

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Energies Renouvelables

ETUDE DE LA DISTRIBUTION DE TEMPERATURE DANS UNE
CELLULE UTILISANT DES MATERIAUX LOCAUX EN MILIEU ARIDE

Par

Djabir YAGOUB

Devant le jury composé de :

A. HAMID	Maître de conférences A USD, Blida	Président
N. KASBADJI	Directeur de recherche, UDES	Examinatrice
D. SEMMAR	Maître de conférences A USD, Blida	Examineur
S.M.A. BEKKOUCHE	Maître de recherche, URAER	Examineur
M. MERZOUK	Professeur USD, Blida	Rapporteur

Blida, Février 2013

RESUME

Dans les régions arides, tel Ghardaïa, l'habitat est soumis à un climat caractérisé par des écarts de température diurnes et saisonniers très élevés. Avec le temps, les méthodes de construction traditionnelles se sont adaptées à ces conditions extrêmes et offrent généralement des conditions de confort thermique acceptable. Ces méthodes de construction comportent à la fois l'adoption des techniques simples et ingénieuses dans la conception architecturale et l'utilisation des matériaux de construction locaux tel que la pierre, l'adobe, la chaux,...etc.

Le but du présent travail est de mettre en évidence l'effet des matériaux de construction sur le comportement thermique d'un habitat soumis aux conditions météorologiques de la région de Ghardaïa. Un modèle mathématique décrivant le processus en régime transitoire a été développé. Le système d'équations différentielles aux dérivées partielles est résolu numériquement, après discrétisation en utilisant une méthode nodale.

Après validation, le modèle a été utilisé pour montrer les effets de différents paramètres sur la variation de la température à l'intérieur de la cellule. Les résultats montrent que les matériaux locaux permettent de réduire nettement les amplitudes de variation de température. Par ailleurs, il est démontré que le rajout d'une isolation appropriée combiné à une orientation adaptée et une peinture externe réfléchissante permettent d'obtenir des conditions de confort très convenables sans apport de système actif.

Mots-clés : matériaux de construction locaux, température, simulation, comportement thermique, volant thermique.

REMERCIEMENTS

Avant tout, je tiens à remercier mon directeur de thèse Monsieur

M. MERZOUK maître de conférences à l'université de Blida pour avoir assuré l'encadrement de ce travail, et pour ses suggestions pertinentes et ses conseils et commentaires pratiques, qui ont été fondamentaux pour mener à bon terme ce mémoire.

Aussi, je remercie vivement Monsieur S.M.A. BEKKOUCHE, maître de recherche à URAER pour avoir Co-encadré cette thèse, et de m'avoir fait profiter de ses connaissances scientifiques.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur A. HAMID, maître de conférences à l'Université de Blida, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse.

Je remercie vivement Madame N. KASBADJI, directrice de recherche à l'UDES et Monsieur D. SEMMAR, maître de conférences à l'université de Blida, pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici mon entière considération.

Mes chaleureux remerciements à la directrice de l'unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables URAER Mme S. CHADER, ainsi qu'à tout son personnel, principalement Messieurs S. BEZARI, B. DADDA, CHRIAR, F.CHELLALI, et O. Gama pour leurs aides et leurs encouragements.

Je suis très reconnaissant envers Messieurs K. KACI et K.IMESSAD qui m'ont aidé à utiliser l'environnement TRNSYS.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur à K. RAMDANE de l'O.P.V.M, ainsi qu'aux Messieurs Y. BOURAS, K. BENKIH, et Y. BARBAR pour m' avoir fourni des documents servant à l'enrichissement de ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux personnels du laboratoire L.T.P SUD, spécialement à mon cousin S. YAGOUB.

Plus intimement, je remercie toute ma famille pour leur soutien, principalement mes parents, mes frères, mes sœurs, et mes oncles pour leur constant appui et leurs encouragements. A ma femme pour ses encouragements et sa patience dont elle a fait preuve durant toute la période de préparation de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX	7
INTRODUCTION	12
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	15
1.1 Gisement solaire	15
1.1.1 Rayonnement Solaire	15
1.1.2 Eclairage reçu sur un plan	21
1.2 Performances énergétiques du bâtiment	24
1.2.1 Introduction	24
1.2.2 Confort de l'occupant	26
1.2.3 Performances énergétiques du bâtiment	31
1.2.3.1 Introduction	31
1.2.3.2 Matériaux de construction	32
1.2.3.3 Travaux expérimentaux et analytiques caractérisant les matériaux de construction de point de vue résistance et inertie thermique	33
1.2.3.4 Isolation Thermique	37
1.2.3.5 Etudes expérimentales et analytiques caractérisant l'isolation thermique	39
1.2.3.6 Conception architecturale	43
1.2.3.7 Fenêtres	45
1.2.3.8 Couleur des parois extérieures	47
1.2.3.9 Ventilation	48
1.3 Matériaux de construction Et Matériaux isolants	50
1.3.1 Introduction	50
1.3.2 Matériaux de construction	51

1.3.3 Matériaux isolant	56
1.4 Détermination des caractéristiques thermo-physique des matériaux	61
1.5 Conclusion	68
CHAPITRE 2 : CLIMAT ET HABITAT TRADITIONNEL DANS LA REGION DE GHARDAIA	70
2.1 Introduction	70
2.2 Climat de Ghardaïa	71
2.2.1 Classification du Climat en Algérie	71
2.2.2 Paramètres météorologiques de Ghardaïa	72
2.3 Méthodes de construction traditionnelles à Ghardaïa	77
2.4 Conclusion	81
CHAPITRE 3 : MODELISATION DU SYSTEME THERMIQUE D'UNE CELLULE	83
3.1 Introduction	83
3.2 Présentation de la cellule et hypothèses	83
3.2.1 Dimension et orientation	83
3.2.2 Constitution de l'enveloppe de la cellule	84
3.2.3 Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction	86
3.2.4 Hypothèses	86
3.3 Bilan énergétique	87
3.3.1 Les échanges thermiques intérieurs et extérieurs de la cellule	87
3.3.2 Modèle de transfert par conduction dans les parois	91
3.3.3 Bilan énergétique sur une paroi	94
3.3.4 Bilan énergétique sur le volume interne	94
3.3.5 Système d'équations à résoudre	95
3.4 Simulation du comportement thermique de la cellule et validation	96
3.4.1 Déroulement de la simulation	96
3.4.2 Résultats et discussion	97
3.5 Conclusion	105
CHAPITRE 4 : SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA CELLULE A GHARDAIA	106

4.1 Introduction	106
4.2 Température ambiante et estimation de l'éclairement solaire à Ghardaïa	106
4.3 Simulation du comportement thermique de la cellule à Ghardaïa	109
4.4 Etude de l'effet des matériaux de construction	118
4.5 Etude de l'effet de l'isolation	125
4.6 Etude de l'effet de l'orientation	132
4.7 Etude de l'effet de la couleur	134
4.8 Conclusion	135
CONCLUSION	137
LISTE DES SYMBOLES	139
BIBLIOGRAPHIE	141

LISTE DES FIGURES

Fig. (1.1)	Spectre de rayonnement solaire	16
Fig. (1.2)	Mouvement du soleil	17
Fig. (1.3)	Rotation de la terre autour du soleil	18
Fig. (1.4)	Mouvement apparent du soleil observé d'un point d'altitude L	19
Fig. (1.5)	Equation du temps ET, et déclinaison δ en onction du jour de l'année	20
Fig. (1.6)	Repère horizontal	20
Fig. (1.7)	Evolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année	28
Fig. (1.8)	Répartition des échanges de chaleur d'une personne en fonction de la température ambiante, supposée homogène.	29
Fig. (1.9)	Diagramme Psychométrique, ou diagramme de Carrier	31
Fig. (1.10)	Isolation thermique intérieure et extérieure d'un habitat.	39
Fig. (1.11)	Déperditions comparées de l'enveloppe de différents logements	44
Fig. (1.12)	Orientation d'un habitat bioclimatique	45
Fig. (1.13)	Fenêtre avec profilés en aluminium à rupture du pont thermique	47
Fig. (1.14)	Schéma de principe d'une installation avec conduits shunt (ventilation naturelle)	49
Fig. (1.15)	Schéma de principe de la ventilation mécanique	50
Fig. (1.16)	La méthode traditionnelle de préparation du mortier de chaux aérienne	56
Fig. (1.17)	Laine de verre	58
Fig. (1.18)	Laine de roche	58
Fig. (1.19)	Fibre de bois	58
Fig. (1.20)	Béton cellulaire autoclavé	59
Fig. (1.21)	Polystyrène extrudé	60
Fig. (1.22)	Effusivité thermique de Quelques matériaux	63
Fig. (1.23)	Chaleur spécifique de quelques matériaux de construction	64
Fig. (1.24)	Schéma de principe de mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée	65
Fig. (1.25)	Schéma de principe de la méthode des boites	66

Fig. (1.26)	Schéma de principe de mesure des caractéristiques thermiques par la méthode des signaux	66
Fig. (2.1)	Carte de l'Algérie, situation de la Wilaya de Ghardaïa.	72
Fig. (2.2)	Moyennes mensuelles de l'humidité relative 2008, 2009, 2010	73
Fig. (2.3)	Variation de la vitesse du vent à Ghardaïa, moyennes mensuelles	74
Fig. (2.4)	Moyennes mensuelles de température relevée en 2008, 2009, 2010	74
Fig. (2.5)	Variation de l'écart diurne de température relevé en 2008, 2009, 2010	75
Fig. (2.6)	Variation des moyennes mensuelles de l'insolation 2008, 2009, 2010	76
Fig. (2.7)	Mur en pierre	77
Fig. (2.8)	Toiture traditionnelle	77
Fig. (2.9)	Utilisation de la pierre dans différents domaines de construction à Ghardaïa	80
Fig. (3.1)	Orientation et dimensions de la cellule à étudier	83
Fig. (3.2)	Constitution des murs de la cellule	84
Fig. (3.3)	Constitution du toit de la cellule	85
Fig. (3.4)	Constitution du sol de la cellule	85
Fig. (3.5)	Echanges thermiques sur les faces intérieure et extérieure d'une paroi	87
Fig. (3.6)	Calcul de facteur de forme entre différentes surfaces du parallélépipédique	88
Fig. (3.7)	Bilan thermique sur un système d'épaisseur (dx) d'une paroi	92
Fig. (3.8)	Schéma de décomposition en réseau nodal d'une paroi	93
Fig. (3.9)	Variation de la température intérieure et extérieure de l'air, le 15 Février. Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle et par TRNSYS.	97
Fig. (3.10)	Variation de la température intérieure et extérieure de l'air, le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle et par TRNSYS	98

Fig. (3.11)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Est le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS	98
Fig. (3.12)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Est le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	99
Fig. (3.13)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Ouest le 15 Février, comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	100
Fig. (3.14)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Ouest le 08 Juillet, comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	100
Fig. (3.15)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Sud le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	101
Fig. (3.16)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Sud le 08 Juillet, Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	101
Fig. (3.17)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Nord le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	102
Fig. (3.18)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Nord le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	103
Fig. (3.19)	Variation de la température intérieure et extérieure du toit le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	104
Fig. (3.20)	Variation de la température intérieure et extérieure du toit le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.	104
Fig. (4.1)	Variation de la température ambiante (journée du 15 Février/2011)	107
Fig. (4.2)	Variation de la température ambiante (journée du 8 Juillet/2011)	107

Fig. (4.3)	Variation de l'éclairement solaire par ciel clair selon les différentes orientations d'un plan incliné (Journée 15 Février)	108
Fig. (4.4)	Variation de l'éclairement solaire par ciel clair selon les différentes orientations d'un plan incliné (Journée 08 juillet)	109
Fig. (4.5)	Variation de la température de l'air intérieur et extérieur, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet	110
Fig. (4.6)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Est, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet	111
Fig. (4.7)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Ouest, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet	112
Fig. (4.8)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Sud, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet	113
Fig. (4.9)	Variation de la température intérieure et extérieure du mur Nord, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet	114
Fig. (4.10)	Mouvement apparent du soleil, en hiver et en été.	115
Fig. (4.11)	Variation des températures intérieures des différentes parois, pour les journées du 15 Février	116
Fig. (4.12)	Variation des températures intérieures des différentes parois, pour les journées du 08 juillet.	116
Fig. (4.13)	Variation de la température ambiante et de la température de l'air, dans les différents types de construction, 15 Février.	121
Fig. (4.14)	Variation de la température ambiante et de la température de l'air, dans les différents types de construction, 08 juillet.	122
Fig. (4.15)	Variation de la température intérieure du toit, dans les différents types de construction, 15 Février.	123
Fig. (4.16)	Variation de la température intérieure du toit, dans les différents types de construction, 08 juillet.	124
Fig. (4.17)	Variation de la température ambiante et de la température de l'air, dans les différents types d'isolation, 15 février.	127
Fig. (4.18)	Variation de la température ambiante et de la température de l'air, dans les différents types d'isolation, 08 juillet.	128
Fig. (4.19)	Variation de la température intérieure du mur sud, dans les différents types d'isolation, 15 février.	129

Fig. (4.20)	Variation de la température intérieure du toit, dans les différents types d'isolation, 15 février.	130
Fig. (4.21)	Variation de la température intérieure du toit, dans les différents types d'isolation, 08 juillet.	130
Fig. (4.22)	Orientations de la cellule proposées	132
Fig. (4.23)	Variation de la température de l'air, dans les différentes orientations de la cellule, 15 février	133
Fig. (4.24)	Variation de la température de l'air, dans les différentes orientations de la cellule, 08 juillet	133
Fig. (4.25)	Variation de la température de l'air, pour les différentes valeurs de (Alpha), journée du 08 juillet.	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (1.1)	Conductivité thermique de quelques matériaux	62
Tableau (1.2)	Diffusivité thermique de quelques matériaux	63
Tableau (2.1)	Moyennes mensuelles des irradiations journalières globales	75
Tableau (2.2)	Moyennes mensuelles des fractions d'insolation	77
Tableau (2.3)	Composition chimique de la pierre dans la région de Ghardaïa	81
Tableau (2.4)	Propriétés physiques de la pierre dans la région de Ghardaïa	81
Tableau (3.1)	Propriétés thermo physiques de matériaux de construction	86
Tableau (3.2)	Valeurs de C et n	90
Tableau (4.1)	Les types de construction proposés	118
Tableau (4.2)	Propriétés thermo physiques de matériaux de construction	120
Tableau (4.3)	Types d'isolation proposés	126
Tableau (4.4)	Propriétés thermo-physique du polystyrène et de la lame d'air	126

INTRODUCTION

Avec la raréfaction des ressources d'énergies fossiles et leurs coûts qui prennent l'ascenseur, en plus des effets négatifs des émissions qui en résultent sur le réchauffement de la planète, l'économie de l'énergie est devenue une préoccupation majeure pour les scientifiques comme pour les politiciens et les économistes.

De nos jours, la plupart des bâtiments à usage d'habitation ou industriel consomment énormément d'énergie pour assurer un confort thermique acceptable par ces occupants, avec 30 % à 40 % de la consommation d'énergie totale selon les pays [25]. Cela cause un épuisement inquiétant des ressources naturelles et amener à des conséquences néfastes pour l'environnement. A ce propos, la recherche d'une conception thermique adaptée aux climats des pays concernés devrait être une des préoccupations prioritaires. En effet, l'efficacité énergétique dans les bâtiments et l'isolation thermique des enveloppes constituent un domaine de recherche très important et ont connu un grand développement ces dernières années [31]. L'application de plusieurs stratégies tel qu'une implantation réfléchie, une orientation optimale, un choix pertinent des matériaux, une isolation performante, le recours aux énergies renouvelables sont autant de solutions à prendre en compte pour réaliser des économies d'énergie et minimiser l'impact sur l'environnement [29].

Dans ce contexte, l'Algérie accuse un retard considérable, essentiellement dû à la subvention par l'état des énergies fossiles comme le gaz naturel [22]. En conséquence, des habitations mal adaptées au climat local, qui consomment énormément d'énergie pour le chauffage et la climatisation. Au titre indicatif, le secteur résidentiel et tertiaire en Algérie se trouve parmi les plus énergivores avec une consommation de 41 % de l'énergie finale [24].

La gamme des matériaux de construction est très variée, donc leurs caractéristiques sont très diverses. Le choix pertinent doit prendre en compte la réalisation d'une construction durable, économique du point de vue de la consommation d'énergie et respectueuse de son environnement depuis sa construction jusqu'à sa destruction.

Les produits locaux sont moins coûteux et capables d'être utilisés comme des matériaux isolants et porteurs. Ils permettent ainsi de réaliser des économies d'énergie [12] alors que le procédé de fabrication classique du ciment, la base de beaucoup de matériaux de construction industrialisés, consomme énormément d'énergie et produit des déchets toxiques [11].

Ce présent travail a pour objectif de faire une étude sur la contribution des matériaux de construction dans le comportement thermique de l'habitat dans les régions arides, tout en faisant le point sur la pierre utilisée pour la construction des édifices dans la région de Ghardaïa. A ce propos, une étude par simulation numérique du système thermique d'une cellule est menée afin de prévoir la distribution de la température. Cela nous permet donc de comparer entre l'utilisation de la pierre, de la brique rouge et du parpaing.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres organisés de la façon suivante.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique permettrait à la fois de présenter les différentes définitions liées à l'énergétique du bâtiment et d'effectuer un état de l'art sur les travaux expérimentaux et analytiques portant sur l'effet des matériaux de construction et de l'isolation thermique sur le confort thermique à l'intérieur des édifices.

Ce chapitre se divise en trois parties : la première, comprend des différentes définitions concernant le gisement solaire, ainsi qu'une présentation du modèle l'Atlas Solaire d'Algérie, pour l'estimation de l'éclairement solaire par ciel clair.

La deuxième partie regroupe les différentes définitions sur le confort thermique et les performances énergétiques du bâtiment, ainsi que les travaux expérimentaux et analytiques caractérisant les matériaux de construction et l'isolation thermique du point de vue résistance et inertie thermique. Nous terminons ce chapitre par une illustration des différents matériaux de construction et d'isolation, ainsi qu'une brève présentation de quelques méthodes de caractérisation thermo-physique des matériaux de construction.

Le deuxième chapitre comporte une présentation générale de la zone d'étude : conditions météorologiques, techniques de construction traditionnelles, et caractéristiques de la pierre locale utilisée dans le domaine de la construction.

Dans le troisième chapitre nous procédons à la simulation du comportement thermique de la cellule, en modélisant dans l'environnement MATLAB son système thermique. Le modèle sera validé, en confrontant ces résultats avec ceux obtenus par TRNSYS.

Enfin, dans le dernier chapitre le modèle obtenu nous sert à étudier la distribution de la température dans la cellule, en tenant compte des paramètres météorologiques de Ghardaïa. Ensuite, nous allons changer les matériaux de construction pour voir leur influence sur le comportement thermique de la cellule. De plus, nous allons tester l'effet de l'isolation thermique, l'orientation de la cellule, et la couleur extérieure de l'enveloppe.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Gisement solaire

1.1.1 Rayonnement solaire

1.1.1.1 Généralités

L'énergie produite par les réactions thermonucléaires dans le soleil est rayonnée dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques dans un spectre très étalé (des ondes métriques aux rayons gammas en passant par la lumière visible), [1].

La Terre étant à une distance de 150×10^6 km du Soleil, elle reçoit une énergie de $1,8 \cdot 10^{17}$ W, [3].

La densité de flux totale vaut en moyenne $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ (E_0 constante solaire), essentiellement reçu dans la bande de $0,3 \mu\text{m}$ (ultraviolet) à $2,5 \mu\text{m}$ (infrarouge proche). L'émission maximale se trouve à $0,55 \mu\text{m}$, correspondant à la couleur verte, [1].

L'absorption et la diffusion atmosphérique ont pour effet de diminuer cette intensité d'une manière générale dans toutes les longueurs d'onde et plus fortement dans certaines bandes d'absorption moléculaires des composants de l'air [1]. La figure (1.1) représente le spectre du rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère et au niveau de la mer, par ciel clair, [2].

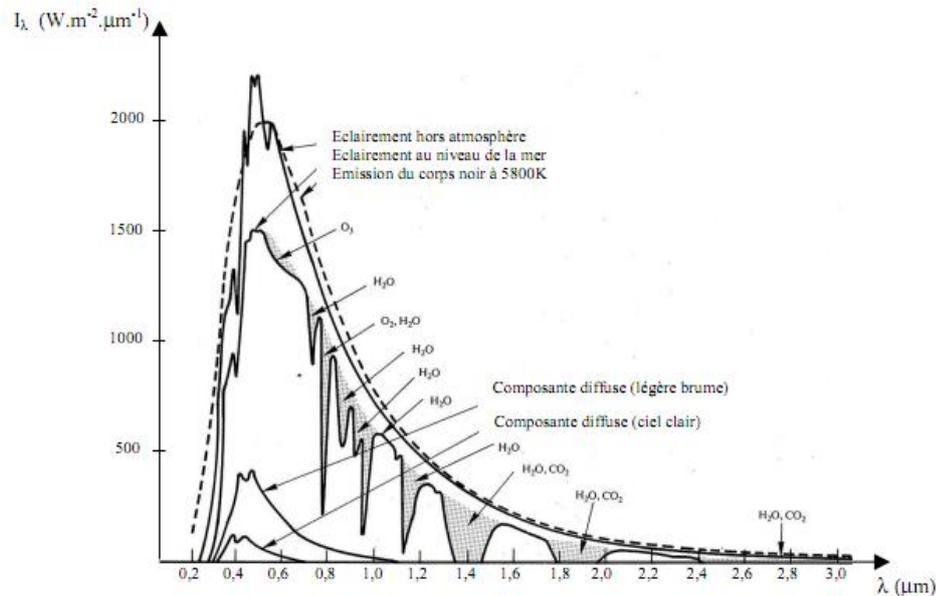


Figure (1.1) : Spectre de rayonnement solaire [2]

Au niveau du sol, l'éclairement solaire, est donc diminué en intensité et son spectre est modifié. Une composante diffuse apparaît.

