppe selon sa constitution [4].

La pierre massive, très lourde (1 tonne/m²) devient le lieu de stockage de l'énergie distribuée par l'environnement. Elle s'oppose aux variations brusques de température avec un facteur d'amortissement important [6]. Gérant les variables; température et hygrométrie et leur variation, la pierre instaure une nouvelle conception du confort reposant sur l'amortissement des fluctuations, première origine de l'inconfort.

La résolution de l'équation de la chaleur par la méthode des éléments finis peut être utile pour prouver le phénomène d'accumulation du flux thermique qui traverse un mur en pierre.

3.2.2. Résolution numérique de l'équation de la chaleur

On considère un mur en pierre homogène et isotrope. La diffusion de la chaleur est régie par l'équation aux dérivées partielles:

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = g \quad (3.1)$$

$0 \leq x \leq e, t \geq 0, C_p > 0, k > 0$

L'inertie thermique de la pierre se caractérise par deux valeurs:

La diffusivité D_f qui s'exprime en m^2/s , et exprime la profondeur à laquelle la chaleur a un effet après une période de temps donnée.

$$D_f = \sqrt{\frac{k}{C_p}} \quad (3.2)$$

L'effusivité E qui s'exprime en $J K^{-1} m^{-2} s^{-1/2}$, détermine la capacité d'accumulation de chaleur. Elle se calcule selon la formule suivante :

$$E = \sqrt{C_p k} \quad (3.3)$$

L'inertie thermique d'une paroi est définie par sa constante de temps. La constante de temps d'une paroi est la durée qui lui est nécessaire pour passer d'un état stable à un autre sous l'effet d'un changement instantané de la température (régime transitoire). Ce temps de réaction est proportionnel au carré de l'épaisseur et inversement proportionnel à la diffusivité. C'est la puissance à fournir pour maintenir un degré de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur.

$$\tau = \frac{e^2}{D_f} \quad (3.4)$$

La fonction g de l'équation (3.1) représente la source de la chaleur, les variables indépendantes sont la position x et le temps t .

Nous avons pris comme conditions aux limites (conditions de type Dirichlet) $T(0,t)$ et $T(e,t)$ et comme condition, dite initiale $T(x,0)$. On suppose que la température est uniforme sur les parois du mur.

$$g = \frac{P}{V} = \frac{G S}{V} = \frac{G}{e} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{k}{C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{G}{e} \quad (3.6)$$

$$G = R + \frac{0.53 \text{ air} (\text{Gr Pr})^{1/4}}{L} (T_{\text{am}} - T) + c (T_{\text{ciel}}^4 - T^4) \quad (3.7)$$

R est la densité du flux absorbé (éclairage) durant trois heures et vingt minutes. Donc, t vari de 0 s à 12000 s.

$c_{\text{air}} = 0.026 \text{ w m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ est la conductivité thermique de l'air.

L: la hauteur du mur (m).

$c = 0.93$ émissivité du ciel.

L'équation de la chaleur devient :

$$\frac{T}{t} - \frac{k}{C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{R}{e C_p} + \frac{0.53 \text{ air} (\text{Gr Pr})^{1/4}}{L e C_p} (T_{\text{am}} - T) + \frac{c}{e C_p} (T_{\text{ciel}}^4 - T^4) \quad (3.7)$$

La figure 3.2 est une schématisation du mur considéré, alors que les figures 3.3 et 3.4 donnent les relevés des températures calculées à l'intérieur du mur selon la profondeur x.

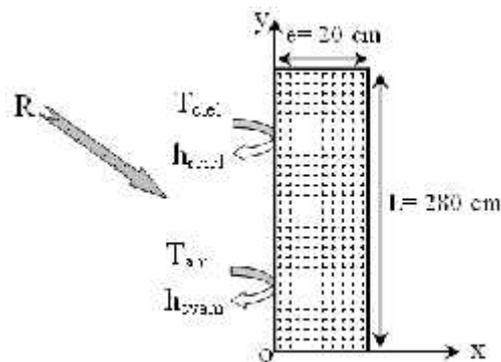


Figure 3.2: Echanges thermiques et schéma descriptif du mur [7-8].

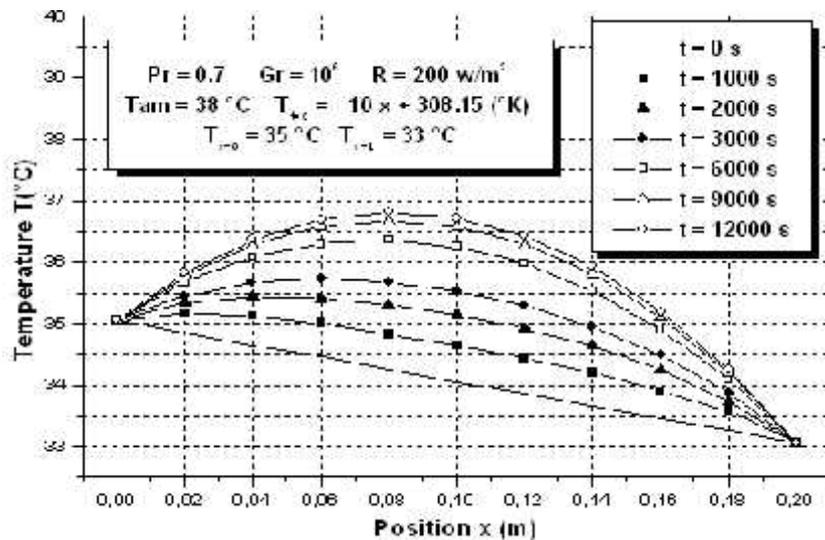


Figure 3.3: Température du mur pour différentes profondeurs, conditions chaudes. [7-8].

À travers des scénarios différents, nous pouvons constater que les températures à l'intérieur du mur sont plus grandes par rapport à celles des températures initiales (figure 3.3). C'est-à-dire que le profil des températures augmente en fonction du temps durant une période chaude.

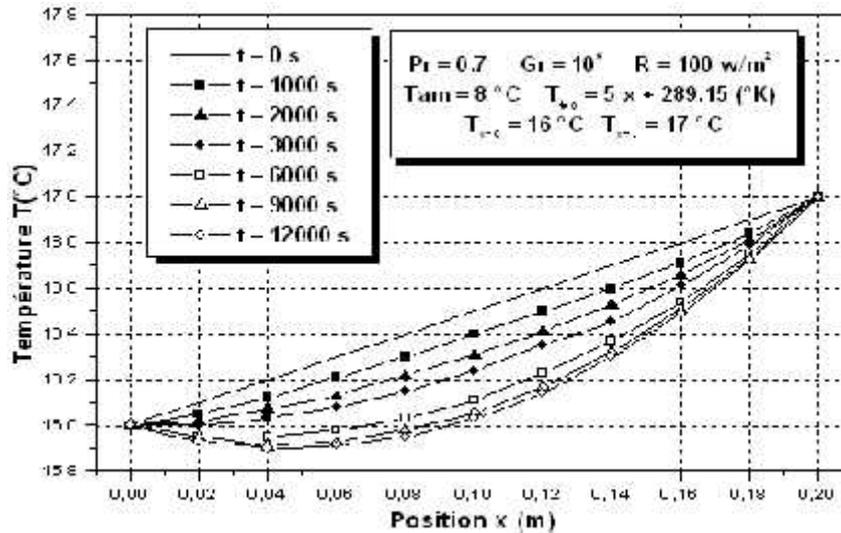


Figure 3.4: Température du mur pour différentes profondeurs, conditions froides. [7-8].

En effet, sur la figure 3.4, on montre que les relevés des températures intérieures sont plus petits par rapport à ceux des températures initiales. Ces accroissements ou décroissements ont été produits entièrement par l'accumulation du flux thermique qui traverse le mur en pierre. C'est tout simplement l'effet de l'inertie ou de la masse thermique. En d'autres termes, il s'agit de l'effet de la capacité d'emmagasiner, de stockage ou de dégagement de chaleur ou de froid que possède la pierre.

3.3. Propriétés et aide à l'amélioration des performances thermiques

Les parois sont les principaux moyens passifs pour gérer les flux thermiques. Un bâtiment est composé de parois opaques comme les murs, les toitures et de parois transparentes comme les vitrages. On distingue communément trois types de parois opaques: les murs, qui ont très souvent la plus grande surface de contact avec l'extérieur; les toitures, plus sollicitées thermiquement que les murs; les sols ou planchers, pour lesquels les exigences thermiques sont moindres.

- Les murs se classent en deux grandes familles : les murs pleins et les murs menés par les cavités d'air. Ces murs maçonnés, plus courants au niveau local, sont mis en œuvre à partir d'éléments de construction connus, tels que le béton, la pierre, la parpaing ou encore la brique.

- Pour les toitures, nous retenons que la toiture isolée du côté extérieur du bâti offre des performances thermiques intéressantes du fait d'une forte inertie entraînant un confort amélioré.

Pour certains matériaux courants mis en valeur dans le tableau 3.1, on constate qu'en hiver les épaisseurs peuvent être mises en œuvre sans trop de difficulté; pour l'été, en revanche, ces mêmes matériaux (selectionnés) sont à proscrire tant l'épaisseur à installer est importante : jusqu'à 1,1 m pour les fibres de polyester [9].

Type d'isolant	Masse volumique kg/m ³	Conductivité W/m K	Capacité thermique Wh/m ³ K	Épaisseur cm	
				Hiver	Été
Panneau isolant de fibres de bois	160	0,04	80	17,3	18,5
Copeaux de bois	90	0,055	63	23,8	24,5
Liège expansé (vrac)	100	0,045	42	19,5	27,1
Ouate de cellulose forte densité	70	0,045	42	19,5	27,1
Ouate de cellulose moyenne densité	55	0,04	33	17,3	28,6
Mousse rigide de polyuréthane	30	0,03	13	13,0	40,5
Perlite expansée	90	0,05	20	21,7	41,6
Laine de mouton	20	0,04	10	17,3	53,5
Polystyrène	20	0,04	8	17,3	59,3
Coton	25	0,04	6	17,3	69,0
Laines minérales	18	0,04	4	17,3	81,5
Fibres polyester	15	0,045	2	19,5	110,0

Tableau 3.1: Épaisseurs optimales des isolants de toiture pour le confort d'hiver et d'été [9]

3.3.1. Isolation thermique et techniques choisies

Malgré les progrès réalisés au niveau de la construction des bâtiments, plusieurs éléments contribuent à l'augmentation des besoins de chauffage ou de rafraîchissement. Parmi ceux-ci on liste l'isolation très efficace de l'enveloppe. L'isolation d'un bâtiment implique le traitement des parois déperditives et celui des linéiques (ponts thermiques) qui correspondent à des ruptures de l'isolation surfacique.

Les ponts thermiques sont une rupture dans l'enveloppe isolante d'une paroi donnant vers l'extérieur. D'un point de vue pratique, on appelle ponts thermiques toutes les parties de la paroi qui donnent sur l'extérieur et qui n'ont pas pu être isolées. Les ponts thermiques les plus fréquents sont [9]:

- La jonction des parois horizontales (plancher bas, plancher intermédiaire, etc.) et des parois verticales;
- L'interface entre les murs de refend et les murs extérieurs ;
- Les tableaux, linteaux et appuis de fenêtres ;
- L'ensemble des points particuliers ne permettant pas d'isolation.

Les ponts thermiques peuvent représenter jusqu'à 25 % des déperditions d'une maison. De plus, les ponts thermiques étant des surfaces froides, ils sont souvent la source de phénomènes de condensation pouvant entraîner la prolifération de champignons et de salpêtre [9].

Il apparaît donc aujourd'hui indispensable d'examiner quelles sont les évolutions possibles ou probables en termes d'exigences à prendre en compte afin d'identifier pour les différents matériaux, produits ou systèmes d'enveloppe comment il sera possible de progresser en matière de performances énergétiques. En principe, il est préférable de poser l'isolant à l'extérieur de la structure porteuse, car cette disposition évite de nombreux ponts thermiques, diminue les risques de condensation et augmente l'inertie thermique interne du bâtiment. L'ancienne méthode consiste à poser l'isolant à l'intérieur de la structure porteuse et à le protéger par un galandage.

L'isolation extérieure compacte ou crépie est constituée de plusieurs couches: le matériau isolant est collé sur la face extérieure de la façade, à l'aide d'un ciment-colle. Des clous de matière plastique sont parfois utilisés pour fixer l'isolant. L'isolant est ensuite enduit d'un crépi synthétique armé d'un treillis de fibre de verre pour le protéger des intempéries et lui donner son aspect final. Des systèmes d'isolation extérieure compacte existent pour tous les isolants principaux (fibres minérales, mousses organiques et inorganiques), mais les systèmes utilisant polystyrène expansé dominant actuellement.

Il est essentiel, pour la durabilité du système, que toutes les couches, depuis le revêtement de façade jusqu'au crépi final soient posées par des spécialistes ayant de l'expérience dans le système. Tous les matériaux utilisés doivent faire partie du système proposé par le fabricant. Le bricolage dans ce domaine est pratiquement voué à l'échec.

On s'intéresse à la détermination de la méthode la plus pratique en vue d'isoler l'enveloppe du bâtiment. Les épaisseurs, les compositions et les valeurs des coefficients de transmission thermique U des murs, des planchers sol et du toit sont donnés dans le tableau 3.2.

	Composition	Epaisseur (cm)	Coefficient de transmission thermique U (W/m ² K)
Murs extérieurs	Plâtre	1.5	0.247
	Brique creuse	30	
	Matériau isolant	10	
	Ciment-colle	1.5	
Murs intérieurs	Plâtre	1.5	0.86
	Brique creuse	20	
	Ciment-colle	1.5	
Plancher sol	Carrelage	10	0.348
	Ciment	1	
	Pierre	6	
	Dalle	24	
	Matériau isolant	10	
Toit	Plâtre	1.5	0.348
	Hourdis ciment	12	
	Matériau isolant	10	
	Ciment mortier	3	

Tableau 3.2: Composition, épaisseurs et coefficient de transmission thermique global, caractérisant l'enveloppe du bâtiment [10]

La présence d'ouvertures dans ce bâtiment pourrait être exploitée pour favoriser une ventilation naturelle de nuit en été. Tout local à fonction de séjour doit disposer d'une fenêtre ouvrante ou d'une porte extérieure afin de pouvoir assurer une ventilation intensive, par exemple en vue de l'évacuation rapide d'odeurs et/ou de la chaleur en été. Ces ouvertures doivent pouvoir rester opérationnelles sans déformer la protection contre l'intrusion du logement. Les fenêtres doivent être conçues en vue de limiter les fuites d'air. Le taux d'infiltration d'air ne doit pas dépasser 2.8 m³/heure par mètre linéaire lorsqu'il est testé dans une différence de pression de 75 Pa. Les caractéristiques utilisées sont données dans le tableau 3.3.

Type de verre			Valeur de U	
			Exposée	Abritée
Verre plat	Simple vitrage, clair		5.91	4.60
	Volet unique avec un revêtement de faible émissivité	e = 0.60	5.68	4.54
		e = 0.40	5.11	3.97
		e = 0.20	4.26	3.12
Vitrage isolant	Double vitrage, clair	4.8 mm espace d'air	3.69	3.29
		6.4 mm espace d'air	3.46	3.12
		12.5 mm espace d'air	3.18	2.95
	Double vitrage avec un revêtement de faible émissivité	e = 0.60	3.01	2.78
		e = 0.40	2.67	2.44
e = 0.20		2.21	2.04	

Tableau 3.3: Valeurs du coefficient de transmission thermique de verre (verre unique) [10]

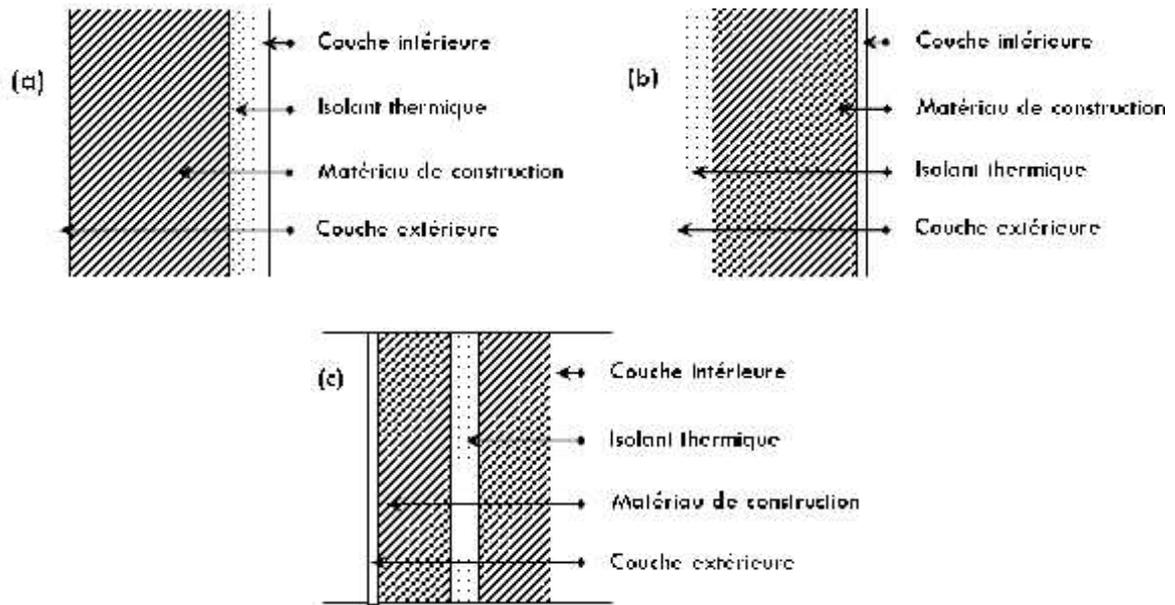


Figure 3.5: Méthode d'emplacement du mur isolé. (a) Isolant disposé à l'intérieur de la masse thermique, (b) Isolant disposé à l'extérieur de la masse thermique, (c) Isolant disposé au milieu de la masse thermique

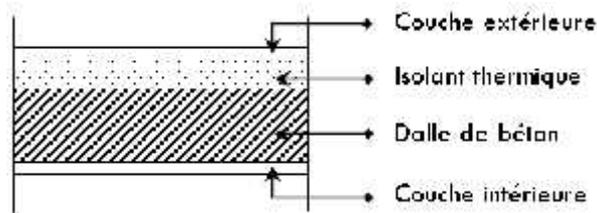


Figure 3.6: Méthodes d'isolation de toiture

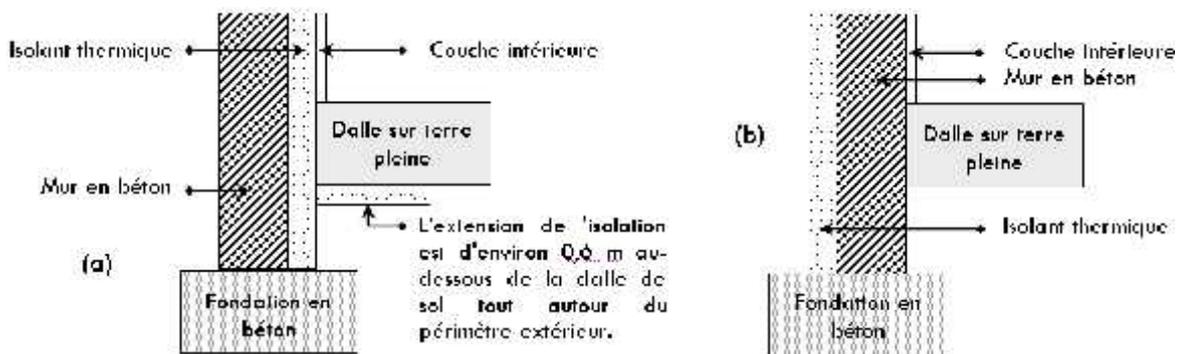


Figure 3.7: Fondation en béton, isolation de la dalle sur terre pleine. (a) Isolation intérieure de la fondation en béton, (b) Isolation extérieure de la fondation en béton

Plusieurs auteurs ont montré que, pour économiser de l'énergie, il est préférable de choisir des murs avec isolation extérieure et de haute masse interne plutôt que des arrangements avec isolation thermique intérieure. Par la suite, il est indispensable de mettre en œuvre un Modèle multizone. Avec ce type de modèle, le principe est de considérer un bâtiment multizone, avec une pression et une température homogène par zone. Les liens entre les différents nœuds sont établis en fonction de la présence éventuelle des ouvertures entre zones (fenêtres, portes, conduits, ...).

La méthode de calcul s'est basée sur un bilan énergétique proposé de l'air (voir chapitre 2) qui est un modèle d'un nœud par zone et qui indique la capacité thermique du volume d'air de cette zone. Dans ce modèle n'importe quel point de l'air dans la zone a les mêmes propriétés. Conçu pour résoudre de tels problèmes, Runge-Kutta du quatrième ordre est une méthode numérique qui a été utilisée pour appréhender le comportement thermique des murs et de l'air soumis à des sollicitations variées. Les programmes élaborés interactifs ont permis de mieux comprendre les phénomènes physiques.

La figure 3.8 donne un aperçu sur les températures simulées du séjour sachant que la température ambiante varie de 26 à 40 °C et la vitesse du vent est très faible. Une étude comparative entre l'isolation à l'intérieure au milieu et à l'extérieur a été effectuée pour déduire la meilleure méthode d'isolation thermique de l'enveloppe en climat saharien (Ghardaïa).

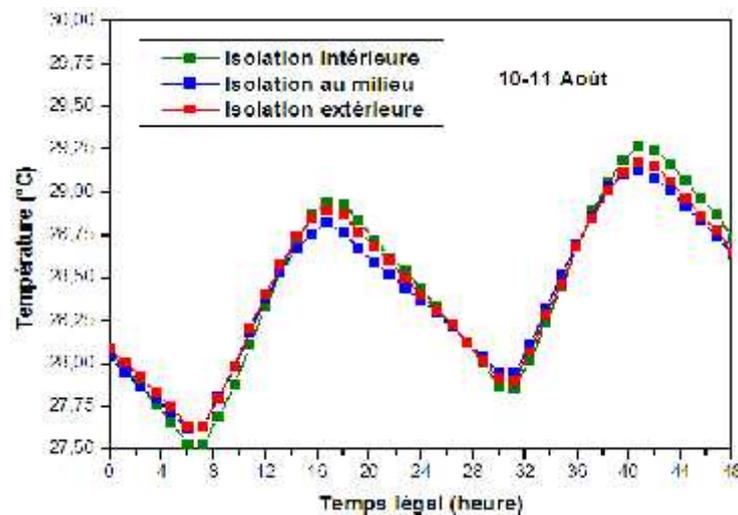


Figure 3.8: Température de l'air du séjour

Par simulation numérique, l'isolation thermique à l'intérieur, au milieu et à l'extérieur donne presque le même résultat. Il est à noter que nous avons ignoré l'effet des ponts thermiques, tandis que l'isolation intérieure et au milieu ne peuvent pas traiter tous les types de ponts thermiques. Toutefois, le principe fondamental de l'isolation extérieure est d'entourer complètement l'enveloppe du bâtiment ce qui élimine les ponts thermiques qui peuvent se manifester autrement

lorsque les murs extérieurs et les fondations se connectent avec les parois internes et la dalle du plancher.

Suivant le type de toiture, il existe plusieurs grandes techniques d'isolation (tableau 3.4). En rénovation, il existe deux grandes techniques d'isolation des parois verticales donnant sur l'extérieur : l'isolation thermique rapportée par l'intérieur qui consiste à placer l'isolant sur la face interne de la paroi et l'isolation thermique par l'extérieur sur la face externe de la paroi. Le tableau 3.5 dresse la liste des avantages et inconvénients de ces deux techniques. Le point critique se situe dans les cas où l'isolation par l'extérieur n'est pas acceptée en rénovation. Pour répondre à ce défi, un effort important de recherche et développement en Europe est fait en vue de développer des isolants à partir du vide d'air (le meilleur isolant connu).

3.3.2. Mécanisme du transfert de chaleur dans une cavité d'air d'un élément de construction

Le choix d'un produit ou matériau de construction doit être réalisé suffisamment tôt lors de l'élaboration du projet, notamment au niveau du gros œuvre et des matériaux utilisés sur des grandes surfaces pour les aménagements intérieurs. L'objectif est d'infléchir certaines décisions quant à la conception et au confort thermique. La conception de l'enveloppe sera basée sur un haut niveau d'isolation des parois opaques et des fenêtres.

Un objectif minimal est de diminuer les déperditions par transmission du bâtiment par rapport à la réglementation en vigueur.

Dès la construction d'un nouvel habitat, deux conditions sont à considérer en priorité si l'on veut s'assurer d'un préalable résultat du point de vue isolation thermique, à savoir la configuration des murs, et le choix des matériaux de construction.

Type de toiture	Techniques	Description
Toiture terrasse	Isolation sur étanchéité toiture inversée	L'isolant est disposé sur une étanchéité existante, éventuellement réparée, ou sur une étanchéité neuve. Selon l'accessibilité, cette couche d'isolant est recouverte d'une couche de gravier ou d'un dallage sur sable. Cela présente l'avantage de protéger l'étanchéité.
	Isolation sous étanchéité	L'isolant est mis en œuvre au-dessus de la dalle puis recouvert par l'étanchéité. Le complexe peut être complété d'une protection lourde : en gravillons pour les toitures non accessibles, ou en dallage lorsqu'une circulation est prévue.

Tableau 3.4: synthèse des grandes techniques disponibles pour l'isolation des toitures [9].

Mode d'isolation	Avantages	Inconvénients
Par l'intérieur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Coût moindre ▪ Aspect extérieur maintenu 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque de condensation interne. ▪ Refroidissement et humidification du mur, risque de détérioration de l'isolant par la pluie et l'humidité ascensionnelle. ▪ Risque de fissuration suite aux variations thermiques du mur. ▪ Perte d'inertie et de confort d'été. ▪ Ponts thermiques non résolus. ▪ Perte de surface au sol. ▪ Finitions intérieures à remplacer. ▪ Continuité du pare-vapeur difficile à assurer. ▪ Installations électrique et de chauffage à revoir. ▪ Risque de gel des conduites dans les murs.
Par l'extérieur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Supprime les risques de ponts thermiques locaux. ▪ Protège le mur du gel et de la fissuration. ▪ Protège de la pénétration de la pluie battante. ▪ Améliore l'aspect en cas de revêtement abîmé. ▪ Conserve l'inertie. ▪ Conserve les finitions intérieures. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les retours des ouvertures doivent être isolés, les seuils et appuis remplacés, etc. ▪ Éventuellement, problèmes d'alignement des façades au droit des gouttières, mitoyens, etc. ▪ L'exécution de ce mode d'isolation doit être confiée à une entreprise spécialisée.

Tableau 3.5: synthèse Critères de sélection d'un mode d'isolation des murs [9].

Ce travail mène des études sur certains paramètres cruciaux " l'émissivité et l'épaisseur de la cavité d'air " qui influent sur la résistance thermique des matériaux dont les cavités d'air sont soumises à des transferts par convection naturelle. On tient compte des axes de symétrie en supposant chaque fois que le transfert est unidirectionnel et perpendiculaire à ces axes. La résistance des matériaux de construction et les charges appliquées sur un bâtiment ont une certaine variabilité dont il faut connaître les caractéristiques. Le propos permet de comprendre que, si la qualité thermique des matériaux n'est pas contrôlée, leur variabilité étant alors inconnue. La résistance thermique d'une couche d'air est dépendante du type de couche d'air, de la direction du flux thermique à travers la couche d'air, de son épaisseur, de la géométrie et de la pente de la couche d'air, de l'émissivité des surfaces délimitantes et des possibilités de ventilation de la couche d'air. Suivant les cas, la résistance thermique de la couche d'air peut être déterminée soit avec précision par des essais ou des calculs soit à l'aide des valeurs par défaut qui peuvent être sélectionnées dans des tableaux.

L'intensité du flux de chaleur dépend de sa direction, de la différence de température, de la nature et de l'épaisseur des matériaux. Dans notre cas, la résistance thermique de la cavité n'est pas calculée séparément mais est déjà comprise dans la valeur équivalente de l'élément de construction dans lequel cette cavité ou ce creux sont présents. Les valeurs de la résistance

thermique des cavités d'air traitées dans ce travail sont applicables aux couches d'air répondant à certaines conditions:

- la cavité doit être délimitée par deux plans parallèles qui sont perpendiculaires à la direction du flux thermique et dont les surfaces sont non réfléchissantes ($\rho = 0.9$).
- la couche d'air doit avoir une épaisseur (mesurée dans la direction du flux thermique) qui ne dépasse pas 300 mm;
- il ne doit y avoir aucune possibilité d'échange d'air entre la couche d'air et l'environnement intérieur.