A la surface de la terre les endroits les plus ensoleillés, comme le sud du Sahara, reçoivent annuellement environ 2000 kWh/m^2 . En région tempérée, on en reçoit plus de la moitié. Aux altitudes usuelles (proches du niveau de la mer) et dans la zone tempérée, l'éclairement solaire est au maximum de l'ordre de 1000 W/m^2 sur une surface perpendiculaire au rayonnement solaire.

Dans ces mêmes conditions, la fraction du rayonnement diffus varie entre le quart et le tiers du rayonnement global. Dans le cas de ciel couvert, il n'y a plus de composante directe, et la composante diffuse, dont la distribution est d'autant plus isotrope que le ciel est plus couvert, devient bien plus faible, par exemple de l'ordre de 100 W/m^2 sur une surface horizontale pour un ciel bien couvert [1].

1.1.1.2 Constante solaire

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire. La constante solaire a été estimée à 1367 W.m^{-2} par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse). Cette valeur de la constante solaire a été adoptée par la Commission des instruments et

des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) en octobre 1981 [6].

Puisque la distance terre soleil est variable (Trajectoire elliptique), la constante solaire (I_0) est variable durant l'année. La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \dots\dots\dots(1.1)$$

La constante solaire corrigée est: $I = I_0 C_{t-s} \dots\dots\dots(1.2)$

1.1.1.3 Position du soleil et angles solaires

1.1.1.3.1 Mouvement apparent du soleil

Les mouvements de la terre dans l'espace permettent à un observateur sur terre d'observer des mouvements apparents du soleil qui sont :

- La rotation de la terre sur elle-même provoque un mouvement apparent du soleil de l'est vers l'ouest du matin au soir
- La rotation de la terre autour du soleil qui explique qu'en été le soleil passe plus haut dans le ciel,[1].

Le schéma suivant montre la course apparente du soleil dans le ciel d'une ville de l'hémisphère nord.

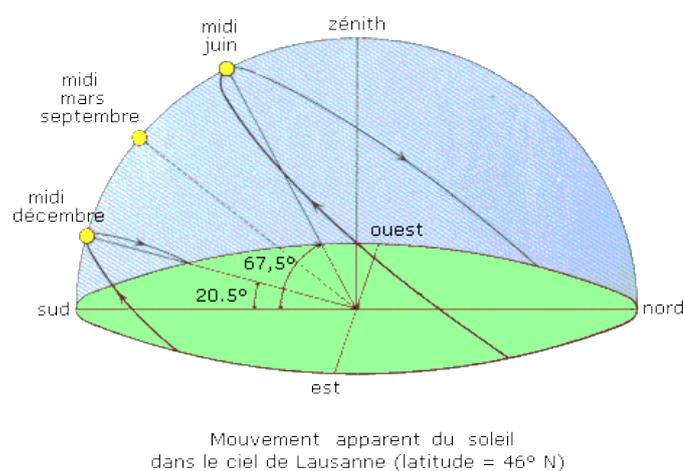


Figure (1.2): Mouvement du soleil, [1]

La figure (1.3) montre la rotation de la terre autour du soleil durant l'année

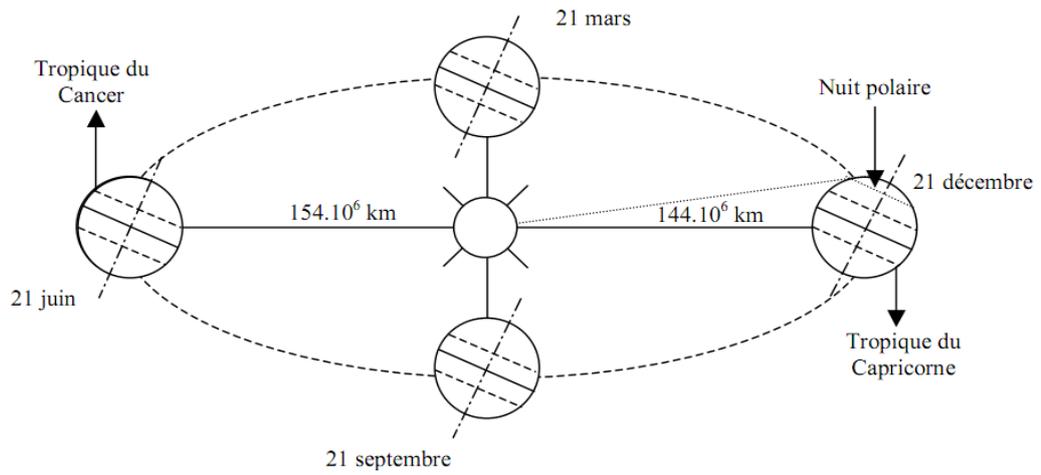


Figure (1.3): Rotation de la terre autour du soleil, [2]

1.1.1.3.2 Temps légal et temps solaire vrai

Le temps solaire vrai est défini par le passage du Soleil au Zénith à midi vrai ($T_{sv} = 12$, implique que le soleil est au sommet de sa course) [1]

Le temps légal T_L et le temps solaire T_{sv} sont reliés par l'équation suivante:

$$T_{sv} = T_L - C + \frac{(4Long_{lieu} + E_t)}{60} \dots \dots \dots (1.3)$$

Avec :

T_{sv} : Temps solaire vrai

T_L : Temps local

$Long_{lieu}$: Longitude de lieu

C : Correction étatique (Différence des heures entre le lieu concerné et le méridien de Greenwich).

E_t : Equation du temps, Elle est donnée par la relation suivante:

$$E_t = 9.87 \sin(2 N) - 7.53 \cos(N) - 1.5 N \dots \dots \dots (1.4)$$

Avec:

$$N = \frac{360}{365} (j - 81) \dots \dots \dots (1.5)$$

J : Le numéro de jour.

1.1.1.3.3 Repérage du soleil

Dans les calculs de l'éclairement solaire, on utilise deux systèmes de coordonnées qui sont : Les coordonnées équatoriales et les coordonnées horizontales.

a. Coordonnées équatoriales :

➤ Angle horaire ω : Est l'angle décrit par le soleil dans son mouvement apparent, projeté sur un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre. Pour midi solaire, il vaut zéro. Négatif le matin et positif l'après-midi. Il est donné par :

$$\omega = 15^\circ (T_{sv} - 12) \dots \dots \dots (1.6)$$

➤ Déclinaison géocentrique δ : C'est l'angle compris entre le plan équatorial terrestre (perpendiculaire à l'axe de rotation de la terre) et l'axe de rotation de la terre autour du soleil (plan de l'écliptique), il varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Sa variation peut être décrite par la relation approchée suivante:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin(0.986^\circ(n + 284)) \dots \dots \dots (1.7)$$

Où : l'angle du sinus est exprimé en degrés, n étant le numéro du jour dans l'année.

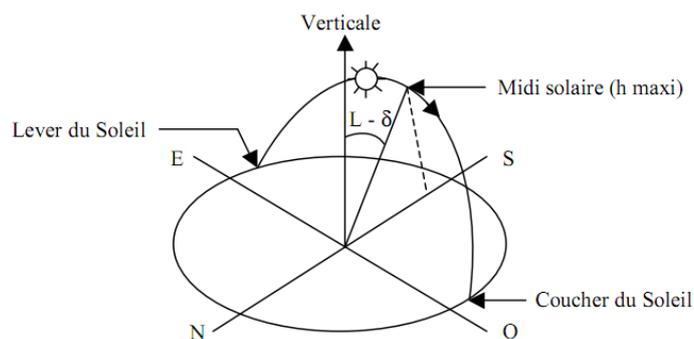


Figure (1.4):Mouvement apparent du soleil observé d'un point d'altitude L, [3]

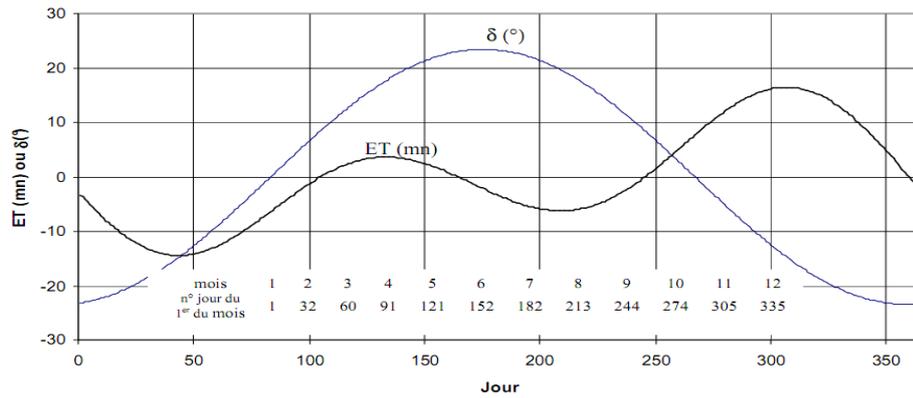


Figure (1.5): Equation du temps E_T , et déclinaison δ en fonction du jour de l'année. [3].

b. Coordonnées Horizontales :

En coordonnées horizontales, figure (1.6), on définit :

- Hauteur h : C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan horizontal.
- L'azimut a : C'est l'angle formé par la direction du soleil après sa projection sur le plan horizontal et la direction Sud.

Les relations entre ces coordonnées sont données par les formules suivantes :

- $\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \dots \dots \dots (1.8)$

- $\sin(a) = \cos(\delta) \sin(\omega) / \cos h \dots \dots \dots (1.9)$

Avec : φ est la latitude de lieu.

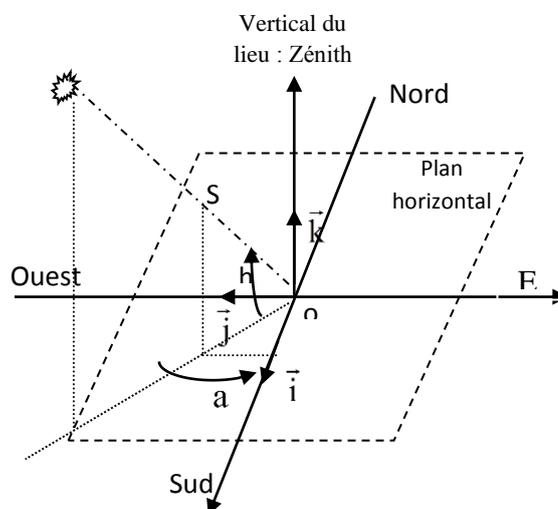


Figure (1.6):Repère horizontal, [5]

1.1.2 Eclairage solaire reçu sur un plan

1.1.2.1 Orientation d'un plan

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

γ : Hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale au plan avec sa projection sur le plan horizontal.

β : Inclinaison du plan par rapport au plan horizontal, elle est donnée par:

$$\beta = 90 - \gamma$$

α : Azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction plein sud.

1.1.2.2 Angle d'incidence

L'angle d'incidence i est l'angle formé par la direction du soleil et la normale au plan. Elle est donnée par [5] :

$$\cos(i) = \sin(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(\omega) - \sin(\gamma) \sin(\omega) \dots \dots \dots (1.10)$$

En coordonnées horaires, on aura, [5]:

$$\begin{aligned} \cos(i) &= \sin(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\omega) \cos(\delta) \\ &+ \cos(\alpha) \cos(\gamma) (\cos(\omega) \cos(\delta) \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cos(\varphi)) \\ &+ \sin(\gamma) (\cos(\omega) \cos(\delta) \cos(\varphi) + \sin(\delta) \sin(\varphi)) \dots \dots \dots (1.11) \end{aligned}$$

1.1.2.3 Estimation de l'éclairage solaire par le modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique de Link pour calculer les composantes direct et diffuse de l'éclairage reçu sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs de trouble

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \dots \dots \dots (1.12)$$

T_0 : trouble dû à l'absorption gazeuse par les constituants fixes de l'atmosphère et par l'ozone. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques, a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2.4 - 0.9\sin(\varphi) + 0.1(2 + \sin(\varphi))A_{he} - 0.2 Z \\ - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(h)) \dots \dots \dots (1.13)$$

Avec :

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right)(j - 121)\right) \dots \dots \dots (1.14)$$

Z : altitude de lieu.

T₁ : Trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère O₂, CO₂, et O₃ et à la diffusion moléculaire de Rayleigh, donnée par :

$$T_1 = 0.89^z \dots \dots \dots (1.15)$$

T₂ : Trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption.

T₂ est calculé en fonction de trouble d'Angstrom β, il est donné par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he})0.63^z \dots \dots \dots (1.16)$$

1.1.2.3.1 Eclairage reçu sur un plan horizontal par ciel clair

L'éclairage direct par ciel clair reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$B = I_0 C_{t-s} \sin(h) \exp\left(-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h)\right)^{-1}\right) \dots \dots \dots (1.17)$$

L'éclairage diffus reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$D = I_0 \exp\left(-1 + 1.06 \log(\sin(h))\right) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \dots \dots \dots (1.18)$$

Avec :

$$a = 1.1$$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02(1 - \sin(h))^2 \dots \dots \dots (1.19)$$

L'éclairage global sur un plan horizontal est donc : G = B + D

1.1.2.3.2 Eclairage reçu sur un plan incliné par ciel clair

L'éclairage direct par ciel clair reçu sur un plan incliné est donné par :

$$B = I_0 C_{t-s} \exp\left(-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h)\right)^{-1}\right) \cos(i) \dots \dots \dots (1.20)$$

Avec :

i : angle d'incidence.

L'éclairement diffus par ciel clair reçu sur un plan incliné est formé par trois composantes :

a. Diffus du ciel :

Il est composé lui-même de trois parties :

a.1 Composante directe ou circumsolaire :

Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi angle au sommet compris entre 3° et 15° , elle est donnée par :

$$\delta_d = I_0 C_{t-s} \exp\left(-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}\right) \dots \dots \dots (1.21)$$

Avec :

$$a = 3.1 - 0.4b \dots \dots \dots (1.22)$$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 - 0.5 \log(\sin(h)) \dots \dots \dots (1.23)$$

1.b Composante isotrope :

Elle est donnée par :

$$\delta_i = D - \delta_d \sin(h) \dots \dots \dots (1.24)$$

Avec :

D : diffus sur un plan horizontal.

1.c Composante du cercle de l'horizon :

Elle provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6° . Elle correspond à une accumulation des aérosols dans les basses couches de l'atmosphère. Elle est donnée par :

$$\delta_h = I_0 \frac{-0.02}{a^2 + ab + 1.8} \exp(\sin(h)) \dots \dots \dots (1.25)$$

Avec :

$$a = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h)) \dots \dots \dots (1.26)$$

$$b = \exp\left(0.2 - 1.75 \log(\sin(h))\right) \dots \dots \dots (1.27)$$

En fonction de ces composantes le diffus du ciel est calculé comme suit :

$$d_{\text{ciel}} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} + \delta_h \cos(\gamma) \dots \dots \dots (1.28)$$

b. Diffus du sol :

Il est donné par :

$$d_{\text{sol}} = \rho G \frac{1 - \sin(\gamma)}{2} \dots \dots \dots (1.29)$$

Avec :

ρ : albédo du sol.

G : Eclairement global sur un plan horizontal.

c. Diffus rétrodiffusé :

Une partie du diffus du sol est rétrodiffusé. Elle est donnée par :

$$\delta'_i = 0.9(\rho - 0.2)G \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}\right) \dots \dots \dots (1.30)$$

L'éclairement diffus reçu sur un plan incliné est donné par :

$$D = d_{\text{ciel}} + d_{\text{sol}} + \delta'_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2} \dots \dots \dots (1.31)$$

L'éclairement global reçu sur un plan (α, γ), est calculé par : $G = B + D$.

1.2 Performances énergétiques du bâtiment

1.2.1 Introduction

Les bâtiments consomment une partie importante de l'énergie utilisée et représentent une source considérable de pollution. Cette énergie est l'objet de nombreux usages, notamment:

- ✓ le chauffage et/ou le refroidissement, pour assurer un climat intérieur confortable
- ✓ la circulation de fluides tels que l'air (ventilation), l'eau (eau chaude, chauffage)
- ✓ l'éclairage
- ✓ les communications (téléphone, radio, télévision)
- ✓ la production de biens (cuisines, couture, etc.)[1]

Dans les climats tempérés et froids, la plus grande part de l'énergie utilisée par un bâtiment sert au chauffage. Le flux de chaleur généré dans le système de chauffage aboutit inévitablement à l'extérieur par différentes voies plus ou moins directes. Dans les climats plus chauds, il est nécessaire d'abaisser la température intérieure des bâtiments par un système de refroidissement qui consomme souvent une quantité importante d'énergie.

Le comportement thermique d'un bâtiment dépend de plusieurs paramètres, à savoir les conditions climatiques du lieu où il se trouve, les matériaux de construction, les dispositions architecturales (position, orientation et type de construction),... etc.

La conception du bâtiment doit mettre en œuvre des principes simples, et doit être adaptée aux besoins saisonniers (chaleur en hiver, fraîcheur en été) et favoriser au maximum l'apport solaire passif et minimiser les déperditions. Ainsi, l'architecture bioclimatique qui prend en compte les principes suivants:

- ✓ Utiliser des matériaux massifs pour augmenter l'inertie thermique,
- ✓ Supprimer les points faibles, tels que les ponts thermiques, ou les balcons qui font corps avec le reste du bâtiment, et agissent comme ailettes d'échange thermique,
- ✓ Prévoir des vitrages isolants (par exemple double vitrage), qu'il faut protéger par des volets, des stores et des casquettes, tout en privilégiant l'éclairage naturel des espaces,
- ✓ Eviter les surchauffes estivales en protégeant le bâtiment par une végétation appropriée,
- ✓ Utiliser des dispositifs architecturaux de protection tels que toiture opaque, casquette, ... etc.

Ainsi, la performance thermique du bâtiment peut être améliorée par diverses méthodes de refroidissement passif, indépendamment des appareils de conditionnement d'air. D'autre part, l'usage d'une seule technique pour la prévention des surchauffes en été ne peut être efficace. En effet, une combinaison judicieuse des différentes techniques, à la manière de l'architecture traditionnelle, peut donner des ambiances de vie favorables, sans recourir aux dispositifs d'appoints. [25]

Dans ce cadre, nous allons représenter dans ce chapitre quelques caractéristiques qui jouent un rôle très important vis-à-vis l'aspect énergétique du bâtiment et la satisfaction aux besoins des occupants.

1.2.2 Confort de l'occupant

1.2.2.1 Introduction

Les exigences actuelles des occupants peuvent être classées en plusieurs catégories, qui interagissent entre elles: exigences de confort thermique, exigences de qualité d'air, besoins en éclairage, protection acoustique et exigences en termes de consommation d'énergie.

Il doit être clair que les besoins des occupants passent avant les exigences énergétiques car le rôle premier d'un bâtiment est de protéger ses occupants des rigueurs du climat extérieur et de leur assurer le bien être et non pour économiser de l'énergie.

Cependant, un bon confort n'implique pas automatiquement une grande consommation d'énergie. Par une planification intelligente et intégrée et une étude approfondie sur les manières et les matériaux de construction, il est parfaitement possible d'assurer une excellente qualité d'environnement intérieur avec une très faible consommation d'énergie.

L'étude et la prédiction du confort thermique permettent:

- Le calcul de bilans énergétiques réels, tenant compte des occupants et de leurs exigences.
- Le calcul des températures minimales et maximales acceptables permettant de diminuer les besoins en énergie. [1]

1.2.2.2 Définition du confort

Le confort est un état de bien être général, il dépend des personnes. Il est mesuré par le taux d'insatisfaction des occupants.

Les paramètres qui interviennent dans le confort sont :

- Conditions thermiques:

Les spécialistes ont défini plusieurs températures destinées à caractériser les échanges thermiques par convection et par rayonnement. Donc, les paramètres à étudier sont :

- Température sèche de l'air : C'est la température indiquée par le thermomètre placé dans une pièce. La plupart des personnes considèrent que 20°C en hiver et 26 °C en été sont des températures d'air associées à une appréciation de confort.
 - Température rayonnante : C'est la température des parois avec lesquelles le corps échange de la chaleur par rayonnement avec les surfaces environnantes.
 - Température d'ambiance : C'est la température mesurée lorsque les mouvements d'air sont faibles, à l'intérieur d'une sphère de couleur sombre placée au milieu de la pièce. Elle indique une valeur qui prend en compte les échanges par convection et par rayonnement avec les parois.
- Qualité de l'air:
 - Vitesse relative de l'air par rapport au sujet.
 - Humidité relative de l'air.
 - Pureté ou pollution de l'air, odeurs.
 - Acoustique:
 - Niveau de bruit, nuisance acoustique.
 - Temps de réverbération (durée d'écho).
 - Visuel:
 - Eclairage naturel et artificiel.
 - Couleurs.
 - Volumes intérieur et distribution des volumes
 - Autres influences:
 - Degré d'occupation des locaux.
 - etc. [1]

1.2.2.3 Confort thermique

Un bâtiment bien conçu fournit un confort nettement supérieur. Il ne surchauffe pas en été et profite des gains solaires pendant l'hiver. Par contre, le bâtiment inadapté à son climat surchauffe en saison chaude et refroidit trop en hiver.