Il est connu donc que l'intensité du rayonnement thermique provenant d'une surface dépend non seulement de la température de cette surface, mais aussi de son émissivité. D'une façon générale, la plupart des corps sont de bons émetteurs de rayonnement thermique, c'est-à-dire qu'ils rayonnent facilement de la chaleur sous forme d'énergie radiante infrarouge. L'émissivité d'un corps mesure son aptitude à émettre un rayonnement thermique. La plupart des matériaux de construction ont une émissivité de 0,9 environ, ce qui signifie qu'ils rayonnent 90% du maximum théorique d'énergie radiante correspondant à une température donnée.

Les figures 3.9 et 3.10 décrivent explicitement les mécanismes de transfert de chaleur dans une cavité d'air d'un matériau de construction. Ce sont des résultats qui ont été approuvés par Sivert Uvsløkk et Heidi Arnesen [11-13]. Les conditions principales pour les calculs sont les suivantes:

- L'épaisseur totale de l'élément de construction (isolation classique + cavités d'air) est constante égale à 200 mm.
- La conductivité thermique de l'isolation conventionnelle est 0.037 W/mK.
- Pas de fuites d'air à travers la cavité.
- Les températures intérieure et extérieure sont de l'ordre de 20 °C et 0 °C respectivement.

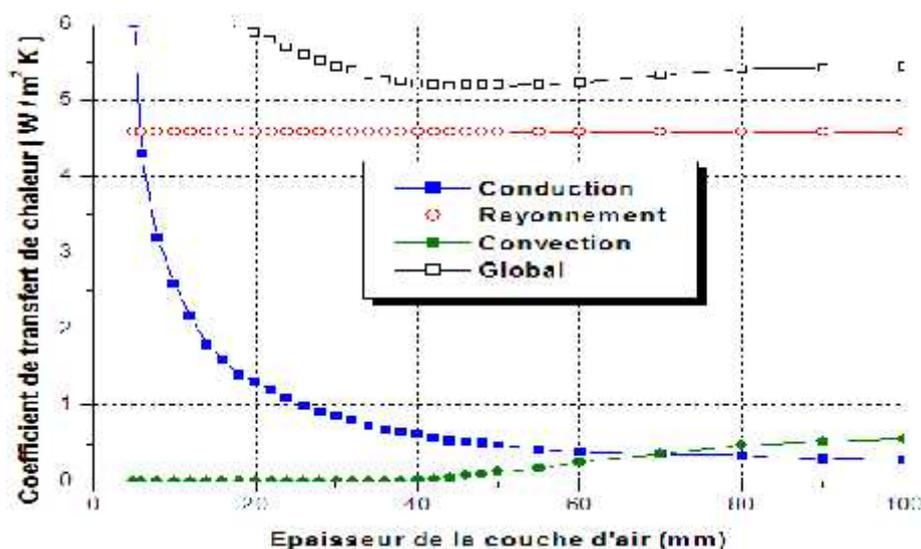


Figure 3.9: Coefficient de chaleur estimé en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air. Cas d'un matériau de construction ordinaire $\rho = 0.9$.

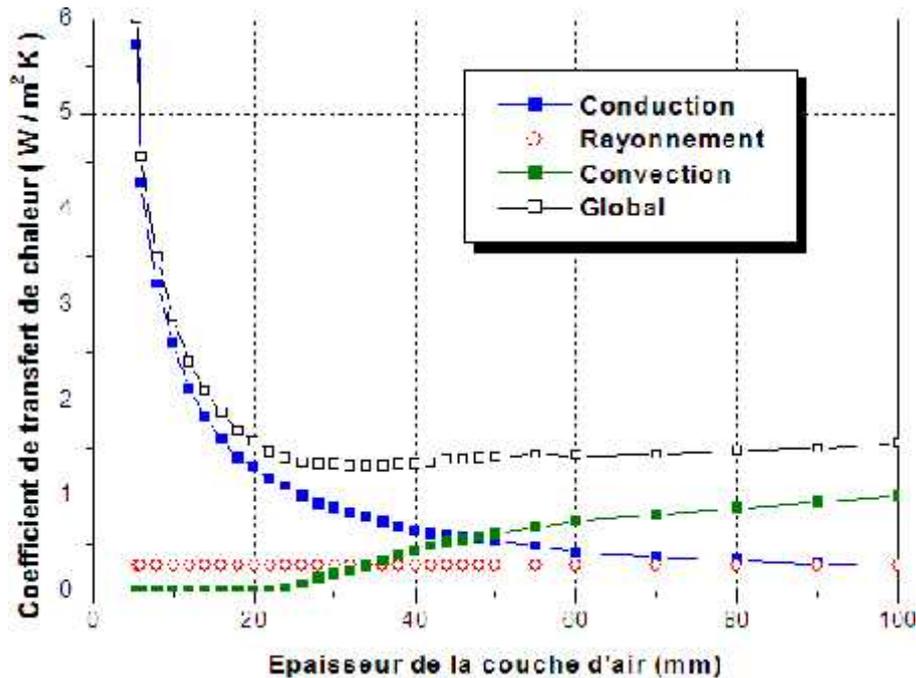


Figure 3.10: Coefficient de chaleur estimé en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air. Cas d'une cavité délimitée par un matériau réfléchissant $\epsilon = 0,05$.

Cette étude démontre que l'utilisation d'un matériau de construction de faible émissivité diminue l'échange de chaleur entre les parois de ses cavités. Ceci peut être justifié par le fait que l'échange de chaleur par rayonnement est proportionnel à l'émissivité des surfaces intérieures. On peut conclure aussi que l'épaisseur de la cavité d'air n'influe pas sur le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement.

Cependant, si nous proposons un mur qui est un ensemble d'éléments de maçonnerie moulé et qui présente un parement sur chacune des deux faces; c'est le cas d'un matériau réel constitué de plusieurs couches. On choisit un mur en parpaing par exemple. Le portrait de la figure 3.11 révèle de façon explicite l'effet de l'épaisseur de la cavité sur les valeurs de la résistance thermique de l'élément de construction suivant la norme ISO 15099:2003 [11-13]. Cette démarche a été suivie pour calculer la résistance thermique en fonction de l'épaisseur de la cavité pour un mur muni de cavités d'air.

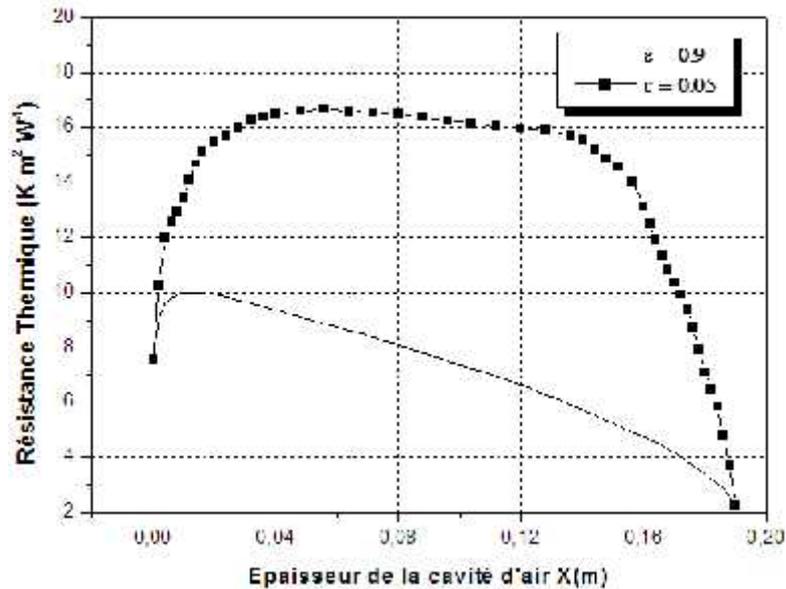


Figure 3.11: Résistance thermique en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air.

Dans d'autres calculs [11], les variations de résistance convective de la cavité d'air en 2D certifient que cette dernière dépend particulièrement de la différence de température entre l'air et la paroi. L'effet de la température T n'est pas assez important par rapport à sachant toujours que est en quelque sorte en relation avec T et l'épaisseur e . Nous avons démontré dans cette partie que l'échange de chaleur radiatif est le mécanisme dominant dans les cavités d'air fermées délimitées par des matériaux de construction ordinaires avec des émissivités supérieures ou égales à 0,9.

Mais en utilisant un film réfléchissant d'émissivité de l'ordre de 0,05 sur une surface de la cavité, le flux de chaleur par rayonnement est considérablement réduit. Dans la figure 3.11, une atténuation des résistances thermiques, provoquée par l'augmentation de l'épaisseur de l'air est observée à partir de l'épaisseur optimale $e = 1.4$ cm si l'émissivité est de l'ordre de 0,9. Toutefois et si la paroi de la cavité est de faible émissivité ou munie par exemple d'un film réfléchissant $\epsilon = 0.05$, l'épaisseur optimale augmente pour avoir une valeur équivalente à 5,6 cm.

3.3.3. Influence de l'épaisseur de la pierre sur les parois et sur l'air intérieur

Généralement, la pierre n'est plus un matériau très utilisé. Réputée chère et difficile à mettre en œuvre, elle disparaît progressivement de la construction neuve au profit du bloc béton ou de la brique.

Les logements traditionnels de Ghardaïa ont été notre source d'inspiration dans la proposition de cette étude. Cette région est caractérisée par la disponibilité de ce matériau. Il est adapté aux commodités de la vie contemporaine, tel que l'utilisation des matériaux locaux. La complexité mathématique de ces problèmes physiques n'est pas un critère suffisant pour juger si le

modèle du bilan énergétique de l'habitat est pertinent ou non: il existe des classes de modèles qui font appel à des outils mathématiques très complexes, telle la recherche opérationnelle.

Pour l'estimation des éclairagements reçus sur les différentes surfaces des murs, on utilise un programme de calcul de rayonnement conçu par MATLAB. Il a pour objectif, d'une part, d'identifier un modèle de connaissance (modèle de Perrin) et, d'autre part, de participer au développement de l'outil de simulation correspondant.

L'analyse par simulation vise à modéliser le comportement thermique d'un bâtiment heure par heure. Elle permet de déterminer quelques solutions améliorant les conditions de confort et les performances énergétiques de l'habitation. Un programme de simulation dynamique permet de calculer toutes les heures la température intérieure des pièces du bâtiment. La connaissance de l'évolution des températures permet de mieux appréhender les situations de confort ou d'inconfort rencontrées durant l'été et l'hiver et de calculer les besoins énergétiques en tenant compte des variations climatiques jour/nuit. Le programme utilisé permet de réaliser des simulations dès les premières esquisses du projet. Il permet aussi d'effectuer une comparaison entre les différentes températures de l'habitat. Pour ce faire, on prend l'exemple donné par la figure 3.12 qui représente les courbes des températures de chaque zone pour un ciel totalement clair, une vitesse de vent négligeable et une température ambiante comprise entre 27 et 39°C.

On remarque que la température de la pièce 2 est généralement la plus élevée. Ces résultats peuvent être justifiés sans doute par le nombre de murs exposés au soleil qui est plus grand. En partant de ce principe, on peut prévoir que les températures des toilettes et de la salle de bain sont les plus inférieures. On constate aussi que la température de l'air du séjour devient plus grande le soir et elle est par contre plus petite le matin par rapport à la température de la pièce 1. Tandis qu'on constate absolument le contraire pour la pièce 1. La raison c'est que les murs Sud et Est sont ceux qui sont exposés au soleil pour la pièce 1. Par contre, pour le séjour, c'est les murs Sud et Ouest qui sont exposés aux différentes conditions climatiques. Donc, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée le matin par les murs de la pièce 1 est plus grande par rapport à celle absorbée par les murs exposés du séjour et vice-versa.

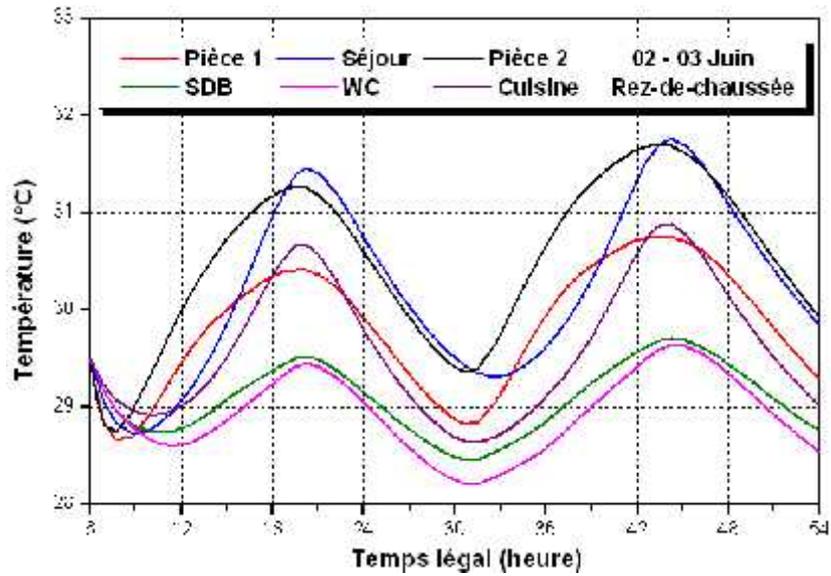


Figure 3.12: Températures intérieures de l'air, 02 - 03 Juin 2008

De plus, l'opinion commune est que des murs épais et denses protègent naturellement des fluctuations importantes de température et n'ont donc pas besoin d'isolation. C'est pour cette raison qu'on va chercher si l'épaisseur des murs suffit pour protéger la maison du froid et du chaud à travers les figures 3.13-3.16 qui représentent respectivement les variations de la température de l'air de la salle du séjour, de la toiture au niveau de sa surface intérieure et du mur sud sur ses deux surfaces superficielles. Les conditions extérieures correspondent à un ciel totalement clair, une faible vitesse de vent et une température ambiante comprise entre 27 et 39°C. On montre qu'un mur épais n'isole pas dans ces conditions mais il ralentit le transfert.

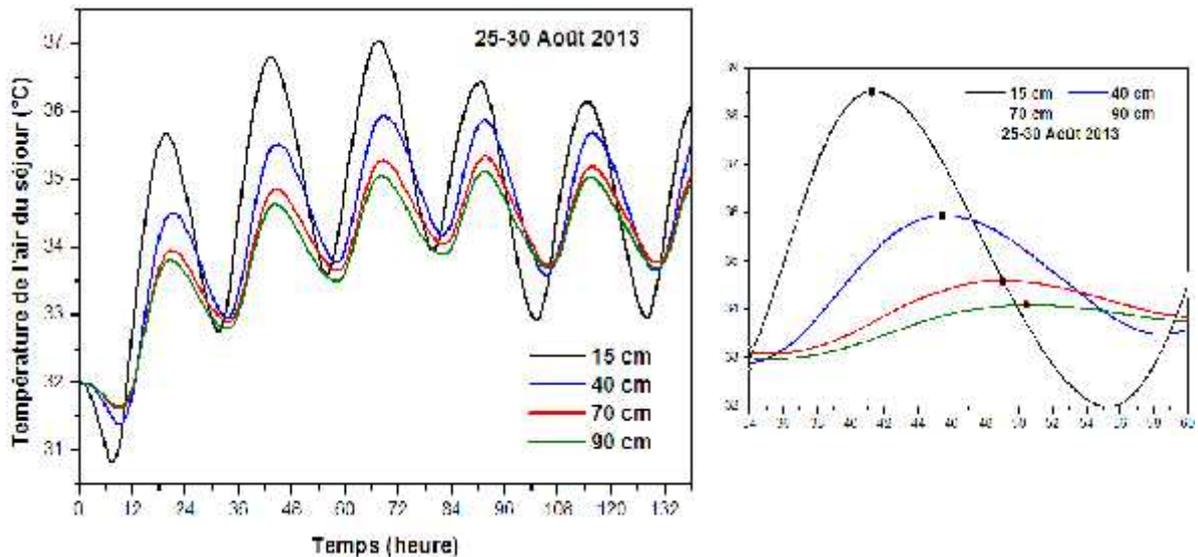


Figure 3.13: Température de l'air intérieure de la salle du séjour, 25 - 30 Août 2013.

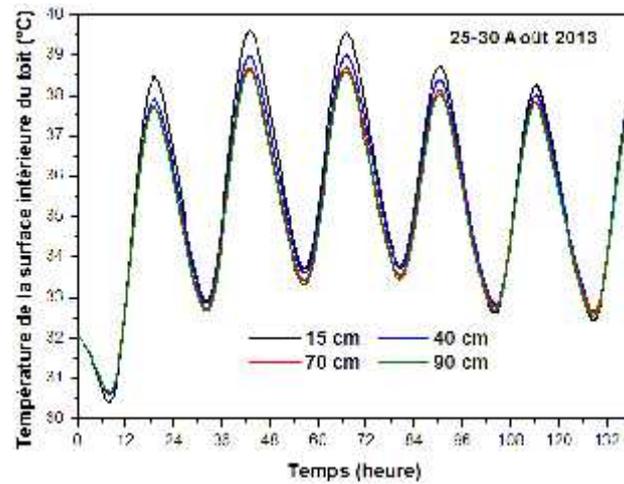


Figure 3.14: Températures de la surface intérieure du toit horizontal, 25 - 30 Août 2013.

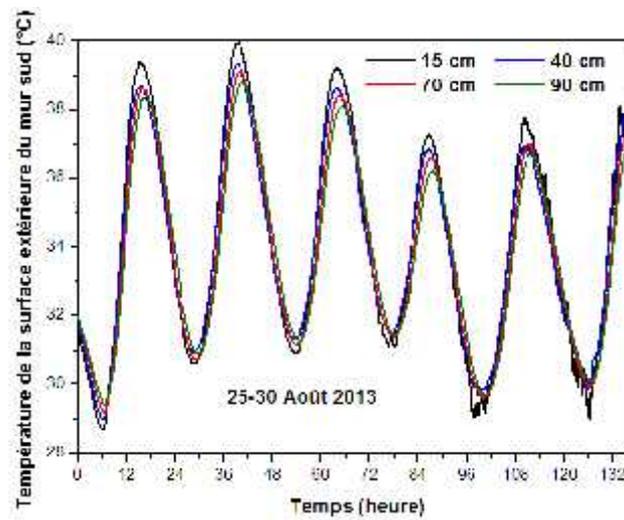


Figure 3.15: Températures de la surface extérieure du mur sud, 25 - 30 Août 2013.

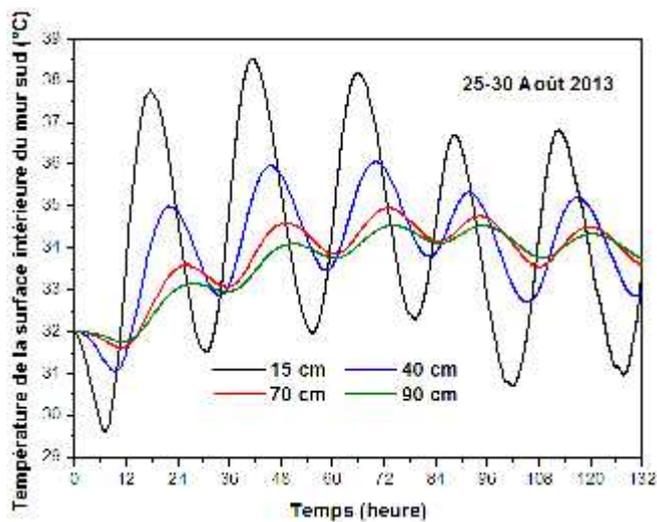


Figure 3.16: Températures de la surface intérieure du mur sud, 25 - 30 Août 2013.

A travers ces résultats, on pourra dire que la pierre ralentit, par son inertie, l'entrée de la chaleur qu'après un certain temps de déphasage selon l'épaisseur des murs. L'ambient intérieure reste frais en été grâce aux murs en pierre à forte inertie thermique. Ces murs épais possèdent un fort déphasage permettant de faire entrer la fraîcheur la nuit dans le mur puis de la restituer la journée. Pour cela, la pierre deviendra le matériau idéal: dense, apte à stocker et conductrice pour favoriser le stockage à condition qu'il existe des nuit fraîches.

Effectivement, c'est là le problème dans ces régions: en été, les températures ambiantes extérieures restent presque tout le temps élevées même durant la nuit. L'inertie thermique consiste alors en une accumulation de la chaleur dans l'enveloppe pour une restitution intérieure par radiation. La complexité de ce phénomène réside en ce que le flux de chaleur à travers l'enveloppe augmente successivement la température des matériaux ce qui permet d'augmenter en même temps la température de l'air de l'habitat.

Selon les figures 3.13-3.16, nous déduisons qu'en faisant varier l'épaisseur du mur, on pourra jouer sur le déphasage. Plus un matériau est épais plus il déphase. C'est logique la chaleur se déplace lentement dans celui-ci. On peut retenir d'après ces simulations que l'inertie thermique des murs dans ces situations joue un rôle négatif, elle permet uniquement de limiter les fluctuations des températures à cause de l'absence de fraîcheur de la nuit qui devrait être issue de l'air ambient extérieure .

On peut constater aussi, selon la figure 3.16, que les murs extérieurs sont plus sensibles en terme de température vu que les fluctuations causées par les conditions climatiques extérieures sont très importantes. En conséquence, on peut dire que l'inertie thermique que possède cette construction peut être bénéfique pour le confort intérieur lors de la période hivernale puisque la température extérieure durant la journée peut atteindre un niveau satisfaisant. Si non, l'optimisation de la forme (la compacité) et la structure fonctionnelle de la construction doivent aussi constituer un autre travail pertinent pour les deux saisons.

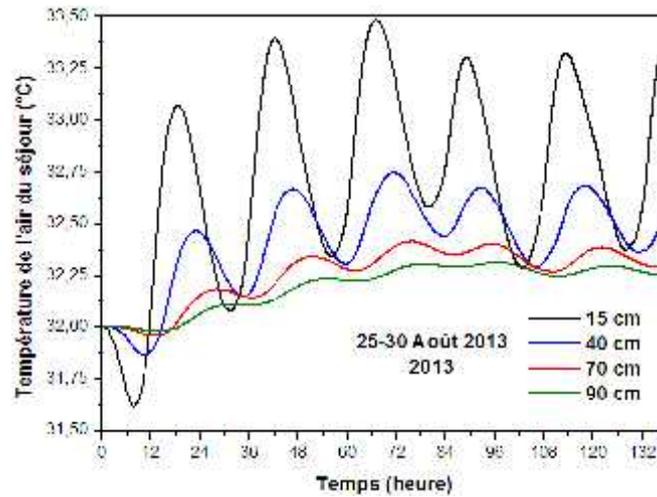


Figure 3.17: Température de l'air intérieure de la salle du séjour pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013.

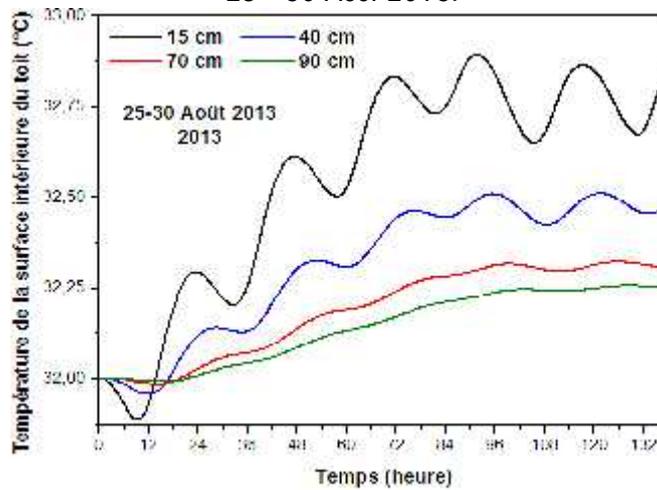


Figure 3.18: Températures de la surface intérieure du toit pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013.

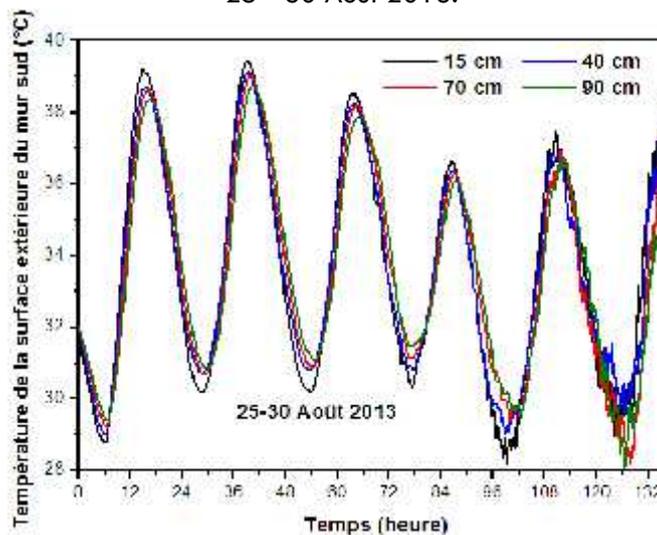


Figure 3.19: Températures de la surface extérieure du mur sud pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013.

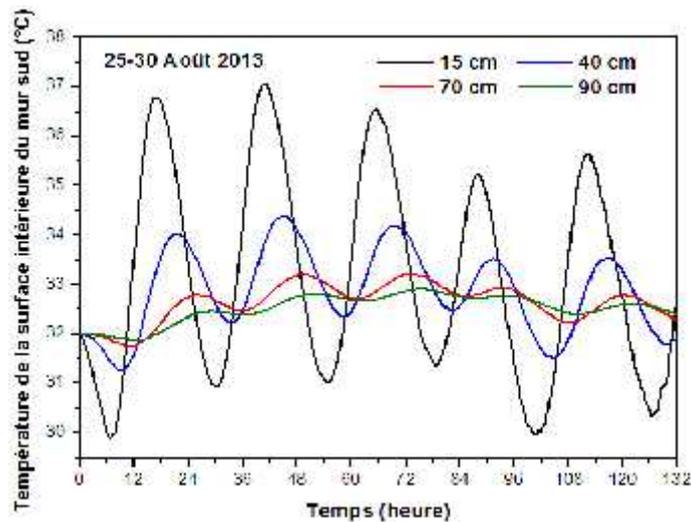


Figure 3.20: Températures de la surface intérieure du mur sud pour une bonne compacité, 25 - 30 Août 2013.

Nous avons supposé dans le précédent exemple une construction pleinement exposée; au niveau de sa toiture et au niveau de ses quatre façades, il en résulte une très mauvaise compacité. Une bonne solution pour analyser l'effet de la géométrie de la construction sur la consommation d'énergie est d'utiliser un indicateur appelé indice de compacité qui est défini comme le rapport entre la somme de toutes les surfaces qui sont en contact avec l'extérieur et le volume du bâtiment. Par la suite, nous considérons une construction mitoyenne avec une meilleure compacité (un faible indice de compacité).

De même, les figures 3.17-3.20 représentent respectivement les variations de la température de l'air de la salle du séjour, de la toiture au niveau de sa surface intérieure et du mur sud sur ses deux surfaces superficielles.

3.3.4. Orientation: les effets du soleil sur la température et les apports solaires

Les bâtiments passifs offrent l'opportunité aux concepteurs de choisir librement le design et les matériaux destinés à la construction. Lorsque l'on conçoit un bâtiment à basse consommation ou passif, il faut bien comprendre que tous les aspects du bâtiment sont liés les uns aux autres, y compris l'orientation. Bien que l'orientation des bâtiments au sud apporte des avantages en termes d'énergie, l'expérience et notre théorie a prouvé que le concept est également fonctionnel pour les sites sahariens.

La réduction des besoins de chauffage et de refroidissement à l'aide d'un système solaire passif dépend de l'orientation de la maison et de ses fenêtres. Le besoin de refroidissement apparaît au début du printemps et peut constituer un problème. De grandes fenêtres orientées au sud peuvent améliorer le confort d'habitation, mais nécessitent des solutions suffisantes pour contrôler la température intérieure et empêcher le sur chauffage.

3.3.4.1. Température

L'influence de l'orientation sur les températures intérieures a été étudiée selon le niveau de compacité du bâtiment. Les figures ci-dessous représentent respectivement les variations de la température de l'air de la salle du séjour, de la toiture au niveau de sa surface intérieure et du mur sud sur ses deux surfaces superficielles. En faisant tourner l'habitat vers l'Est par 90° , 180° et 270° , nous pouvons effectuer une étude comparative qui sera confiée à l'effet de l'orientation sur les différentes températures.

Les figures 3.21-3.24 donnent les courbes des différentes températures dans le cas où la construction est pleinement exposée (très faible compacité; indice de compacité élevé).

Selon les figures 3.21 et 3.22, on peut conclure que les températures de l'air et de la surface intérieure du toit ne sont pas influencées considérablement par le changement d'orientation. Ceci est dû à la mauvaise compacité de la construction même si elle est fermée et étanche. La quantité d'énergie qui caractérise le transfert de chaleur à travers toute l'enveloppe est très élevée. En revanche, l'influence de l'orientation est observée aux niveaux des températures des surfaces superficielles des parois opaques (murs et toitures) exposées directement aux conditions climatiques extérieures, ce qui est confirmé par les courbes tracées dans les figures 3.23 et 3.24. L'ordre des valeurs suit exactement le scénario observé pour le comportement de l'éclairement solaire incident pour un ciel clair tout en respectant l'orientation du mur. Les températures obtenues sont très loin de la température du confort (27°) et l'optimisation de l'orientation n'est pas importante pour une construction de faible compacité.

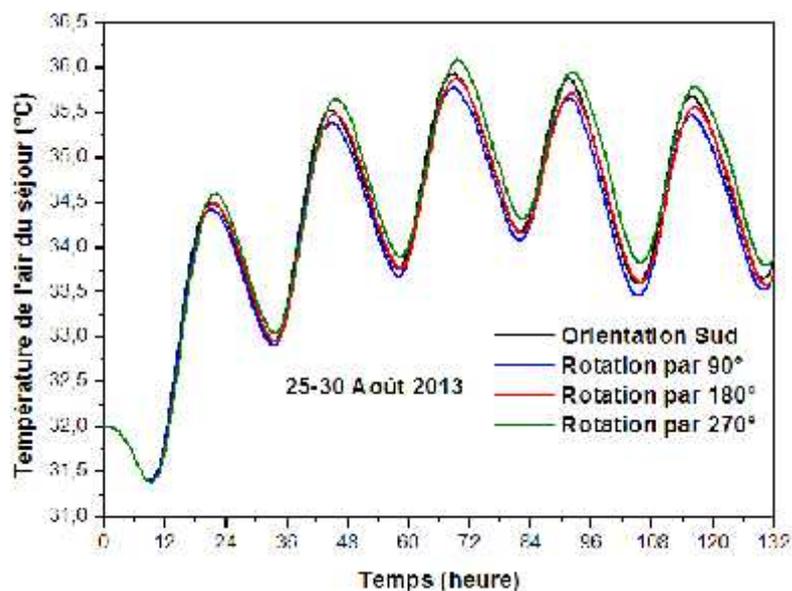


Figure 3.21: Température de l'air intérieure de la salle du séjour, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

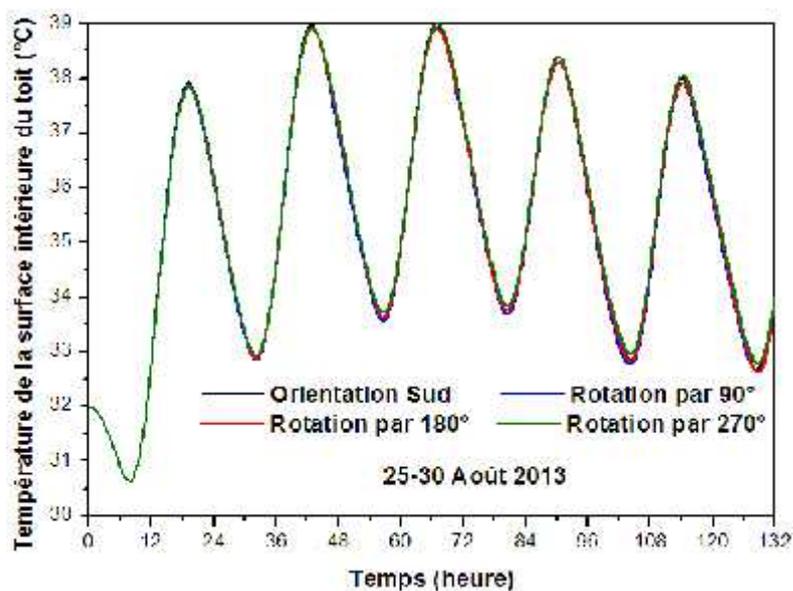


Figure 3.22: Températures de la surface intérieure du toit horizontal, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

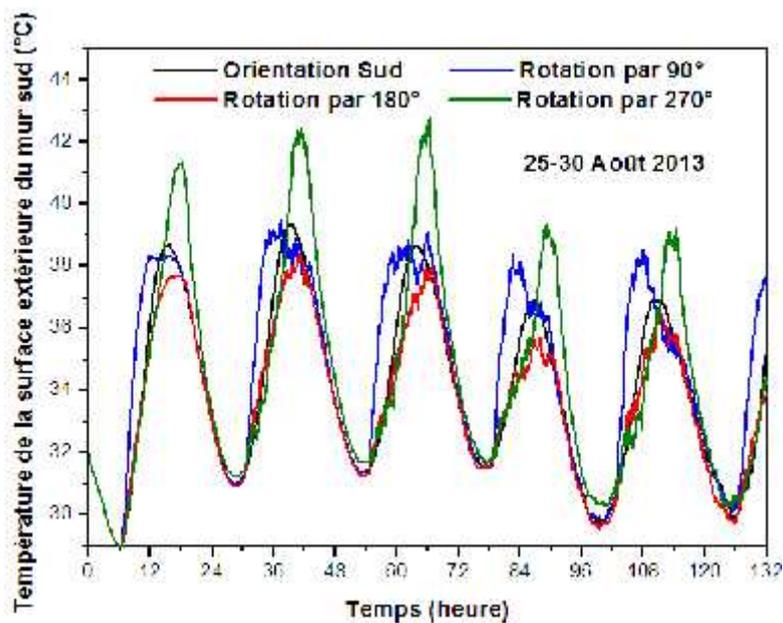


Figure 3.23: Températures de la surface extérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

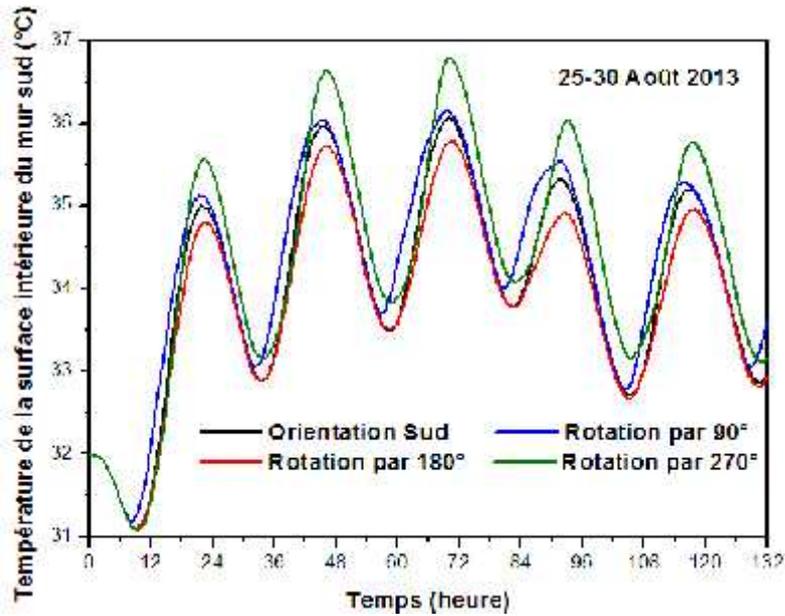


Figure 3.24: Températures de la surface intérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

Faisant suite à cette étude, nous pouvons confirmer que les études sur la compacité des bâtiments résultent non seulement de la recherche d'économie d'énergie à long terme mais également de la limitation simultanée des investissements grâce à la diminution des surfaces des parois d'échange extérieures.

La forme, le design et le mode de contact de chaque construction sont des éléments déterminants qui affectent le confort intérieur en générale et les températures intérieures en particulier. Pour cela, il convient de positionner l'aspect orientation dans le cas d'une compacité plus favorable pour obtenir l'orientation la plus adéquate qui permet de minimiser les températures intérieures. Les figures 3.25-3.28 donnent une idée sur les profils des différentes températures en considérant que cette construction est mitoyenne avec automatiquement une compacité plus favorable.

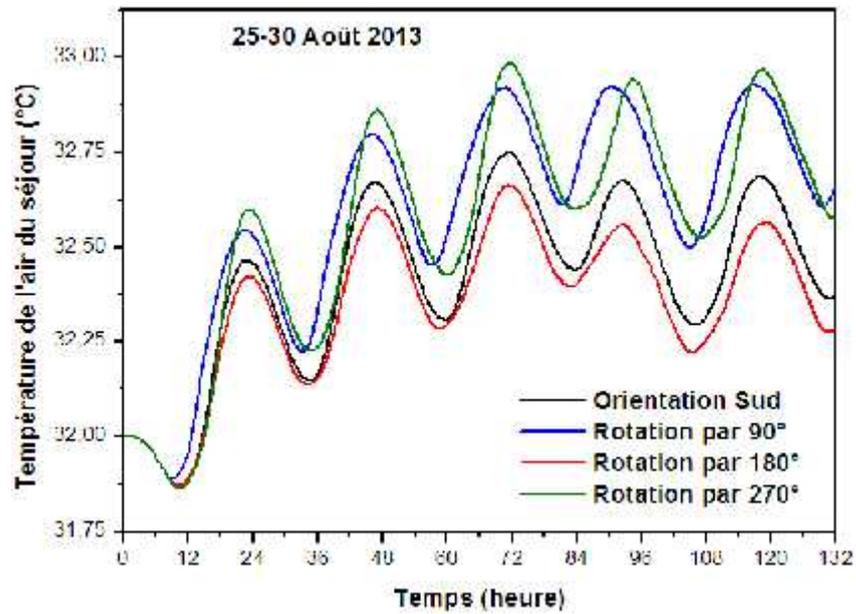


Figure 3.25: Température de l'air intérieure de la salle du séjour, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

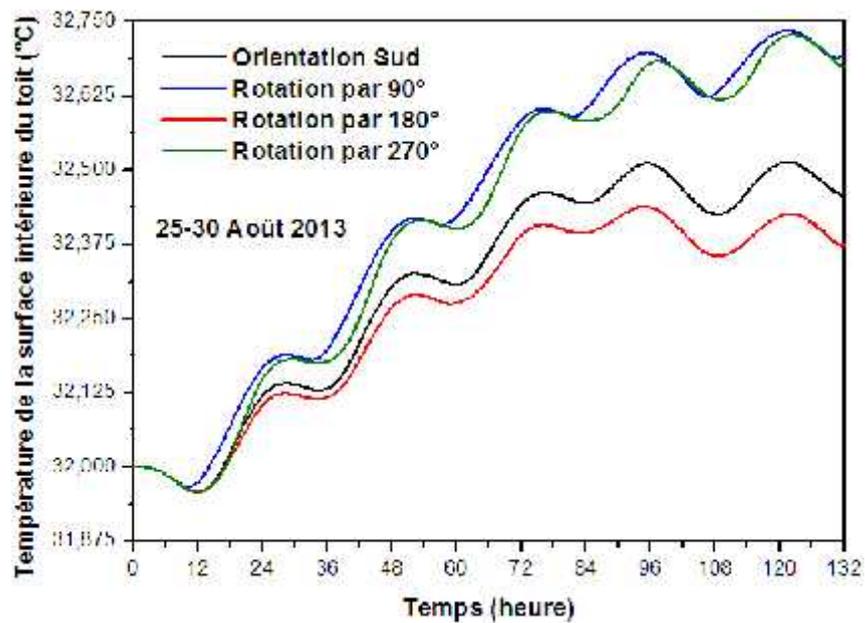


Figure 3.26: Températures de la surface intérieure du toit horizontal, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

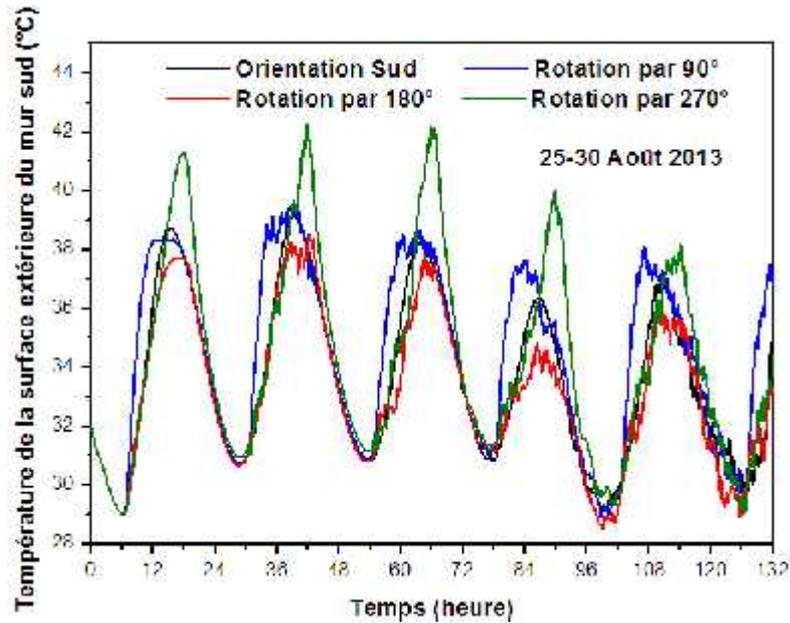


Figure 3.27: Températures de la surface extérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

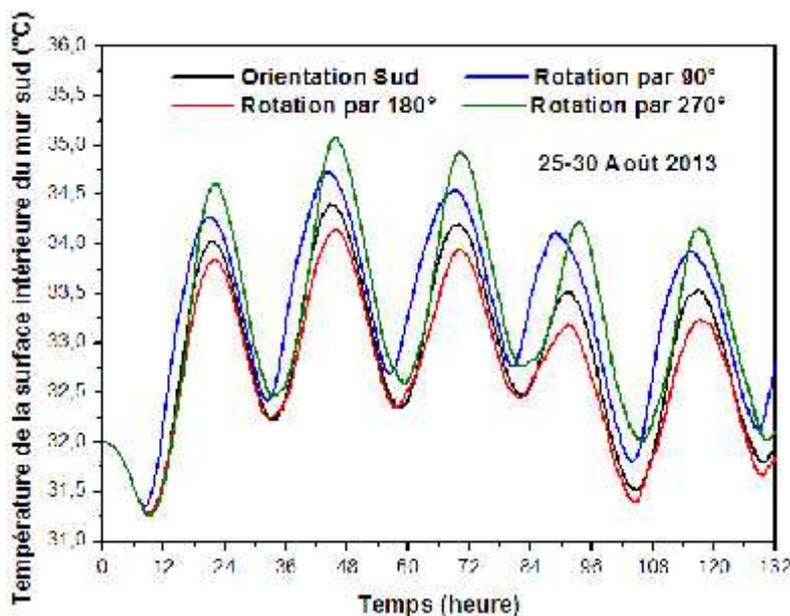


Figure 3.28: Températures de la surface intérieure du mur sud, rotation de l'habitat vers l'Est, 25 - 30 Août 2013.

Les résultats cette fois-ci certifient qu'une compacité plus favorable génère une stabilisation des températures résultantes et minimise donc les fluctuations, en gardant toujours à l'esprit que les murs extérieurs sont plus sensibles en terme de température si on change une orientation quelconque, vu que les fluctuations causées par les conditions extérieures sont très importantes. Pour le choix de l'orientation, par le biais de cette simulation et en période estivale, nous estimons que les orientations nord et sud présentent un très petit avantage si on prend comme référence la température de l'air.

La différence entre les autres valeurs n'est pas significative quelle que soit l'orientation. Nous pouvons donc déduire à travers ces travaux qu'en milieu saharien et lors d'une période chaude que la sélection d'une orientation optimale sans tenir compte de la compacité ne va pas apporter un plus au confort intérieur en général. Mais nous savons que l'orientation sud est prioritaire si on veut appliquer les règles de la conception bioclimatique.

3.3.4.2. Apports solaires

Dans la présente partie, on s'intéresse à l'influence de l'orientation sur les apports solaires. Ces apports représentent l'énergie solaire introduite par l'ensoleillement direct via les vitrages et par transmission surfacique des parois en contact avec l'extérieur. C'est tout simplement l'énergie captée dans un bâtiment sous forme de chaleur sans disposition spéciale de captage (à travers les ouvertures). Nous devons aménager alors ces bâtiments en fonction des apports solaires afin de profiter " passivement " de la chaleur et de la lumière du soleil.

La première façon de gérer les apports solaires est de penser à l'architecture et à l'orientation de la maison.

Les apports solaires dépendent du site où se situe le bâtiment, des surfaces réceptrices et de l'orientation.

$$Q_s = 24 \quad I_{sj} S_{sj} \quad (3.8)$$

$$S_{sj} = A S F_s \quad (3.9)$$

Pour le Nord, $F_s = 0.89$,

Pour le Sud, $F_s = 0.72$,

Pour l'Est et l'Ouest, $F_s = 0.67$,

Pour la menuiserie bois $S = 0.44$,

Pour la menuiserie PVC $S = 0.42$,

Pour la menuiserie $S = 0.46$.

S mesure donc la contribution d'un vitrage à l'échauffement de la pièce.

Applications Numériques

Surface des ouvertures coté Sud = 3.36 m²

Surface des ouvertures coté Nord = 3.36 m²

Surface des ouvertures coté Est = 2.068 m²

Surface des ouvertures coté Ouest = 2.5080 m²

Ensuite, on détermine S_{sj} :

$$S_{s_Sud} = 3.36 \times 0.44 \times 0.72 = 1.0644 \text{ m}^2$$

$$S_{s_Nord} = 3.36 \times 0.44 \times 0.89 = 1.3158 \text{ m}^2$$

$$S_{s_Est} = 2.068 \times 0.44 \times 0.67 = 0.6096 \text{ m}^2$$

$$S_{s_Oust} = 2.5080 \times 0.44 \times 0.67 = 0.7394 \text{ m}^2$$

Donc on peut écrire que :

$$Q_s = I_{s_Sud} S_{s_Sud} + I_{s_Nord} S_{s_Nord} + I_{s_Est} S_{s_Est} + I_{s_Ouest} S_{s_Ouest} \quad (3.10)$$

Dans toute l'Algérie, peu de stations de mesure fournissent des données répondant directement à nos besoins. Mis à part ces stations, la seule source de données est l'Atlas Solaire de l'Algérie [14]. Un programme de calcul sous Excel a été adopté par M R Yaiche [15] en choisissant deux approches théoriques qui sont valables pour un ciel totalement clair. Pour l'estimation des irradiations incidentes sur un plan horizontal, il avait utilisé le modèle de Perrin de Brichambaut.

Il a ensuite exploité ces valeurs afin d'estimer le mieux possible le rayonnement solaire incident sur un plan incliné mais en utilisant dans ce cas le modèle de Liu Jordan. Il a procédé à ce choix car de nombreuses études [15-19] menées par plusieurs chercheurs soulignent et prouvent que ces deux approches donnent généralement de bons résultats. L'objectif était donc de fournir des données concernant le rayonnement solaire avec une couverture géographique continue.

L'utilisation des approches mathématiques s'est donc immédiatement imposée que se soit pour la réalisation des programmes et codes ou pour la modélisation d'un tel dispositif solaire. Les tableaux ci-après donnent les valeurs calculées de l'irradiation journalière pour toutes les journées de l'année et pour les quatre orientations.

La figure 3.29 obtenue représente la variation du gain solaire journalier moyen calculé pour chaque mois selon les quatre orientations classiques: Sud, Nord, Est et Ouest. Nous illustrons ensuite par la cinquième courbe (noire), la variation du gain solaire journalier moyen de l'habitat orienté plein Sud en considérant qu'il n'y a pas d'ouvertures dans la façade Nord.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
01	6578	6815	6173	4684	3185	2286	2134	2693	3837	5129	6098	6466
02	6584	6809	6129	4633	3148	2270	2142	2720	3879	5166	6120	6476
03	6589	6792	6092	4579	3109	2255	2150	2748	3921	5210	6137	6481
04	6593	6784	6051	4525	3072	2240	2159	2779	3969	5250	6157	6496
05	6598	6775	6013	4474	3032	2224	2168	2808	4014	5285	6173	6367
06	6602	6760	5970	4416	2997	2211	2179	2837	4056	5324	6196	6375
07	6606	6749	5930	4366	2961	2199	2190	2871	4101	5358	6211	6388
08	6609	6737	5890	4312	2927	2188	2201	2902	4143	5400	6229	6396
09	6775	6718	5840	4258	2893	2175	2214	2932	4191	5437	6242	6404
10	6783	6704	5794	4207	2858	2165	2227	2966	4233	5470	6259	6411
11	6791	6688	5751	4150	2826	2156	2241	2997	4275	5510	6270	6424
12	6799	6662	5700	4100	2790	2148	2257	3029	4320	5542	6291	6431
13	6806	6644	5656	4047	2759	2137	2273	3066	4368	5577	6301	6439
14	6808	6625	5607	3997	2727	2131	2288	3098	4413	5611	6316	6446
15	6814	6601	5562	3941	2697	2125	2305	3131	4454	5641	6326	6453
16	6821	6580	5512	3892	2666	2120	2322	3167	4498	5678	6335	6470
17	6826	6548	5466	3839	2638	2115	2340	3201	4539	5706	6348	6477
18	6832	6529	5411	3790	2610	2112	2359	3243	4587	5738	6357	6484
19	6836	6501	5364	3739	2580	2107	2378	3282	4628	5766	6374	6491
20	6841	6470	5312	3688	2553	2105	2399	3322	4671	5796	6381	6498
21	6844	6444	5260	3637	2526	2104	2420	3367	4711	5822	6389	6505
22	6837	6416	5212	3586	2501	2104	2441	3407	4755	5855	6400	6512
23	6840	6383	5156	3539	2477	2104	2463	3450	4794	5880	6407	6523
24	6841	6345	5107	3490	2452	2106	2486	3491	4841	5908	6413	6530
25	6842	6314	5055	3443	2430	2108	2509	3532	4880	5931	6429	6536
26	6837	6278	5005	3392	2408	2110	2537	3576	4923	5957	6435	6542
27	6837	6245	4952	3348	2384	2114	2561	3617	4969	5987	6436	6549
28	6835	6212	4902	3306	2364	2117	2586	3664	5008	6008	6446	6555
29	6833		4845	3268	2343	2122	2611	3706	5050	6033	6456	6561
30	6825		4791	3225	2324	2128	2637	3750	5088	6052	6461	6566
31	6820		4741		2307		2666	3792		6080		6572
Total	209682	184128	170249	117871	83544	64586	72843	99144	134116	175107	189393	200824
Moy	6764	6576	5492	3929	2695	2153	2350	3198	4470	5649	6313	6478

Tableau 3.6: Irradiations solaires journalières, totales mensuelles et moyennes, incidentes sur un capteur vertical orienté en plein Sud

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
01	250	281	339	460	1020	1883	2093	1325	672	447	353	275
02	250	282	341	468	1044	1907	2079	1299	657	444	350	273
03	250	284	344	476	1067	1932	2064	1274	642	442	347	272
04	250	286	346	485	1091	1956	2047	1249	628	439	344	270
05	250	288	349	494	1112	1976	2029	1222	613	436	341	268
06	251	289	351	506	1135	1997	2010	1195	598	433	338	267
07	251	292	353	524	1160	2017	1990	1169	584	430	335	266
08	251	294	356	541	1191	2037	1968	1141	569	427	332	265
09	252	295	358	559	1221	2054	1947	1117	556	424	329	263
10	252	298	360	577	1249	2071	1924	1097	549	421	326	262
11	253	300	363	594	1278	2086	1901	1076	542	418	323	261
12	254	301	365	612	1304	2100	1877	1055	535	415	321	260
13	255	304	368	630	1331	2110	1852	1035	529	412	318	259
14	256	306	370	648	1357	2121	1827	1014	523	409	315	258
15	257	308	373	665	1384	2131	1803	992	516	405	312	257
16	258	310	375	683	1408	2139	1779	970	510	403	310	256
17	259	312	378	700	1433	2146	1754	948	504	399	307	256
18	260	314	380	718	1457	2152	1727	926	498	396	304	255
19	261	316	382	736	1479	2154	1701	903	492	393	302	254
20	262	319	385	754	1502	2157	1674	880	487	390	300	253
21	264	321	387	770	1526	2158	1646	858	481	387	297	253
22	265	323	392	793	1554	2158	1592	835	476	384	295	252
23	266	325	397	820	1617	2157	1540	812	471	381	292	252
24	268	327	403	846	1680	2154	1514	791	467	378	290	251
25	269	330	410	872	1710	2150	1486	776	464	374	288	251
26	271	332	416	897	1738	2144	1464	761	461	371	286	251
27	272	334	423	923	1764	2137	1442	746	459	368	283	250
28	274	337	430	947	1790	2127	1420	732	456	365	281	250
29	275		437	973	1815	2117	1396	716	453	362	279	250
30	277		445	996	1840	2106	1373	702	450	359	277	250
31	279		453		1863		1349	687		356		250
Total	8062	8608	11829	20667	44120	62534	54268	30303	15842	12468	9375	8010
Moy	260	307	382	689	1423	2084	1751	978	528	402	312	258

Tableau 3.7: Irradiations solaires journalières, totales mensuelles et moyennes, incidentes sur un capteur vertical orienté vers le Nord

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
01	2339	2996	3535	4095	4266	4274	4189	4009	3829	3353	2917	2480
02	2345	3018	3547	4110	4267	4273	4185	4006	3817	3340	2902	2472
03	2351	3036	3563	4123	4265	4273	4181	4002	3804	3332	2884	2462
04	2358	3058	3577	4134	4266	4272	4176	4001	3796	3321	2868	2457
05	2366	3080	3592	4148	4260	4268	4172	3997	3786	3308	2850	2314
06	2373	3100	3605	4156	4261	4268	4168	3992	3772	3297	2836	2310
07	2381	3122	3620	4168	4258	4266	4163	3994	3760	3283	2818	2307
08	2389	3145	3635	4178	4258	4265	4159	3989	3745	3274	2803	2304
09	2560	3164	3644	4186	4257	4261	4154	3984	3736	3262	2785	2300
10	2575	3186	3655	4197	4254	4259	4149	3982	3720	3247	2769	2297
11	2590	3208	3668	4202	4253	4258	4144	3976	3704	3237	2752	2296
12	2606	3225	3676	4212	4246	4256	4142	3970	3691	3222	2739	2294
13	2623	3247	3689	4218	4244	4247	4137	3970	3680	3209	2722	2292
14	2638	3268	3699	4227	4240	4245	4132	3964	3665	3196	2707	2291
15	2655	3287	3711	4229	4238	4243	4126	3958	3648	3180	2690	2289
16	2673	3307	3719	4237	4234	4241	4121	3954	3633	3169	2674	2292
17	2691	3323	3731	4241	4232	4239	4115	3947	3615	3153	2659	2292
18	2710	3344	3736	4248	4230	4236	4109	3943	3602	3138	2644	2292
19	2729	3364	3747	4252	4221	4231	4103	3935	3583	3122	2632	2292
20	2749	3381	3754	4255	4219	4228	4100	3927	3567	3108	2616	2293
21	2769	3401	3761	4257	4214	4225	4094	3925	3548	3091	2601	2294
22	2785	3421	3930	4259	4211	4222	4088	3916	3532	3078	2589	2296
23	2805	3437	3946	4264	4287	4219	4027	3910	3512	3061	2574	2299
24	2826	3451	3967	4265	4285	4216	4025	3901	3421	3046	2560	2302
25	2847	3469	3985	4269	4286	4213	4022	3891	3410	3029	2550	2304
26	2866	3485	4005	4266	4288	4210	4026	3884	3402	3013	2537	2308
27	2888	3503	4021	4269	4282	4208	4023	3874	3395	3000	2523	2311
28	2910	3520	4040	4269	4283	4200	4020	3869	3384	2982	2512	2315
29	2931		4052	4271	4280	4196	4017	3859	3374	2967	2502	2319
30	2951		4067	4267	4280	4192	4013	3850	3362	2949	2491	2324
31	2973		4084		4280		4013	3838		2935		2329
Total	82252	91546	116961	126472	131945	127204	127293	122217	108493	97902	80706	72027
Moy	2653	3269	3773	4216	4256	4240	4106	3942	3616	3158	2690	2323

Tableau 3.8: Irradiations solaires journalières, totales mensuelles et moyennes, incidentes sur un capteur vertical orienté vers l'Est et Ouest

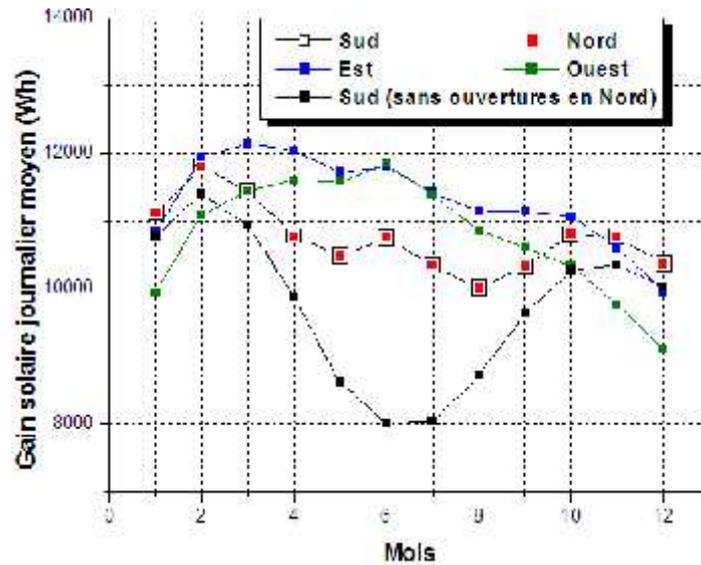


Figure 3.29: variation du gain solaire journalier moyen mensuel

La figure 3.29 montre que pour se protéger des surchauffes d'été, il est recommandé de choisir l'orientation Sud entre Mars et Septembre et l'orientation Ouest pour le mois d'Octobre. En outre, afin de bénéficier des apports solaires, nous devons choisir l'orientation Sud entre Novembre et Janvier et l'orientation Ouest pour le mois de Février. Par conséquent, on peut dire que l'orientation dominante est celle du Sud. Même si on se réfère aux remarques des mois de Février et d'Octobre, nous pouvons constater que la différence des gains d'énergie solaire n'est pas vraiment considérable par rapport aux gains de l'orientation Sud. On peut déduire aussi de cette étude que la fermeture des ouvertures de la façade Nord réduit sensiblement le gain solaire direct par temps chaud.