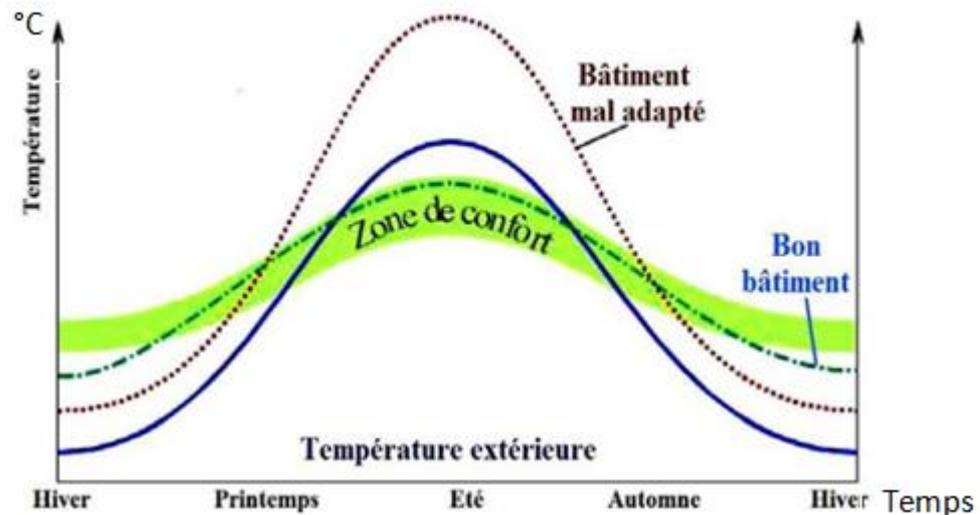


Figure (1.7): Evolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, [24].

Le confort thermique tient compte des paramètres suivants:

- Les facteurs liés à l'individu:
 - Son activité.
 - Son habillement.
 - Son sexe.
- Les facteurs liés à l'environnement:
 - Températures de l'air et des surfaces environnantes :

a) Température des parois :

L'écart avec la température ambiante doit rester inférieur à 2 à 3 °C. Plus la paroi est froide, plus elle absorbe de rayonnement,[5].

b) Température résultante :

Si T_a est la température de l'air du milieu environnant, T_p la température des parois environnantes et T la température des vêtements, on montre que le flux échangé simultanément par convection avec l'air ambiant et par rayonnement avec les parois environnantes, est proportionnel à la surface des vêtements (ou du corps) et à l'écart entre la température des vêtements et la température résultante externe T_r qui dépend à la fois de T_a et de T_p .

$$\phi = h(T - T_r), \text{ avec : } T_r = 0.49 T_a + 0.51 T_p$$

h est le coefficient global d'échange.

T_r appelée aussi température résultante de confort est souvent approchée à la moyenne arithmétique de T_a et T_p . [5]

c) Homogénéité des températures d'un local :

Horizontalement: 2 à 3 °C maximum d'écart toléré d'un point à un autre.

Verticalement: écart maximum de 3 °C entre la tête et les chevilles. [5]

- Vitesse relative de l'air et degré de turbulence:

La vitesse de l'air doit rester comprise entre environ 0.1 et 0.2 m/s (ne jamais dépasser 0.5, m/s), car l'échange thermique augmente si la vitesse de l'air augmente. [5]

- Pression de vapeur d'eau ou humidité relative.

La chaleur dégagée par le métabolisme est éliminée, par convection et conduction vers l'air ambiant, par rayonnement vers les surfaces voisines et par évapotranspiration dans l'air. La figure (1.8) représente la répartition des échanges de chaleur d'une personne en fonction de la température ambiante

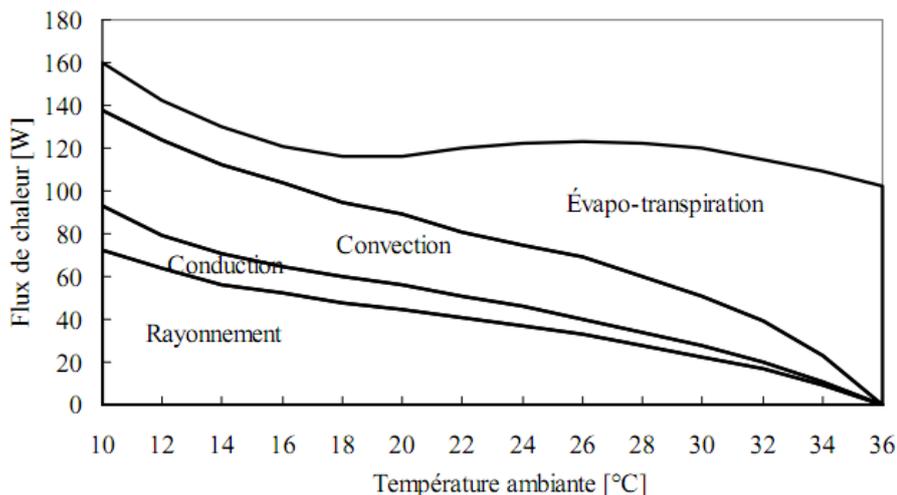


Figure (1.8) : Répartition des échanges de chaleur d'une personne en fonction de la température ambiante, supposée homogène, [1].

On note ainsi, que pour satisfaire aux critères du confort, il ne suffit pas de régler simplement la température de l'air intérieur de l'habitation. [1]

1.2.2.4 Qualité de l'air

Les paramètres affectant sur la qualité de l'air à l'intérieur d'un habitat sont :

1.2.2.4.1 Concentration des polluants

Un air de bonne qualité ne contient pas d'impuretés en quantités gênantes ou dangereuses pour les occupants. Le rôle de l'aération est précisément de remplacer l'air intérieur pollué par de l'air extérieur, en principe plus propre.

Dans une zone homogène (air bien brassé), la concentration en impuretés, C_n , dépend de l'intensité de la source de cette impureté, S , et du débit d'air pur Q_v , et C_{n_e} la concentration en impureté à l'extérieur. La loi de conservation de la masse de polluant [1], nous permet d'écrire:

$$\rho_i V \frac{dC}{dt} = S - \rho_e Q_v (C_n - C_{n_e}) \dots \dots \dots 1.32)$$

En régime permanent, la concentration est constante, donc :

$$S = \rho_e Q_v (C_n - C_{n_e}) \dots \dots \dots (1.33)$$

D'où le débit d'air nécessaire, pour ne pas dépasser une concentration limite, est

donc:
$$Q_v = \frac{S}{\rho_e (C_{n_{lim}} - C_{n_e})} \dots \dots \dots (1.34)$$

1.2.2.4.2 Humidité de l'air

La quantité de vapeur d'eau que peut contenir l'air augmente avec la température, [1].

La pression de vapeur saturante est donnée par le diagramme psychrométrique. Figure (1.9).

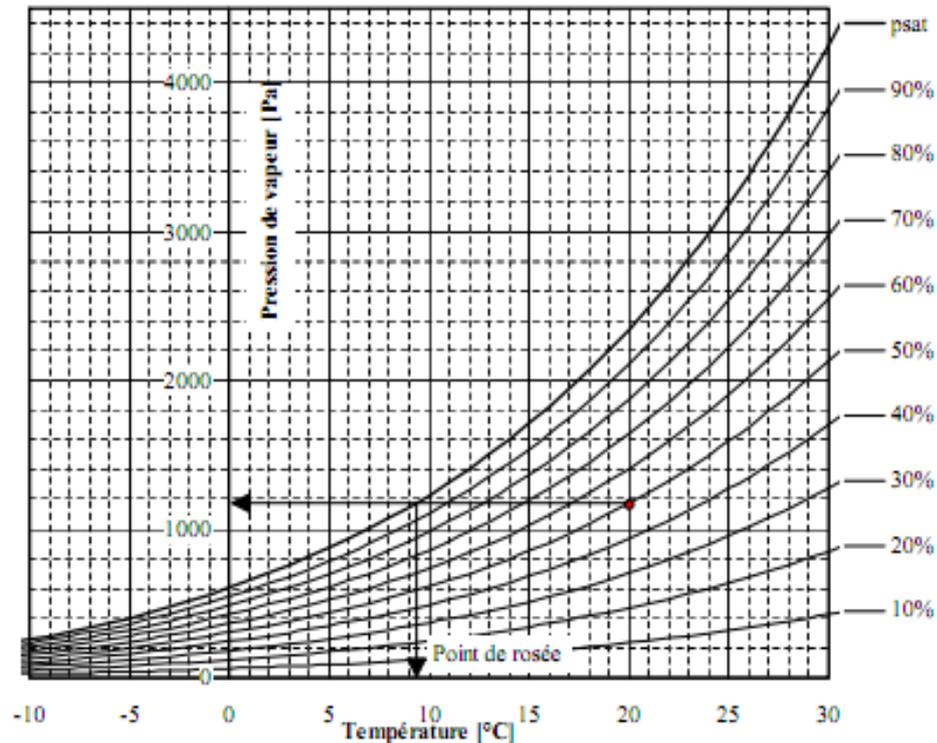


Figure (1.9): Diagramme Psychrométrique, ou diagramme de Carrier, [1]

1.2.2.4.3 Odeurs

Les odeurs proviennent de quantités minimales de milliers de composés divers, souvent en mélange, et rarement tous identifiés. Il n'est donc pas possible de quantifier une odeur par une masse ou un volume. A l'heure actuelle, le nez reste l'instrument de référence pour détecter, qualifier et même quantifier les odeurs, [1].

1.2.3 Performances énergétiques du bâtiment

1.2.3.1 Introduction

L'enveloppe de l'habitat joue un rôle déterminant dans les échanges de chaleur entre les ambiances extérieure et intérieure grâce à ses propriétés thermiques. En fonction de la nature des matériaux de l'enveloppe, la chaleur en provenance de l'extérieur peut-être amortie et subir un retard avant son arrivée dans le local, [23].

On dit, qu'un bâtiment est performant énergétiquement s'il permet à ses occupants de profiter des conditions intérieures confortables que ce soit en été ou en hiver, tout en minimisant le plus possible la consommation de l'énergie.

Le choix du site d'implantation est le premier facteur garantissant une conception architecturale thermiquement performante bien qu'il n'affecte ni les températures ni les humidités, mais il a un effet non négligeable sur le vent, la pluie et le rayonnement solaire [25].

Faisant intervenir des paramètres, tel que les caractéristiques du lieu d'implantation, les conditions météorologiques, la disponibilité et les performances des matériaux de construction on fait le choix sur :

- Les matériaux de construction.
- Le niveau d'isolation.
- La conception architecturale (Type de construction, distribution des pièces, forme et compacité du bâtiment, orientation parois, et orientation des baies).
- Le type de vitrage.
- La couleur des parois.
- La protection au soleil.
- L'aération.

1.2.3.2 Matériaux de construction

Un choix judicieux des matériaux de construction participe à la réduction de température de l'air ambiant à l'intérieur des locaux. Du fait que l'impact thermique des matériaux de construction sur le bâtiment se traduit par ces deux qualités principales :

- la résistance thermique à la conduction.
- la capacité calorifique ou l'inertie thermique.

L'inertie thermique est l'un des paramètres qui influent sur le confort thermique en été et en hiver.

L'inertie thermique d'un bâtiment correspond à sa capacité à accumuler puis à restituer un flux thermique. Donc, elle permet de lisser les flux thermiques, et les pics de température, [26].

L'inertie thermique d'un matériau est en général proportionnelle à sa conductivité thermique, plus une maçonnerie est lourde et épaisse plus son inertie thermique est élevée. La notion d'inertie exprime une "résistance" propre à un changement d'état ou de régime, donc à des phénomènes dynamiques. Ce changement d'état peut être provoqué soit par des variations de la température extérieure, ou par des variations de flux dissipées à l'intérieur du logement, [26].

L'inertie thermique est utilisée en construction comme une solution face aux grandes variations des températures extérieures, et permet de limiter un refroidissement ou une surchauffe trop importante à l'intérieur.

1.2.3.3 Travaux expérimentaux et analytiques caractérisant les matériaux de construction de point de vue résistance et inertie thermique

Plusieurs expériences ont été réalisées pour mettre en évidence l'impact de l'inertie sur le comportement thermique des bâtiments. Les investigateurs ont effectué des mesures sur les paramètres de performance dans différents types de constructions. De plus ils ont recours aux logiciels de simulation afin de prévoir l'influence de l'inertie thermique des matériaux de construction sur le comportement thermique global des édifices. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques travaux menés dans ce cadre.

1.2.3.3.1 Etude réalisée à la ville de Béchar [25]

Cette étude est basée principalement sur l'impact des matériaux de construction sur les températures intérieures de l'habitat. Elle est effectuée en deux parties :

-La première partie est une simulation thermique en utilisant le logiciel TRNSYS d'une pièce mono zone de 16 m² de surface habitable et de hauteur 3 m, construite sur terre pleine avec une fenêtre en bois sur la façade sud de dimensions 1.2 x 1.4 m². Le vitrage (simple) a une épaisseur de 4mm et une conductance hors résistance superficielle de 5.8 W/m² et un facteur solaire K = 0.85. Pour les 4 murs et le toit, le coefficient d'absorption (intérieur et extérieur) est de 0.7, et les coefficients de convection intérieur et extérieur sont 11 W/m²°C et 64

W/m²°C respectivement. Aucun espace ne bénéficie de la ventilation transversale puisqu'il n'y a qu'une seule ouverture.

-Dans la deuxième partie, on a effectué des mesures in-situ dans un local individuel situé au sud-ouest de la ville de Béchar. La maçonnerie est en parpaings et les murs extérieurs sont en doubles parois de 10 cm avec lame d'air de 5 cm et des enduits de ciment de 2 cm extérieur et intérieur.

Les résultats obtenus, ont permis de déduire que :

- Le choix des matériaux de construction, joue un rôle important dans le confort des locaux. Du fait que l'inertie d'un bâtiment réduit et retarde l'effet des conditions extérieures
- La brique rouge présente une bonne isolation thermique par apport au parpaing. En effet, un écart de température de 7°C est constaté à l'intérieur de la pièce.
- L'épaisseur des parois contribue au confort climatique des bâtiments.
- la masse thermique est plus efficace lorsqu'elle comporte une isolation thermique ce qui stabilise les températures et en réduit les fluctuations.

1.2.3.3.2 Etude réalisée par CSTB (France) [26]

Une étude réalisée par CSTB évalue l'impact de l'inertie thermique des bâtiments résidentiels sur le confort d'été visée à ressortir un ensemble d'informations aidants à une conception des habitats qui présentent une inertie thermique ,évitant les surchauffes et favorisant le confort d'été. Cette étude est effectuée sur cinq types de structure de construction appliqués sur quatre types d'habitations: deux logements collectifs et deux maisons individuelles. Ces types de construction représentent des inerties thermiques distinctes : très faible; faible; moyenne; forte; et très forte.

Cette étude a permis d'apprécier l'effet de l'inertie thermique sur le confort d'été (conditions météorologique de France), il en ressort les conclusions suivantes :

- Plus l'inertie thermique augmente, plus la température maximale atteinte diminue et plus les variations de température entre le jour et la nuit sont faibles.
- L'utilisation des matériaux lourds, ayant une masse volumique importante, favorise l'augmentation de l'inertie thermique du bâtiment.

- Le confort thermique en été peut être obtenu sans ou avec un minimum de climatisation artificielle, si on construit des bâtiments ayant une forte inertie thermique associée avec d'autres facteurs, influant sur les conditions intérieures.

1.2.3.3.3 Etude réalisée au Cameroun [23]

Cette étude, a eu pour but de comparer entre les types des habitats existants au Cameroun, à savoir les habitats traditionnels et les habitats modernes. Pour ce faire, on a simulé le comportement thermique pour chaque type et comparé entre les résultats obtenus. Sachant que les matériaux de construction traditionnels sont ceux qui sont disponibles dans chaque zone climatique du Cameroun, comme le bois, la brique de terre, la terre battue, et les matériaux modernes sont le parpaing de ciment.

L'habitat simulé est de type mono zone de 15 m² de surface habitable et d'une hauteur de 2,8 m. Il comporte: une fenêtre en vitrage simple de 4 mm d'épaisseur, de dimension 1 × 1,2 m², avec encadrement en bois léger, une porte en bois léger de dimension 1 x 2,2 m². Les ouvertures sont situées sur la façade nord de l'habitat. La simulation a été effectuée pour deux climats différents qui règnent le Cameroun :

- Climat équatorial.
- Climat tropical.

D'après l'analyse des résultats trouvés, il ressort que :

- L'inertie thermique des matériaux de construction joue un rôle important dans le confort thermique des locaux. C'est le cas des matériaux comme le bois qui a une faible inertie et est adapté pour les zones où l'on veut reproduire l'ambiance extérieure à l'intérieur d'un local.
- La brique de terre est aussi comparée au parpaing dans certaines régions climatiques et est plus appréciée pour son inertie thermique élevée.
- Contrairement au bois qui a une faible inertie, le parpaing peut assurer un confort dans les locaux en zones sahariennes.
- L'habitat traditionnel en bois simple, en bois enduit de terre battue, en brique de terre obéit bien aux caractéristiques climatiques de la région où il est utilisé.

1.2.3.3.4 Etude réalisée à Guelma [4]

Cette étude a pour but de poser le problème de la conception non étudiée de l'enveloppe des maisons du point de vue dimensionnement (épaisseur) et le choix inadapté des matériaux de construction utilisés, Ceci conduit en effet, à l'inconfort des occupants et à une surconsommation de l'énergie à l'intérieur des habitations.

L'étude présentée dans ce mémoire a été basée principalement sur :

- L'investigation et mesures in situ.
- La simulation numérique.

A) Investigation et mesures in situ

Une investigation est menée sur une maison de l'époque coloniale à Guelma, composée d'une cave, rez-de-chaussée, et un étage. On a effectué des mesures in situ de la température et de l'humidité relative au rez-de-chaussée et au premier étage, qui constituent deux maisons occupées par deux familles différentes. Les résultats ont permis de faire des comparaisons entre eux et d'évaluer l'effet de l'inertie du sol, de la cave, des murs au l'R.D.C et l'effet de l'inertie de la toiture et du plancher à l'étage.

Les résultats obtenus montrent que:

La température moyenne de l'intérieur offre une stabilité durant tout le jour avec une faible amplitude en comparaison avec la température météo et celle de la rue présentent des fortes amplitudes.

L'inertie thermique en étage le jour se comporte comme celle du R.D.C en amortissant la fluctuation de température extérieure, et en la déphasant dans le temps. L'inertie thermique évite les chutes brutales de température en hiver, et le surchauffe en été.

Les effets de la cave au profit du R.D.C, et celui de la ventilation nocturne au profit de l'étage dans l'abaissement de la température en période estivale.

B) Simulation numérique

Les résultats de la simulation thermique permettent de tirer les constatations suivantes :

- La pierre (travertin) donne la meilleure performance
- Le parpaing donne la mauvaise réponse thermique comparé à la pierre et à la brique creuse.
- l'épaisseur est un facteur important ayant un impact sur la variation de la température intérieure.
- Au contraire de la masse thermique, la croissance de l'épaisseur du vide d'air fait augmenter la température ambiante, surtout le cas de la brique et du parpaing.
- l'effet isolant de la lame d'air n'est pas aussi important que celui du matériau.
- L'effet de la lame d'air est plus perçu la nuit que le matin et l'après midi.

1.2.3.4 Isolation Thermique

1.2.3.4.1 Introduction

L'enveloppe extérieure doit limiter les pertes de chaleur en hiver et protéger des radiations solaires en été. Cela est possible si les parois constituant l'habitat sont caractérisées par une faible transmission thermique. De fait, il est nécessaire d'isoler thermiquement les parois qui sont soumises aux conditions climatiques extérieures ou qui sont en contact avec l'ambiance non chauffée (vide ventilé, garage, etc.).

Pour obtenir un bon isolant, il faut [1] :

- ✓ Diminuer la conduction, en diminuant la quantité de matière, (le vide ne conduit pas la chaleur).
- ✓ Eliminer la convection, en immobilisant ou supprimant les fluides.
- ✓ Eliminer le rayonnement, à l'aide d'écrans opaques au rayonnement, ou à l'aide de surfaces à faible émissivité.
- ✓ Eliminer l'évaporation - condensation, en utilisant des matériaux secs.

1.2.3.4.2 Nécessite de l'isolation pour une structure bioclimatique

L'isolation thermique permet de réduire la consommation d'énergie de chauffage et /ou de climatisation et d'accroître le confort des occupants.

De plus, l'isolation est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

En effet, L'isolation permet de réduire les déperditions à travers les parois durant la période hivernale, cela conduit à une diminution des besoins en chauffage. En été, l'isolation fait barrière à la chaleur et au rayonnement solaire extérieur.

L'échange radiatif entre le corps humain et les parois froides en hiver, et les parois très chaudes en été est à l'origine d'une sensation d'inconfort. Donc, il est indispensable de maintenir ces parois intérieures à une température désirée, cela est possible par l'utilisation des isolants thermiques.

Une maison bien isolée vieillit mieux et nécessite moins de travaux d'entretien. Car, l'isolation, associée à une ventilation efficace, supprime les risques de condensation qui causent souvent des dégradations aux parois, [28].

1.2.3.4.3 Isolation intérieure et extérieure des façades

Le type d'isolation des façades joue un rôle important sur le niveau de l'inertie thermique d'un bâtiment. En effet, l'isolation extérieure présente quelques avantages essentiels en comparaison avec l'isolation intérieure.