Par ailleurs, suivant l'orientation, une ouverture verticale peut être facilement gérée par rapport aux apports solaires. A l'inverse, les surfaces horizontales captent peu d'énergie en hiver et apportent des surchauffes en été. La façade est considérée donc comme élément initial fondamental de la conception. La partie des murs et autres supports concernés par cette vue depuis l'extérieur fait la plupart du temps l'objet d'une attention particulière de conception et de réalisation.

3.3.4.3. Intégration des brises soleil

La fonction principale d'un système d'ombrage est la protection de l'enveloppe transparente du bâtiment à partir du rayonnement solaire dans des conditions estivales, empêchant ainsi la surchauffe en bloquant l'accès de l'écoulement de l'énergie non souhaitée dans le bâtiment. Parmi les diverses solutions d'ombrage et afin de limiter cette charge thermique, l'interception du rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la surface vitrée, par l'utilisation de

dispositifs d'ombrage extérieurs, est la plus efficace [20]. Ce type d'intégration consiste à placer un capteur PV par exemple au-dessus de vitrage pour protéger le bâtiment d'une surchauffe l'été. Cette technique architecturale n'est pas spécifique aux capteurs PV. Ce dispositif, aussi connu sous le nom de masque intégré, est même couramment employé dans la conception bioclimatique.

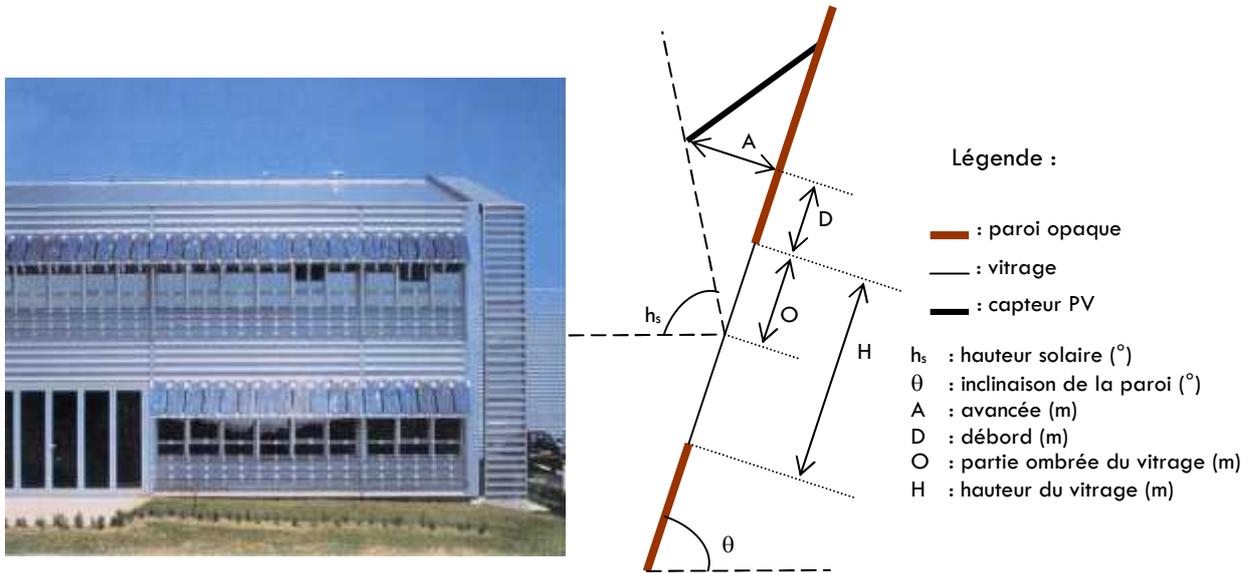


Figure 3.30: intégration de type brise-soleil

Le rayonnement incident sur le vitrage est atténué par le brise-soleil. Cela peut se traduire par un facteur d'atténuation du rayonnement, qui sera le rapport entre la surface ombrée et la surface totale du vitrage. Il est supposé que la largeur du brise-soleil soit suffisamment grande, ce qui permet d'effectuer des calculs à une dimension (suivant la hauteur du vitrage). Le calcul de l'atténuation n'est pas le même suivant que l'on considère la partie directe ou diffuse du rayonnement incident dans le plan du vitrage (le brise-soleil n'a pas d'influence sur la partie réfléchi du rayonnement).

Pour la partie directe du rayonnement, le facteur d'atténuation F_B se calcule grâce aux lois géométriques qui relient la partie ombragée O aux autres paramètres indiqués dans la figure 3.30 [20]:

$$F_B = \frac{O}{H} \quad (3.11)$$

$$O = \frac{A \left(\tan(h_s) - \frac{1}{\tan \theta} \right)}{1 + \frac{\tan(h_s)}{\tan \theta}} - D \quad (3.12)$$

En première approximation, le facteur d'atténuation de la partie diffuse du rayonnement F_D peut se calculer en effectuant le rapport entre l'angle sous lequel le brise soleil est vu depuis le vitrage, ceci suivant les deux directions principales (zenith et azimut) [20]:

$$F_D = \frac{\arctan\left(\frac{A}{(D + (H/2))}\right)}{\pi - \theta} + \frac{\pi - 2\theta}{2\pi - 2\theta} \quad (3.13)$$

Si le capteur PV est semi-transparent, l'effet de masque n'est plus le même comparé à un capteur totalement opaque. Dans ce cas, il faut introduire un coefficient C_{ST} qui permet de prendre en compte la semi-transparence sur l'effet de masque. Si les cellules PV sont uniformément réparties sur toute la surface du capteur, le nouveau facteur d'atténuation F_B peut se calculer de la manière suivante [20]:

$$\begin{aligned} F'_B &= C_{ST} F_B = C_{ST} \frac{O}{H} \\ C_{ST} &= (1 - \xi) + \tau_V \xi \\ \xi &= \frac{(1 - S_{cel})}{S_{tot}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

D'après les expressions (3.12) et (3.14), le facteur d'atténuation se calcule comme suit [20]:

$$F'_B = \frac{C_{ST}}{H} \left[\frac{A \left(\tan(h_s) - \frac{1}{\tan \theta} \right)}{1 + \frac{\tan(h_s)}{\tan \theta}} - D \right] = \frac{1}{H} \left[\frac{C_{ST} A \left(\tan(h_s) - \frac{1}{\tan \theta} \right)}{1 + \frac{\tan(h_s)}{\tan \theta}} - C_{ST} D \right] \quad (3.15)$$

Autrement dit, le masque semi-transparent d'avancée A , de débord D et de coefficient C_{ST} est équivalent à un masque opaque d'avancée $A' = C_{ST} A$ (ce qui revient à supprimer la partie transparente du masque), et de débord $D' = C_{ST} D$ (le débord n'a pas d'effet sur la partie opaque du masque). L'effet de masque sur le bâtiment du capteur PV intégré en brise-soleil calculé a été calculé ci-dessus.

Pour notre cas :

 $H = 0.9 \text{ m}$

 $O = 0.9 \text{ m}$

 $= 90^\circ$

 $D = 0 \text{ m}$

Des composants photovoltaïques peuvent être mis en œuvre pour former des protections solaires au-dessus des vitrages, sur les deux niveaux H et D . La figure 3.31 donne quatre exemples pour les deux saisons (hivernale et estivale), et ceci pour une latitude correspondant à

la ville de Ghardaïa. Les calculs effectués correspondent à des avancées horizontales. En ce qui concerne les capteurs PV, il est préférable que les avancées soient inclinées de manière à maximiser le rendement des modules photovoltaïques.

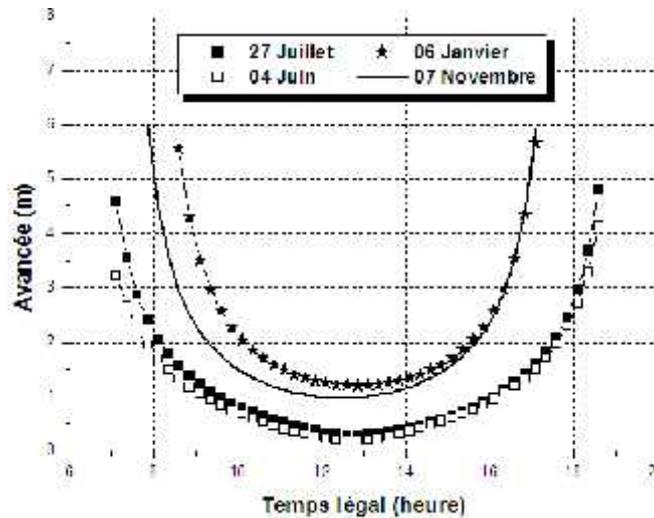


Figure 3.31: dimension de l'avancée suivant le temps légal

L'observation des résultats atteste que l'ombrage total du vitrage n'est pas fourni tout au long de la journée, en particulier juste après le lever du soleil et avant le coucher du soleil. Il est nécessaire d'insérer dans la toiture une avancée "au lever du soleil" autour de 4,5 et 3,2 m pour les jours indiqués en Juin et Juillet.

Pour le coucher du soleil, il est essentiel d'inclure une protection d'environ 4,8 et 4,1 m de dimension afin de garantir des solutions d'ombrage total, ce qui n'est pas évident pour une seule surface vitrée de (0,9 m x 0,8 m).

Faisant suite à ces résultats, nous pouvons déduire qu'il est indispensable d'optimiser les ouvertures en terme de : design, de géométrie, d'inclinaison et d'orientation pour assurer un ombrage total.

3.4. Conclusion

Dans le domaine de l'énergétique des bâtiments, le modèle numérique prédictif est devenu en quelques années un outil très utilisé et pertinent. Par l'intermédiaire de ces modèles, notre contribution s'attachera à caractériser le comportement thermique d'une paroi.

Pour faire, en toute connaissance de cause, des choix constructifs qui améliorent les performances de leurs projets en la matière, les maîtres d'œuvre doivent connaître avec précision l'impact de l'inertie thermique sur le confort. De même, les murs épais, ne peuvent pas apporter une isolation et un confort suffisants, ni réduire correctement les consommations d'énergie.

Ils doivent donc être isolés. Il en ressort les conclusions suivantes:

- L'épaisseur des murs assure une forte inertie thermique.
- On déduit qu'il existe une forte relation entre la forme du bâtiment et la demande en énergie du bâtiment, une économie d'énergie pourra être possible avec des réductions importantes par rapport au cas de référence.
- Généralement, plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus la température maximale atteinte et les variations de température jour/nuit sont faibles. Ces deux résultats ne sont pas parfois favorables au confort thermique pour certaines constructions dans les régions arides et semi-arides. Ceci est justifié par le fait que le phénomène de stockage de la fraîcheur nocturne qui est restituée dans la journée est absent.

L'isolation thermique par l'extérieur s'impose donc comme étant performante et meilleure solution.

En effet, les murs extérieurs représentent en moyenne 20% de la déperdition de chaleur dans un bâtiment [21-22]. L'isolation des murs extérieurs est donc une priorité pour réduire la consommation énergétique des bâtiments. L'isolation thermique par l'extérieur se révèle bien souvent la solution idéale sur le plan thermique mais aussi sur le plan pratique. L'isolation par l'extérieur permet d'obtenir une forte inertie thermique à l'intérieur du bâtiment, c'est à dire une forte capacité à stocker de la chaleur dans ces murs. Plus l'inertie d'un bâtiment est forte, plus il se réchauffe et se refroidit lentement. Une forte inertie peut être un atout pour le confort d'été de jour car elle amortit les pics de surchauffe. Une bonne ventilation la nuit devra permettre d'évacuer la chaleur accumulée pendant la journée.

Les murs à cavité possèdent un avantage important par rapport aux murs de maçonnerie massive du fait qu'ils permettent d'avoir une protection contre les conditions climatiques extérieures puisqu'ils ont un meilleur coefficient d'isolation thermique. Les paramètres régissant le problème sont l'épaisseur optimale de la cavité, le nombre de Rayleigh et l'émissivité du matériau utilisé.

En effet l'air est un bon isolant thermique s'il est immobile mais au delà d'un seuil, il se passe un phénomène de convection d'où une circulation naturelle de l'air même s'il se trouve dans une cavité close, il prend les calories coté chaud pour les rendre coté froid. En dessous des seuils, il n'y a pas assez d'espace pour amorcer cette convection.

Le transfert de chaleur par rayonnement est fortement affecté par l'émissivité des parois des cavités. Ce transfert à travers la cavité augmente rapidement avec l'émissivité dans un élément de maçonnerie en général. Certains problèmes du confort thermiques pourront être évités grâce donc à la combinaison de différents éléments : compréhension des principes fondamentaux, spécifications tenant compte du climat et information des praticiens concernant la performance réelle du matériau de construction utilisé.

L'orientation et les ouvertures se font dans l'axe Sud afin de capter un maximum de lumière et de chaleur, c'est ce que l'on appelle les apports passifs. Il faut protéger et limiter les ouvertures au Nord afin de minimiser les déperditions thermiques du bâtiment. La mise en place de casquettes ou balcons dans l'architecture, sont calculés en rapport de la hauteur du soleil suivant les saisons. Le but étant de bloquer les rayons entrant l'été ou de les laisser pénétrer l'hiver pour réchauffer l'habitat. Une technique architecturale, pour maîtriser les apports solaires consiste à utiliser des brises et/ou des stores extérieurs. Ces dispositifs doivent être contrôlables électriquement et permettent de faire varier la température intérieure de la maison en régulant les quantités d'apports solaires.

Les caractéristiques des vitrages doivent répondre à des préoccupations parfois contradictoires : profiter des apports solaires en hiver et les limiter en été et limiter le facteur solaire tout en profitant de l'éclairage naturel. Donc, si l'on ne prend en compte que le seul critère thermique et si une protection solaire très efficace n'est pas prévue, une limitation des espaces vitrés par exemple s'impose dans une maison individuelle bien isolée et avec des apports internes moyens ou élevés, quelle que soit son orientation. Des composants photovoltaïques peuvent être mis en œuvre aussi pour former des protections solaires au-dessus des vitrages. Le rayonnement incident sur le vitrage est atténué par le brise-soleil. Cela peut se traduire par un facteur d'atténuation du rayonnement, qui sera le rapport entre la surface ombrée et la surface totale du vitrage.

Références

- [01] : Lou Chesné, vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques, thèse de Doctorat, Centre de Thermique de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole Doctorale MEGA Année 2012.
- [02] : Bencheikh Hamida, Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporative dans les climats chauds et arides, Thèse de Doctorat Es science Option : Architecture, Université Mentouri de Constantine 2007.
- [03] : Jean Pierre Oliva, L'Isolation écologique. Conception, matériaux, mise en œuvre, Ed. Terre Vivante, 2001.
- [04] : Thierry Gallauziaux, David Fedullo, Le Grand livre de l'isolation, Ed. Eyrolles, 2009.
- [05] : Mazria, E. (1979). The passive solar energy book. Rodale Press, Inc., Emmaus, PA, USA.
- [06] : Camous, R. et Watson, D. (1983). L'habitat bioclimatique. L'Etincelle.
- [07] : M.A.C. Haddam, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz et M.R. Yaïche, Impact de l'inertie thermique de la pierre sur les températures intérieures d'un habitat situé au Sahara Algérien, Premier Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR 2010 Ghardaïa, 11-12 Octobre 2010.
- [08] : S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Thèses de Doctorat en Sciences Physiques, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Juin 2009.
- [09] : www.editionsdumonde.com, Complément technique, Janvier/Février 2012, Source : Dr ingénieur Reinhardt Geisler, Isofloc.
- [10] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaïche et N Benamrane, Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate, Elsevier, Energy and Buildings vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [11] : S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaïche et N Benamrane, Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance, International Journal of Energy and Environment, Volume 4, Issue 3, 2013 pp. 459-466.
- [12] : ISO 15099:2003, Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations.
- [13] : Uvsløkk, S. (1998). Undersøkelse av U-verdi til vegg med uventilert hulrom og, Thermo – brite III radiant barrier, som dampspærre, Oslo, Norway (In Norwegian).
- [14] : M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome1, vol 1 et 2, Modèles théoriques et expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [15] : M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 683 – 695.
- [16] : M. R. Yaïche, A. Bouhanika, S. M. A. Bekkouche, A. Malek, T. Benouaz, Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration, Elsevier Energy Conversion and Management 82 (2014) 114–123.

- [17]: M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Conception et validation d'un logiciel sous Excel pour la modélisation d'une station radiométrique en Algérie cas d'un ciel totalement clair, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°4 (2009) 677 – 688.
- [18]: M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire direct en Algérie, cas d'un ciel clair, *Revue Internationale d'Héliotechnique Energie - Environnement - N° 39* (2009) 50-55.
- [19]: M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie, cas d'un ciel totalement clair, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°3 (2008) 423 – 436.
- [20]: M. A. C. Haddam, S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M. K. Cherier, N. Benamran, Integration of eaves and shading devices for improving the thermal comfort in a multi-zone building, *Thermal Science*, 2014, doi: 10.2298/TSC1140422117H.
- [21]: M. Hamdani, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, A New modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in saharan climate, *Thermal Science*, 2014, doi: 10.2298/TSC1131217026H.
- [22]: M. Hamdani, S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, R. Belarbi, M. K. Cherier, Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate, *Engineering Structures and Technologies*, Taylor & Francis: ISSN 2029-882X / EISSN 2029-8838 2014 6(3): 131–149, doi:10.3846/2029882X.2012.988756.

Chapitre 4

Une Démarche Complémentaire à la Voie Passive, Compacité et Débord de Toiture

CHAPITRE 4

UNE DEMARCHE COMPLEMENTAIRE A LA VOIE PASSIVE & COMPACITE ET DEBORD DE TOITURE

4.1. Introduction

Un bâtiment, qu'il soit à usage d'habitation ou tertiaire, est un environnement complexe de par sa géométrie et ses sollicitations nombreuses et fluctuantes dans le temps et de par la nature multiple des transferts de masse et de chaleur dont il est le siège. Sauf exceptions, chaque bâtiment est un prototype unique pour lequel l'étude expérimentale de sa conception est irréalisable en pratique. Par conséquent, la conception des bâtiments, et plus précisément l'évaluation de leurs performances thermo-aérauliques doit être assistée par la modélisation des phénomènes physiques [1].

En Algérie, les conditions climatiques ne correspondent pas souvent aux zones de confort. On utilise alors différents moyens afin que le climat intérieur se différencie du climat extérieur et assure le confort. Avant de recourir au chauffage ou à la climatisation, de nombreuses possibilités sont utilisables: utiliser les gains internes, favoriser les apports solaires passifs, augmenter la masse thermique du bâtiment, ventiler la nuit...etc. Pour limiter la consommation d'énergie à des valeurs raisonnables, il est nécessaire de savoir où agir. La connaissance des flux d'énergie au travers un bâtiment est nécessaire à la prise de décisions ou à la planification de travaux.

Si nous nous contentons des performances basées sur la réglementation thermique en vigueur pour prédire la maison de demain, il est recommandé d'appliquer le concept de maison à basse énergie qui accorde une grande importance à l'architecture notamment à l'intégration de concepts énergétiques passifs.

On s'intéresse dans ce chapitre aux débords de toiture et à la compacité.

Avant tout, une modélisation du comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment multizone est proposée dans ce travail. Cette modélisation dispose de tous les éléments nécessaires pour représenter le comportement de l'humidité de manière réaliste, en particulier ses interactions avec la température. On verra ensuite dans quelle mesure les avant-toits et la compacité peuvent contribuer à l'amélioration du confort intérieur.

4.2. Modélisation thermo-aéraulique

La réalité physique se manifeste par des phénomènes simples en apparence, mais elle reste cependant complexe. Ainsi, pour mieux la comprendre, nous sommes contraints de la remplacer par de "l'invisible compliqué" qui décrit le comportement thermo-aéraulique des bâtiments multizones. La majorité de ces phénomènes est liée non seulement à l'humidité, mais également à la température et/ou aux mouvements d'air. Seul un modèle couplé thermo-aéraulique permet de les étudier de manière complète. Toutefois, la majorité des codes de simulation énergétique des bâtiments néglige l'humidité de l'air, où bien, la représente de manière très simplifiée.

L'énergie ne peut ni se créer ni se détruire mais uniquement se transformer d'une forme à une autre (principe de Mayer) ou être échangée d'un système à un autre (principe de Carnot). La théorie ou le modèle proposé dans ce cas est un ensemble conceptuel formalisé mathématiquement dans lequel ces relations permettent de prédire de façon quantitative le résultat en utilisant un bilan sensible et un bilan latent.

4.2.1. Bilan enthalpique

Soit une zone i en contact avec $N+1$ autres zones (la zone $N^{\circ} 0$ est l'extérieur), la variation d'enthalpie par unité de temps s'écrit pour la zone i [2]:

$$\frac{dH(i)}{dt} = H^e(i) - H^s(i) + \sum_{j=i}^{NW(i)} h_{cij} (T_{sij}(i) - T_{al}(i)) + P_1 + P_s + CI_s + CI_e \quad (4.1)$$

$$H^e(i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^e(n, i) (T_{al}(n) C_{as} + r_s(n)) (L_v + C_v T_{al}(n))_e \quad (4.2)$$

$$H^s(i) = (T_{al}(i) C_{as} + r_s(i)) (L_v + C_v T_{al}(i)) \sum_{n=0}^N Q_{mas}^s(i, n) \quad (4.3)$$

$\sum_{j=i}^{NW(i)} h_{cij} (T_{sij}(i) - T_{al}(i))$: Expression de flux convectifs échangés entre les surfaces j de température T_{sij} de la zone i et l'air de cette zone de température $T_{al}(i)$. [3]

4.2.2. Bilan massique d'air

En thermique du bâtiment, les variations de masse dm_{as}/dt dans le temps représentent des quantités faibles, ce qui nous permet de simplifier l'équation de conservation de la masse d'air dans le local i [2]:

$$\sum_{n=0}^N Q_{\text{mas}}^e(n, i) - Q_{\text{mas}}^s(i, n) = \frac{dm_{\text{as}}}{dt} \approx 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^N Q_{\text{mas}}^e(n, i) = \sum_{n=0}^N Q_{\text{mas}}^s(i, n) \quad (4.4)$$

De cette équation, nous pouvons considérer que la somme des débits massiques d'air sec entrant dans la zone i est égale à la somme des débits sortant de la zone i . Cette équation permet de simplifier les bilans enthalpiques.

4.2.3. Bilans sensible et latent

L'équation du bilan enthalpique s'écrit par [2]:

$$H(i) = H_s(i) + H_L(i) = m_{\text{as}} C_{\text{as}} T_{\text{al}}(i) + m_{\text{as}} r_s(i) (L_v + C_v T_{\text{al}}(i)) \quad (4.5)$$

On peut négliger le terme $m_{\text{as}} C_v T_{\text{al}}(i)$ si on le compare avec la quantité $m_{\text{as}} L_v r_s(i)$, $L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ et $C_v = 1.96 \text{ kJ/kg K}$. On peut supposer dans ce cas les approches suivantes [2]:

$$H_s(i) \approx m_{\text{as}} C_{\text{as}} T_{\text{al}}(i) \quad (4.6)$$

$$H_L(i) \approx m_{\text{as}} r_s(i) L_v \quad (4.7)$$

Cette simplification permet d'écrire 2 équations de bilan enthalpique [2]:

$$\frac{dH(i)}{dt} = \frac{dH^e(i)}{dt} - \frac{dH^s(i)}{dt} \quad (4.8)$$

4.2.3.1. Bilan sensible

Dans le domaine de la thermique de l'habitat, les variations de masse dans le temps représentent des quantités très faibles. Par conséquent la variation d'enthalpie peut être assimilée par la variation des températures [2]:

$$\frac{dH_s(i)}{dt} = \frac{d(m_{\text{as}} C_{\text{as}} T_{\text{al}}(i))}{dt} = C_{\text{as}} \frac{dm_{\text{as}}}{dt} T_{\text{al}}(i) + C_{\text{as}} \frac{dT_{\text{al}}(i)}{dt} m_{\text{as}} \quad (4.9)$$

$$\frac{dH_s(i)}{dt} = H_s^e(i) - H_s^s(i) + \sum_{j=i}^{NW(i)} S_j h_{\text{cij}} (T_{\text{sij}}(i) - T_{\text{al}}(i)) + P_s + CI_s \quad (4.10)$$

$$\rho_{\text{as}} C_{\text{as}} V(i) \frac{dT_{\text{al}}(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{\text{mas}}^e(i, n) C_{\text{as}} (T_{\text{al}}(n) - T_{\text{al}}(i))] + \sum_{j=i}^{NW(i)} [S_j h_{\text{cij}} (T_{\text{sij}}(i) - T_{\text{al}}(i))] + P_s + CI_s \quad (4.11)$$

Nous obtenons un système de N équations avec N inconnus qui sont la température d'air de chaque zone. Les températures de surface T_{sij} peuvent être obtenues en établissant le bilan thermique des murs.

4.2.3.2. Bilan latent

De la même manière, en négligeant le terme dm_{as}/dt et en utilisant l'équation simplifiée de conservation de la masse d'air sec, nous obtenons l'équation 12 [2]:

$$\frac{H_L(i)}{dt} = H_L^c(i) - H_L^s(i) + P_L + CI_L \quad (4.12)$$

$$m_{as}(i) = \frac{V(i)}{v_s(i)} \quad (4.13)$$

$$\frac{dH_L(i)}{dt} = \frac{d(m_{as} r_s(i) L_v)}{dt} = L_v \frac{dm_{as}}{dt} r_s(i) + L_v \frac{dr_s(i)}{dt} m_{as} \quad (4.14)$$

$$m_{as}(i) \frac{dr_s(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^e(i, n) (r_s(n) - r_s(i))] + \frac{P_L}{L_v} + \frac{CI_L}{L_v} \quad (4.15)$$

Comme pour le bilan sensible, nous obtenons un système de N équations avec N inconnus qui représentent les humidités spécifiques d'air de chaque zone. Les températures de surface T_{sij} peuvent être obtenues en établissant le bilan thermique des murs.

On peut aussi utiliser directement la formule empirique de Nadeau and Puiggali [4]. L'humidité spécifique peut être donnée en fonction de l'humidité relative par les relations suivantes:

$$H_s = \frac{0.622 P_{sat}(T) Hr}{101325 - P_{sat}(T) Hr} \quad (4.17)$$

$$P_{sat}(T) = e^{23.3265 - \frac{3802.7}{T} - \frac{472.68}{T^2}} \quad (4.18)$$

Pour les échanges superficiels et par conduction, nous utilisons les équations données dans le chapitre 2.

4.3. Validation des résultats

Notre étude s'est focalisée cette fois-ci sur un bureau (figure 4.1) à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa. Celui-ci a une surface habitable de 15.98 m² (4.7 x 3.4) dont la hauteur des murs est de 3.5 m. Un certain nombre d'informations sont connectés à un nœud type, traduisant par exemple l'affectation de ce nœud dans une zone ou encore la topologie du réseau électrique global associé. En effet, par rapport aux équations, les nœuds

sont concernés par des phénomènes différents. Ensuite, il apparaît nécessaire d'attribuer un type à chaque nœud. Pour une construction donnée, lorsque la structure de nœuds est établie, il est facile de remplir chaque élément du modèle mathématique. En effet, il suffit de balayer la structure de nœuds et d'attribuer les termes pertinents.

Pour ce bureau, l'enveloppe de la paroi Sud est exposée à l'environnement extérieur, est constituée d'une structure lourde en pierre de 40 cm d'épaisseur entourée de deux couches ayant respectivement une épaisseur de 1,5 cm de plâtre, 1 cm de ciment de mortier et un revêtement de finition intérieure. Les parois internes ou les murs de séparation du côté du hall sont considérées comme structures en parpaing entourées de deux couches de mortier de ciment de 1,5 cm d'épaisseur et deux couches de revêtement de finition (enduit de plâtre).

Dans cette partie, une étude expérimentale a été effectuée ce qui nous a permis de décrire l'évolution de la température intérieure de ce bureau. L'obtention des données s'est achevée en utilisant quatre stations météorologiques calibrées de haute précision. La figure 4.3 ci-dessous donne des interfaces décrivant les évolutions instantanées des différents paramètres. Les valeurs obtenues sont des moyennes de n'importe quelle grandeur. Les capteurs ont été placés de telle sorte qu'on tient en compte chaque fois du phénomène de stratification de l'air. La collecte des données de l'ambiance extérieure sera par transmission.

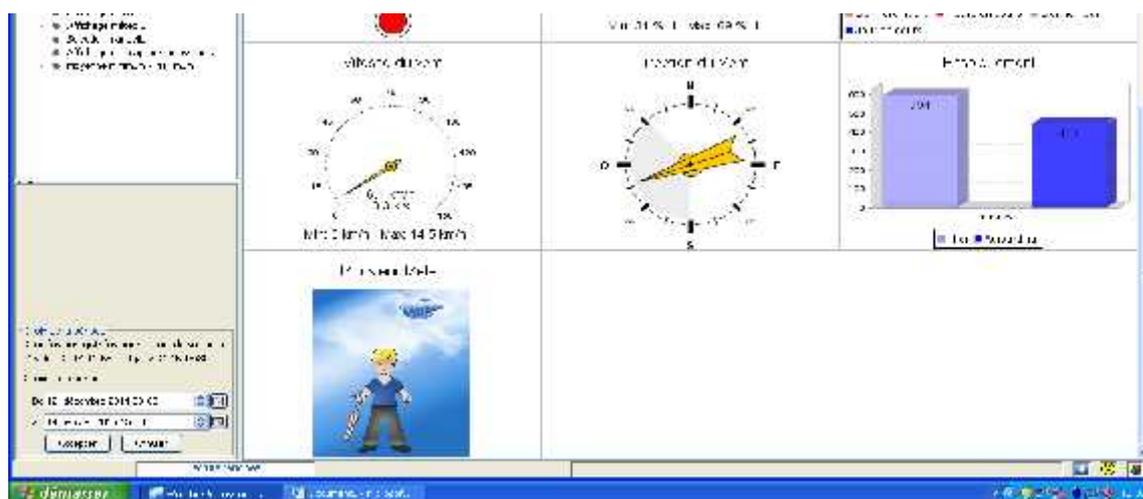
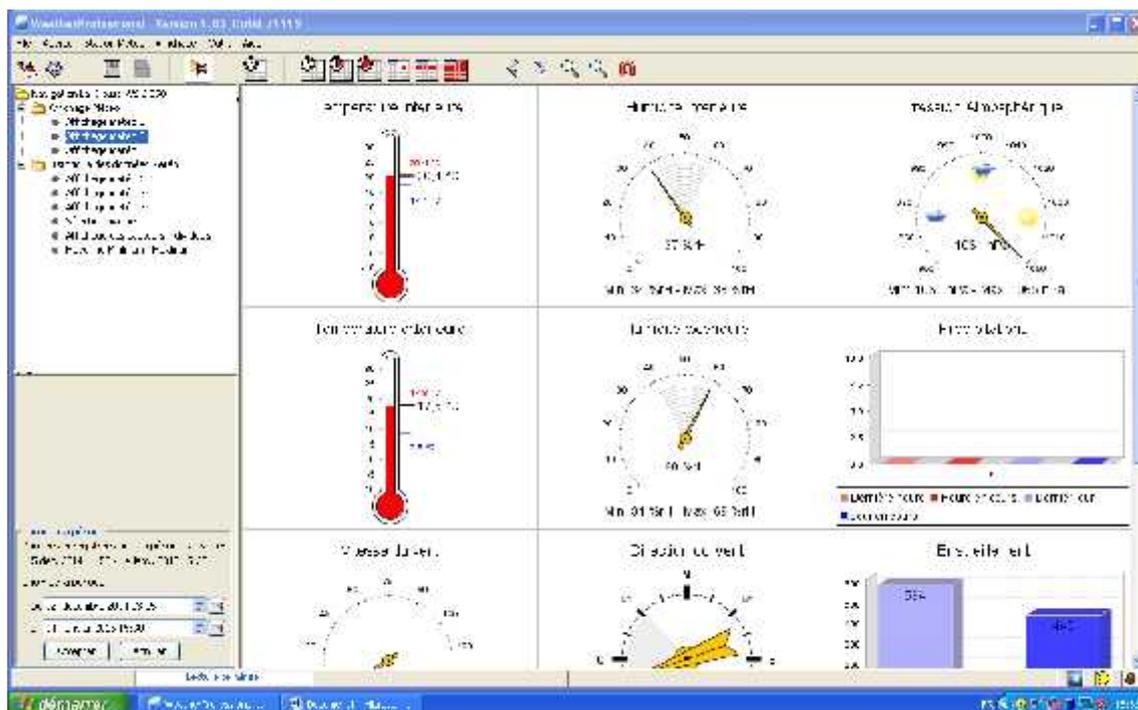
L'exemple ci-dessous illustre certaines données pour une période ventée et très perturbée caractérisée par un comportement aléatoire que se soit pour la vitesse du vent ou en ce qui concerne l'humidité, allant du 16 au 20 décembre 2014. La durée d'insolation enregistrée du 15/12 (vers 12 :00) au 20/12 (à 13 :00) s'élève à 3000 minutes, ce qui prouve que le ciel est peu nuageux durant cette période.



Figure 4.1 : Photo générale décrivant la position du bureau



Figure 4.2 : Photo prise pour les stations météorologiques : (a) anémomètre, (b) Consol.



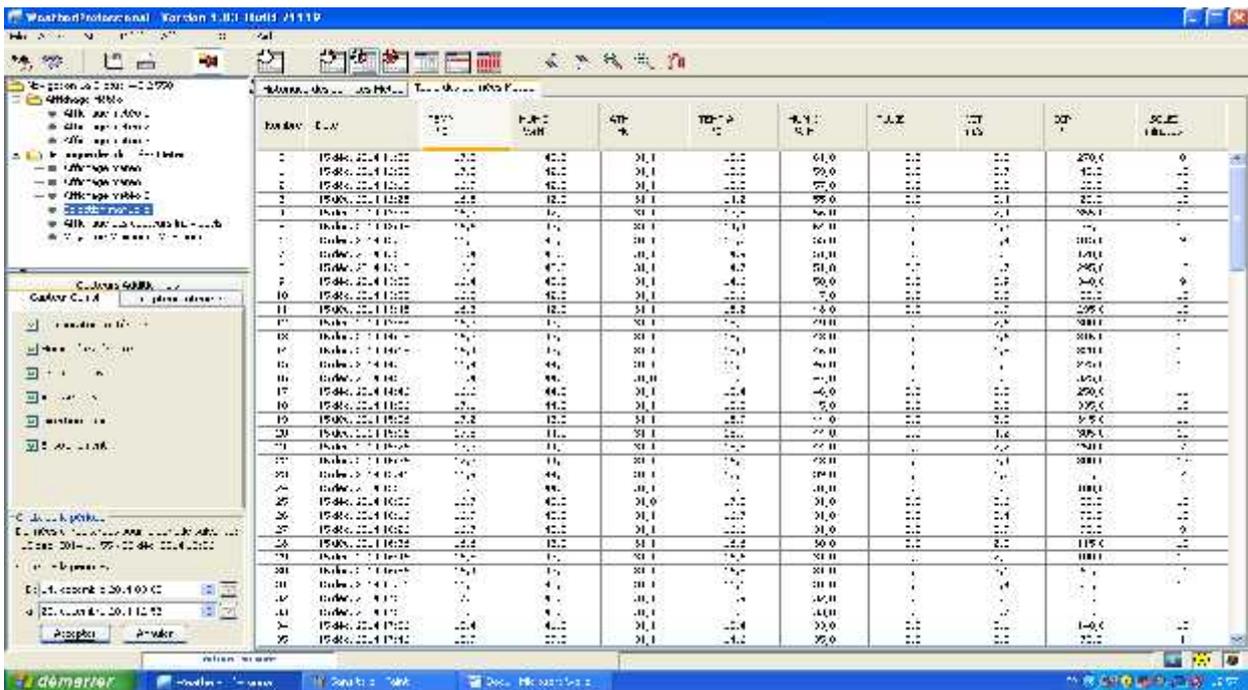
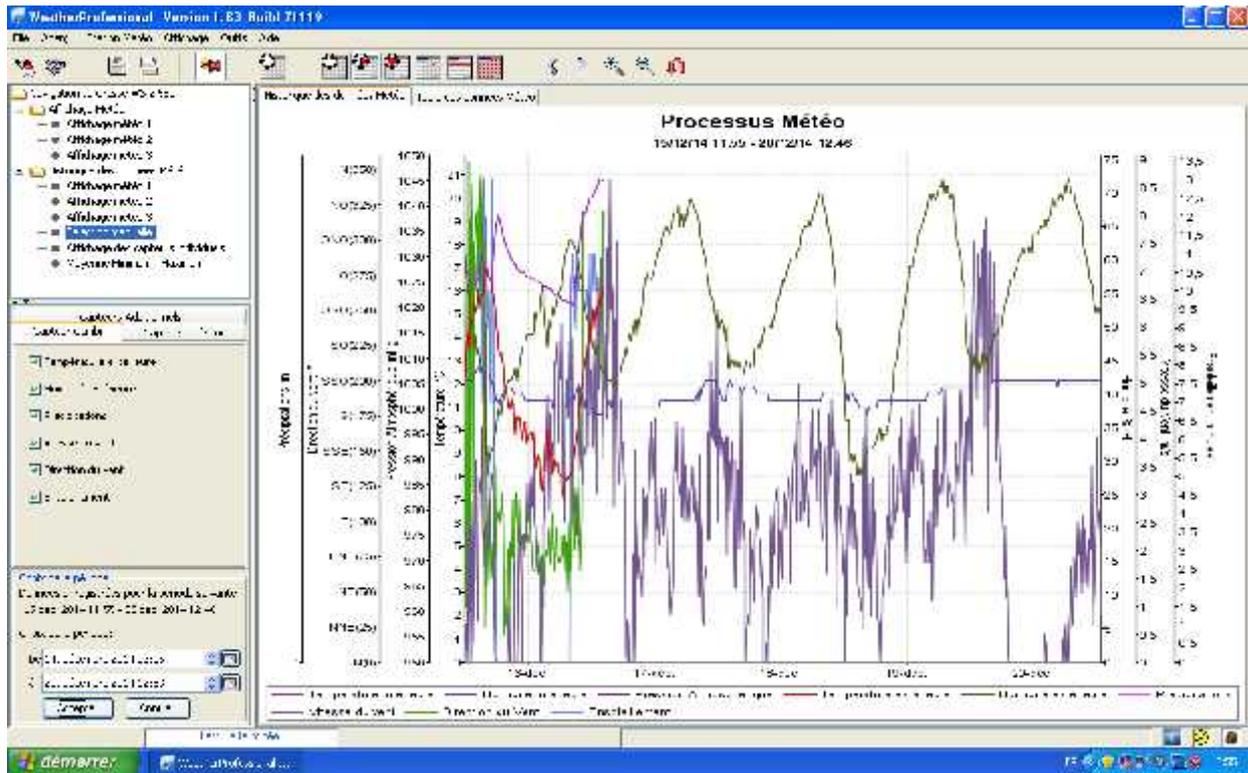


Figure 4.3 : Visualisation des données mesurées en temps réel

Les courbes tracées dans la figure 4.4 décrivent respectivement le comportement des températures de l'air ambiant intérieur et extérieur. Le comportement de l'humidité relative à l'extérieur et à l'intérieur du bureau est décrit selon le scénario observé dans la figure 4.5.

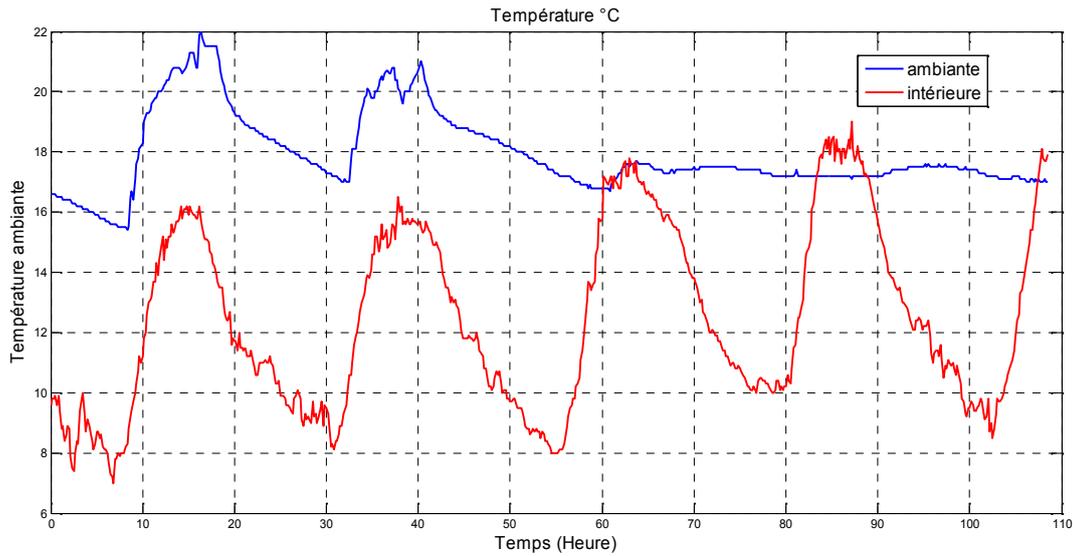


Figure 4.4: température de l'air ambiant intérieur et extérieur du 15 (vers 12 :00) au 20 (à 13 :00) décembre 2014.

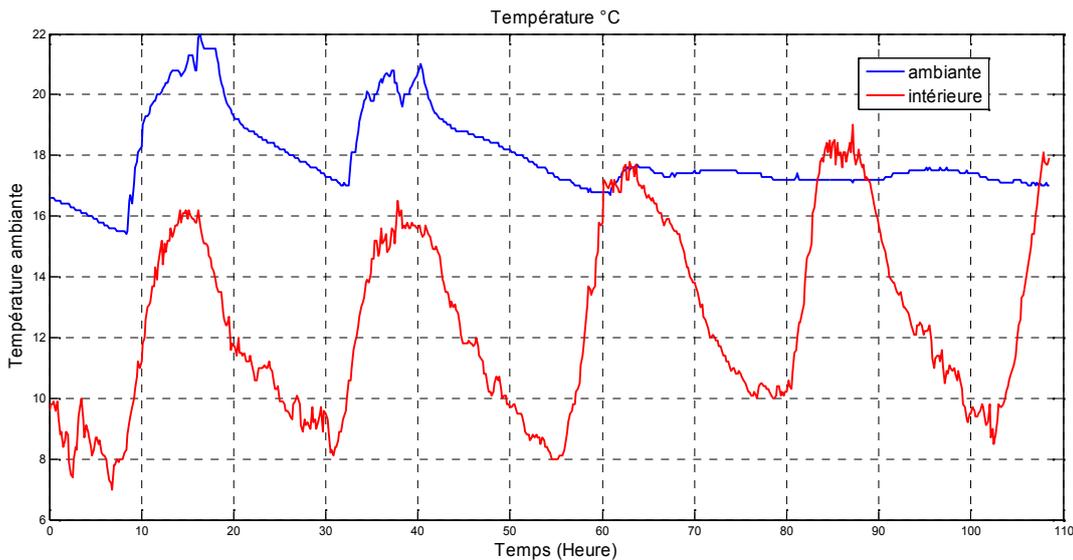


Figure 4.5: l'humidité relative extérieure et intérieure du bureau du 15 (vers 12 :00) au 20 (à 13 :00) décembre 2014.

En raison du coût et des durées expérimentales, la modélisation-simulation est un moyen efficace pour mettre au point et étudier le comportement thermo-aéraulique des bâtiments en régime variable. Il est légitime donc de disposer des méthodes numériques permettant de calculer très rapidement les températures et les humidités spécifiques. Pour obtenir directement l'humidité relative nous avons utilisé la formule suivante [5]:

$$r_s = \frac{M_v}{M_{as}} \frac{H_r p_{vs}}{p - H_r p_{vs}} \quad (4.19)$$

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel MATLAB car il présente l'avantage de posséder une bibliothèque intéressante.

Olgay, malgré sa démarche clairement déterministe, reconnaissait ainsi que la modélisation dans l'architecture, dans toute sa diversité, constitue un mode d'expression privilégié du développement durable. La simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant. Les progrès des méthodes numériques, Runge-Kutta d'ordre 4, à titre indicatif, permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes.

La figure 4.6 donne un aperçu de la température de l'air du bureau en absence d'un débit massique entrant et d'infiltration.

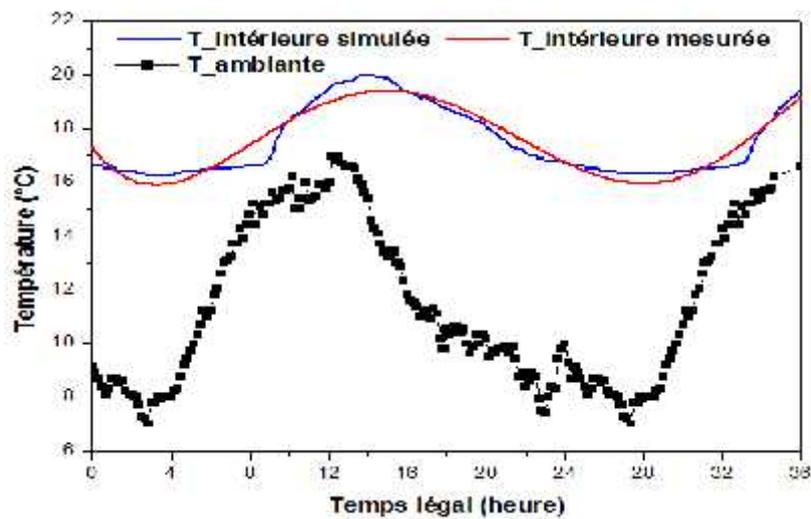


Figure 4.6: Confrontation des températures prédites et mesurées de l'air intérieur du bureau, Ghardaïa le 22 décembre 2014.

La figure 4.7 donne les profils des humidités relatives de l'air intérieur du bureau.

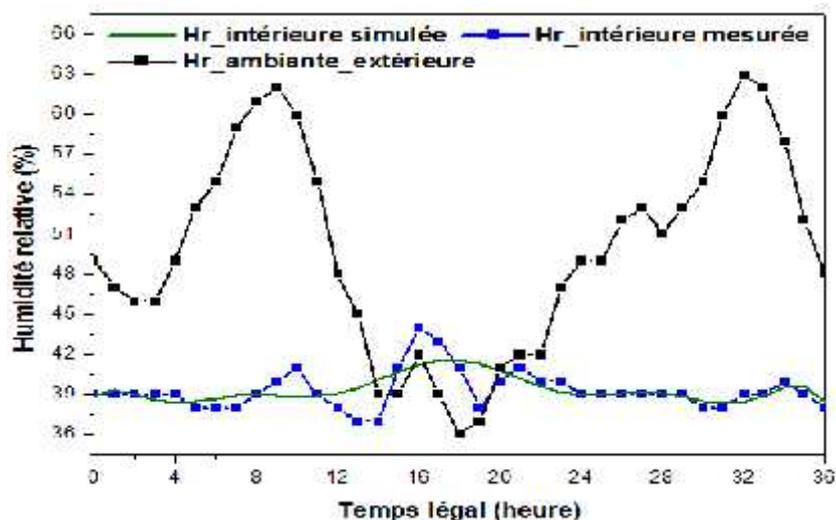
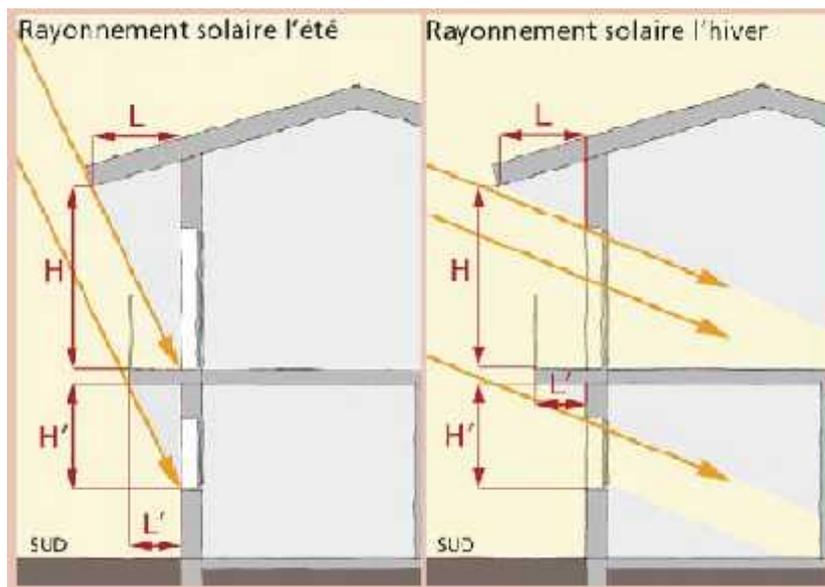


Figure 4.7: confrontation des humidités relatives prédites et mesurées de l'air intérieur du bureau, Ghardaïa le 22 décembre 2014.

En conclusion, nous pouvons dire que le bilan sensible intègre les phénomènes dans la modélisation thermo-aéraulique en régime transitoire. Le comportement thermo-aéraulique est très complexe du fait que les transferts se produisent simultanément avec la variation compliquée mathématiquement des conditions climatiques. Malgré ces situations, la concordance pour cet exemple semble satisfaisante. En effet les méthodes permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes.

4.4. Débord de toiture

Les protections fixes doivent être judicieusement dimensionnées afin d'offrir une protection efficace contre les surchauffes d'été sans devenir un frein aux apports solaires hivernaux. Les murs et les fenêtres sont à l'ombre en été dans un souci de protection car le soleil est haut sur l'horizon alors qu'en hiver c'est le contraire, le soleil pénètre dans la maison pour chauffer. La course du soleil n'est pas la même en fonction de la saison. Elle évolue entre deux extrêmes aux solstices d'été et d'hiver.



- Ouverture orientée plein sud $L > 0,48 \times H$
- Ouverture décalée de 15° vers l'Est ou l'Ouest $L > 0,55 \times H$
- Ouverture décalée de 30° vers l'Est ou l'Ouest $L > 0,77 \times H$

Figure 4.8: Calcul de la longueur d'une protection horizontale idéale dans le sud de la France

Les protections horizontales projettent une ombre verticale sur les parois devant lesquelles elles se déploient. Plus le soleil est haut dans le ciel, plus l'ombre couvrira une surface importante de la façade. On les retrouvera donc idéalement sur les orientations Sud, et proches de l'axe Sud à plus ou moins 30° .

En effet, l'été, l'avancée relativement faible (voir la figure) permet de protéger les façades sur une hauteur importante, tout en permettant un réchauffement passif l'hiver. Plus on se rapproche des orientations Est et Ouest, plus la longueur doit être importante. Il devient alors impossible de les dimensionner de manière à s'adapter aux contraintes de chaque saison.

Pour étudier l'importance de ces avancées, nous avons sélectionné la dernière semaine du mois d'Août de l'année 2013. Cette semaine correspond à un ciel totalement dégagé, une température ambiante située entre 23 et 43°C, une vitesse du vent du comportement aléatoire et une humidité relative globalement inférieure à 35%.

Cependant, le dimensionnement et l'optimisation d'un système solaire utilisant le rayonnement solaire nécessite une connaissance des éclairagements globaux (soleil et voûte céleste) et diffus (voûte céleste seule), disponibles dans le plan du système. On s'est référé toujours à l'utilisation des méthodes numériques et des programmes de calcul qui ont été suivis auparavant par de nombreuses validations avec des données fournies par des stations de mesure au sol [6-10]. La figure 4.9 présente l'évolution instantanée de l'éclairage solaire incident sur les façades sans (global) et avec (diffus) le débord.

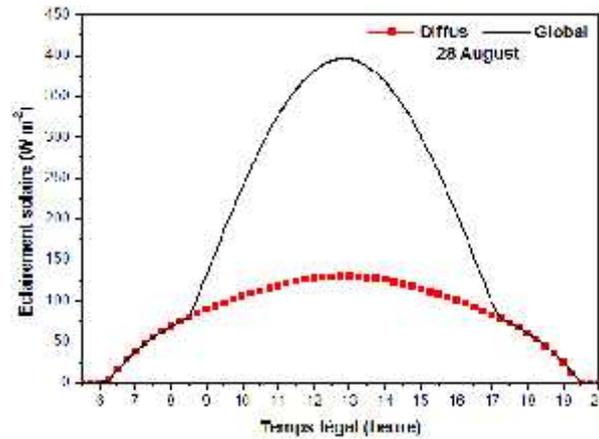


Figure 4.9: Eclairage solaire global et diffus incident sur la paroi Sud de la façade, Ghardaïa le 28 Août.

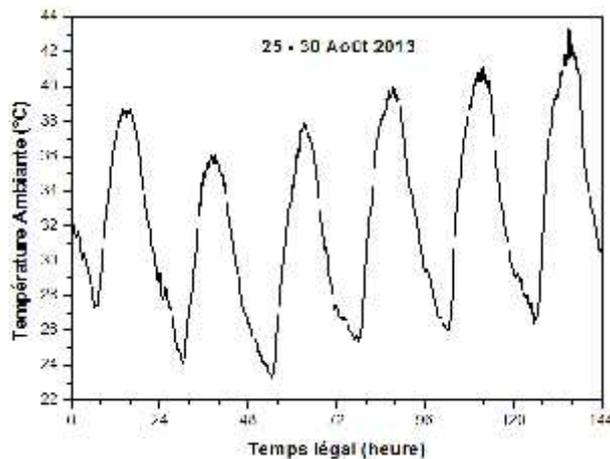


Figure 4.10: Température ambiante, Ghardaïa les 25-30 Août 2013.

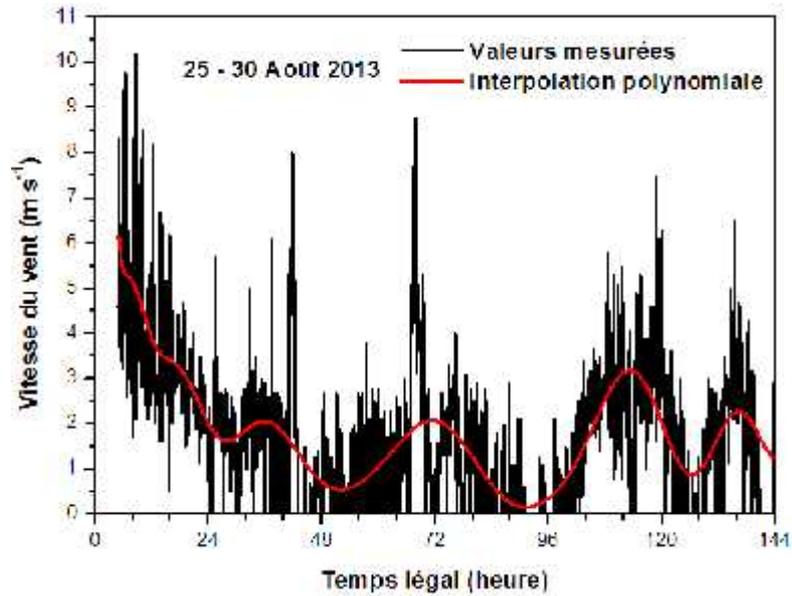


Figure 4.11: Vitesse du vent, Ghardaïa les 25-30 Août 2013

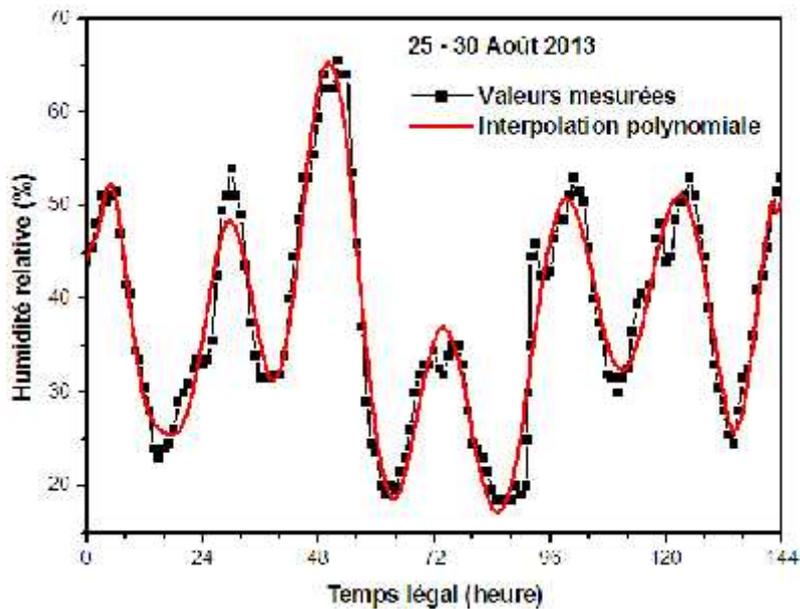


Figure 4.12: Humidité relative, Ghardaïa les 25-30 Août 2013

La simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant. Les progrès des méthodes numériques, Runge-Kutta d'ordre 4 à titre indicatif, permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes. Les figures 4.13 et 4.14 représentent le comportement observé des températures et des humidités spécifiques de l'air intérieur de la pièce 1 pour deux différentes indices de compacité (0.5882 et 0.2564).