- L'isolation intérieure, contrairement à l'isolation extérieure, ne permet pas de profiter de la masse inerte des matériaux qui composent la structure.
- La stabilisation de la température de la structure, entraîne vieillissement plus lent de celle-ci.
- Diminution, et dans la plupart des cas élimination totale des risques de condensation dans les éléments de construction.
- En plus, elle permet très souvent d'éviter la plupart des ponts thermiques

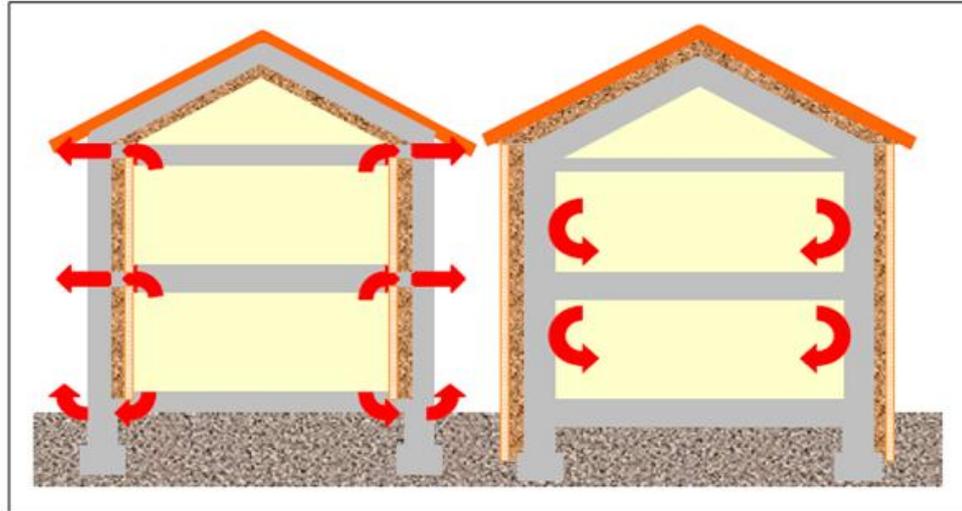


Figure (1.10): A gauche, isolation intérieure: de nombreux ponts thermiques sont inévitables à chaque étage. A droite, isolation extérieure, entourant complètement la structure, [1].

1.2.3.5 Etudes expérimentales et analytiques caractérisant l'isolation thermique

1.2.3.5.1 Etude de l'effet de l'isolation thermique d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa [30]

Cette étude a été effectuée par simulation numérique. Le cas d'étude qui a été choisi, est une salle de séjour d'un habitat situé à Ghardaïa.

Dans le but de mettre en évidence l'effet de l'isolation thermique, la présente étude consiste à faire la comparaison entre trois cas différents

- La pièce à étudier est sans isolation thermique.
- Uniquement les parois ensoleillées de la pièce, le mur sud, le mur ouest, et le toit, sont isolées.
- Toutes les parois de la pièce sont isolées.

Les auteurs montrent que :

- La meilleure méthode consiste à isoler uniquement les murs exposés au soleil; cela peut être dû au fait que, flux de chaleur traversant les surfaces isolées de l'extérieur vers l'intérieur, est absorbé par les autres surfaces non isolées. Dans le cas où toutes les surfaces sont isolées thermiquement, le flux de chaleur, traversant les surfaces isolées, est piégé à l'intérieur de la pièce.

- L'épaisseur de l'isolant influe sur l'efficacité et le rendement de l'isolation et donc sur la température de l'air intérieur du salon.

1.2.3.5.2 Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda [31]

Cette étude a été effectuée par simulation de comportement thermique du centre psychopédagogique SAFAA, dans le but de faire un choix pertinent entre divers solutions proposées qui visent à l'introduction des matériaux isolants, tout en assurant un meilleur confort thermique de cette institution avec une consommation minimale d'énergie. A ce propos, des simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel de simulation du comportement thermique en régime dynamique 'TRNSYS 16' avec le modèle numérique type 56.

Parmi les différents résultats qu'on a tiré de cette étude, on a déduit que :

- L'état actuel (avant la réhabilitation) consomme plus d'énergie en comparaison aux autres solutions proposées. Pour tous les cas, l'utilisation de l'isolation permet de diminuer la consommation énergétique.
- L'isolation de la toiture et l'isolation interne des murs avec 6 cm de polystyrène expansé et l'utilisation du double vitrage permet de réduire considérablement la puissance de chauffage.

1.2.3.5.3 Etude sur l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure. Cas d'un habitat à Guelma [32]

Cette étude a été effectuée par une modélisation du comportement thermique d'un habitat de l'époque coloniale à la ville de Guelma. L'environnement utilisé est TRNSYS. Cette étude a consisté à :

- Mettre en évidence l'effet de l'introduction de l'isolation thermique en remplaçant le vide d'air.
- Rechercher l'emplacement idéal de l'isolation thermique dans la paroi afin de profiter de l'aspect de l'inertie thermique.
- Rechercher l'épaisseur idéale de l'isolant en tenant compte du facteur économique.

D'après les résultats obtenus, on a suggéré que :

- L'isolation des murs extérieurs par le feutre donne une température intérieure moins fluctuante par rapport à l'isolation par la lame d'air.
- L'emplacement idéal de l'isolant dans la paroi est celui du côté externe de la masse thermique.
- L'épaisseur recommandée de l'isolation et pour des raisons économiques, est de 5 cm. Car, à partir de cette valeur, la température intérieure reste peu sensible.

1.2.3.5.4 Etude sur la réhabilitation thermique de l'enveloppe de bâtiment [24]

Ce travail a été effectué sur un logement du dernier étage d'un bâtiment d'habitat collectif, situé à l'USTO, Oran. Il a été choisi car il est le plus défavorable, exposé sur ces trois façades, plus la terrasse, aux conditions climatiques.

L'objectif de cette étude était mesurer l'impact de la réhabilitation thermique sur la température intérieure et sur les besoins énergétiques.

Les solutions qui ont été proposées pour la réhabilitation sont :

- Le remplacement des fenêtres en simples vitrages par des fenêtres en doubles vitrages.
- L'isolation des parois de l'enveloppe par l'extérieur afin de supprimer les déperditions à travers les ponts thermiques.
- L'augmentation de l'isolation du plancher terrasse.

Les résultats obtenus par l'analyse thermique par simulation montrent que :

- Dans la période de froid, les déperditions après réhabilitation de l'enveloppe sont moindres que celles du cas normal.
- Dans la période estivale La température intérieure après la réhabilitation est inférieure de celle avant la réhabilitation sauf dans la période 11 h à 20 h, on remarque une élévation de la température de l'ordre de 1.3 °C. Cela est dû à l'augmentation de l'inertie thermique de l'enveloppe à cause de l'isolation par l'extérieur. On a suggéré donc, que la forte isolation peut causer des surchauffes importantes, si la ventilation n'est pas bonne.

L'introduction dans cette simulation les systèmes de chauffage et de climatisation a permis de montrer qu'une optimisation de la consommation d'énergie serait réalisée après la réhabilitation thermique, avec un gain de 50% de calories.

1.2.3.5.5 Etude des transferts thermiques dans un local muni d'une structure à isolation variable [33]

Cette étude effectuée par une simulation numérique a consisté à prédire l'effet de la nature et de l'épaisseur des couches de matériaux constituant les parois d'une structure alvéolaire, à isolation thermique variable et à effet de diode thermique, sur le comportement thermique d'un local muni de cette structure.

Les simulations numériques ont permis de comparer le comportement thermique d'un local muni de cette structure sur les faces Sud, Est et Ouest à celui d'un classique à forte inertie thermique ayant des parois à isolation fixe (laine de verre). Les simulations sont effectuées dans le cas d'une application de type climatisation dans une zone désertique.

Les simulations numériques consistent à résoudre le système d'équation de conservation d'énergie par la méthode nodale.

Une structure alvéolaire à effet de diode thermique est composée de deux parois verticales et deux lamelles (parois passives) inclinées d'un angle α par rapport à l'horizontale. Lorsque les parois verticales sont chauffées, mais n'est pas de la même manière, nous avons deux comportements différents. Dans le cas où la paroi basse est plus chaude que la paroi haute, l'écoulement de l'air et par suite l'échange convectif est favorisé par la géométrie (sens passant) et la structure est équivalente à une faible couche d'isolant. Lorsque la paroi basse est moins chaude que la paroi haute, cette disposition entraîne une réduction notable du transport convectif puisque le fluide se trouve considérablement freiné (sens isolant) et la structure est équivalente à une forte couche d'isolant.

Afin de voir l'impact de la structure alvéolaire à effet de diode thermique sur la température intérieure d'un habitat, on a comparé l'évolution de la température dans trois locaux différents dont les géométries et les dimensions identiques. Le premier est un local muni d'une structure alvéolaire à effet de diode thermique (isolation variable), le deuxième est un local à forte inertie thermique avec une isolation fixe, le troisième, est un local à faible inertie thermique, [33].

Les auteurs montrent que :

- La température intérieure du local à structure alvéolaire est légèrement plus basse que celle du local à faible inertie. Cette différence qui est due à l'effet diode peut atteindre 1.5 °C vers 14 heures.

- La température de l'air intérieur dans le local à forte inertie présente une faible amplitude entre la période diurne et la période nocturne. Elle est plus basse que celle des autres locaux pendant la période diurne et inversement la nuit. Ceci est dû à l'isolation importante assurée par la forte inertie, par rapport à celle des autres locaux.

1.2.3.6 Conception architecturale

Pour une architecture bioclimatique, plus adaptée à son milieu d'implantation, les concepteurs doivent appliquer un ensemble des principes architecturaux. Ainsi, les stratégies à suivre ont pour objectif soit de minimiser les déperditions thermiques et favoriser les apports solaires, soit d'éviter la surchauffe et protéger la structure des irradiations solaires. A ce propos, on a recommandé :

✓ Les ouvertures de la maison ne doivent pas être placées sur les façades trop exposées au vent. Si cela n'est pas possible, des sas d'entrée peuvent jouer un rôle de zone tampon.

✓ Mettre aux abords du bâtiment, des surfaces claires de type dalle ou graviers réfléchissent l'énergie qu'elles reçoivent vers les murs, qui doivent avoir des couleurs absorbantes, pour les échauffer.

✓ Il est possible de tirer parti du terrain s'il est en pente en enterrant une partie de la maison. Car le sol reste à une température constante d'une dizaine de degrés toute l'année, les déperditions seront réduites en hiver et la maison bénéficiera d'un rafraîchissement en été.

Une fois la chaleur captée et emmagasinée, il faut la restituer. Pour cela, l'aménagement de la maison est très important, donc :

✓ Il faut que les pièces principales aient un accès à la façade sud, source de chaleur. La chaleur se propage ensuite vers les pièces orientées au nord. Les pièces doivent être disposées en conséquence : celles ayant des besoins de chauffage moindres ou discontinues comme le garage, la salle de bain, les toilettes sont placées au nord de la maison.

Quant à l'orientation des fenêtres, la quantité des apports solaires dépend évidemment de l'orientation de la fenêtre. Dans l'hémisphère nord, les fenêtres orientées au nord présentent le moins d'apport. Les fenêtres orientées au sud bénéficient d'un large ensoleillement en hiver et de peu d'ensoleillement en été. Les fenêtres orientées à l'ouest et à l'est bénéficient d'apports solaires toute l'année; celles orientées à l'ouest présentent de plus l'inconvénient de bénéficier d'apports en fin de journée alors que le bâtiment a déjà eu le temps de s'échauffer; il s'agit donc de l'orientation la plus critique lorsque l'on essaie de se prémunir des apports énergétiques du soleil.

La forme de l'habitat joue aussi un rôle important sur le plan thermique. Effectivement, la compacité consiste à minimiser les déperditions thermiques par transmission et par renouvellement d'air [35]. La figure (1.11), représente une comparaison des déperditions thermiques de différentes formes des logements.

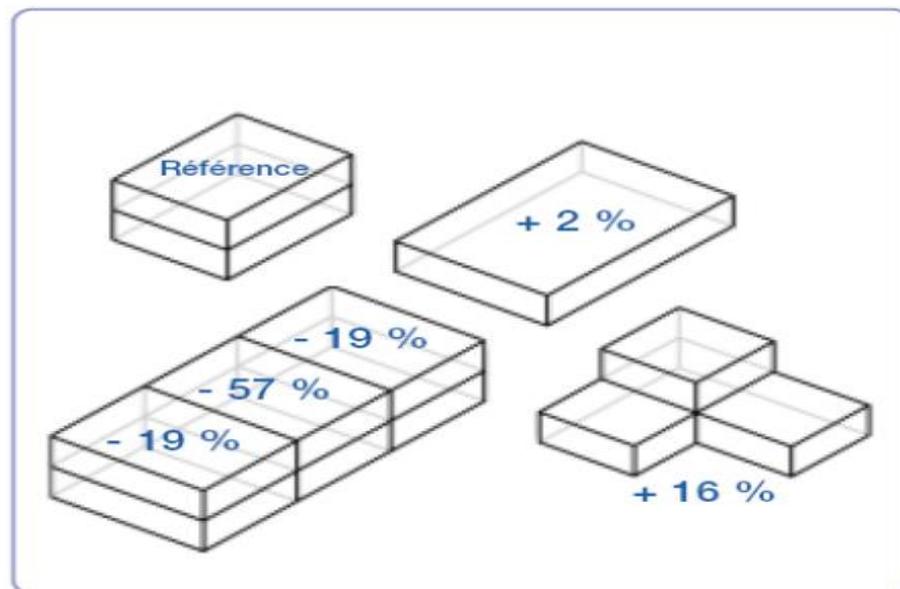


Figure (1.11): Déperditions comparées de l'enveloppe de différents logements de 96 m². [35]

Une conception architecturale solaire doit tenir en compte la distribution des pièces dans un habitat selon l'utilisation et la durée d'occupation. Cela dans le but de profiter des apports solaires en hiver et d'en protéger en été et en mi-saison.

Dans ce contexte, on trouve dans un document dont l'auteur Thierry SALOMON [36] quelques principes de base pour une maison bioclimatique :

- Les chambres seront plutôt situées au sud et à l'est, profitant du lever du soleil. Elles garderont ainsi leur fraîcheur en fin de journée
 - Les pièces occupées en permanence durant la journée devraient de préférence être orientées au sud.
 - On doit limiter dans la cuisine les apports solaires sur les vitrages sud-ouest, problème de surchauffe.
 - Les espaces peu ou non chauffés (entrée, atelier, garage) seront plutôt disposés à l'ouest ou au nord. Si le vent est souvent violent, un sas d'entrée sera nécessaire pour éviter que l'air froid ne pénètre pas dans la maison.
 - Une serre ou véranda placée au sud permet, tout en apportant de la chaleur en hiver, de créer un espace intermédiaire entre l'intérieur et l'extérieur.
- La figure (1.12) représente la position de l'habitat bioclimatique par rapport au soleil durant une journée d'hiver (ce schéma est valable pour l'hémisphère nord).

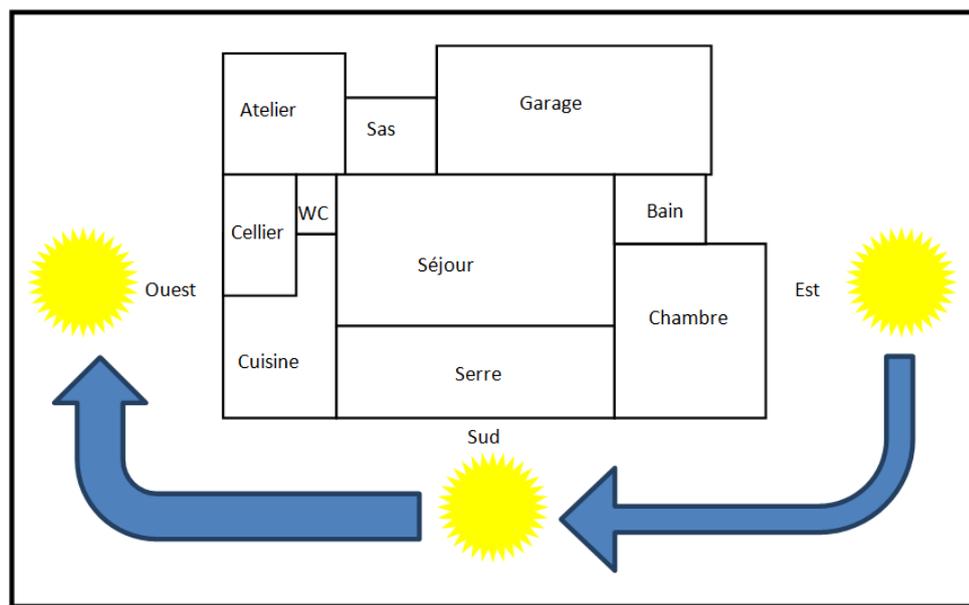


Figure (1.12): Orientation d'un habitat bioclimatique, d'après [36]

1.2.3.7 Fenêtres

Le rôle des fenêtres est primordial dans un logement. Elles assurent l'accès à l'éclairage naturel, la récupération des apports solaires en hiver,

l'aération en les ouvrants. Mais elles engendrent aussi des déperditions thermiques et un effet de paroi froide important, si elles sont uniquement munies de simple vitrage.

Le choix de type de la fenêtre est basé :

1- D'une part sur le choix de vitrage (Simple vitrage, survitrage, Double vitrage avec du vitrage clair, Double vitrage avec du vitrage peu émissif, Double fenêtre).

2- D'autre part sur le choix de menuiserie (Bois, PVC, Métal, Métal à rupture de pont thermique).

1.2.3.7.1 Choix du vitrage

Le choix du vitrage influe sur la lumière transmise, ainsi que sur les gains solaires et les pertes de chaleur à travers la fenêtre du fait que, la transmission lumineuse et énergétique d'un vitrage est caractérisée par trois paramètres :

- ✓ Facteur de transmission lumineuse.
- ✓ Facteur solaire.
- ✓ Coefficient de transmission thermique.

Il existe trois approches permettant d'améliorer les performances énergétiques des vitrages :

- Modifier la composition chimique du verre (verre teinté).
- Augmenter le nombre des lames d'air en assemblant plusieurs vitrages.
- Appliquer une couche à la surface de vitrage (couche d'oxyde métallique) pour réduire l'émissivité du vitrage et réduire en conséquence l'émission des infrarouges vers l'extérieur.
- Remplacer la couche d'air par un gaz rare (Argon, Krypton).

De plus, les vitrages dynamiques, les systèmes directionnels, sont d'autres techniques appliquées aux vitrages permettant le contrôle de ces propriétés.

1.2.3.7.2 Choix de la menuiserie

Les propriétés thermiques des profilés des fenêtres dépendent des matériaux constructifs, leur épaisseur, nombre de chambre pour les châssis en PVC, et de la présence des ruptures de pont thermique en cas de profilés métalliques, figure (1.13), ou de renfort métallique en cas de profilés plastiques.

Les profilés en bois ou en PVC ont des conductivités thermiques faibles d'où, leur utilisation est préférée pour limiter les déperditions thermiques à travers les fenêtres. L'utilisation des profilés métalliques est à éviter, car ils représentent une très forte conductivité, sauf, s'ils sont à rupture de pont thermique.

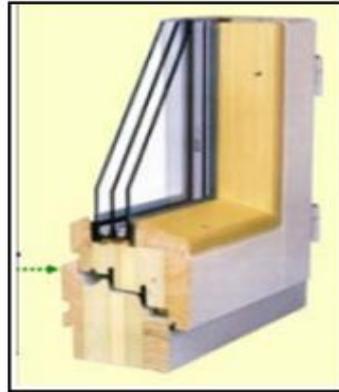


Figure (1.13): Fenêtre avec profilés en aluminium à rupture du pont thermique, [37]

1.2.3.8 Couleur des parois extérieures

Une partie du rayonnement solaire irradiant une paroi est absorbée et l'autre est réfléchi. La capacité de réflexion d'un matériau dépend de sa couleur. Plus la couleur est claire plus la réflexion est importante. A l'inverse, plus la paroi est sombre, plus la l'absorption est importante.

En climat chaud, la couleur claire en façade participe à la protection solaire du bâti.

L'impact de la couleur des parois extérieures sur la température intérieure a été testé dans différentes études. Medjelekh, [4] dans son mémoire de Magister a fait une étude par simulation numérique sur l'impact de l'inertie thermique sur le confort et la consommation énergétique de l'habitat, ceci en faisant varier le coefficient d'absorption des parois extérieures.

On a déduit de cette étude, que l'augmentation du coefficient d'absorption cause une augmentation de la température intérieure. L'écart maximal entre le meilleur cas (couleur très claire) et le cas de couleur très sombre est de 1.99 °C.

1.2.3.9 Ventilation

L'aération influe sur plusieurs domaines de la physique de bâtiment :

- La qualité de l'air.
- Les déperditions de chaleur.
- Les problèmes de condensation internes et superficielle.
- Le confort thermique.
- La consommation énergétique.

L'aération apporte à l'intérieur de l'air extérieur, pour diluer les sources de nuisance interne (mauvaise odeur, concentration élevée de la vapeur d'eau, divers polluants).

Cependant, une aération inadéquate peut mener à de mauvaises conséquences

Dans le cas où l'aération est très forte :

- Consommation d'énergie est exagérée.
- Courant d'air est exagéré.

Dans le cas où le renouvellement est insuffisant, on constate :

- Une mauvaise qualité de l'air.
- Une condensation dans les endroits froids, moisissures [1].

L'aération peut ainsi être utilisée pour réduire la température intérieure dans les locaux présentant de la surchauffe.

Les systèmes de ventilation peuvent être classés en deux principaux types :

- Ventilation naturelle.
- Ventilation mécanique.

A) Ventilation naturelle

Le principe de ce type de ventilation est l'extraction de l'air intérieur soit par les ouvertures (Fenêtre, porte), soit par un conduit principal. Dans ce dernier cas, la ventilation est causée par une dépression assurée par le gradient de température entre sa base et son débouché en toiture. Des grilles situées dans les locaux humides assurent le passage de l'air vers ce conduit. Le renouvellement d'air est assuré par l'ensemble des infiltrations et des ouvertures en façade [35].

La figure (1.14) représente le schéma de principe d'une installation avec conduits shunt.

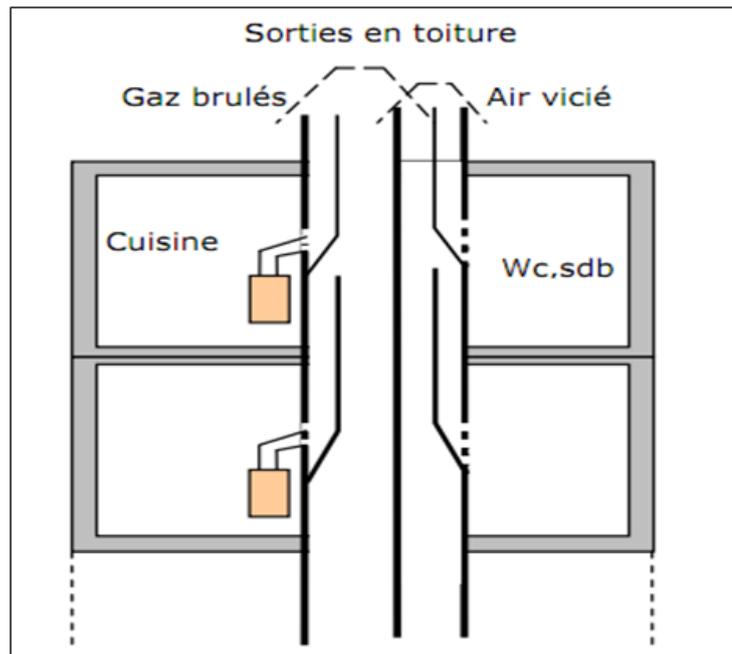


Figure (1.14): Schéma de principe d'une installation avec conduits shunt (ventilation naturelle), [35]

B) Ventilation mécanique

Dans ces types de ventilation, on introduit des systèmes mécaniques pour faire circuler l'air en créant une dépression. Ils existent deux types :

1) Ventilation simple flux :

Ce système est composé de trois organes : les entrées d'air, les bouches d'extraction, et les groupes d'extraction. La ventilation peut être contrôlée par une régulation sur les entrées d'air frais et sur les bouches d'extraction. Cette régulation peut soit se faire en fonction de différence de pression (système auto réglable), soit en fonction de l'hygrométrie (système hygro-réglable).

2) Ventilation double flux :

Ce système est composé des bouches de soufflage et des bouches d'extraction et un groupe qui assure l'extraction et l'insufflation, ainsi que la récupération d'énergie à travers d'échangeur thermique, figure (1.15). La régulation peut se faire en fonction de la différence de pression (système auto réglable), ou en fonction de l'hygrométrie de l'air (système hygro réglable). Les organes de régulation peuvent être les bouches de soufflage et d'extraction et/ou le groupe.

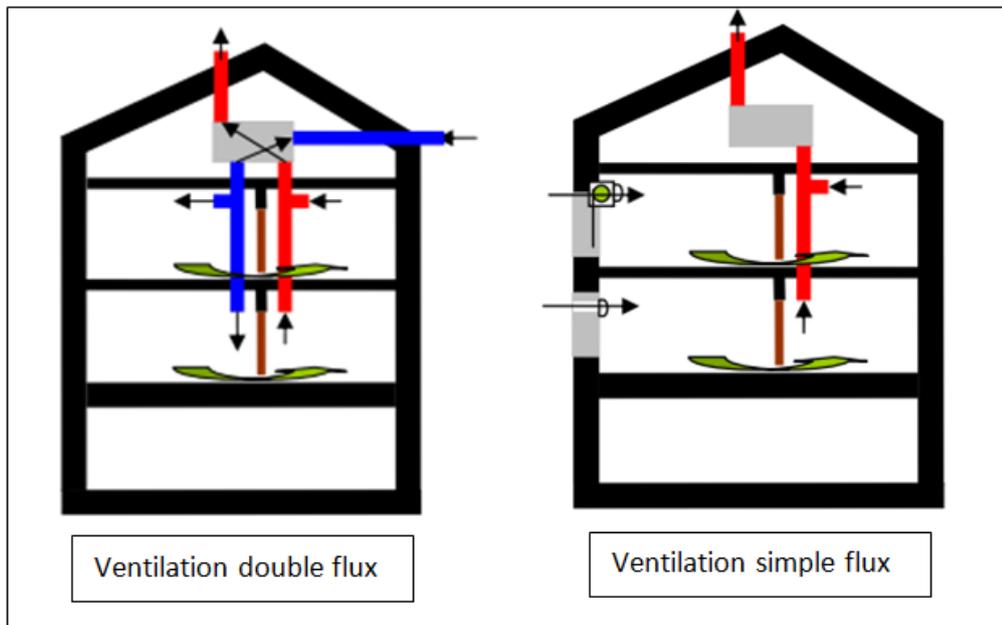


Figure (1.15): Schéma de principe de la ventilation mécanique, [35]

1.3 Matériaux de construction et matériaux isolants

1.3.1 Introduction

L'amélioration de la qualité thermique de l'habitat passe par un choix adéquat des matériaux de construction prenant en compte le comportement dynamique de la construction afin d'améliorer le confort thermique des occupants et éviter le recours souvent excessif à la climatisation et au chauffage.

La connaissance détaillée des propriétés physiques, thermiques, et hydriques des matériaux constituant l'enveloppe d'un habitat permet de prédire ses performances énergétiques, et donc être capable d'optimiser les échanges de chaleur avec l'extérieur.

Dans le but d'améliorer le confort thermique dans un habitat et minimiser la consommation d'énergie, il est nécessaire de mettre en œuvre des matériaux isolants. Avec leur faible coefficient de transfert, il est évident que l'isolation thermique offre à l'enveloppe du bâtiment la qualité de protection son intérieur contre les sollicitations extérieures.

1.3.2 Matériaux de construction

1.3.2.1 Introduction

Le choix de matériaux de construction est déterminant car ils recouvrent la quasi-totalité de la construction et représentent la barrière entre l'intérieur habitable et le milieu extérieur. Il existe de nombreux matériaux de construction aux caractéristiques très diverses qu'il faut prendre en compte afin de réaliser une construction durable, économique du point de vue de la consommation d'énergie et respectueuse de son environnement depuis sa construction jusqu'à sa destruction.

Pour les raisons mentionnées au dessus, le choix pertinent des matériaux de construction s'avère une action primordiale pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments et minimiser ou annuler le recours aux systèmes de chauffage et climatisation. D'où la préservation de l'environnement et la contribution au développement durable.

1.3.2.2 Définition de quelques principaux matériaux de construction

Ce sont l'ensemble des matériaux utilisés dans la construction comprenant les granulats, le ciment, les briques, les tuiles, les profilés en acier, le bois, le plâtre, le béton, le verre,...etc. Certains de ces matériaux doivent être travaillés avant emploi à l'instar du béton, le plâtre, ...etc.[10]

A) Le béton

Obtenu en mélangeant du sable, des granulats, du ciment et de l'eau, le béton occupe depuis son invention la première place en volume d'utilisation des matériaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité, il présente également d'autres qualités, telles qu'une excellente tenue au feu, une grande résistance aux chocs, une bonne protection contre les radiations nucléaires, etc.

Actuellement, le béton est disponible sous différents types, les plus courants sont, les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BMP), les bétons à très hautes performances (BTHP), et les bétons auto-plaçant

(BAP). Sans oublier ceux offrant des avantages particuliers, élaborés en additionnant certains ajouts qui permettent d'améliorer leurs performances thermiques. Nous citons parmi eux :

➤ Les bétons allégés : Ils sont obtenus par ajout à la pâte de ciment d'agents tels que : polystyrène, sciure, ponce, granulats de chanvre, granulats de pouzzolane, etc. Donc, la densité de ces produits est réduite, ce qui fait leur isolation thermique et phonique est renforcée. Il faut noter aussi que ces produits peuvent être utilisés pour les structures porteuses.

➤ Le béton cellulaire : Le principe pour obtenir un béton cellulaire est de faire un mélange sable, chaux, ciment avec un agent d'expansion tel que la poudre d'aluminium qui fait lever la pâte et permet ainsi la formation de cellules d'air dans le béton. Sa structure contenant des cellules d'air, permet au béton cellulaire d'avoir plusieurs avantages par rapport au béton ordinaire :

- Bon isolant thermique grâce aux cellules d'air
- Inertie thermique importante.
- Moins de matières premières
- Fabrication en circuit fermé, donc utilisation de moins d'eau et d'énergie.
- Déchets de production pouvant être recyclés en granulats
- Rapidité de pose, donc coût de main d'œuvre moins chère.
- Plus légers que le parpaing
- Hygro-régulation
- Confort acoustique
- Résistance au feu
- structure porteuse

Cependant, le béton présente un impact environnemental non négligeable. Car, le ciment inclus dans sa fabrication nécessite une cuisson. Il consomme donc beaucoup d'énergie lors de sa production, et contribue à la pollution de l'air par un dégagement important des gaz carboniques [11], [12].

B) Les blocs de béton

Le besoin de gagner du temps sur les chantiers a conduit à utiliser des éléments normalisés, et donc à produire en usine des pièces de dimensions et de

qualités égales. Il existe aujourd'hui de très nombreux produits préfabriqués en béton. Les plus connus sont le parpaing, et l'hourdis. Ils sont creux pour réduire leur poids, et pour constituer une lame d'air et fournir un espace isolant.

Le parpaing : C'est un bloc de béton moulé fréquemment en forme de parallélépipède de structure peut être creuse ou pleine.

L'hourdis : L'hourdis, ou entrevous, permet de créer rapidement des planchers. Ces éléments sont simplement posés entre deux poutrelles. Une petite épaisseur de béton armé au-dessus de ce complexe suffit à constituer un plancher d'étage.

C) Les matériaux à base de terre crue

Contrairement au béton ordinaire, la terre à l'état naturel est un matériau de construction local. Elle peut être utilisée sans dépense de l'énergie nécessaire pour la production en usine et le transport aux lieux de construction. De plus, les propriétés thermo-physiques (faible masse volumique, faible conductivité) offrent aux blocs de terre la qualité d'isolation thermique. Il présente, ainsi de nombreux avantages environnementaux, sociaux, et culturels. En effet, L'activité de la construction induit des effets économiques qui varient dans une certaine mesure en fonction des matériaux et techniques utilisés, ainsi que des relations de ceux-ci aux savoir faire et à la culture des communautés locales. Dans cette perspective, les matériaux et techniques, de construction peuvent être considérés comme vernaculaires ou locaux dans la mesure où ils participent effectivement à l'économie locale.[9], [13]

On a recensé à travers le monde une vingtaine de méthodes traditionnelles de construction utilisant les ressources de la terre crue. L'Adobe (mot berbéro-arabe "Toub" assimilé en espagnol et transmis aux Amériques où il est adopté en anglais) qui désigne des briques de terre crue séchées au soleil (après leur mise en forme dans des moules). En plus de diverses variantes régionales, on distingue toutefois deux procédés principaux. D'une part le « Toub » qu'est la brique crue moulée, et d'autre part le "pisé", dérivé du mot français apparu à Lyon en 1562, d'origine latine qui désigne le principe de construction de murs épais (50 cm minimum) en damant la terre dans des coffrages latéraux, qu'on déplace au fur et à mesure de l'avancement du travail.

Ce dernier procédé connu aussi en Algérie avant 1962 est encore employé à ce jour au Maroc [14].

L'étude de l'influence des matériaux de terre sur la performance hygrothermique du bâtiment, nécessite la connaissance détaillée de leurs propriétés thermo-hydriques. Malheureusement, dans la littérature il existe peu de données concernant ces propriétés [9], surtout qu'elles diffèrent d'un gisement à un autre.

D) Les blocs de terre stabilisée (BTS)

La terre crue peut être sensible à l'humidité et à la pluie, surtout dans les régions pluvieuses, d'où la nécessité de procéder à la stabilisation des briques de terre comprimées.

La stabilisation est un ensemble des procédés physiques, mécaniques, et chimiques permettant d'améliorer les propriétés d'une brique de terre, en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau, et sa durabilité.

Les procédés mécaniques et physiques permettent de réduire le vide entre les particules solides. Quant aux procédés chimiques, ils permettent de créer les liens ou d'améliorer les liaisons existant entre les particules.[9]

Plusieurs études ont été réalisées visant d'une part à caractériser les BTS, selon le gisement de la terre utilisée, et d'autre part à créer de nouveaux BTS plus performants, tout en améliorant leurs caractéristiques de résistance. Ceci par l'ajout de différents composants.

Dans ce contexte, on peut citer un projet qui mérite d'être présenté. C'est celui concernant l'élaboration d'un BTS, appelé CEMATERRE par son innovant Alain Lefebvre, assisté par Jean-Elie Dandjinou et Saïd Taïbi. CEMATERRE est un matériau de construction à base de terre, de chaux et de fibre de lin.

Le matériau CEMATERRE vise à la réalisation d'éléments porteurs pour la construction d'édifices simples sans contrainte particulière.

La qualité qui fait de ce procédé une innovation importante c'est que ce produit se coule comme du béton. Après un prélèvement sur place ou à proximité du chantier, la terre est mélangée aux autres éléments et stabilisée dans une malaxeuse qui reprend le système de centrale à béton adaptée au matériau terre.

La centrale de malaxage se trouve sur le chantier. Le matériau est donc fabriqué sur place puis il est coulé dans les coffrages et vibré à l'aide des aiguilles vibrantes.

Pour le comparer à du béton, CEMATERRE est 3 fois plus isolant, mais 3 fois moins résistant, ce qui peut être compensé par une épaisseur des murs 2 à 3 fois plus importante. Par ailleurs, son coût est moindre comparé à celui du béton ou d'autres matériaux, grâce notamment aux économies réalisées sur le transport des matières premières.

E) La brique de terre cuite

Les briques de terre cuite sont obtenues à partir du mélange de terre et notamment d'argile. Ce mélange est ensuite moulé ou extrudé pour obtenir la forme et éventuellement les alvéoles du produit fini. Le produit est découpé à la hauteur et à la longueur voulue. Et pour finir il est séché dans des étuves. La brique alvéolaire se distingue par ses performances accrues en matière d'isolation. [11]

F) Le mortier de chaux

Le terme de chaux regroupe un grand nombre de produits dont le seul point commun est d'être obtenu par calcination de la pierre calcaire.

La chaux est utilisée dans la construction sous plusieurs formes. Elle est utilisée comme liant d'un mortier pour bâtir et servir comme un enduit, et au traitement des sols. Elle est utilisée, ainsi pour la réalisation des peintures décoratives.[17]

On distingue deux types de chaux.

- La chaux aérienne: Elle est obtenue par une calcination des pierre calcaires (dolomites pures) qui ne contiennent par plus de 5% de la matière argileuse, [17]. Le mortier chaux aérienne fait prise au contact de l'air. Il durcit en surface et reste souple à l'intérieur de la maçonnerie. Cette qualité en fait un mortier qui reste élastique et donc qui ne se fissure pas. Ce mortier est employé dans la maçonnerie traditionnelle de pierres ou de briques. Mais il ne doit pas être utilisé dans un milieu humide. (Cave, mur souterrain, etc.)

- La chaux hydraulique: Elle est obtenue par calcination des pierres calcaires contiennent des mélanges de marnes et d'argiles riches en silice, en alumine et en fer. La chaux hydraulique durcisse aussi bien au contact de l'air que de l'eau, [17]. Dans leur communication, Muzahim AL-MUKHTAR, Kevin BECK, ont caractérisé le mortier à base de chaux hydraulique et de poudre de tuffeau (pierre calcaire employée dans la construction des châteaux dans le Val de Loire – France). Parmi les résultats qui ont ressortis de leur étude, ils ont déduit que l'utilisation des mortiers moins résistants, plus souples, plus poreux tel que le mortier de chaux hydraulique permet de minimiser la dégradation future de la pierre en œuvre par rapport au mortier [16]

La figure (1.16) représente la méthode traditionnelle de préparation du mortier de chaux aérienne



Figure (1.16) : Méthode traditionnelle de préparation du mortier de chaux aérienne,[17]

1.3.3 Matériaux Isolant

1.3.3.1 Introduction

Le secteur d'isolation thermique a connu un développement considérable depuis les années 70 du siècle précédent. En effet, Ce développement s'est

manifesté avec vigueur dans le domaine de la normalisation internationale (ISO, CEN), ce qui a favorisé l'élaboration de nombreuses réglementations.

En parallèle, plusieurs recherches sont menées dans le domaine d'isolation thermique, en vue d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques qui les régissent, et ainsi être capable d'améliorer les isolants existants, rechercher de nouveaux isolants pour des nouvelles applications, aussi une caractérisation plus précise des matériaux isolants (propriétés thermo-physiques et mécaniques, résistances au feu et au vieillissement, etc.).

Les matériaux isolants modernes sont dans leur grande majorité des matériaux poreux légers, au sein desquels le transfert de chaleur se fait à la fois par conduction et par rayonnement. Les études de base sur le fonctionnement des isolants ont porté principalement sur la meilleure compréhension des transferts de chaleur et de masse par convection naturelle et forcée, et par rayonnement en milieu poreux semi-transparent. [8]

Par convention, l'isolant thermique destiné au secteur du bâtiment doit avoir le rapport de son épaisseur à sa résistance thermique au plus égal à $(0,065 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$, et sa résistance thermique au moins égale à $(0,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1})$, ces valeurs sont considérées à la température de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ et sur des matériaux à l'état sec[8].

1.3.3.2 Classification des matériaux isolants

L'isolation thermique du bâtiment peut être complémentaire à la structure de base. Une autres solution consiste à faire appel à des matériaux de construction, qui en raison de leur propriété isolantes, se suffisent eux-mêmes et ne nécessitent pas la mise en œuvre d'une isolation complémentaire [9].

La classification des isolants thermiques est basée sur la nature de leur structure, isolants fibreux, cellulaires etgranulaires de nature minérale et organique.

A) Isolants fibreux

A.1) Matériaux fibreux minéraux

Les principaux types sont : Les laines minérales (La laine de verre, La laine de roche,.. etc.), et les isolants en fibres céramiques (silice-alumine) [8]. Ces matériaux présentent une excellente résistance au feu et de bonnes qualités acoustiques [1].



Figure (1.17) : Laine de verre, [8]



Figure (1.18): Laine de roche, [8]

A.2) Matériaux fibreux organiques

Ces matériaux peuvent être d'origine naturelle (La laine ou les fibres de bois, la laine de mouton, le coton, la cellulose, la paille,.. etc.), ou manufacturés à partir de matières plastiques comme les fibres de polyester.

Ces matériaux sont utilisés souvent dans la construction éco-biologique.

Des mesures doivent être prises pour que ces matériaux résistent au feu, à l'humidité et aux parasites.[1],[8].



Figure (1.19): Fibre de bois, [8]

B) Isolants cellulaires

Ce sont les matériaux poreux à matrice solide consolidée contenant des cellules fermées ou ouvertes ou partiellement ouvertes, contenant de l'air ou un autre gaz ayant servi à l'expansion du matériau initial [8].

B.1) Matériaux cellulaires minéraux

Les plus utilisés sont :

- le béton cellulaire léger.
- le verre cellulaire : Matériau, relativement cher, mais il est totalement étanche à l'eau et présente d'excellentes qualités mécaniques. Il est utilisé en toiture plate et pour l'isolation de fondations et de dalles.

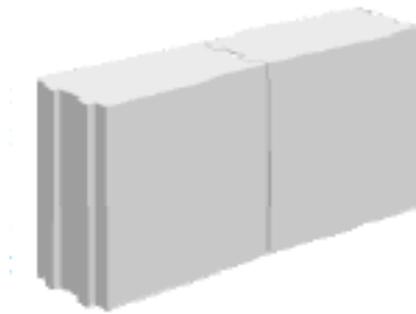


Figure (1.20) : Béton cellulaire autoclavé, [1]

B.2) Matériaux cellulaires organiques

Ce type d'isolants est largement utilisé dans le domaine de bâtiment. Ils sont manufacturés et représentés par une grande diversité de matériaux plastiques alvéolaires et de mousses à base de produits carbonés :

- le polystyrène : Expansé puis découpé, pour faire des plaques d'isolant d'usage général, mais peu résistantes à l'eau, ou bien extrudé directement en plaques, qui possèdent alors une pellicule les rendant résistantes à l'eau.

- Polyuréthane : Possède une conductivité thermique apparente très basse. De plus, il a une bonne résistance à la compression. Il est utilisé en toiture, sous des dalles, en isolation industrielle. Cependant, Il est sensible au rayonnement ultraviolet et ne doit pas être exposé aux intempéries.



Figure (1.21): Polystyrène extrudé, [8]

Ainsi, il existe d'autres matériaux cellulaires organiques, tel que : le polychlorure de vinyle, la mousse phénolique et les mousses souples d'élastomère, [8],[1].

Il existe d'autres types d'isolation, plus ou moins utilisées. On peut citer par exemple :

- Les matériaux ligneux (Les bois légers, la paille agglomérée, les panneaux de fibre de bois, etc.).
- L'isolation mince réfléchissante.
- Le liège.