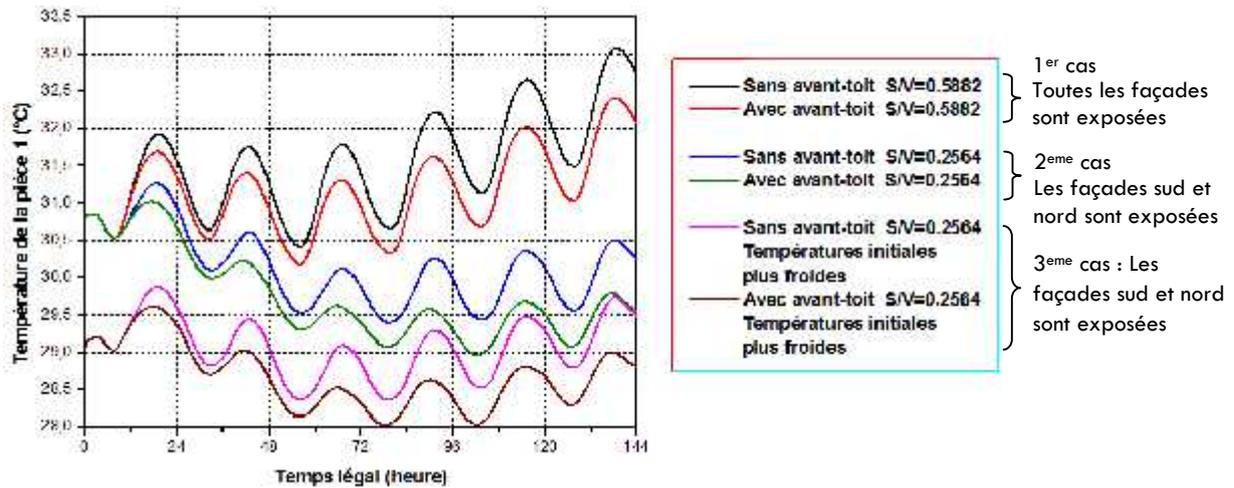


Figure 4.13: Température de la pièce 1, Ghardaïa les 25-30 Août 2013.

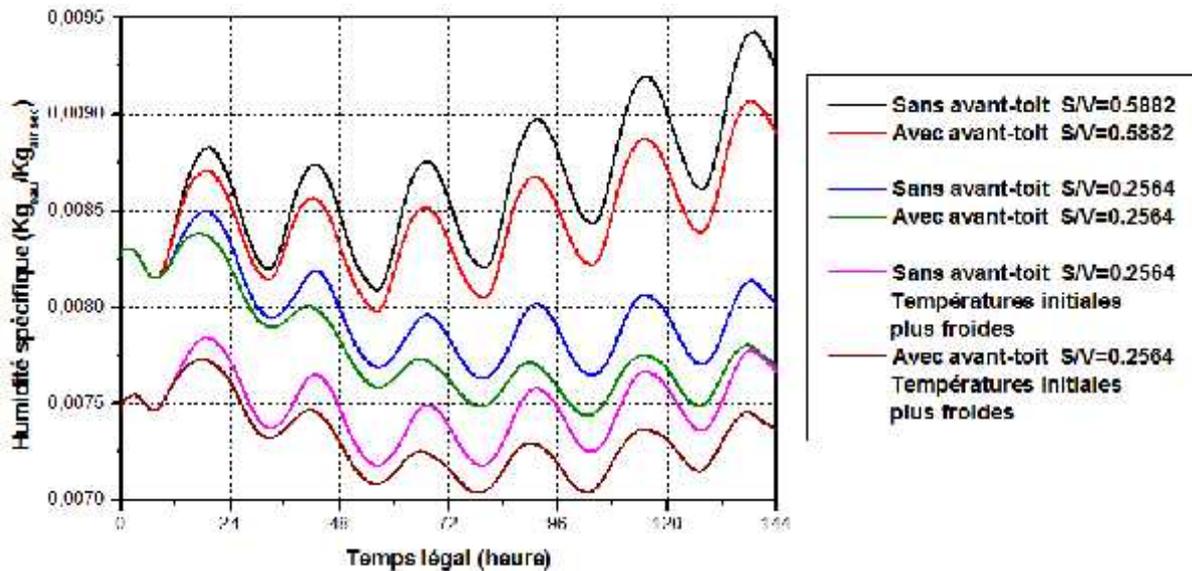


Figure 4.14: Humidité spécifique de la pièce 1, $H_{r\text{moyenne}} = 30\%$, Ghardaïa les 25-30 Août 2013

La comparaison des valeurs pour les trois cas montre que la température souhaitée n'a pas été atteinte par seulement cette technique mais elle peut contribuer à améliorer la température du confort. Les beaux jours arrivent et chaque année c'est la même histoire... Les maisons en pierre à Ghardaïa redeviendraient chaque fois une étuve ! Les températures intérieures dépassent parfois les 35 °C pour d'autres exemples.

L'isolation thermique des murs va permettre de diminuer encore ces températures. La lutte contre le gaspillage d'énergie passe par l'isolation thermique des bâtiments qui est le principe de base de la maison passive. En terme de comparaison, nous avons utilisé les mêmes conditions y compris les conditions initiales. C'est pour cette raison que les températures et les humidités

spécifiques, résultantes dans le deuxième cas diminuent puis se stabilisent pour donner des courbes qui se rapprochent de la forme sinusoïdale. Ainsi il est légitime de dire que le choix des températures initiales n'a pas été en concordance avec la réalité des phénomènes physiques. C'est pourquoi, nous avons choisi des températures initiales plus inférieures pour faire apparaître cet aspect dans le troisième cas.

Les exemples font ressortir encore les atouts et les avantages que peut présenter un bâtiment compact. La compacité du bâtiment est primordiale dans la conception climatique. Il faut comprendre que les murs ou enveloppe ne sont rien d'autre que des radiateurs en été et des radiateurs inversés en hiver. Ils constituent la surface d'échange avec l'extérieur. Un faible indice de compacité permet de limiter la surface d'échange par rapport au volume intérieur. Plus cet indice est faible plus le confort est favorable et plus l'insertion des avant-toits est rentable. Nous allons décrire ce résultat dans la prochaine section qui sera consacrée à l'étude de la compacité.

4.5. Etude de compacité par TRNSYS 16

De nombreuses études et retours d'expériences [11-17], sur les bâtiments les plus performants montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports solaires passifs, une sur-isolation de l'enveloppe (mur et vitrages) et, dans la plupart des cas, la mise en place d'une ventilation double-flux avec récupération de chaleur. C'est pourquoi, la simulation thermique dynamique est aujourd'hui un outil incontournable pour la recherche, le développement et la conception de bâtiments peu consommateurs d'énergie [18]. TRNSYS figure parmi les outils de recherche les plus pertinents permettant l'étude du comportement thermique du bâtiment. Ses très nombreuses fonctionnalités permettent de réaliser un travail en profondeur sur le comportement thermique des bâtiments et de leurs différents constituants.

4.5.1. Qu'est ce que TRNSYS

TRNSYS "TRaNsient SYstem Simulation" veut dire programme de simulation de systèmes transitoires. C'est un environnement complet et extensible pour la simulation transitoire des systèmes, y compris les bâtiments multizones. Il est devenu le logiciel de référence pour les chercheurs et ingénieurs du monde entier afin de valider de nouveaux concepts d'énergie, des systèmes simples d'eau chaude sanitaire pour la conception et la simulation des bâtiments et de leurs équipements pour une année météorologique. TRNSYS est un logiciel commercial développé à l'Université du Wisconsin. L'une de ses applications était pour permettre d'effectuer une simulation thermique du comportement d'un bâtiment pour une année météorologique [19].

L'un des facteurs clés de la réussite TRNSYS au cours des 35 dernières années c'est la bibliothèque TRNSYS qui comprend un grand nombre des composants couramment dans les systèmes d'énergie thermique et électrique, ainsi que des routines de composant pour gérer l'entrée de données météorologiques ou d'autres fonctions de forçage dépendant du temps et de sortie des résultats de simulation.

La nature modulaire de TRNSYS donne au programme grande flexibilité et facilite l'ajout au programme de modèles mathématiques ne figurant pas dans la bibliothèque TRNSYS standard. TRNSYS est bien adapté à des analyses détaillées de tout système dont le comportement dépend de l'écoulement du temps [20].

TRNSYS peut être facilement connecté à de nombreuses autres applications, pour le pré- ou post-traitement ou par des appels interactifs au cours de la simulation (par exemple Microsoft Excel, Matlab, COMIS, etc.). Ses principales applications sont les systèmes solaires (systèmes solaires thermiques et photovoltaïques), les bâtiments a basse énergie et les systèmes de CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation), les systèmes d'énergies renouvelables, les systèmes d'hydrogène, la cogénération, les piles à combustible, etc.

TRNSYS évalue le niveau de confort thermique d'un bâtiment par rapport à son environnement climatique et le choix opéré sur son système thermique (type de chauffage, niveau d'isolation, orientation des pièces...), puis il évalue les systèmes de chauffage et de climatisation des plus simples au plus complexes, comme des systèmes solaires innovants, grâce à une bibliothèque de 50 familles de composants.

4.5.2. Choix de TRNSYS [17]

Les comparatifs de logiciels " ouverts " disponibles, concernant essentiellement les capacités à simuler facilement les performances énergétiques d'un bâtiment (c'est-à-dire en bénéficiant au maximum de la disponibilité de modèles existants) et des solutions climatiques retenues (fenêtre, serre, mur capteur accumulateur, matériaux d'isolation transparents, protections solaires, matériaux a changement de phase, échangeur air/sol, ventilation nocturne) indiquent que deux environnements semblent répondre prioritairement a la problématique posée : TRNSYS et Énergie Plus.

Si Energy Plus présente plus de dispositifs climatiques que TRNSYS, notamment l'éclairage et la ventilation naturels, TRNSYS a l'avantage de disposer d'une interface plus agréable, d'une plus grande rapidité de prise en main, d'avoir été valide dans de nombreuses taches de l'Agence Internationale de l'Energie et enfin d'être communément répandu dans la communauté scientifique européenne notamment.

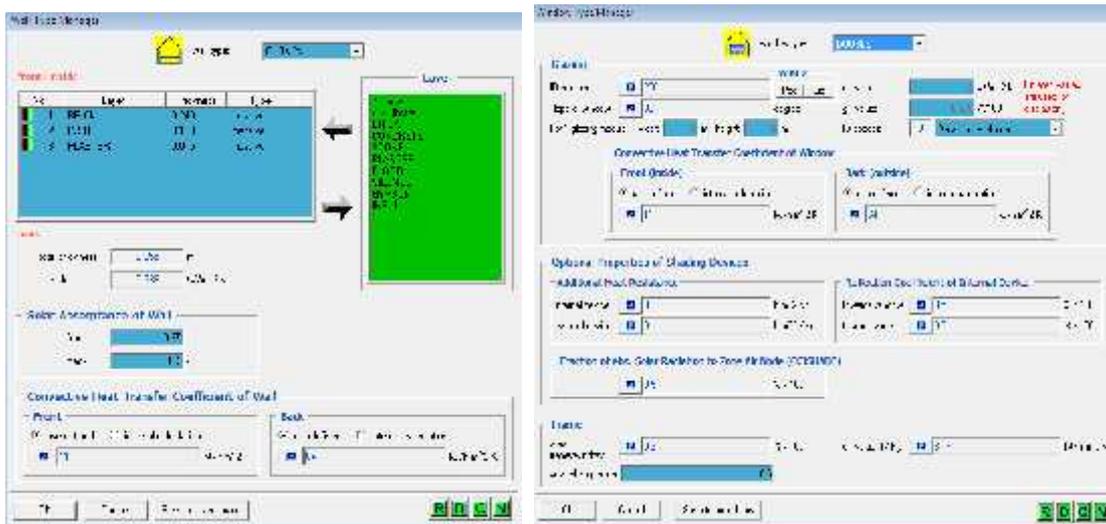
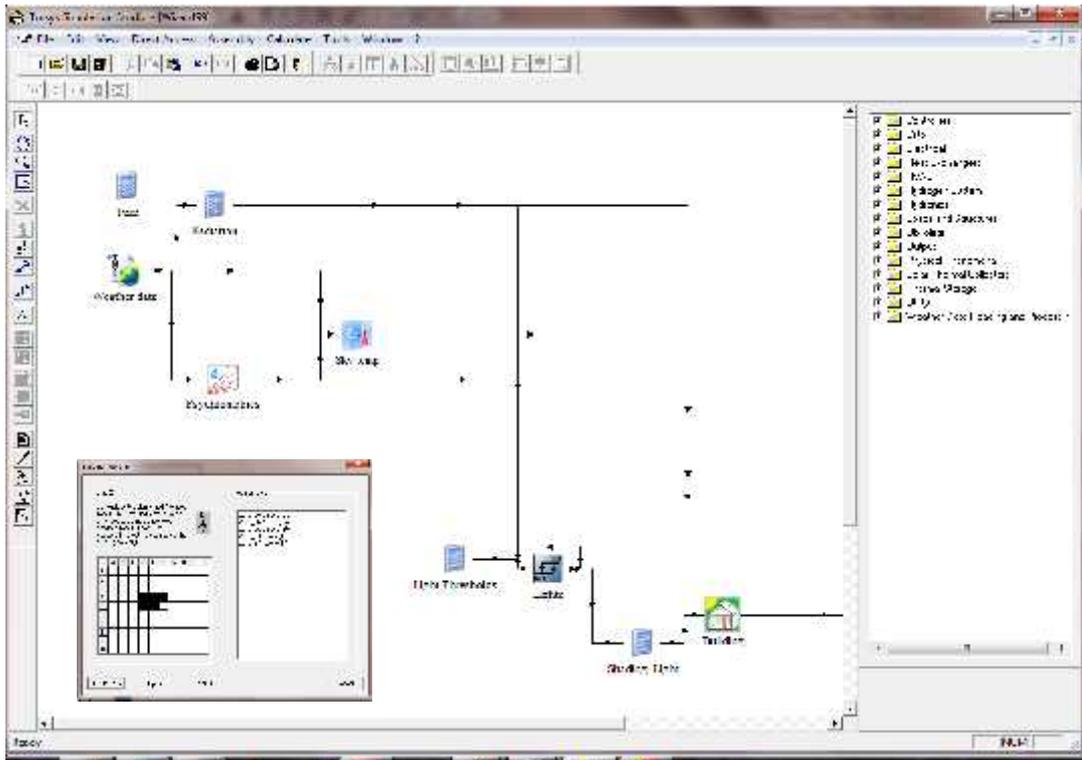


Figure 4.15 : Interfaces du logiciel TRNSYS

TRNSYS est un logiciel dédié à la simulation dynamique des systèmes développé par le laboratoire d'énergie solaire (SEL) de l'Université de Madison aux Etats-Unis. Il permet de faire des simulations dynamiques du comportement thermique d'un bâtiment mono ou multizones. Il permet également de suivre heure par heure les consommations (chauffage, climatisation) ou les productions (panneaux solaires) énergétiques annuelles des équipements d'un bâtiment. Ces simulations peuvent être réalisées en fonction de l'emplacement des matériaux de construction utilisés, de l'architecture, du concept énergétique choisi entre autre.

A travers son interface graphique, l'utilisation du logiciel TRNSYS est simple. La force de TRNSYS réside dans la bibliothèque du logiciel où quelques 50 familles de composants sont disponibles, ces derniers représentant le bâtiment (mono ou multizones), les équipements (chauffage, climatisation, ...), les données météorologiques, les régulateurs, ... il suffit de choisir les bons composants et de les relier entre eux pour réaliser une simulation permettant de modéliser l'environnement complet d'un bâtiment. Si l'utilisateur ne trouve pas de composant adéquat dans la bibliothèque, il peut également y ajouter ses propres composants.

Le comportement thermique du bâtiment est très complexe du fait des transferts thermiques se produisant simultanément et de la variation des conditions le sollicitant (conditions climatiques). TRNSYS intègre ces phénomènes dans la modélisation thermique en régime transitoire du bâtiment de la façon suivante: les transferts thermiques au sein de l'enveloppe sont traités en utilisant le module " Type56 " de TRNSYS. Sachant qu'une paroi de bâtiment peut donner lieu à trois transferts thermiques différents : la conduction au sein de la paroi, la convection entre les faces de la paroi et les ambiances fluides qu'elle sépare, le rayonnement courtes longueurs d'ondes (CLO) et grandes longueurs d'ondes (GLO) échangé avec les autres parois ou le ciel.

La modélisation des écoulements aérauliques est effectuée par le biais de TRNFlow. Ainsi, le critère de sélection retenu pour modéliser les transferts aérauliques dans le bâtiment est la fiabilité des résultats en un minimum de temps.

L'approche nodale ou zonale permet de simplifier des modèles à des fins de rapidité de calcul. Le bâtiment est ainsi représenté par un ensemble de nœuds représentant des pièces ou un groupement de pièces qui communiquent par des liens avec l'extérieur et avec l'intérieur (échanges entre pièces).

La modélisation se caractérise par la définition d'un nœud par zone. Les lois régissant les transferts aérauliques entre zones sont généralement des lois de puissance qui donnent le débit d'air en fonction de la différence de pression.

4.5.2.1. Données introduites

-  Description du bâtiment et données météo (fournies avec le programme pour certaines villes).
-  Description des éléments du système thermique et de leur fonctionnement.
-  Des liens existent avec certains programmes de dessin pour faciliter la saisie des données décrivant le bâtiment (notamment IISiBat).

4.5.2.2. Résultats

-  Consommations mensuelles et annuelles.
-  Visualisation sous forme d'histogrammes.

- Impression des différentes valeurs variables (par pas de temps).
- Visualisation en temps réel de certaines valeurs de la simulation.

4.5.2.3. Avantage

- Grâce à son approche modulaire, TRNSYS est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).
- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.
- Une vaste documentation sur les sous-programmes y compris des explications, les usages usuels et les équations de base.
- Une définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

4.5.2.4. Inconvénients

- Pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder et introduire un ensemble exhaustif de données définissant le bâtiment et le système.

4.5.3. Transferts thermiques dans TRNSYS [21]

Pour les parois opaques, on distingue les transferts conductifs et convectifs. Dans TRNSYS, les transferts par conduction sont traités par une méthode convolutive, celle de la transformée en Z comme précisé ci-dessus. Concernant le vitrage, les parois vitrées sont considérées sans inertie. De ce fait, on utilise généralement l'équation du régime permanent pour modéliser les transferts conductifs. Les échanges convectifs sont pris en compte comme suit [21] :

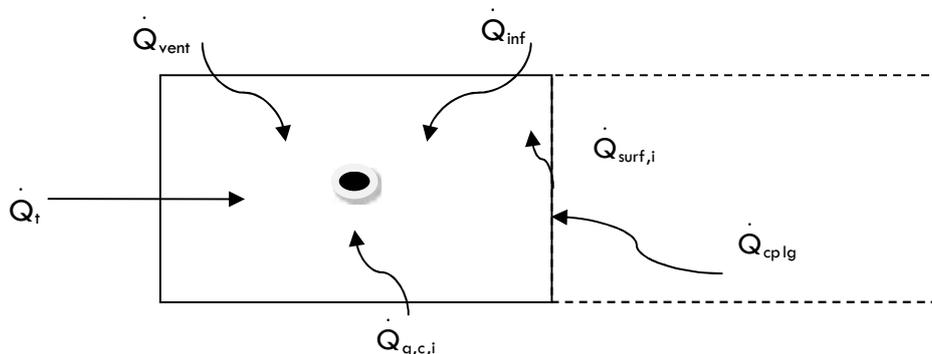


Figure 4.16 : Interfaces du logiciel TRNSYS

$$Q_{\text{conv.e}} = h_{c,e} (T_{se} - T_e) \quad (4.20)$$

$$Q_{\text{conv},i} = Q_{\text{surf},i} + Q_{\text{inf},i} + Q_{\text{vent},i} + Q_{\text{g},c,i} + Q_{\text{gplg},i} \quad (4.21)$$

Avec :

$Q_{\text{surf},i}$: Gains provenant des surfaces internes [W]

$$Q_{\text{surf},i} = U_{\text{mur},i} A_{\text{mur},i} (T_{\text{mur},i} - T_{\text{air}}) \quad (4.22)$$

U : Le coefficient de transmission thermique d'une paroi [W/m²]

A : La surface [m²]

T : Température en Kelvin

$Q_{\text{inf},i}$: Gains provenant des infiltrations [W]

$$Q_{\text{inf},i} = \nu \rho C_p (T_{\text{ext}} - T_{\text{air}}) \quad (4.23)$$

$Q_{\text{vent},i}$: Gains provenant de la ventilation [W]

$$Q_{\text{vent},i} = \nu \rho C_p (T_{\text{vent},i} - T_{\text{air}}) \quad (4.24)$$

ν : Le volume (m³)

ρ : La masse volumique (Kg/m³)

C_p : La chaleur spécifique (J/kg K)

$Q_{\text{g},c,i}$: Gains convectifs intérieurs [W]

Ils peuvent être dus : aux occupants, aux équipements, à l'éclairage, aux radiateurs, etc.

$Q_{\text{gplg},i}$: Gains convectifs dues aux écoulements d'air provenant de zones adjacentes [W]

$$Q_{\text{gplg},i} = \nu \rho C_p (T_{\text{zone},i} - T_{\text{air}}) \quad (4.25)$$

En ce qui concerne les échanges radiatifs, TRNSYS distingue les échanges de courtes longueurs d'onde CLO correspondant à des longueurs d'onde inférieures à 2,5 μm et les grandes longueurs d'onde GLO supérieures à 2,5 μm . A l'intérieur d'une zone, on a :

$$Q_{\text{rd},i} = Q_{\text{CLO},i} + Q_{\text{GLO},i} = Q_{\text{g},r,i} + Q_{\text{sol},i} + Q_{\text{long},i} + Q_{\text{gains internes},i} \quad (4.26)$$

Pour une paroi extérieure, l'équation des échanges radiatifs s'écrit comme suit :

$$Q_{\text{GLO},e} = \sigma \xi_{s,o} (T_{s,o}^4 - T_{f,ciel}^4) + S_{s,o} \quad (4.27)$$

Avec

$Q_{\text{rd},i}$: Gains radiatifs du noeud de température de surface du mur,

$Q_{\text{g},r,i}$: Gains radiatifs internes de la zone reçues par le mur,

$Q_{sol,i}$: Gains solaires a travers les fenêtres reçus par le mur,

$Q_{long,i}$: Flux grande longueur d'ondes échange entre le mur et les autres murs et fenêtres, gains internes,

$Q_{gains\ internes,i}$: Si l'utilisateur spécifie un flux de chaleur à la surface du mur ou de la fenêtre et

$S_{s,o}$: Le rayonnement solaire absorbé par la surface.

4.5.4. Simulation numérique

L'environnement de simulation TRNSYS a été utilisé pour déterminer les températures des différentes zones en vue de prédire la variation de la compacité par rapport au mode de contact à forme et à volume constants. Lors de cette étude, nous avons utilisé les données météorologiques de la région de Bechar. A cet effet, nous avons choisi deux périodes pour la simulation numérique, correspondant à un ciel globalement dégagé. L'intervalle de temps est compris entre 24 et 120 heures, correspondant à une période froide du 02 au 05 Janvier, l'autre période (chaude) est située entre 4800 et 4913 heures ce qui correspond aux jours allant du 09 au 13 Juillet. Par la suite, il nous a été nécessaire d'identifier les caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe du bâtiment considérée en parois opaques. Il convient de souligner que le gain de puissance thermique due à l'infiltration d'air et les gains d'énergie solaire sont supposés nulles. Le tableau ci-dessous donne un état récapitulatif de ces caractéristiques.

Elément	Matériau (ext → int)	e (m)	λ (KJ/h m k)	Cp (Kj/kg k)	ρ (Kg/m ³)	U (W/m ² K)
Mur extérieur	Insul	0.100	0.144	0.800	40.00	0.329
	Pierre	0.500	5.000	1.000	2000	
	Plâtre	0.050	5.00	1.000	2000	
Plafond	Béton	0.240	7.56	0.800	2400	0.233
	Insul	0.160	0.144	0.800	40.00	
Plancher bas	Floor	0.005	0.252	1.000	800.0	0.834
	Pierre	0.060	5.000	1.000	2000	
	Silence	0.040	0.180	1.440	80.00	
	Béton	0.240	7.560	0.800	2400	
Mur intérieur	Gypse	0.012	0.756	1.000	1200	1.552
	Pierre	0.500	5.000	1.000	2000	
	Gypse	0.012	0.756	1.000	1200	
Plancher haut	Floor	0.005	0.252	1.000	800.0	0.313
	Pierre	0.060	5.000	1.000	2000	
	Silence	0.040	0.180	1.440	80.00	
	Béton	0.240	7.560	0.800	2400	
	Insul	0.080	0.144	0.800	40.00	

Tableau 4.1: Caractéristiques thermo-physiques des parois opaques

La construction étudiée est une structure multizones, le modèle TRNBuild permet de construire un fichier type 56 qui est utilisé dans l'interface TRNSYS.

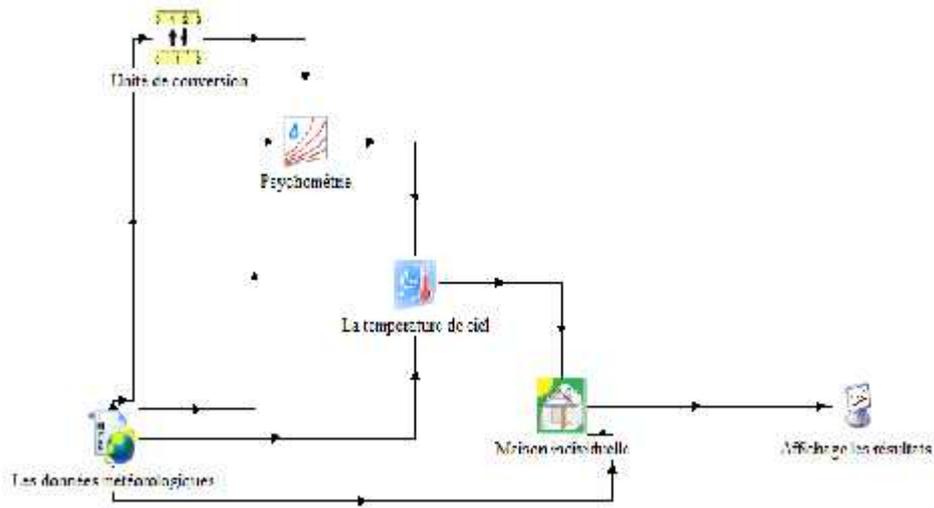


Figure 4.17: Modèle de simulation sous TRNSYS

Symbole	Type	Mode réel
	Type 109-TMY2 (Météonorme)	Données climatiques
	Type 57	Convertisseur
	Type 33 e	Psychométrie
	Type 69 b	Température du ciel
	Type 56 a TRNBuild	L'enveloppe bâtie, dimensions et matériaux
	Type 56 d (Online Plotter)	Visualisation et affichage

Tableau 4.2 : Relation entre TRNSYS et le mode réel

Les courbes décrites dans la figure 4.18 représentent respectivement la variation de la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative. L'évolution des allures se rapproche un petit peu à une forme périodique ou sinusoïdale. De même pour la vitesse du vent, on remarque que ce paramètre subit un comportement plus compliqué, il est parfois considérable et parfois faible.