1.3.3.3 Qualités des isolants thermiques

L'isolation dans le bâtiment est obtenue souvent par l'utilisation des matériaux spécifiques qui présentent non seulement, une bonne résistance thermique, et qui doivent présenter aussi d'autres qualités, tel que :

- Résistance au feu : Pour de raisons de sécurité évidentes, il est interdit d'utiliser des matériaux de construction facilement inflammables.
- Résistance mécanique (traction et compression) : L'isolation des dalles, des planchers, ou des ouvrages souterrains nécessite des matériaux qui résistent à la compression. L'isolation extérieure compacte et les toitures plates non chargées nécessitent un isolant qui résiste dans une certaine mesure à la traction, de manière que les couches d'isolant ne se séparent pas sous l'effet des forces de succion du vent.
- Résistance à la diffusion de vapeur d'eau : La vapeur d'eau diffuse au travers des matériaux, surtout s'ils sont poreux, et tend à se condenser dans les zones froides, donc notamment du côté froid de la couche isolante

- Stabilité dimensionnelle et comportement à la chaleur
- Qualités acoustiques
- Étanchéité à l'air
- Faible absorption d'eau par immersion, par flottaison et par diffusion
- Légèreté.
- Absence d'effets nuisibles sur les matériaux en contact avec l'isolant.
- Coût.[1],[9]

1.4 Détermination des caractéristiques thermo-physique des matériaux

1.4.1 Introduction

Vu que la plupart des matériaux de construction possèdent une structure poreuse à l'intérieur de laquelle l'eau (sous forme liquide ou vapeur) peut être stockée ou restituée au milieu environnant, et que le transfert de chaleur dans un milieu poreux s'accompagne, souvent, de transfert d'humidité, les caractéristiques des matériaux à rechercher sont donc :

a) Les propriétés thermiques :

- La capacité calorifique.
- La conductivité thermique.
- La diffusivité et l'effusivité thermique.

b) Les propriétés hydriques ;

- La perméabilité à la vapeur d'eau.
- La teneur en humidité.
- Le coefficient d'absorption de l'eau.
- La diffusivité de l'eau à l'état liquide.
- La perméabilité à l'air.

La modélisation du transfert de chaleur dans un milieu poreux est assez compliquée, car les modèles à adopter pour l'étude de ce phénomène doivent prendre en compte le transfert couplé de chaleur et de l'humidité, en considérant l'eau sous forme liquide ou vapeur. [9]

1.4.2 Propriétés thermiques des matériaux

1.4.2.1 Conductivité thermique

Le tableau (1.1), représente la conductivité thermique de quelques matériaux de construction et d'isolation. D'après ce tableau, les isolants présentent une faible conductivité thermique. Le plâtre et le sable présentent une résistance thermique plus grande que celles des autres matériaux de construction.

Tableau (1.1) : Conductivité thermique de quelques matériaux, d'après [19]

Matériau	Conductivité (W/m.°C)
Béton plein	1.75
Brique de terre cuite	1.15
Carrelage	2.4
Plâtre	0.48
Sable	0.2-0.1
Laine de roche	0.041-0.047
Laine de verre	0.035-0.051
Polystyrène expansé	0.047-0.041
Polyuréthane mousse	0.03-0.045
PVC mousse	0.031, 0.041

1.4.2.2 Diffusivité thermique

Lorsque la conductivité thermique est indépendante de la température, l'équation de la chaleur est exprimée par la relation :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T \dots \dots \dots (1.35)$$

Le terme $(\frac{\lambda}{\rho C_p} = d)$ représente la diffusivité thermique du milieu. Elle caractérise la vitesse de propagation d'une onde de chaleur dans un corps [9].

De plus, on définit la grandeur $\delta = \sqrt{dt}$ comme une profondeur de pénétration (m) où t est un temps caractéristique, [1].

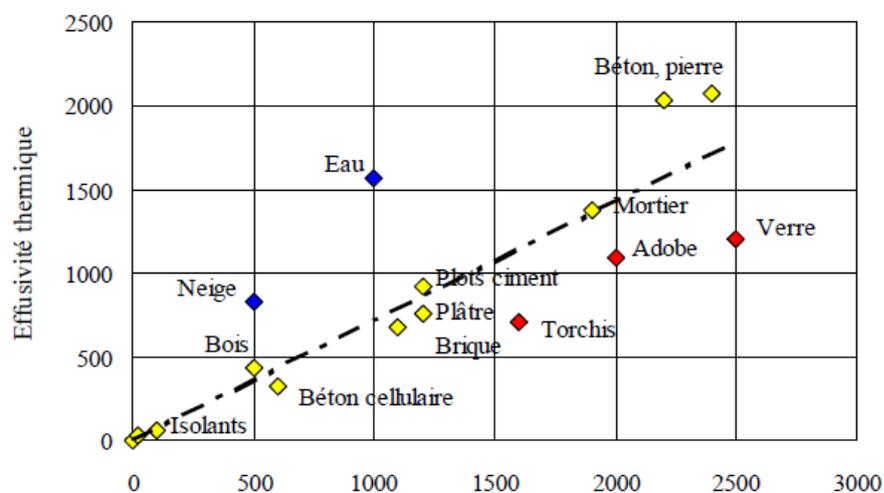
Tableau (1.2) : Diffusivité thermique de quelques matériaux, d'après [19]

Matériau	Diffusivité (m^2/s) $\times 10^{-6}$
Pierre sédimentaire	1.09
Brique alvéolaire	0.57
Parpaing	0.78
Béton	0.65
Carrelage	1.14
Plâtre	0.40
Schiste	1.04
Laine de verre	7.29
Polystyrène	1.91
Polyuréthane expansé	3.01

1.4.2.3 Effusivité thermique

L'effusivité thermique traduit la capacité d'accumulation de chaleur d'un matériau. Elle est donnée par la relation: $b = \sqrt{\lambda\rho c}$ (1.36)

Donc, si on veut stocker plus de chaleur dans un matériau, il doit avoir plus de conductivité, de masse thermique, et de chaleur spécifique. La figure (1.22) montre l'effusivité de quelques matériaux. On peut constater que l'effusivité augmente linéairement avec la masse volumique.

**Figure (1.22):** Effusivité thermique de Quelques matériaux [1]

1.4.2.4 Chaleur spécifique

La figure (1.23), représente la chaleur spécifique de quelques matériaux de construction.

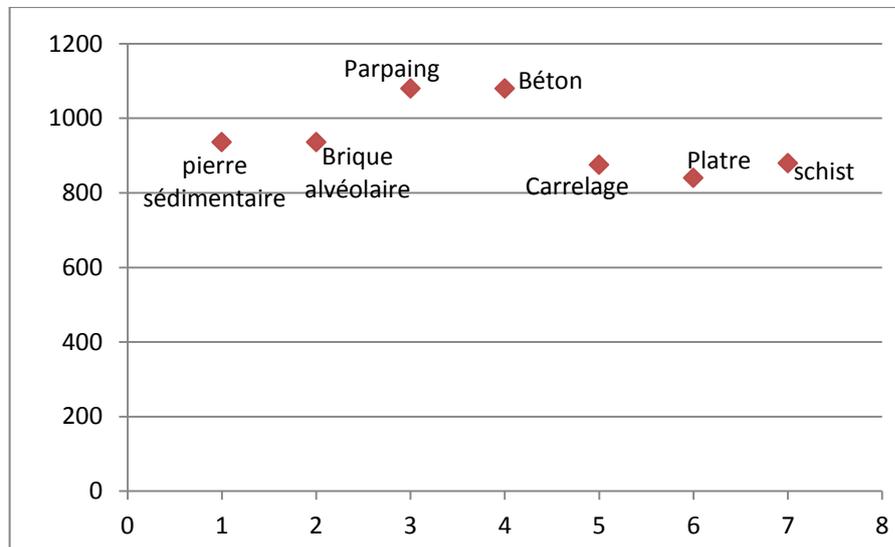


Figure (1.23): Chaleur spécifique de quelques matériaux de construction, d'après [19]

D'après cette figure, on constate que le béton et ses dérivés ayant une chaleur spécifique importante.

1.4.3 Quelques méthodes de mesure des propriétés thermo-physiques

La chaleur spécifique, la diffusivité, l'effusivité, et la conductivité sont les paramètres qui peuvent être mesurés par divers méthodes.

1.4.3.1 Les méthodes en régime permanent pour la mesure de la conductivité

Ces méthodes sont basées sur l'utilisation de la loi de Fourier en régime stationnaire. Le processus de mesure est long, surtout si la conductivité de l'échantillon est faible, car il faudra attendre jusqu'à l'établissement du régime permanent. Les principales méthodes utilisées sont :

a) Méthode de la plaque chaude gardée

Son principe consiste à maintenir une différence de température entre deux plaques parallèles portées aux températures différentes. Un échantillon à étudier

est placé entre ces deux plaques. Cette méthode est développée par (Gustafson et al, 1981; Pradhan et al 1991).[9]

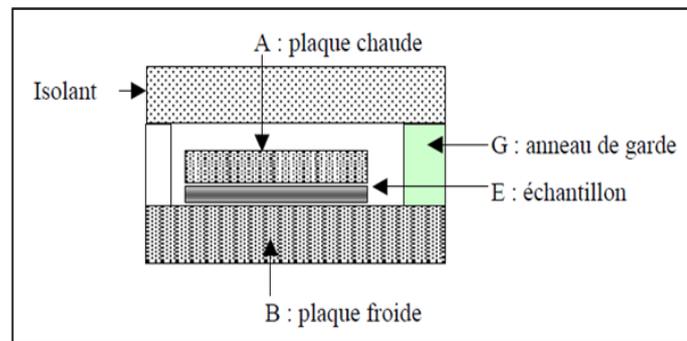


Figure (1.24): Schéma de principe de mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée, [9] .

b) Méthode des boîtes

Cette technique de mesure est adoptée par le laboratoire d'études thermiques et solaires de l'Université Claude Bernard Lyon I en France, et utilisée au Laboratoire de Thermique, Energie Solaire et Environnement, Faculté des Sciences, Université A. Essaâdi, Tétouan, Maroc [20], est défini comme suit :

L'échantillon (E), placé entre la capacité isotherme froide (A) et la source de chaleur à flux constant (R), est traversé par un flux thermique supposé unidirectionnel. On mesure alors le gradient de température qui s'établit entre ses deux faces lorsque celui-ci devient constant. Une fois le régime permanent établi, la conductivité thermique apparente est donnée par :

$$\lambda_a = \frac{e}{S\Delta T} (q + C\Delta T') \dots \dots \dots (1.37)$$

C : Coefficient de déperdition thermique ($W \cdot ^\circ C^{-1}$).

e : Epaisseur de l'échantillon (m).

q : flux de chaleur(W).

S : Surface de l'échantillon (m^2).

ΔT : Ecart de température entre les faces chaude et froide de l'échantillon ($^\circ C$).

$\Delta T'$: écart de température entre les ambiances extérieure et intérieure de la boîte ($^\circ C$)

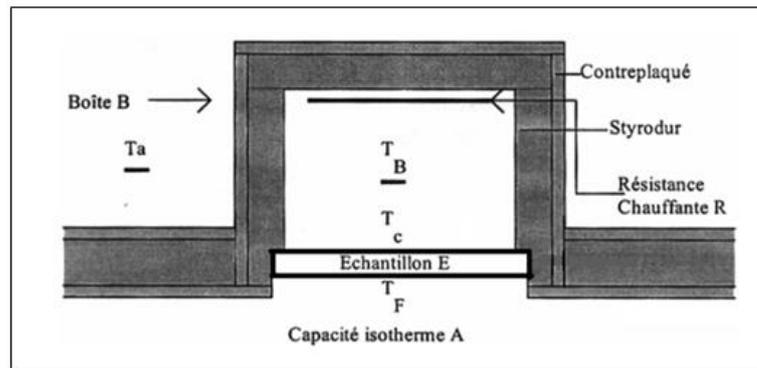


Figure (1.25): Schéma de principe de la méthode des boîtes, [20].

1.4.3.2 Les méthodes en régime transitoire

Ces méthodes sont, généralement utilisées pour les matériaux biologiques ayant un taux d'humidité élevé. Ces méthodes sont basées sur l'équation différentielle complète de chaleur. Cependant, elles ne donnent pas une grande précision. Les principales méthodes utilisées sont :

a) Méthode de la plaque chaude avec une excitation sinusoïdale

Cette méthode est basée sur le système à plaque chaude. Son principe consiste à générer un signal thermique périodique sur la face inférieure de l'échantillon. La température extérieure de l'échantillon est maintenue constante à l'aide d'un dispositif de refroidissement

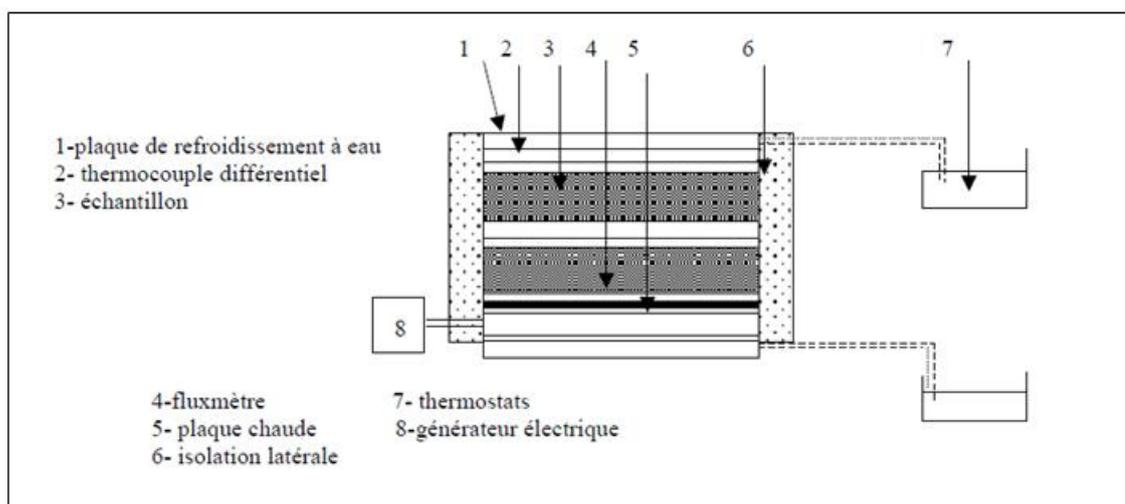


Figure (1.26): Schéma de principe de mesure des caractéristiques thermiques par la méthode des signaux, [9].

La modélisation mathématique du système physique obtenue par cette méthode, après l'établissement du régime périodique, nous permet de mesurer la conductivité, la diffusivité, et l'effusivité thermique. Tout en résolvant l'équation de Laplace :

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \dots \dots \dots (1.38)$$

Pierre MEUKAM Dans sa thèse de Doctorat, [9], a défini par détaille d'autres méthodes existantes. Nous pouvons citer:

- Mesure de la conductivité par la méthode du fil chaud.
- Mesure de l'effusivité par la méthode du plan chaud.
- Mesure simultanée de l'effusivité et de la conductivité par la méthode du ruban chaud.
- Mesure de la diffusivité par la méthode flash.

b) Méthode calorimétrique pour la mesure de la chaleur spécifique

On plonge dans un calorimètre, contenant de l'eau froide, un solide préalablement chauffé pendant au moins 24 heures. La relève des températures de solide et de l'eau à différents instants, nous permet de procéder à la résolution de l'équation suivante :

$$m_s C_s (T_{s0} - T_{s1}) = m_e C_e (T_e - T_{e0}) + \int_0^t U \cdot S (T_{em} - T_a) dt \dots \dots \dots (1.39)$$

T_{s1} : Température moyenne du solide à l'instant t.

T_{s0} : Température initiale du solide.

T_e : Température maximale de l'eau.

T_{e0} : Température initiale de l'eau.

T_{em} : Température moyenne de l'eau.

T_a : Température de la salle de l'expérience.

C_s, m_s : Chaleur spécifique, et masse du solide.

C_e, m_e : Chaleur spécifique, et masse de l'eau.

U : Coefficient de déperdition de chaleur du calorimètre à l'ambiance de la salle.

S : Surface d'échange.

1.5 Conclusion

Le secteur du bâtiment est une activité où le potentiel d'économie d'énergie est important. Une implantation réfléchie, une orientation optimale, un choix pertinent des matériaux, une isolation performante, sont des solutions à prendre en compte lors de la réalisation d'habitation.

A ce propos, afin qu'on sache mieux le rôle de chaque facteur caractérisant le bâtiment, et qu'on puisse optimiser le choix de différents paramètres, plusieurs études et expériences ont été effectuées dans des climats différents. Parmi les résultats obtenus, il en ressort que l'utilisation de l'isolation thermique d'une manière correcte permet à la fois de réduire les consommations d'énergie de chauffage et / ou de climatisation et d'accroître le confort thermique des occupants.

L'utilisation des matériaux de construction de faible conductivité thermique contribue à l'amélioration des performances du bâtiment. De plus, l'utilisation des matériaux dont la masse thermique importante est recommandée, surtout dans les climats non tempérés. Par exemple, l'inertie thermique des habitations dans le climat saharien, connu par son écart diurne de température important, est très utile pour la création des conditions intérieures confortables.

Après la présentation de quelques matériaux de construction utilisés dans le domaine du bâtiment, nous pouvons les classer en deux catégories principales : matériaux locaux, et matériaux industrialisés.

Les matériaux locaux sont caractérisés, généralement, par leur qualité d'isolation thermique, et par leur faible coût. De plus leur utilisation permet d'économiser une grande partie d'énergie. En effet, elles connaissent actuellement un regain d'intérêt suite à la crise énergétique et celle du logement.

La gamme des isolants thermiques est très variée. La connaissance de leurs propriétés permet de faire le choix adéquat selon l'utilisation. En effet, La qualité de l'isolation à prévoir dépend du climat, de l'exposition des murs et aussi des matériaux employés pour la construction.

Le développement récent de quelques matériaux allégés de construction, tel que les bétons légers, capables de jouer un rôle en tant qu'isolant, tout en conservant des niveaux de performances mécaniques suffisants.

Les méthodes d'estimation des propriétés thermiques des matériaux tels que la conductivité, le diffusivité, l'effusivité, et la chaleur spécifique sont nombreuses. Cependant, elles peuvent être classées en deux catégories : les méthodes de mesure en régime permanent; et les méthodes de mesure en régime transitoire.

CHAPITRE 2 : CLIMAT ET HABITAT TRADITIONNEL DANS LA REGION DE GHARDAÏA

2.1 Introduction

Le climat est l'un des facteurs déterminant dans l'architecture. La conception des édifices est fortement influencée par les conditions climatiques qui caractérisent le site d'implantation. En effet, le système thermique d'un habitat est un système dynamique dont l'évolution est liée aux sollicitations du climat extérieur. De ce fait, pour mieux adapter une construction à son environnement, les concepteurs doivent acquérir une base de données suffisante concernant les conditions climatiques pour pouvoir concevoir des habitations qui répondent à la fois aux exigences des usagées, et à la nécessité de minimiser la consommation de l'énergie.

L'étude des matériaux de construction revient à définir leur niveau d'adaptation au climat, lequel concerne la gestion des rayonnements solaires et terrestres à travers les parois, selon, les matériaux qui les composent, leur épaisseur et leur revêtement. Dans les régions où les températures diurnes sont importantes, la technique utilisée consiste à retarder le plus longtemps possible l'entrée de la chaleur dans les habitations par la mise en œuvre de matériaux disponibles sur place et à forte inertie thermique tel que l'adobe, le pisé, la pierre ou diverses combinaisons de ces matériaux, [34].

Dans ce chapitre, nous caractérisons le climat local de la région de Ghardaïa, et nous présentons des données fournées par O.N.M, station météorologique de Ghardaïa comportant des mesures de température, d'humidité, d'insolation, et de la vitesse de vent. Les données concernant les irradiances solaires, d'après [3], sont aussi présentées.

Ensuite, nous faisons une présentation succincte sur les méthodes de construction traditionnelles, et sur les caractéristiques physico-chimiques de la pierre dans la région de Ghardaïa.

2.2 Climat de Ghardaïa

2.2.1 Classification du climat en Algérie

L'Algérie est située entre une zone subtropicale et la côte sud de la méditerranée. Sa superficie dépasse les deux millions de km². Plus des 4/5 de sa superficie sont désertiques. D'où une large variété géographique et climatique allant du littoral au désert. En effet, on recense en Algérie trois (03) climats :

- Le climat méditerranéen : Caractérisé par un hiver doux et pluvieux, et un été chaud et moins humide.
- Le climat continental (arrière littoral et hauts plateaux) : Son hiver est très froid, son été est chaud et sec.
- Le climat saharien : c'est un climat aride caractérisé par un hiver sec et froid surtout la nuit. La période d'hiver est courte. En été l'air est très sec et très chaud. Les températures atteignent les 45°C à l'ombre avec des vents intenses (siroco).

La diversité du climat en Algérie permet de distinguer quatre (04) zones principales :

- Zone A : Littoral marin.
- Zone B : Arrière littoral montagne.
- Zone C : Hauts plateaux.
- Zone D : Présaharien et saharien. [4], [7]

D'après J-C BOREL [15], Le climat en Algérie peut être classé en quatre (04) zones climatique (A, B, C, et D), et une sous-zone B'.

La zone A comprend le rivage de la mer avec parfois le versant Nord des chaînes côtières.

La zone B comprend la pleine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières de l'Atlas tellien autre que celle de Cheliff.

La sous-zone B' comprend la vallée de Cheliff.

La zone C comprend les hauts-plateaux compris entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien.

La zone D comprend le Sahara au-delà de l'Atlas saharien jusqu'à la latitude $32^{\circ}5'$. Dans cette zone on distingue les sites d'altitude inférieure de 500 mètres, le site compris entre 500 et 1000 mètres et ceux au dessus de 1000 mètres, [15].