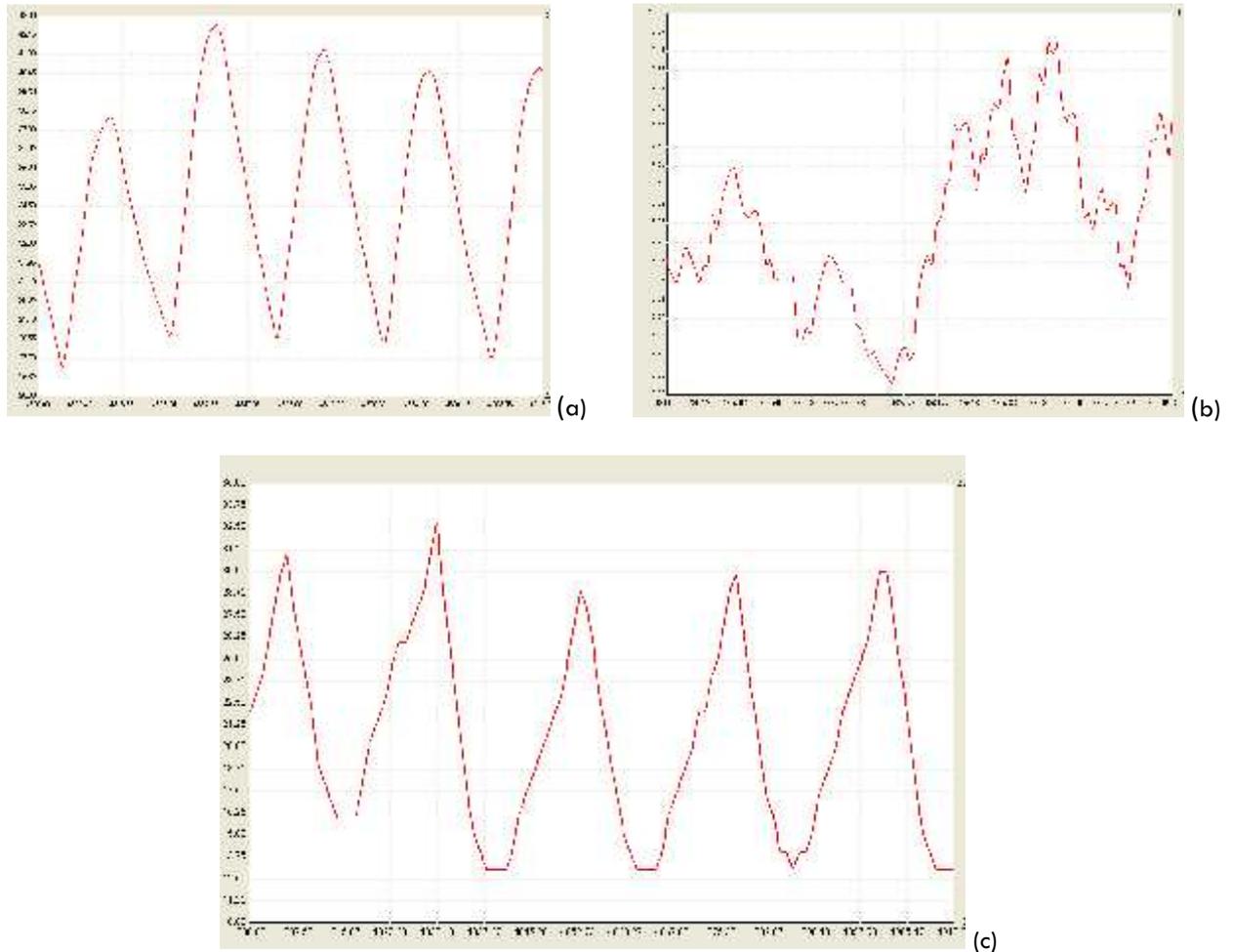


Figure 4.18: donnée climatique extérieures : (a) la température ambiante, (b) la vitesse du vent et, (c) l'humidité relative, Bechar du 02 au 05 Janvier

Nous procéderons dans cette section à une comparaison entre plusieurs cas possibles pour avoir au moins une piste qui nous conduit à des décisions justes et constructives. Le but est de confronter les températures intérieures des cellules de 4 m de dimension en supposant les cas suivants :

- Une cellule cubique de 4 m de dimension pleinement exposée au Sud et d'indice de compacité égal à 1.25; c'est-à-dire en contact avec l'extérieur à tout niveau sauf au sol.
- Deux cellules cubiques adjacentes de 4 m de dimension, la première est exposée aux cotés Sud et Est dont l'indice de compacité est de 1. La deuxième est une cellule mitoyenne de même dimension, orientée selon l'axe Nord – Sud, l'indice de compacité correspondant est de 0.75.
- Une cellule qui appartient à un groupe de six cellules adjacentes et groupées selon deux lignes orientées selon l'axe Sud – Nord. Elle est positionnée coté Sud avec un indice égal à 0.5.

Les courbes tracées ci-dessous représentent les valeurs des températures intérieures des cellules prises en considération.

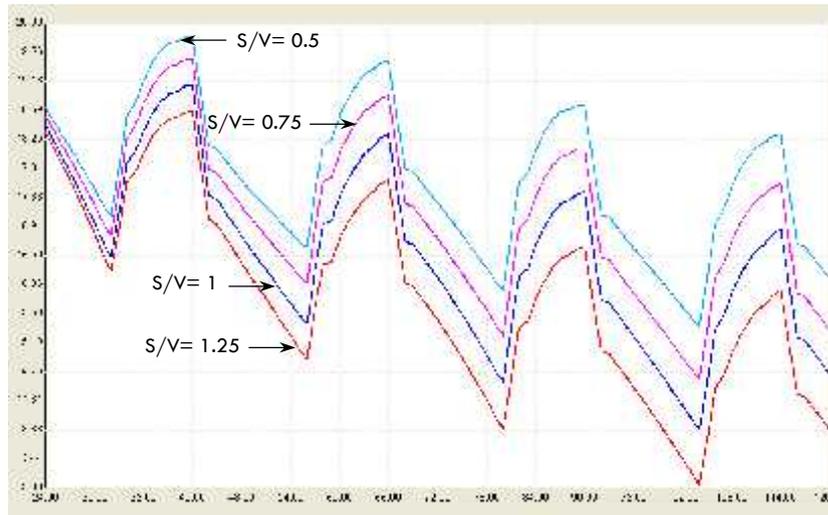


Figure 4.19: Températures intérieures des quatre cellules, Bechar du 02 au 05 Janvier

Il convient de souligner que la situation la plus convenable est celle de la cellule qui a le plus faible indice de compacité et qui appartient à un groupe de six cellules adjacentes. En effet, les murs adjacents ne sont plus en contact avec l'extérieur ce qui limite les déperditions par ces parois.

Pour une période estivale, nous suivons le même raisonnement; les courbes données par la figure 4.20 définissent respectivement les évolutions instantanées de la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative. L'évolution des allures se rapproche un petit peu de la forme périodique ou sinusoïdale. De même pour la vitesse du vent, on remarque que ce paramètre subit un comportement plus compliqué.

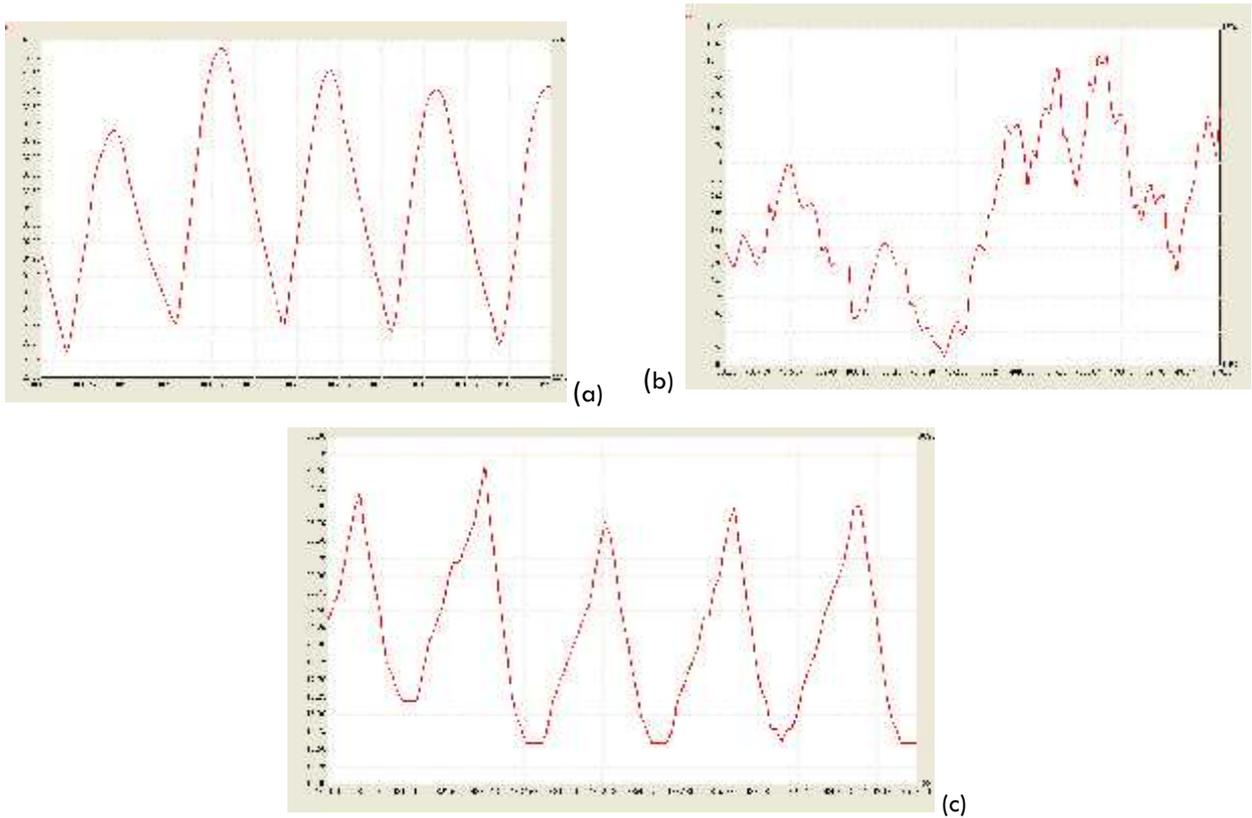


Figure 4.20: donnée climatique extérieures : (a) la température ambiante, (b) la vitesse du vent et, (c) l'humidité relative, Bechar du 09 au 13 Juillet

Les courbes tracées dans la figure 4.21 représentent les valeurs des températures intérieures obtenues pour les cellules étudiées. Nous avons trouvé que le confort est inversement proportionnel par rapport à l'indice de compacité et proportionnel par rapport à la compacité. Le mode de contact le plus favorable est celui qui correspond au plus faible indice.

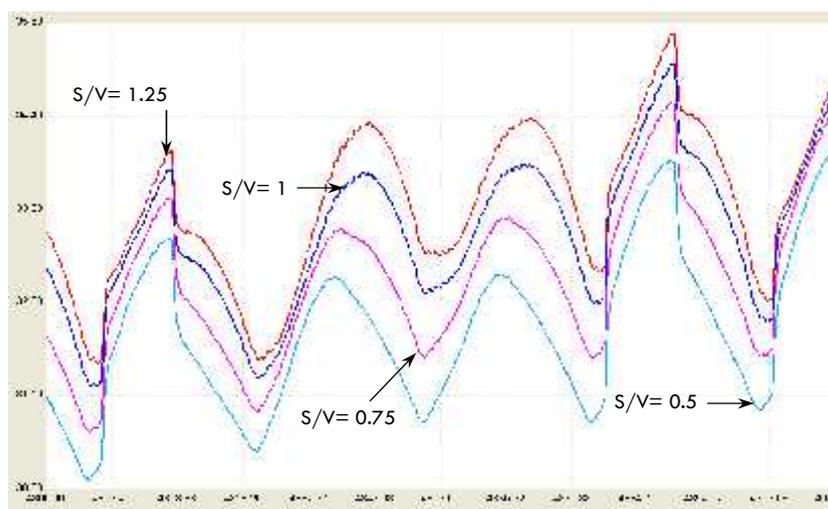


Figure 4.21: Températures intérieures des quatre cellules, Bechar du 09 au 13 Juillet

Nous nous intéressons dans ce qui suit à la détermination de l'effet de la forme géométrique en proposant plusieurs configurations (une de forme cubique et certaines correspondent à une forme parallélépipédique). Les dimensions sont données dans le tableau 4.3 :

Forme géométrique	Hauteur (m)	Largeur (m)	Longueur (m)	Volume (m ³)	Surface exposée (m ²)	Indice de compacité
Cube	4	4	4	64	80	1.25
Parallélépipède	4	8	8	256	192	0.75
Parallélépipède	4	16	16	1024	512	0.5
Parallélépipède	4	32	32	4096	1536	0.375
Parallélépipède	4	64	64	16384	5120	0.3125

Tableau 4.3: Dimensions des différentes configurations proposées

La figure 4.22 est un exemple qui permet d'indiquer la variation des températures selon les différents cas proposés.

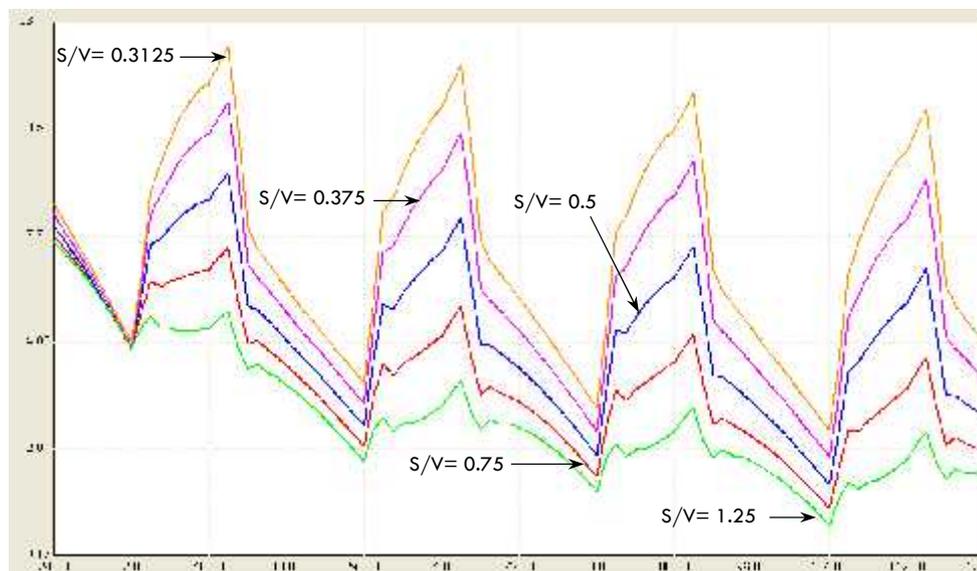


Figure 4.22: Températures intérieures des quatre cellules, Bechar du 02 au 05 Janvier

Nous constatons que les amplitudes en température sont très importantes, ceci est dû au niveau d'isolation qui est non satisfaisant, c'est pour cette raison qu'on obtient une baisse considérable des températures en période nocturne. Cet aspect est constaté plus particulièrement pour les cellules les plus compactes, sachant que le confort est atteint en dehors de ces intervalles.

4.6. Conclusion

Cette étude, menée tant sur l'aspect expérimental que numérique, concerne le comportement thermo-aéraulique d'un bureau de travail à l'URAER. Le modèle mathématique obtenu était très compliqué du fait que les transferts se produisent simultanément avec la variation compliquée mathématiquement des conditions climatiques. Malgré cette situation, la concordance s'avère acceptable. Les méthodes suivies permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes.

D'autre part, la conception d'une maison à faible consommation énergétique s'inscrit pleinement dans le contexte actuel de la maîtrise de l'énergie et de développement durable. Le secteur du bâtiment peut réaliser de nombreux progrès en matière d'économie d'énergie, nous supposons qu'il est en pleine évolution vers la création d'un marché pour ce type de construction. Ainsi, il faut que le gouvernement mette en place des programmes dans ce sens, c'est-à-dire construire des bâtiments protégés à la fois par des avancées de toiture et par une forte isolation et compacité en vue d'économiser la consommation énergétique. Nous concluons qu'il faut suivre certaines stratégies de construction en ayant à l'esprit que :

- Il faut encourager certaines typologies urbaines comme les rangées de maisons mitoyennes, les immeubles collectifs...etc.
- Assurer une bonne compacité en choisissant des formes géométriques optimales tout en diminuant le maximum l'indice de compacité.
- Introduire les protections solaires

Références

- [01] : L. Mora, Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet, Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment, UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur, université de la rochelle, Septembre 2003 (Thèse de Doctorat).
- [02] : J.J Roux, Comportement thermique des bâtiments, Institut National des Sciences Appliquées, département de génie civil, 2000, INSA de Lyon.
- [03] : Y. Jannot, transferts thermiques, école des mines, Nancy, 2012.
- [04] : J. P. Nadeau, J.R. Puiggali, Séchage: des processus physiques aux procédés industriels, Tec & Doc-Lavoisier, 1995 (ISBN 2-7430-0018-X).
- [05] : S. Hongois, Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, thèse de Doctorat, Ecole doctorale Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique MEGA, Laboratoire d'accueil : Centre de Thermique de

- Lyon CETHIL à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Soutenu le 1er avril 2011.
- [06] : M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 683 – 695.
- [07] : M. R. Yaïche, A. Bouhanika, S. M. A. Bekkouche, A. Malek, T. Benouaz, Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration, Elsevier Energy Conversion and Management 82 (2014) 114–123.
- [08] : M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Conception et validation d'un logiciel sous Excel pour la modélisation d'une station radiométrique en Algérie cas d'un ciel totalement clair, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 677 – 688.
- [09] : M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire direct en Algérie, cas d'un ciel clair, Revue Internationale d'Héliotechnique Energie - Environnement - N° 39 (2009) 50-55.
- [10] : M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie, cas d'un ciel totalement clair, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 423 – 436.
- [11] : J.R. Goulding, J.O. Lewis, T.C. Steemers, 'Energy in architecture, the European Passive Solar Handbook, 339 p, 1993.
- [12] : O. Sidler, 'Logements à faibles besoins en énergie, guide de recommandation et d'aide à la conception, région Rhone Alpes, ODH 26, ADEME, conseil général de Savoie, 2000.
- [13] : PREBAT, Comparaison internationale Bâtiment et énergie: Rapport final, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie/Plan Urbanisme Construction Architecture/Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2007.
- [14] : EFFINERGIE, Réussir un projet de Bâtiment Basse Consommation, guide à destination des professionnels du bâtiment, 2008.
- [15] : S. Thiers, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 252 p, 2008.
- [16] : M. Trocmé, Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, novembre 2009
- [17] : S. Bendara, L'Apport de l'indice de compacité sur les températures intérieures d'une habitation multizone, Université Ahmed Draïa Adrar, Décembre 2015.
- [18] : A. Khecharem, Modélisation thermique des bâtiments : Evaluation des principaux critères architecturaux sur la qualité thermique des bâtiments, Mémoire pour obtenir le grade de Master à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, Université Henri Poincaré, Nancy Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, Master Design Global 2008-2009.
- [19] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation_Thermique_Dynamique
- [20] : <http://telechargerlelogiciel.blogspot.com/2013/09/telecharger-trnsys-17-gratuit.html>
- [21] : TRNSYS, 2004, A transient Simulation Program - Manual, Solar Energy Laboratory - University of Wisconsin – Madison, 2004.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La conception bioclimatique consiste à mettre à profit les conditions climatiques favorables tout en se protégeant de celles qui sont indésirables, ceci afin d'obtenir le meilleur confort thermique. En période froide, une architecture bioclimatique favorise les apports de chaleur gratuits, diminue les pertes de chaleur et assure un renouvellement d'air suffisant. En période chaude, elle réduit les apports caloriques et favorise le rafraîchissement. Le bien-être thermique dépend de plusieurs paramètres sur lesquels le concepteur d'un bâtiment peut agir. Nous citons à titre illustratif, la température de l'air, les températures des parois et l'humidité relative ou spécifique de l'air.

Pour ce faire, nous avons utilisé trois modèles mathématiques de transfert de chaleur à l'intérieur d'un espace multizone. Ces modèles ont été basés sur les approches multizones existantes. Nous avons pu traiter ensuite des connaissances et des outils de travail simples (la méthode nodale et la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4) et performants qui nous ont permis d'étudier et par la suite d'intégrer dès la conception du projet les meilleures solutions passives de la future construction. Une confrontation des résultats théorique et expérimentale s'est effectuée avec succès.

Le comportement thermo-aéraulique est très complexe ceci est dû au fait que les transferts se produisent simultanément avec la variation des conditions climatiques mathématiquement complexe. Malgré ces situations, la concordance pour ce deuxième modèle nous semble satisfaisante. L'avantage de ces modélisations est qu'elles permettent de transformer un problème très complexe en une série de problèmes plus faciles à traiter.

Par cette modeste contribution, nous avons démontré aussi que dans un milieu saharien, aride ou semi-aride, il est possible de construire des bâtiments économes en énergie en conservant un degré de confort acceptable. Pour cela, des solutions simples et éprouvées peuvent se concevoir à travers:

1- Le choix de matériaux de construction idéaux permettant la transmission de la chaleur par conduction, le contrôle de la capacité thermique qui est par définition l'aptitude à stocker de la chaleur, la diffusivité thermique qui détermine la rapidité à transmettre la chaleur, l'effusivité thermique qui définit la rapidité à absorber la chaleur et le coefficient de transmission thermique qui indique le niveau d'isolation thermique ainsi que la capacité de s'opposer à la fuite des calories.

L'inertie sera placée à l'intérieur de l'isolation autour des espaces de vie. Il est possible donc de calculer le temps de déphasage pour que la chaleur soit restituée au meilleur moment. Il

est judicieux d'utiliser les isolants thermiques ordinaires (polystyrène, bois, liège...) et les produits minces réfléchissants ou ce qu'on appelle les isolants thermo-réfectifs, isolants minces par thermo-réflexion et barrières radiantes.... Ces matériaux peuvent parfois maximiser la performance thermique au complet et pas seulement les échanges thermiques par rayonnement.

Les murs à cavité possèdent un avantage important par rapport aux murs de maçonnerie massive du fait qu'ils permettent d'avoir une protection contre les conditions climatiques extérieures puisqu'ils ont un meilleur coefficient d'isolation thermique.

2- Les orientations et les formes doivent être choisies en fonction de l'ensoleillement en développant les façades (ouvertures et murs opaques) répondant aux objectifs d'économie d'énergie en hiver et de confort en été. L'orientation la plus favorable est celle du Sud car elle facilite aussi l'intégration des éléments d'une conception bioclimatique.

3- La forme et le volume de la maison doivent assurer une bonne compacité à travers des formes géométriques optimales tout en diminuant au maximum l'indice de compacité. Une forme compacte est à privilégier afin d'éviter les déperditions thermiques en été comme en hiver.

Nous devons concevoir une forme simple qui se rapproche au maximum de la forme sphérique. Dans les bâtiments de grande taille, les murs mitoyens étant disposés entre deux espaces ne seront pas considérés comme déperditifs.

Cependant, dans un contexte urbain, la liberté en termes de volumes étant souvent fortement limitée, les gabarits et les alignements devant être respectés, ce qui contraint parfois l'architecture. C'est pourquoi une compacité performante et une bonne inertie sont préconisées pour que la maison soit réellement économe.

4- Les protections solaires extérieures doivent être placées sur les murs et devant les ouvertures, ce qui permet d'arrêter et de réfléchir le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne les vitrages. Ces protections contribuent donc particulièrement à l'isolation dynamique de la façade ainsi qu'à la gestion de la lumière naturelle. Les fenêtres des pièces en-dessous des débords par exemple bénéficient de l'ombre de ceux-ci en été et de la lumière du soleil bas en hiver. Ainsi, les stores et les brises soleil servent à diminuer l'inconfort lié au rayonnement direct du soleil.

Ceci dit, nous espérons à l'avenir développer davantage le présent travail par des recherches plus avancées, notamment en utilisant des modèles hygro-thermo-aérauliques. Le couplage entre les isolations (inertie) et la forme géométrique optimale de la construction, voir l'influence de l'infiltration, la stratification de l'air, engendrent aussi d'autres paramètres de confort.

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

ANNEXE

INTEGRATION OF EAVES AND SHADING DEVICES FOR IMPROVING THE THERMAL COMFORT IN A MULTI-ZONE BUILDING

by

Muhammad Abdalkhalaq Chuayb HADDAM¹, Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE², Tayeb BENOUAZ¹, Maamar HAMDANI², Mohamed Kamel CHERIER² and Noceir BENAMRAN²

¹ University of Tlemcen, Algeria BP. 119, Tlemcen R.p. 13000

² Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria

Abstract: This paper introduces a new approach to the description and modelling of multi-zone buildings in Saharan climate. Therefore, nodal method was used to apprehend thermo-aeraulic behavior of air subjected to varied solicitations. A coupling was made between equations proposed by P. Rumianowski and some equations of a building thermal energy model found in the TRNSYS user manual. Runge-Kutta fourth order numerical method was used to solve the obtained system of differential equations.

Theses results show that proper design of passive houses in an arid region is based on the control of direct solar gains, temperatures and specific humidities. According to the compactness index, the insersion of solar shading and eaves can provide improved thermo-aeraulic comfort.

Key words: Eaves – Solar Shading – Temperature – specific humidity – Multizone Model.

1. Introduction

Building simulation has developed rapidly since the 1960s. It is a very important tool to analyze and predict the thermal performance and energy consumption of buildings. Modelling is a trade-off between reliability, accuracy and time. Using software packages in the building environmental engineering field, simulations of building thermal performance are increasingly being used to address real world problems in the design of energy efficient buildings and healthy buildings. Heat, Air and Moisture models describe combined heat, air and moisture transfer in building components. The models differ in the way the transfer phenomena are modelled [1].

Two kinds of mathematical methods are used in the simulation of building thermal performance: one is frequency domain method, such as Fourier transformation, which requires the harmonic decomposition of all heat disturbances with FFT "Fast Fourier Transformation" technique; the other is time domain method, such as transfer function [2], thermal response factors "Z-transform function" [3], nodal method "finite volume" [4], state space method [5]. To date, Simbad [6] has several building models that are mono-zone models. When the user needs to simulate a multizone building, he had to break it down to several monozone blocks and to couple them manually. However, to explain the model separation approach, Ole P. Fanger has identified the dominant modes of heat transfer that need to be described adequately to quantify a building's energy consumption and the occupant's thermal comfort [7].

It is well known that the building envelope is one of the most affecting factors in the energy consumption of buildings. The study of surface temperatures of walls is not of purely academic interest, but a step forward to the comprehension of the building behavior, the improvement of the building envelope, and the prediction of comfort levels inside it. Massive walls (concrete, brick, etc.) are time-dependent in nature, and cannot be modeled by a simple R-value, yet this is what is commonly done leading to inaccurate computer modeling, and incorrect estimation of energy loads. When a particular configuration for the external and internal walls of a building must be studied for a certain climate, there is a wide variety of thermal analysis that can be used to characterize the wall thermal behavior under these outdoor conditions [8].

Various numerical modelling approaches have been used to predict detailed information within the indoor environment. The type of approach used depends on the complexity of the phenomena observed, the results expected, the parameters investigated, and the degree of required accuracy. I A Cartes [9] stress the importance of creating common patterns of design for a better performances achievement of buildings, owing to the fact that traditional models have been inherited and already exist as valid references. The proposed multizone model can easily handle hundreds of zones simultaneously.

Otherwise, in a real building, the instantaneous solar gains are either used to supply part of the losses, or stored in the building structure for later use. Some part of the solar gains is not useful, since they overheat the air. W. A. Monsen et al [10] present a more general design method for direct gain systems. In this paper a simplified method for calculating the solar gain is presented. It shows also the adaptation of a method of thermal analysis, the nodal analysis, linked to the case of building's thermal behaviour. We take successively an interest in the case of conduction into a wall, in the coupling with superficial exchanges and finally in the constitution of thermal models of the building. The study was performed for the air and walls of a residence for Applied Research Unit on Renewable Energies. The transient thermal behavior, especially the temperature of the air and walls was monitored during one summer week. The fitting with the thermal behavior predicted by this method is discussed. In this contribution, thermal nodal method was used to apprehend thermal behavior of air subjected to varied solicitations. The nodal analysis is a powerful method of investigation in the thermal analysis of systems. It has been used in several branches such as solar energy systems [11], micro-electronics [12] or also the spatial field [13]. We will gradually use this approach in the domain of building's physics and we'll interest ourselves in the automatic generation of nodal models.

2. Multi-zone building modeling: mass and enthalpy balances

One of the fundamental laws of physics states that mass can neither be produced nor destroyed, i.e. mass is conserved. Although energy can change in form, it can not be created or destroyed. These two laws of physics provide the basis for two tools which are used routinely in environmental engineering and science "the mass balance and the enthalpy balance", knowing that the enthalpy is a measure of the total energy of a thermodynamic system.