2.2.2 Paramètres météorologiques de Ghardaïa

La ville de Ghardaïa est située au Sud de la capitale (600 km), à $32^{\circ}4'$ de latitude Nord, $3^{\circ}81'$ de longitude Est et 450 m d'altitude. La fraction d'insolation dans cette région est très importante (en moyenne 75 %) et la moyenne annuelle de l'irradiation journalière globale mesurée sur un plan horizontal dépasse 6000 Wh/m². [3]



Figure (2.1): Carte de l'Algérie, situation de la Wilaya de Ghardaïa.

Le climat de la région de Ghardaïa est de type désertique, il est caractérisé par un été sec et chaud et un hiver sec à température diurne modérée et nocturne basse. L'écart diurne de température est important en été comme en hiver. Les vents soufflent toute l'année, parfois violents et chargés de sable avec des maximums au printemps (Mars, et Avril). Les pluies sont très rares.

2.2.2.1 Humidité de l'air

La région de Ghardaïa est une zone sèche. La moyenne mensuelle de l'humidité relative de l'air n'a pas dépassé durant les trois ans 2008, 2009, et 2010 le taux de 66% (mesuré en Janvier 2009).

En été, l'air est plus sec. Les mois les plus secs de l'année sont généralement Juillet et Août.

Les mesures faite par O.N.M, station météorologique de Ghardaïa, ont permet d'établir les moyennes mensuelles des années de 2008, 2009, 2010.

Les courbes de la figure (2.2) donnent les moyennes mensuelles de l'humidité relative pour les années 2008, 2009, 2010.

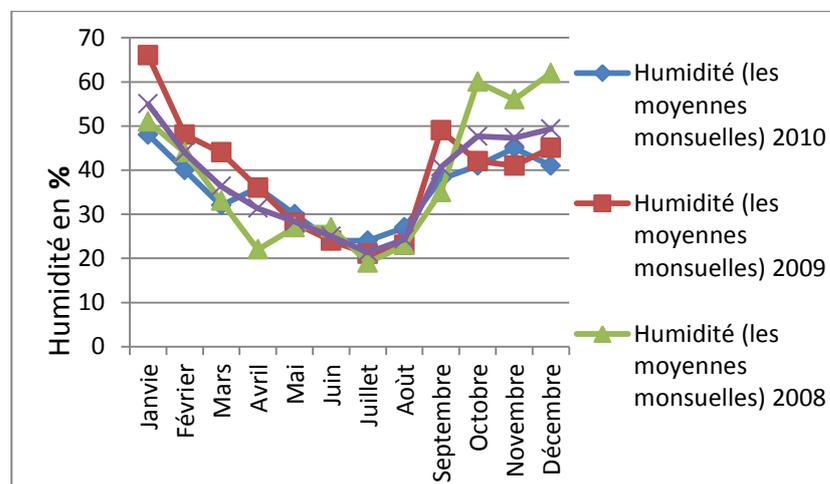


Figure (2.2): Moyennes mensuelles de l'humidité relative 2008, 2009, 2010, d'après l'O.N.M

2.2.2.2 Vitesse du vent

En se basant sur des mesures de vitesse du vent, effectuées par l'ONM, pour une période s'étalant du Février 2004 à Décembre 2009, soit une durée de presque de 7 ans, on a calculé les moyennes mensuelles et annuelles. Sachant que les mesures ont été prises à une hauteur de 10 m de sol. [7].

La figure (2.3) représente les résultats.

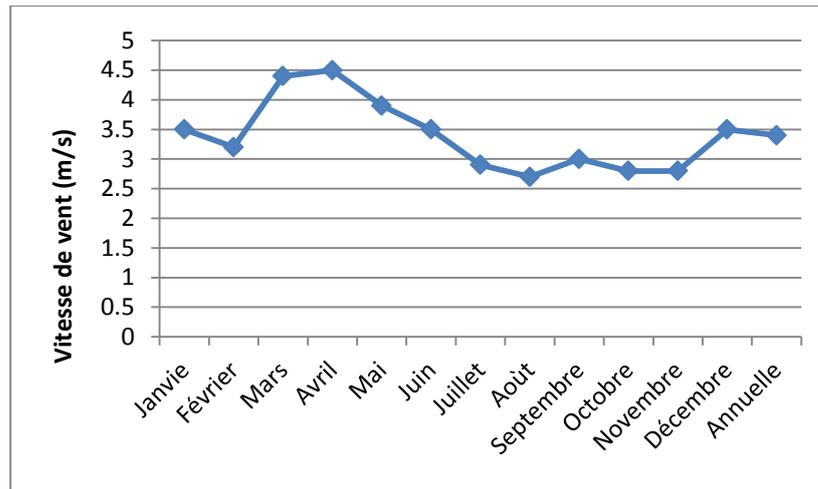


Figure (2.3): Variation de la vitesse du vent à Ghardaïa, moyennes mensuelles, d'après l'ONM

2.2.2.3 Température ambiante

La figure (2.4) représente les températures moyennes mensuelles relevées sur une période de 3 ans (2010, 2009, et 2008) par l'O.N.M, station météorologique de Ghardaïa.

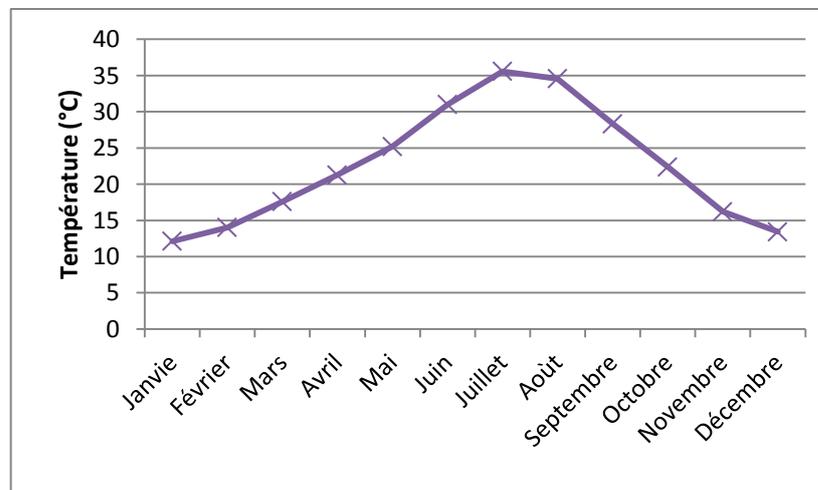


Figure (2.4): Moyennes mensuelles de température relevée en 2008, 2009, 2010, d'après l'O.N.M

La figure (2.5) représente la variation des moyennes mensuelle de l'écart diurne des températures relevées en 2008, 2009, et 2010.

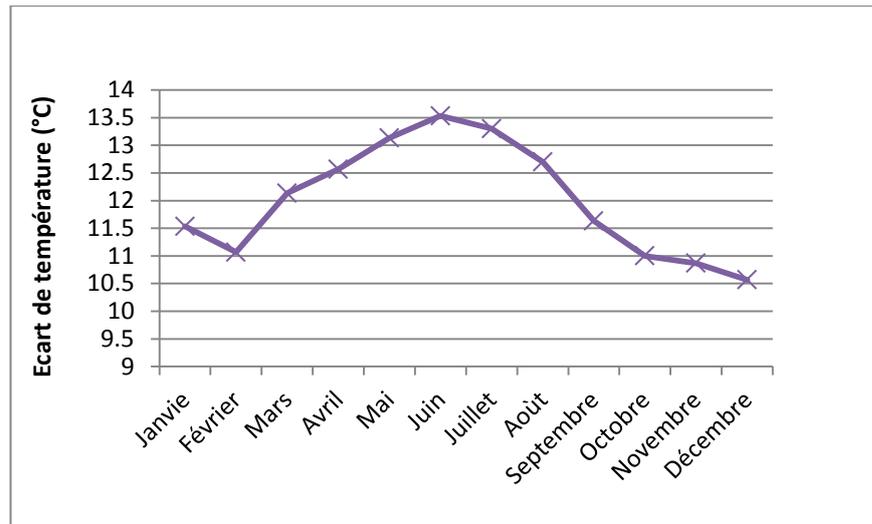


Figure (2.5): Variation de l'écart diurne de température relevé en 2008, 2009, 2010, d'après l'O.N.M

Nous remarquons à partir de cette courbe, que l'écart diurne est plus important durant la période estivale. Il a atteint 13.5°C au mois de Juin.

2.2.2.4 Eclairage solaire

A) Irradiation solaire

Le tableau (2.1) représente les moyennes mensuelles des irradiations journalières globales mesurées sur une surface horizontale.

Tableau (2.1): Moyennes mensuelles des irradiations journalières globales, d'après [3]

Mois	Moyenne mensuelles des irradiations journalières globales (Wh/m ²)
Janvier	3871
Février	4842
Mars	5926
Avril	7339
Mai	7745
Juin	7812
Juillet	7503

Août	7090
Septembre	6036
Octobre	4824
Novembre	4026
Décembre	3437

B) Insolation

L'insolation, est la durée pendant laquelle l'éclairement solaire direct reçu sur un plan horizontal dépasse 120 W/m^2 .

La figure (2.6) représente la variation mensuelle des moyennes mensuelles d'insolation pour les années de 2008, 2009, et 2010 (mesures effectuées par l'O.N.M, station météorologique de Ghardaïa).

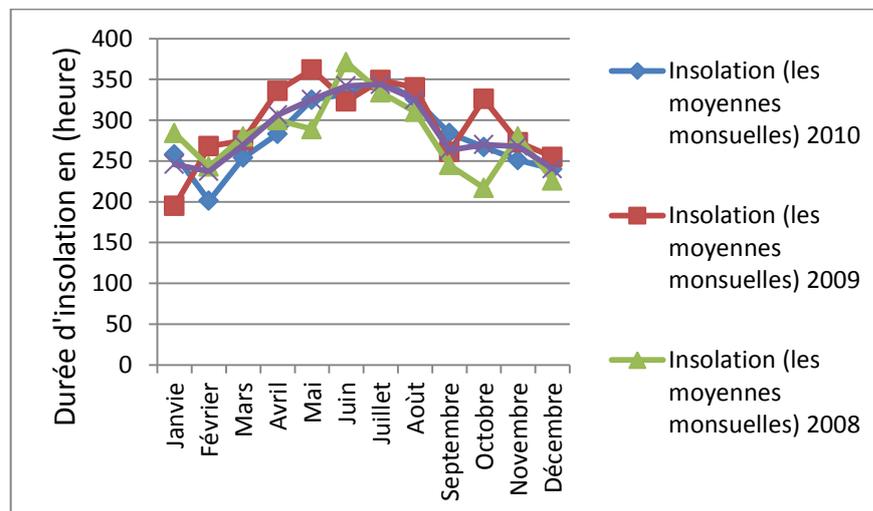


Figure (2.6): Variation des moyennes mensuelles de l'insolation 2008, 2009, 2010, d'après l'O.N.M

C) Fraction d'insolation

Les mesures d'insolation nous permettent de calculer la fraction d'insolation moyenne pour chaque mois. Sachant que la fraction d'insolation est le rapport de la durée d'insolation réelle (mesurée) sur la durée d'insolation extraterrestre (calculée).

Le tableau (2.2), représente les fractions d'insolation mensuelles, moyenne des trois ans (2008, 2009, et 2010).

Tableau (2.2) : Moyennes mensuelles des fractions d'insolation

Mois	Jan	Fév	Mar	Avar	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov	Déc
Fract	78%	79%	74%	80%	77%	81%	80%	79%	71%	77%	86%	78%

2.3 Méthodes de construction traditionnelles à Ghardaïa

2.3.1 Construction des Murs

Les murs sont construits par des Moellons de pierre hourdés avec un mortier à base de sable et de chaux locale ou tinchemt (gypse déshydraté) à prise rapide.[18]



Figure (2.7):Mur en pierre [18]

2.3.2 Construction de la toiture

Dans les maisons traditionnelles, la toiture est construite sur les voûtains de pierre, reposent sur un cintre de branche de palmier. Le niveau est égalisé par un conglomérat de cailloux dont la cohésion est assurée par du tinchemt, puis une couche d'argile de 5 à 8 cm d'épaisseur est étalée pour assurer une isolation thermique, enfin une couche de mortier de chaux.[18]



Figure (2.8):Toiture traditionnelle [18]

Par ailleurs, on rencontre souvent dans des toitures traditionnelles une couche d'argile ou de tuf dont l'épaisseur peut aller jusqu'à 40 cm.

2.3.3 Revêtements des murs

Les murs sont revêtus par un enduit composé de sable et de tinchemt [18], ou bien par du mortier de chaux. Pour l'esthétique, on utilise le badigeon au lait de chaux coloré en bleu, rose, ocre, etc.

2.3.4 Construction en terre crue

L'utilisation optimale des ressources naturelles est l'un des principes fondamentaux de la construction à la vallée du M'Zab. C'est pour cette raison que les constructions des Ksour sont réalisées en pierre et en chaux, alors que la majorité des constructions dans la palmeraie sont en argile, vue l'abondance et la

facilité d'exploitation et d'utilisation de cette matière sur ce site. La technique de construction en terre utilisée est celle de la construction en adobe comme la plupart des ksour dans le Sahara algérien.

Les fondations ainsi que la partie inférieure des constructions en adobe sont en pierre et en chaux, à cause de la sensibilité de l'argile à la remontée capillaire de l'eau. L'enduit entre les adobes est fabriqué en argile ou à partir de la chaux. Le revêtement et la bordure au-dessus des murs sont généralement en enduit de chaux. Le toit de la maison traditionnelle en terre est identique au celui de la maison en pierre et chaux, voir la figure (2.9).

2.3.5 Utilisation de la pierre dans la construction

La pierre est utilisée pour la construction dans la vallée du M'Zab depuis longtemps. En effet, l'utilisation de la pierre locale peut être constatée dans les ruines des Ksour construits avant ceux connus actuellement. Exemple : Ksar Talzdite, Ksar Baba Essàd,...etc. [10].

Dans la région du M'Zab, la pierre était utilisée dans différents domaines tel que la construction des maisons, des tours, des murailles, des barrages, des systèmes d'irrigations...etc. Il existe plusieurs techniques de construction en pierre selon l'utilisation. Nous pouvons citer, par exemple, quelques techniques utilisées dans la construction des édifices comme :

Mur en pierre d'une seule face : Cette technique est utilisée dans les cloisons et dans les murs de clôture.

Mur en pierre en double faces : Cette technique est utilisée souvent dans les constructions des habitations, des mosquées, des tours. Le mur est construit par deux rangées de pierre délimitant un espace rempli soit par du mortier soit par des petits cailloux, soit par les deux.

Croisement des pierres : Afin de rendre le mur plus résistant et plus stable, les blocs de pierre sont croisés au niveau des coins.

La toiture traditionnelle : La pierre est utilisée dans la construction des toitures traditionnelles.

Ainsi, la pierre est utilisée dans d'autres domaines tel que : le soutènement des puits traditionnels, la construction des barrages, le pavage des rues, des places et des maisons, ...etc.[10]

Actuellement, la pierre est toujours présente dans la construction des édifices, et dans les travaux de réhabilitation. Cependant, les techniques adoptées sont modernisées par l'intégration du béton dans la construction des dalles des poteaux et des poutrelles, l'utilisation de mortier de ciment comme liant au lieu du gypse, et de l'argile. Toutefois, le mortier de chaux est toujours présent même dans les constructions contemporaines. Cela est peut être dû à ses diverses qualités tel que sa résistance thermique importante, sa force d'adhérence à la pierre, et son coût relativement faible à celui du mortier de ciment.

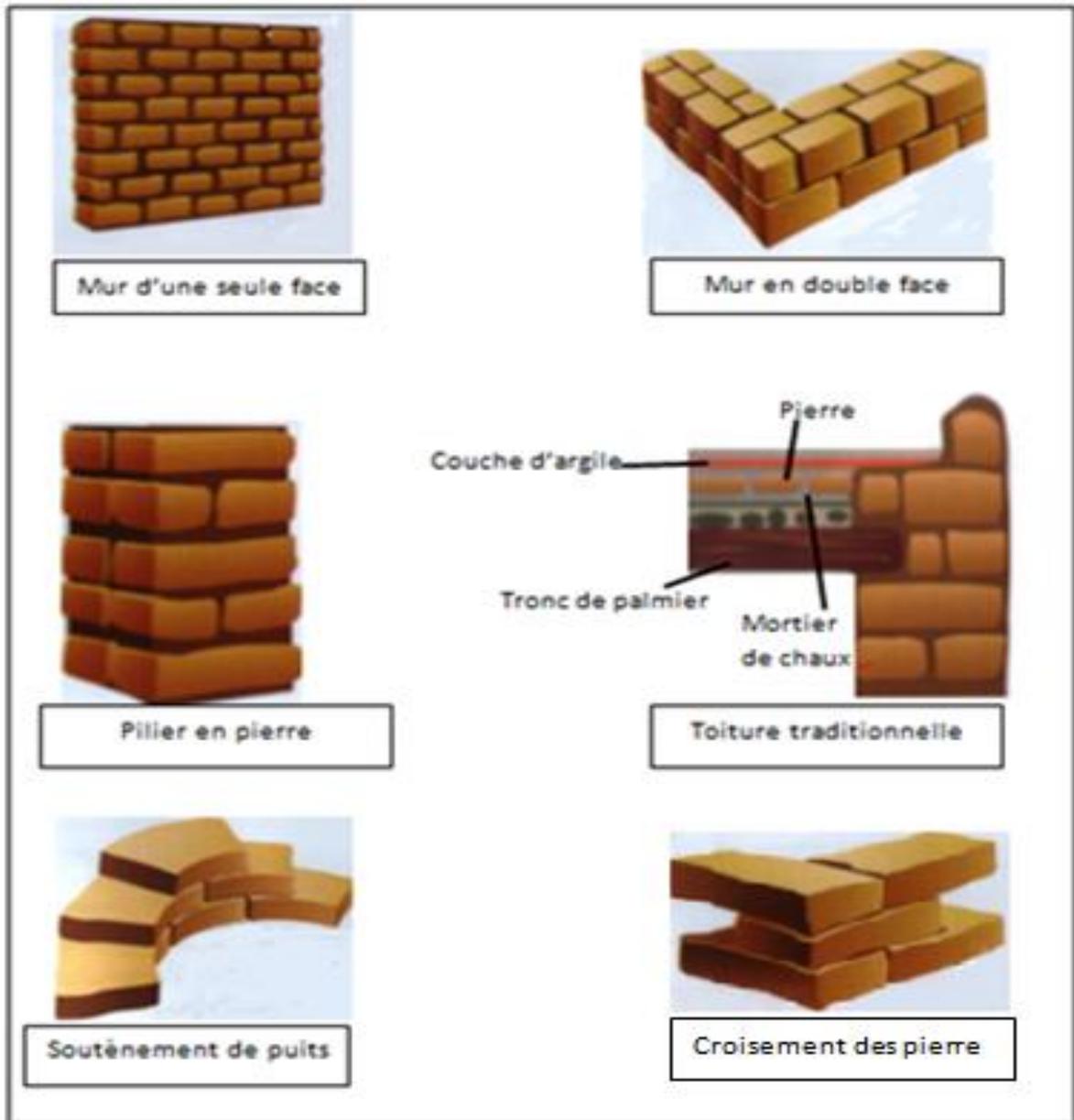


Figure (2.9):Utilisation de la pierre dans différents domaines de construction à Ghardaïa, d'après [10].

2.3.6 Caractéristiques de la pierre locale

Le relief de la région de Ghardaïa est formé de vastes plateaux étagés, entaillés par de larges vallées. Leurs surfaces sont recouvertes de débris de roches calcinées et modelées par les facteurs climatiques, [21]. Il est donc de nature rocheux sédimentaire carbonaté.

Les matériaux issus des carrières répartis dans le territoire de la Wilaya de Ghardaïa sont utilisés dans différents domaines. Selon les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des roches, elles peuvent être utilisées pour l'industrie de verre, ou la production des matériaux de construction (chaux, agrégats, pierre de construction, etc.). Dans le tableau (2.3), nous représentons quelques résultats des analyses chimiques effectuées dans le cadre d'une étude menée par l'Entreprise Nationale de Développement et de Recherche Industriels des Matériaux de Construction, ENDMC, [21]), Les valeurs présentées dans ce tableau représentent la composition chimique des échantillons pris de différents endroits dans la région de Ghardaïa (Berriane, Metlili, Sebseb, Azuoil [Bounoura], Ouldja [Noumérat].)

Tableau (2.3) : Composition chimique de la pierre dans la région de Ghardaïa

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F
Teneur	0.1 -	0.01 -	0.18 -	30.45	18.85	0.07 -	0.02 -	0.02 -	46.22
%	1.57	0.47	0.05	-32.37	-21.36	0.57	0.04	0.17	-47

D'après ces résultats, on peut constater que la composition chimique de la pierre dans la région de Ghardaïa varie d'un endroit à l'autre. Cependant, elle est généralement de nature calcaire ou dolomite.

Quant aux propriétés physiques de la pierre, à savoir la masse volumique, l'absorption de l'eau, et la porosité, les essais effectués par le même organisme [21], sur les mêmes échantillons permettent d'avoir les résultats suivants, tableau (2.4).

Tableau (2.4) : Propriétés physiques de la pierre dans la région de Ghardaïa

Masse Volumique (kg/m ³)	Absorption de l'eau %	Porosité %
2246.6 – 2678.0	0.52 – 5.14	1.41 – 11.55

2.4 Conclusion

D'après les données présentées dans ce chapitre concernant les paramètres météorologiques à Ghardaïa, Il est évident que ce climat est de de type désertique, et sec avec un écart diurne de température important. En été, il connaît une importante surchauffe.