2.1 Enthalpy balance

Assuming that an area "zone i" is in contact with N+1 other zone, outside is represented by area N° 0. For the zone i, the enthalpy change per unit time is written by the following equation [14]:

$$\frac{dH(i)}{dt} = H^e(i) - H^{leav}(i) + \sum_{j=i}^{NW(i)} h_{cij} (T_{sij}(i) - T_{al}(i)) + P_L + P_s + CI_L + CI_s \quad (1)$$

$$H^e(i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n, i) (T_{al}(n) C_{as} + r_s(n)) (L_v + C_v T_{al}(n)) \quad (2)$$

$$H^{leav}(i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(i, n) (T_{al}(i) C_{as} + r_s(i)) (L_v + C_v T_{al}(i)) \quad (3)$$

$\sum_{j=i}^{NW(i)} h_{cij} (T_{sij}(i) - T_{al}(i))$: expressions of the convective flow exchange between surfaces j of walls for zone i corresponding to a temperature T_{sij} and the air mass in this zone corresponding to a temperature T_{al} (W) [15]

Expression of convective transfer coefficients due to exchange between the air and walls inner surfaces are given in [16]:

2.2 Mass balance of dry air

In the building thermal, temporal variations in mass are very low amounts, which allow simplification of the conservation equation of air mass in zone I [14].

$$\sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n, i) - Q_{mas}^{trans}(i, n) = \frac{dm_{as}}{dt} \approx 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n, i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(i, n) \quad (4)$$

This equation reflects that the sum of the mass flows of dry air entering the zone i is equal to the sum of the mass flows leaving the zone i . This equation allows us, hereinafter, to simplify the writing of enthalpy balances.

2.3. Enthalpy changes: sensible and latent balance

An enthalpy change describes the change in enthalpy observed in the constituents of a thermodynamic system when undergoing a transformation or chemical reaction [17].

$$H(i) = H_s(i) + H_L(i) = m_{as} C_{as} T_{al}(i) + m_{as} r_s(i) (L_v + C_v T_{al}(i)) \quad (5)$$

We can neglect $m_{as} C_v T_{al}(i)$ if we compare this amount with $m_{as} r_s(i) L_v$, $L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ and $C_v = 1.96 \text{ kJ/kg K}$. Therefore,

$$H_s(i) \approx m_{as} C_{as} T_{al}(i) \quad (6)$$

$$H_L(i) \approx m_{as} r_s(i) L_v \quad (7)$$

This helps to write the following equation [14]:

$$\frac{dH(i)}{dt} = \frac{dH^e(i)}{dt} - \frac{dH^{leav}(i)}{dt} \quad (8)$$

This simplification allows us to write two equations of enthalpy balance: Sensible balance: as a function only of T_{al} . Latent balance: as a function only of r_s . As we have already mentioned, in the building thermal, temporal variations in mass are very low amounts, the change in enthalpy can be assimilated to the variation in temperature:

$$\frac{dH_s(i)}{dt} = \frac{d(m_{as} C_{as} T_{al}(i))}{dt} = C_{as} \frac{dm_{as}}{dt} T_{al}(i) + C_{as} \frac{dT_{al}(i)}{dt} m_{as} \quad (9)$$

$$\frac{dH_s(i)}{dt} = H_s^e(i) - H_s^{leav}(i) + \sum_{j=i}^{NW(i)} S_j h_{cij} (T_{sij}(i) - T_{al}(i)) + P_s + CI_s \quad (10)$$

From this result, the following equation was obtained for the temperature function [14]

$$\rho_{as} C_{as} V(i) \frac{dT_{al}(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) C_{as} (T_{al}(n) - T_{al}(i))] + \sum_{j=i}^{NW(i)} [S_j h_{cij} (T_{sij}(i) - T_{al}(i))] + P_s + CI_s \quad (11)$$

We obtain a system of N equations with N unknowns; the main variables are the air temperatures in each zone. The surface temperature T_{sij} will be obtained by establishing thermal balance of the wall inner surface. It is through these balances that we see couplings with other modes of heat transfer.

In the same manner as the sensible balance, neglecting the term dm_{as}/dt , and with using the simplified conservation equation of the dry air mass, we get the equation 15:

$$\frac{dH_L(i)}{dt} = H_L^e(i) - H_L^{leav}(i) + P_L + CI_L \quad (12)$$

$$m_{as}(i) = \frac{V(i)}{v_s(i)} \quad (13)$$

$$\frac{dH_L(i)}{dt} = \frac{d(m_{as} r_s(i) Lv)}{dt} = Lv \frac{dm_{as}}{dt} r_s(i) + Lv \frac{dr_s(i)}{dt} m_{as} \quad (14)$$

$$m_{as}(i) \frac{dr_s(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) (r_s(n) - r_s(i))] + \frac{P_L}{L_v} + \frac{CI_L}{L_v} \quad (15)$$

As for the sensitive balance, a system of N equations with N unknowns is obtained; the main variables are the specific humidities in each zone [14].

We can use the empirical formulas of Nadeau and Puiggali [18]; specific humidity may be expressed as a function of relative humidity by the relationship:

$$H_s = \frac{0.622 P_{sat}(T) Hr}{101325 - P_{sat}(T) Hr} \quad (16)$$

$$P_{sat}(T) = e^{23.3265 - \frac{38027}{T} - \left[\frac{472.68}{T}\right]^2} \quad (17)$$

3. Heat conduction model and coupling with superficial exchanges

For an envelope's wall, and in the hypothesis of mono-dimensional conductive transfers, the transposition of the thermal problem of conduction into an electrical problem is called thermo-electrical analogy. The nodes, which in an electrical meaning symbolize equipotentials, correspond to isotherm lines. Therefore, each of those nodes is getting an electrical capacitor, traducing the thermal storage of the corresponding wall's part, and allowing in this the traduction of the thermal inertia effects. In this section, we propose a simplified approach allows representing the multilayer system by a model based on an electrical analogy proposed by Rumianowski et al in 1989, and then it was taken by Con et al. in 2003 [19]. It is often used when we intresse to the determination of the temperature of any node inside a wall. The conduction model is given in detail in references [16, 19-20].

4. Location, climate, nodal structure and description of typical house plan

Ghardaïa region (32.4° N, 3.8° E) is located 600 km from the coast, at an altitude of 450 m above sea level. It is influenced by a dry climate, characterized by very low precipitations (160 mm/year), very high temperatures in summer and low temperatures in winter (frosty from December to mid-February). The climate is hot and dry in the summer with temperatures variation between a maximum of around 45 °C and a minimum of 20 °C, thus giving a large diurnal temperature swing. Winter temperatures vary between a maximum of 24 °C and a minimum of 0 °C. Its normal temperature in January is 10.4 °C; it is 36.3 °C in July. The average annual range is about 12.2° amplitudes of monthly average temperatures. They are more moderate in winter than in summer (average 11°C in winter cons 13.5 °C in summer). The monthly maximum amplitudes are larger in summer than in winter fluctuates around 20 °C. Solar radiation is intense throughout the year with a maximum of 700 W/m² in winter and 1000 Wm² in summer, measured on the horizontal surface [20].

The study was carried out on a building in URAER Ghardaïa. Figure 1 is a schematic outline of partment building, the apartment has a surface of 95.74 m² with a living space of 71.3 m², and wall heights are equal to 2.8 m. A given building is composed of a certain number of rooms, walls, doors and also glass-windows. Layer thickness, composition and thermal transmittance values U for walls, ground and roof and glass thermal transmittance values are given in references [20-25]. In these works, the diagram and the solar path serve to identify the shade and particularly the influence of the shade of walls on the other opaque walls

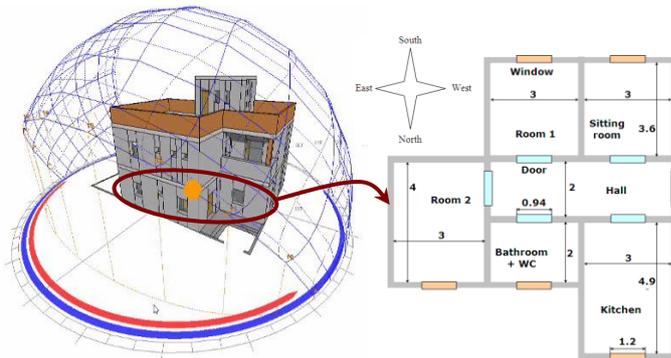


Figure 1. Diagram, solar path and descriptive plane

	Composition	Thickness (cm)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
Exterior walls	Mortar cement	1.5	1.97
	Stone	40.0	
	Mortar cement	1.5	
	Coating plaster	1.0	
Interior walls	Mortar cement	1.5	2.82
	Stone	15	
	Mortar cement	1.5	
	Coating plaster	1.0	
Ground	Tiling	2.5	0.93
	Cement	1.0	
	Stone	6.0	
	Concrete	24.0	
Roof	Plaster	1.5	1.05
	Slab	12.0	
	Mortar	3.0	
Flat glass	Single pane, clear	0.2	5.91

Table 2: Layer thickness, walls composition and U values for building envelope

Therefore, the splitting up of the building into thermal zones induces the setting of nodes of temperature by zone. We have been induced to assign a type to each node. The nodes are concerned with different phenomena. In [16], we give the types of nodes encountered. For a given building, when the node structure is established, it is easy to fill up each element of the mathematical model. The structure will include six zones' numbers (figure 1). Windows shall be designed to limit air leakage. The air infiltration rate shall not exceed 2.8 m³/h per linear metre of sash crack when tested under a pressure differential of 75 Pa. For our study, we consider that the window composition comprises in addition to the configuration given in Table 1, wood blinds usually separated from the previous configuration by an air gap of 2 cm. We assume that the heat transfers through windows are only by conduction. However, the doors are made of wood with a thickness of 2 cm: $\lambda = 0.14 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 500 \text{ kg m}^{-3}$ and $C_p = 2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, λ , ρ and C_p are, respectively, thermal conductivity, density and specific heat capacity).

5. Integration of the eave and their effect upon the temperature

Implementing the general law of building energy conservation, we arrive to a non stand alone system governed by one hundred and forty one non linear ordinary differential equations. Subsequently, it is essential to implement numerical methods that compute these temperatures. Designed to solve such problems, Runge Kutta fourth order numerical method was used to apprehend thermal behavior of walls and air subjected to varied solicitations. The elaborated interactive programs allowed a better understanding heat transfer phenomenon of walls and air under dynamic regime. Windows and black-out curtains remained closed all over the period. The instantaneous temperatures of air and wall surfaces were calculated by entering the measured meteorological data.

In a hot climate, it is essential to reduce the exposed wall surfaces to protect them from overheating in summer. So in integrating the shading device on the southern walls, we can significantly reduce temperatures. To show the advantage of the shading device we chose the days of 25 to 30 August, these days correspond to a completely clear sky and an ambient temperature between 24 and 42 °C. Wind velocity is between 0.25 and 10.2 m s⁻¹ and the average relative humidity equal to 35 %. The incident solar radiation (diffuse radiation) for a vertical plane facing south was determined using numerical models [26-27]. Figure 2 gives an idea of the temperature profiles obtained by numerical simulation, and figure 3 predicts the calculated specific humidity using the same conditions inside the sitting room for two different cases: if the habitat is in its original state and if the habitat is with the shading device. These results take into account the compactness index: the main impact of building compactness from the indoor climate point of view is its effect on the envelope's surface area, relative to the floor's area, or the space volume, and hence, the rate of heat exchange of the building with the outdoors. In hot dry climates, the surface volume area ratio should be as low as possible to minimize heat gain and the compactness is better when the compactness index is lower [16]. The first is the real or ordinary case: the house is exposed to the sun at its four facades and compactness index equal to 0.5882. The second case corresponds to a row house, i.e. only the south and north facades are exposed S/V=0.2564.

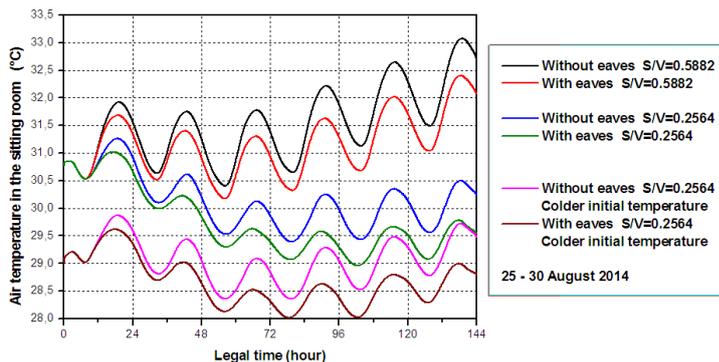


Figure 2. Sitting room temperatures

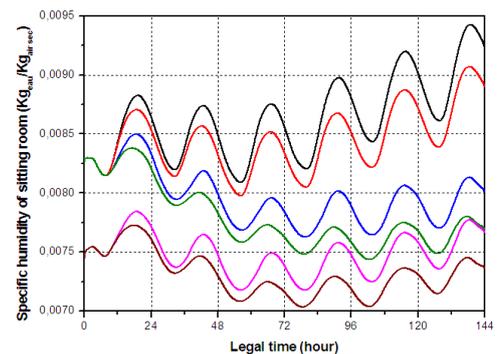


Figure 3. Specific humidity of sitting room

The most commonly used indicator of thermal comfort is air temperature, it is easy to use and most people can relate to it. But although it is an important indicator to take into account, air temperature alone is neither a valid nor an accurate indicator of thermal comfort. Air temperature should always be considered in relation to other environmental factors: radiant temperature, air velocity and Humidity. The advantage of our proposed model is that these four factors were taken into consideration. The present study demonstrates that the inclusion of the shading device (eaves) slightly

reduced the temperature of sitting room; the difference maximum (1 °C) is at 19:45, and specific humidity follows the same scenario. Consequently, we can say that the integration of this architectural technique does not achieve thermal comfort since the internal temperatures are not reached. In winter the angle between the rays and the horizontal is less important in summer many winter rays pass under the eaves and reach the façade. While some summer rays reach the façade; they are stopped by shading devices.

5. Integration and effect of solar shading

The main function of a shading system is the protection of the building transparent envelope from solar radiation in summer conditions, so preventing overheating by blocking the access of unwanted energy flow into the building. Among the several shading solutions for limiting this thermal load, intercepting the solar radiation before it reaches the glazed area, through the use of external shading devices, is the most effective one [28]. We are interested in optimizing the length of the roof overhang. Figure 4 shows a detailed geometric description of this roof overhang. The incident radiation is reduced by shading; this can be explained by a radiation attenuation factor, which is the ratio of the shaded area and the total area of the glazing. For the direct radiation component, the attenuation factor F_B is calculated using the geometric laws that connect the shaded area O to the other parameters shown in figure 4.

$$F_B = \frac{O}{H} \quad (18)$$

$$O = \frac{A \left(\tan(h_s) - \frac{1}{\tan \theta} \right)}{1 + \frac{\tan(h_s)}{\tan \theta}} - D \quad (19)$$

As a first approximation, the attenuation factor F_d of the diffuse radiation component can be calculated by taking the ratio between the angle at which the solar shading is seen from the windows, this according to the two main directions (zenith and azimuth).

$$F_d = \frac{\arctan\left(\frac{A}{(D + (H/2))}\right)}{\pi - \theta} + \frac{\pi - 2\theta}{2\pi - 2\theta} \quad (20)$$

If the sensor is semi-transparent, the masking effect is not the same compared to a completely opaque sensor. In this case, we must introduce a coefficient C_{ST} to take into account the semi-transparency of the masking effect. The new attenuation factor F'_B can be calculated as follows:

$$F'_B = C_{ST} F_B = C_{ST} \frac{O}{H} \quad C_{ST} = (1 - \xi) + \tau_v \xi \quad \xi = \frac{(1 - S_{cel})}{S_{tot}} \quad (21)$$

From the expressions 19 and 21, the attenuation factor is calculated as follows:

$$F'_B = \frac{C_{ST}}{H} \left[\frac{A \left(\tan(h_s) - \frac{1}{\tan \theta} \right)}{1 + \frac{\tan(h_s)}{\tan \theta}} - D \right] = \frac{1}{H} \left[\frac{C_{ST} A \left(\tan(h_s) - \frac{1}{\tan \theta} \right)}{1 + \frac{\tan(h_s)}{\tan \theta}} - C_{ST} D \right] \quad (22)$$

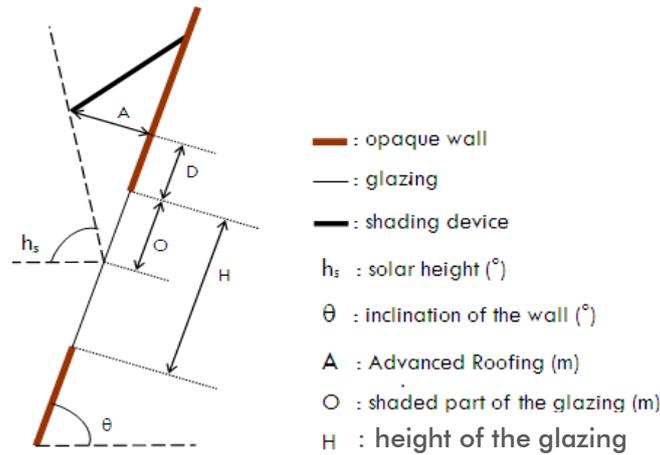


Figure 4. integration of shading device

The semi-transparent mask corresponding to an advanced roofing A , to an overhang D and to a coefficient C_{ST} is equivalent to an opaque mask of an Advanced $A' = C_{ST} A$ (which is to remove the transparent part of the mask) and an overhang $D' = C_{ST} D$ (the overhang does not affect the opaque part of the mask). This study is valuable for opening and even for an opaque wall. For an opening, in our case: $H = 0.9$ m, $O = 0.9$ m, $\theta = 90^\circ$ and $D = 0$ m. Figure 5 shows four examples for two seasons (winter and summer), and this for a latitude corresponding to Ghardaïa province. The calculations correspond to the horizontal advanced roofing that is fixed horizontally.

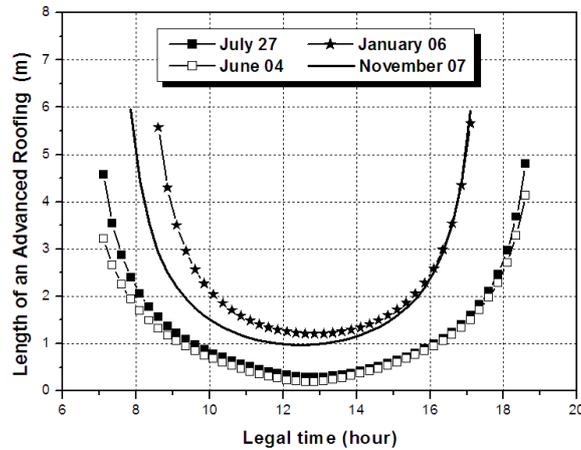


Figure 5. Length variation of the advanced roofing

Moreover, according to the orientation, a vertical opening can be easily managed with respect to solar gain. In contrast, horizontal surfaces capture some energy in winter and bring overheating in summer. The observed results certify that the total shading of the glazing is not provided throughout the day, especially just after sunrise and before sunset. It is necessary to insert advanced roofing "at sunrise" around 4.5 and 3.2 m for selected days in months of June and July respectively. For sunset, it is essential to include advanced roofing around 4.8 and 4.1 m to ensure total shading solutions. This is not obvious for only one glazed surface area of (0.9 m x 0.8 m). Heat transfer through openings depends on receiving surfaces and orientation. The advanced roofing can be designed to control the amount of the direct solar gain. The application of solar shading can reduce solar gain in summer reducing air-conditioning costs and allows solar heat gain in winter, thereby saving heating costs.

6. Conclusion

A new approach to modelling of multizone buildings in Saharan climate was introduced. Thermal nodal method was used to apprehend thermal behavior of air subjected to varied solicitations. The rate of heat exchange of the building with the outdoors. Proper use of building geometry parameters will noticeably minimize building energy and improve the internal temperature of the building. The compactness of a building form is essential for the building energy status. In hot dry climates, the surface volume area ratio should be as low as possible to minimize heat gain and the compactness is better when the compactness index is lower. Heat gains through the walls are certainly the main cause of overheating of these habitat types. This sun protection covers all the external walls of housing: roof, walls and windows. This is an important step in the design of bioclimatic habitats. But, the realization of effective sun protection is the second fundamental phases of the design of energy efficient housing.

The integration of a solar protection with a rectangular geometric shape at the south facing opening does not provide total shade especially at sunrise and sunset. For this reason it is recommended to think about the optimization of the geometry of the solar system and the opening and facade design.

Nomenclature

S	: surface (m^2)	C_v	: heat capacity at constant volume ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
j	: number of the inner surface (wall, door and window) in zone i	C_{as}	: heat capacity of the air mass ($J\ Kg^{-1}\ K^{-1}$)
$NW(i)$: total number of the interior surfaces (wall, door and window) in zone i	H_s, H_L	: sensitive and latent enthalpy of the humid air (J)
$T_{al}(n)$: air temperature of the zone $n =$ air temperature entering the zone i (K)	$H^e(i)$: enthalpy of the humid air mass entering the zone i (J)
T_{sij}, T_A	: temperature of surface j in zone i (K)	$H^{leav}(i)$: enthalpy of the humid air mass leaving the zone i (J)
$r_s(i)$: specific humidity : mass of water vapor contained in the unit mass of dry air (kg_{vap}/kg_{as})	$Q_{mas}^{trans}(n,i)$: mass flow transiting from zone n to zone i (kg/s)
H_r	: relative humidity (%)	$Q_{mas}^{trans}(i,n)$: mass flow of the dry air transiting from zone i to zone n (kg/s)
P_{sat}	: pressure of saturation vapor (Pa)	$CI_s,$: internal sensitive and latent powers due to appliances, occupants, lighting...(W)
L_v	: latent heat of vaporization of water ($J\ kg^{-1}$)	CI_L	
τ_v	: the transmission rate of the transparent part of the sensor	P_s, P_L	: sensitive and latent powers provided by the air-conditioning (W)
ξ	: the semi-transparent sensor, equal to the ratio of the transparent area and the total area of the sensor	S_{cel}	: the covered area (m^2)
		S_{tot}	: the total area (m^2)

References

- [01]: Tianzhen Hong, Yi Jiang, A New Multizone Model for the Simulation of Building Thermal Performance, Building and Environnement, Vol. 32, No. 2. pp. 123-128, 1997.
- [02]: Stephenson, D. G. and Mitalas, G. P., Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multilayer Slabs, ASHRAE Transactions, 1911, 71, 2:117.

- [03]: Stephenson, D. G. and Mitalas, G. P., Room Thermal Response Factors. ASHRAE Transactions, 1967, 73, 2:3:1.
- [04]: Laret, L., Liebecq, G. and Ngendakumana, Ph., Building Specification, IEA Annex 10 report, University of Liege, Belgium, 1988.
- [05]: Jiang, Y., State Space Method for Analysis of the Thermal Behaviour of Rooms and Calculation of Airconditioning Load, ASHRAE Transactions, 1981, 88, 122-132.
- [06]: SIMBAD, 2003, SIMBAD Building and HVAC, Toolbox, Version 3.1, CSTB, France.
- [07]: Ole P. Fanger, Thermal Comfort, McGraw Hill, 1973.
- [08]: Silvana Flores Larsen, Celina Filippin, Graciela Lesino, Thermal Behavior of Building Walls in Summer: Comparison of Available Analytical Methods and Experimental Results for a Case Study, Building Simulation, (2009) 2: 3–18 DOI 10.1007/S12273-009-9103-6.
- [09]: I A Cartes, Traditional Architecture, Building Materials and Appropriate Modernity in Chilean Cities, Renewable Energy, Volume 15, Issues 1 – 4, September – December 1998, Pages 283 – 286.
- [10]: W. A. Mosen, S. A. Klein and W. A. Beckman, prediction of direct gain solar heating system performance, Solar Energy Vol 7, N° 2, pp 143-147, 1981.
- [11]: J. B. Saulnier and A. Alexandre, La Modélisation Thermique par la Méthode Nodale, Ses Principes, Ses Succès et Ses Limites. Revue Générale de Thermique 280, 363-372 (1985).
- [12]: J. L. Auger, A. Alexandre and J. Martinet, Fonctionnement de Capteurs Solaires Plans en Régime Variable. Revue Générale de Thermique 239, 81 1-824 (1981).
- [13]: A. J. Chapman, Heat Transfer, Macmillan, New York (1984).
- [14]: J.J Roux, thermal behavior of buildings (in French), Institut National des Sciences Appliquées, département de génie civil, 2000, INSA de Lyon.
- [15]: Y. Jannot, heat transfer (in French), école des mines, Nancy, 2012.
- [16]: S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaiche et N Benamrane, "Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate", Elsevier, Energy and Buildings vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [17]: <http://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy>.
- [18]: Nadeau and Puiggali, Séchage: des processus physiques aux procédés industriels, Tec & Doc-Lavoisier, 1995 (ISBN 2-7430-0018-X).
- [19]: P. Rumianowski, J. Brau, et J.J Roux, An Adapted Model for Simulation of the Interaction Between a Wall and the Building Heating System. In Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference Orlando, USA, p. 224-233, 1989.
- [20]: S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, Construction and Building Materials 52 (2014) 59–70.
- [21]: M. Hamdani, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, A New Modelling Approach Of A Multizone Building To Assess The Influence Of Building Orientation In Saharan Climate, Thermal Science, 2014, doi: 10.2298/TSCI131217026H.
- [22]: S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, R. M Yaiche, R. Khanniche (2013), Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), International Scientific Journal, Thermal Science, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 349-364.
- [23]: S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz, M. R. Yaiche, M. K. Cherier, M. Hamdani, F. Chellali, Introduction to Control of Solar Gain and Internal Temperatures by Thermal Insulation, Proper Orientation and Eaves, Elsevier, Energy and Buildings vol.43 (2011) pp. 2414–2421.
- [24]: S. M. A. Bekkouche, T. Benouaz and A. Cheknane (2009), A Modelling Approach of Thermal Insulation Applied to a Saharan Building, Thermal Science: Vol. 13 (2009), No. 4, pp. 233-244.
- [25]: S. M. A. Bekkouche, Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique et Modélisation, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Juin 2009.
- [26]: M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Conception and Validation of an Excel Program to Estimate the Solar Radiation Incident in Algeria in the case of a Totally Clear Sky (in French), Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 423 – 436.
- [27]: M.R. Yaïche, A. Bouhanik, S.M.A. Bekkouche, A.Malek, T.Benouaz, Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration, Elsevier Energy Conversion and Management 82 (2014) 114–123.
- [28]: Laura Bellia, Francesco De Falco, Francesco Minichiello, Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates, Applied Thermal Engineering 54 (2013) 190-201.

Résumé: On cherche à étudier une habitation conçue pour bénéficier au maximum de la fraîcheur et de la chaleur du soleil en raison du caractère de sa conception et de la qualité de ses composants (murs, toiture, sol, fenêtre et portes...). En appliquant la loi générale de la conservation de l'énergie, on aboutit à un système d'équation différentielles ordinaires non linéaires. L'établissement de ces dernières est possible pour toutes les techniques envisagées en utilisant par exemple la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4. Les paramètres principaux qui seront testés au cours de cette thèse sont: Situation géographique de l'habitat, Niveau d'isolation thermique des parois opaques (toit et murs), Niveau d'inertie, Orientation (sans et avec isolation thermique), Matériaux de construction (pierre, parpaing et brique).

Mots clés: Protection solaire - température - humidité spécifique - multizone modèle.

Abstract: It seeks to investigate a home designed to take maximum advantage of the freshness and warmth of the sun because of the nature of its design and the quality of its components (walls, roof, floor, windows and doors...). By applying the general law of conservation of energy, we obtain a system of non linear ordinary differential equations. The establishment of the past is possible for all techniques considered using for example the Rung-Kutta numerical method of order 4. The main parameters that will be tested in this thesis are Location of the habitat, thermal insulation level of opaque walls (roof and walls), Inertia Level, and Orientation (With and without therma insulation).

Keywords: Solar Shading - Temperature - Specific humidity - Multizone model.

_____:

نحن نتطلع إلى دراسة منزل الهدف منه الاستفادة القصوى من دفء الشمس بسبب طبيعة تصميمه و جودة مكوناته (الجدران، السقف، النوافذ و الأبواب ...). من خلال تطبيق القانون العام الخاص بالمحافظة على الطاقة، نحصل على المعادلات التفاضلية العادية نذام غير خطي الإنشاء يتم بواسطة طريقة عددية "رونج - كوتا من النظام 4. المعالم الرئيسية التي سيتم اختيارها في هذه الأطروحة هي: موقع الجغرافي، مستوى عزل الجدران(سقف و الجدران)، و مستوى العطالة أو القصور الذاتي، و التوجيه (مع و بدون العزل)، و مواد البناء (الحجر، المسقوفة و الطوب)

_____ : الحماية من أشعة الشمس - درجة الحرارة - الرطوبة محددة - نموذج متعدد المناطق.