Nous avons vu ainsi dans ce chapitre que dans les maisons traditionnelles on utilisait des matériaux de construction locaux qui semblent d'être adaptés parfaitement au climat local, et disponible en abondance. La construction des parois épaisses avec la pierre calcaire locale, caractérisée par une capacité thermique élevée, est généralement la technique de construction la plus utilisée dans les maisons traditionnelles. Même si la pierre se présente comme un mauvais isolant, elle a cependant l'avantage de capter l'énergie solaire et de l'accumuler pour la restituer plus tard dans la nuit par l'effet de la ventilation nocturne.

CHAPITRE 3 : MODELISATION THERMIQUE D'UNE CELLULE

3.1 Introduction

Le but de la présente étude est d'établir un modèle mathématique décrivant le système physique intervenant dans la variation de la température d'une cellule d'habitation.

Il s'agit d'un système thermique qui dépend de plusieurs paramètres tel que les paramètres liés à l'habitat (le type de construction, l'orientation de la cellule, les matériaux de construction et d'isolation,...etc.), ainsi que les paramètres liés aux conditions extérieures (température externe, éclairement solaire, vitesse du vent, Humidité de l'air, etc.)

3.2 Présentation de la cellule et hypothèses

3.2.1 Dimension et orientation

La pièce à étudier est une cellule de géométrie parallélépipédique dont la dimension est de 6x4x3 (m). La figure (3.1) représente son plan descriptif.

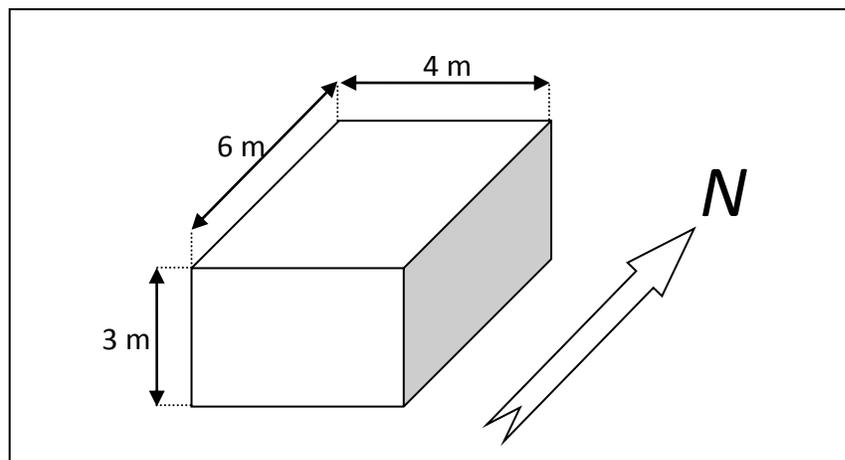


Figure (3.1) : Orientation et dimensions de la cellule

La cellule choisie pour notre étude est totalement fermée du fait qu'elle ne dispose d'aucun ouvrant (fenêtre ou porte). Ce choix est justifié par la mise en évidence du seul effet des matériaux de construction sur la température à l'intérieur d'une pièce

en éliminant plusieurs facteurs influant sur le comportement thermique des habitats (renouvellement et infiltration d'air, apport solaire direct par les fenêtres, type de vitrage,...etc.).

3.2.2 Constitution de l'enveloppe de la cellule

Dans cette partie de la simulation, nous supposons que la cellule représente une technique de construction massive utilisée largement dans la région de Ghardaïa ayant pour but de favoriser l'inertie thermique de l'habitat. Elle consiste à utiliser la pierre et le mortier de chaux, disponibles localement (voir chapitre2), pour construire des murs denses avec une épaisseur qui dépasse 30 cm.

3.2.2.1 Constitution des murs

Les murs sont construits par deux rangées de pierre délimitant un espace rempli soit par du mortier soit par des petits cailloux, soit par les deux. Le liant utilisé soit le mortier de chaux soit le mortier de ciment. Pour le revêtement des murs, nous avons supposé que l'enduit utilisé est le mortier de chaux.

Pour modéliser le système thermique des murs, nous supposons la constitution suivante: Mortier de chaux (1.5 cm), Pierre (30 cm), Mortier de chaux (1.5 cm). Voir la figure (3.2)



Figure (3.2): Constitution des murs de la cellule

3.2.2.2 Constitution du toit et du sol

La toiture est supposée de type dalle en béton revêtue par du ciment. La constitution du système thermique de la toiture est donc : Enduit de ciment (1 cm), hourdis (20 cm), béton (5 cm), mortier de ciment (2 cm). Voir la figure (3.3).

Quant au sol, il est supposé en carrelage collé avec du ciment sur une dalle de béton de (10cm). Voir la figure (3.4).

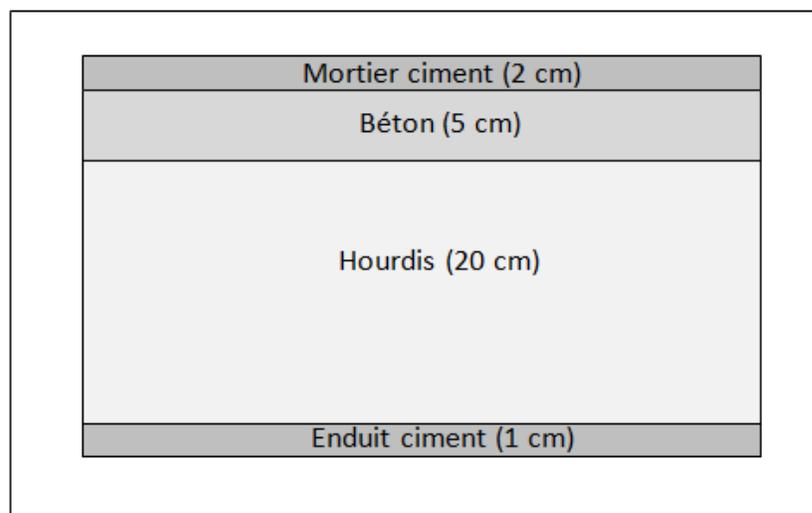


Figure (3.3): Constitution du toit de la cellule

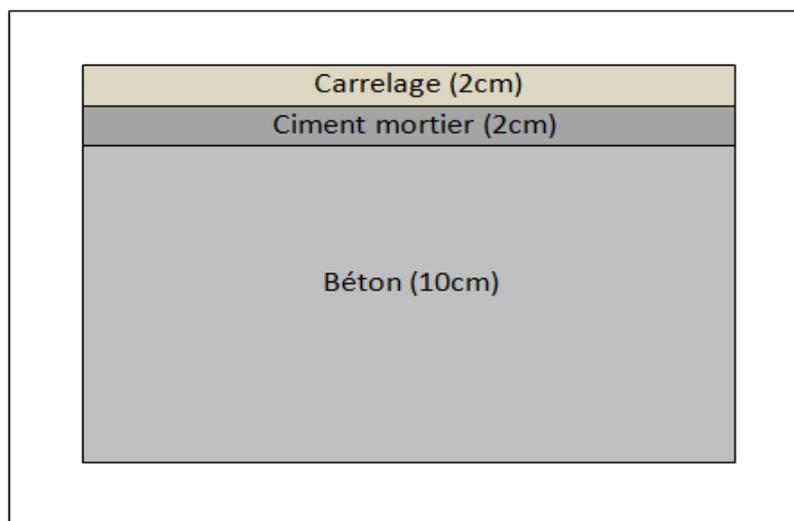


Figure (3.4): Constitution du sol de la cellule

3.2.3 Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction

Le tableau (3.1) donne les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction à adopter dans notre étude. Sachant que les valeurs concernant les propriétés thermo-physiques de la pierre sont approximatives, vu l'absence des données exactes.

Tableau (3.1) : Propriétés thermo physiques de matériaux de construction, d'après DTR, [19] et [24]

Matériau	Masse volumique (kg/m³)	Chaleur spécifique (J/kg.°K)	Conductivité (W/m.°K)
Pierre	2580 ^{DTR}	936 ^{DTR}	2.4 ^{DTR}
Béton	2500 ^[24]	1080 ^[24]	1.75 ^[24]
Ciment mortier	2200 ^{DTR}	1080 ^{DTR}	1.4 ^{DTR}
Carrelage	2400 ^[19]	875 ^[19]	2.4 ^[19]
Hourdis	1300 ^{DTR}	1080 ^{DTR}	1.1 ^{DTR}
Mortier de chaux	1800 ^{DTR}	1080 ^{DTR}	0.87 ^{DTR}

DTR : Document Technique Réglementaire

3.2.4 Hypothèses

Le modèle mathématique que nous adoptons nous permet de mettre en évidence l'évolution de la température à l'intérieure de la cellule et sur les faces internes et externes de l'enveloppe, en tenant compte des échanges thermiques par conduction, convection, et rayonnement. Plusieurs caractéristiques qui rentrent dans l'étude d'énergétique de bâtiment ne sont pas prises en compte, on peut citer par exemple :

- la stratification de l'air d'une zone.
- la diffusion de l'eau dans les parois.
- Les changements d'état.
- Les apports thermiques dus à l'occupant et aux matériels ou appareils électriques.

Afin de simplifier ce système, il est indispensable d'ajouter quelques hypothèses simplificatrices :

- L'écoulement de la chaleur est unidirectionnel à travers les différentes couches des murs.
- L'air est considéré comme un gaz parfaitement transparent.
- On suppose que la distribution de la température d'une paroi située sur chaque surface est uniforme.
- La température de l'air intérieur est uniforme.
- L'éclairement solaire incident sur une face est uniforme.
- Les propriétés thermo physiques des matériaux sont constantes et uniformes.
- Absence des infiltrations de l'air.
- La cellule est totalement fermée, donc pas de renouvellement d'air.

3.3 Bilan énergétique

3.3.1 Les échanges thermiques intérieurs et extérieurs de la cellule

La figure (3.5) représente les différents échanges thermiques d'une paroi avec les milieux extérieure et intérieure.

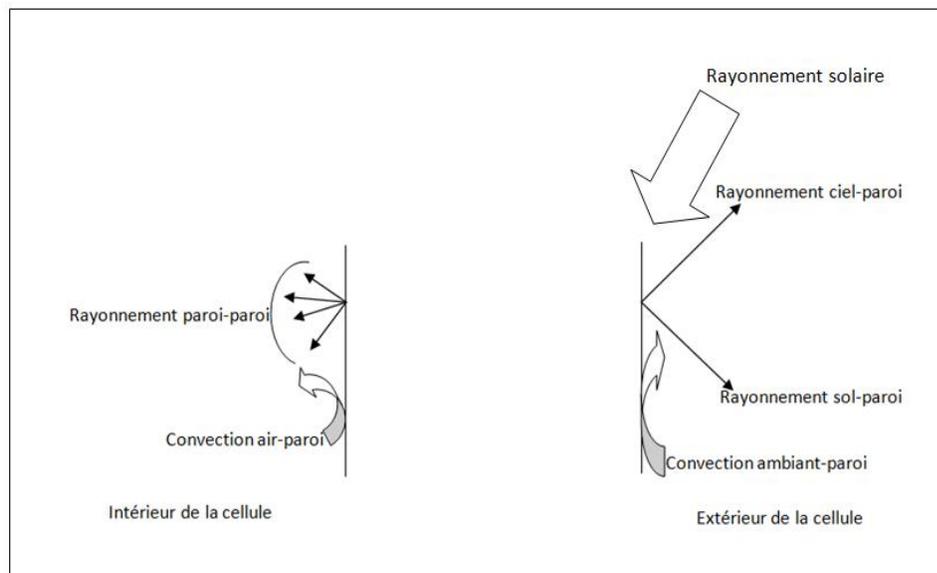


Figure (3.5) : Echanges thermiques sur les faces intérieure et extérieure d'une paroi

3.3.1.1 Rayonnement entre les faces intérieures des parois

Les faces intérieures de l'enveloppe de la cellule échangent entre eux la chaleur par rayonnement. Le flux échangé est exprimé par :

$$\varphi_{ri-j} = S_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \dots \dots \dots (3.1)$$

Avec :

S_i : Surface de la paroi (i).

F_{ij} : Facteur de forme gris (entre corps considérés non noirs), il est en fonction de la géométrie et de l'émissivité des corps.

Il est calculé comme suit :

$$F_{ij} = \left(\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \frac{1}{f_{ij}} + \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \times \frac{S_i}{S_j} \right)^{-1} \dots \dots \dots (3.2)$$

f_{ij} : Facteur de forme. Dans la présente étude, nous déterminons les facteurs de forme par la méthode analytique. Cette méthode est définie comme suit [3]:

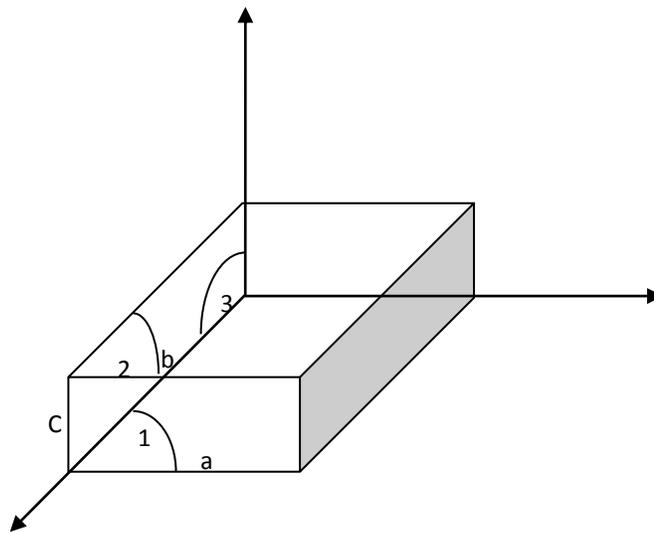


Figure (3.6) : calcul de facteur de forme entre différentes surfaces du parallélépipédique

On pose : $X=a/c$ et $Y=b/c$

a) Echange entre deux surfaces parallèles

Dans ce cas, le facteur de forme est donné par, [3]

$$F_{12} = \frac{1}{\pi XY} (F(X, Y) - F(X, 0) - F(0, Y)) \dots \dots \dots (3.3)$$

Tel que :

$$F(u, v) = 2u\sqrt{1+v^2} \tan^{-1}\left(\frac{u}{\sqrt{1+v^2}}\right) + 2v\sqrt{1+u^2} \tan^{-1}\left(\frac{v}{\sqrt{1+u^2}}\right) - \ln(1+u^2+v^2) \dots \dots \dots (3.4)$$

b) Echange entre deux surfaces perpendiculaires

Le facteur de forme est calculé comme suit, [3] :

$$F_{13} = \frac{1}{4\pi XY} (F(X, Y) - F(X, 0) - F(0, Y)) \dots \dots \dots (3.5)$$

Tel que :

$$F(u, v) = -4v\sqrt{1+u^2} \tan^{-1}\left(\frac{v}{\sqrt{1+u^2}}\right) + 4uv \tan^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) + (u^2 - v^2 + 1)\ln(1+u^2+v^2) - (u^2 - v^2)\ln(u^2+v^2) \dots \dots \dots (3.6)$$

3.3.1.2 Echange convectif entre l'air intérieur et une paroi

Le flux de chaleur échangé entre l'air et les faces intérieures de l'enveloppe de la cellule est calculé comme suit :

$$\varphi_{convection\ air-paroi} = S \cdot h_{conv} (T_{air} - T_{paroi}) \dots \dots \dots (3.7)$$

Avec :

S : Surface de la paroi.

h_{conv} : Coefficient d'échange convectif. Il est calculé comme suit [19] :

$$h_{conv} = C \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^n \dots \dots \dots (3.8)$$

C, et n sont définis dans le tableau (3.2).

Tableau (3.2) : Valeurs de C et n, d’après [19]

Géométrie	Laminaire $10^4 < Gr Pr < 10^9$	Turbulent $Gr Pr > 10^9$
Plaque ou cylindre vertical	C = 1.42, n = 1/4	C = 1.31, n = 1/3
Face supérieure d’une plaque horizontale chaude ou face inférieure d’une plaque froide	C = 1.32, n = 1/4	C = 1.52, n = 1/3
Face inférieure d’une plaque chaude ou face supérieure d’une plaque froide	C = 0.59, n = 1/4	C = 0.59, n = 1/4

3.3.1.3 Echange convectif entre l’ambiance et une paroi

Le flux de chaleur échangé entre l’air ambiant et les faces extérieures de l’enveloppe de la cellule est calculé comme suit :

$$\Phi_{\text{convection ambiant-paroi}} = S \cdot h_{\text{conv ambiant}} (T_{\text{ambiant}} - T_{\text{paroi}}) \dots \dots \dots (3.9)$$

Avec :

$h_{\text{conv ambiant}}$: Coefficient de transfert de chaleur par convection mixte entre une paroi et l’air extérieur.

Plusieurs travaux ont été faits pour déterminer ce coefficient d’échange convectif qui dépend de la vitesse de vent (v) [7].

Mac Adams (1954) : a suggéré que le coefficient d’échange convectif entre une paroi et l’air ambiant est calculé par la relation suivante :

$$h_{\text{conv ambiant}} = 5.7 + 3.8 v \dots \dots \dots (3.10)$$

Watmuff et al. (1977) : a suggéré que les échanges radiatifs avec le ciel et le sol ne sont pas exclus dans la relation de Mac Adams. Il a proposé la corrélation suivante :

$$h_{\text{conv ambiant}} = 2.8 + 3.3 v \dots \dots \dots (3.11)$$

Sparrow et al (1979) : $Nu_w = 0.0158 Re^{0.8} \dots \dots \dots (3.12)$

Lunde (1980) : $h_{\text{conv ambiant}} = 4.5 + 2.9 v \dots \dots \dots (3.13)$

Dans notre étude, nous utilisons la relation de Watmuff et al :

$(h_{\text{conv ambiant}} = 2.8 + 3.3 v) \dots \dots \dots (3.14)$

3.3.1.4 Echange radiatif entre une paroi et le milieu extérieur (ciel + sol)

Les faces extérieures des parois sont soumises à un échange radiatif avec le sol et le ciel. Le flux échangé est exprimé par [39]:

$$\begin{aligned} \varphi_{r \text{ ext-paroi}} = \varepsilon \sigma S. & \left(\frac{(1 - \cos\beta)}{2} (T_{sol}^4 - T_{paroi}^4) \right) \\ & + \varepsilon \sigma S. \left(\frac{(1 + \cos\beta)}{2} (T_{ciel}^4 - T_{paroi}^4) \right) \dots \dots \dots (3.15) \end{aligned}$$

Avec :

$$T_{ciel} = 0.0552(T_{ambiante}^{1,5}) \dots \dots \dots (3.16), [5]$$

3.3.1.5 Eclairage solaire

Considérons que toutes les parois sont éclairées par le soleil (absence de l'ombrage).

L'éclairage solaire absorbé par une paroi est donné par :

$$G_{abs} = \alpha S G \dots \dots \dots (3.17)$$

Avec :

α : Coefficient d'absorption de l'éclairage solaire.

3.3.2 Modèle de transfert par conduction dans les parois

Considérons une paroi de l'enveloppe de la cellule d'épaisseur (e), le bilan d'énergie sur un système d'épaisseur dx de cette paroi (paroi passive, et diffusion monodirectionnelle de la chaleur), est exprimé par l'équation de la chaleur :

$$\varphi_x = \varphi_{x+dx} + \varphi_{st} \dots \dots \dots (3.18)$$

Avec :

$$\varphi_x = - \left(\lambda. S. \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x \dots \dots \dots (3.19)$$

$$\varphi_{x+dx} = - \left(\lambda. S. \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} \dots \dots \dots (3.20)$$

$$\varphi_{st} = \rho \cdot Cp \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots (3.21)$$

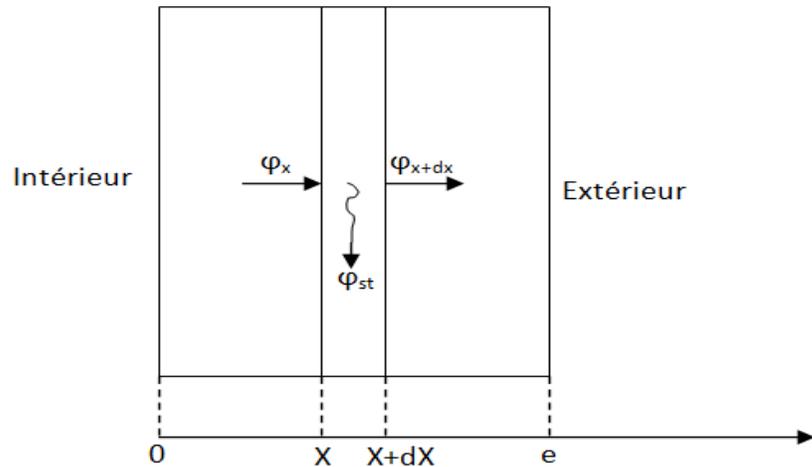


Figure (3.7) : Bilan thermique sur un système d'épaisseur (dx) d'une paroi

Les conditions aux limites sur une paroi :

Sur les extrémités (x=0, et x=e), la paroi subit des échanges thermiques, respectivement, avec le milieu intérieur et extérieur de la cellule.

Les conditions aux limites sont donc :

$$-\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sum_j S F_{paroi-j} \sigma (T_j^4 - T^4) + S h_{conv} (T_{air} - T) \dots \dots \dots (3.22)$$

$$-\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=e} = \varepsilon \cdot S \cdot \left(\frac{(1 - \cos\beta)}{2} (T_{sol}^4 - T^4) \right) + \varepsilon \cdot S \cdot \left(\frac{(1 + \cos\beta)}{2} (T_{ciel}^4 - T^4) \right) + S \cdot h_{conv \text{ ambient}} (T_{ambient} - T) + \alpha S G \dots \dots \dots (3.23)$$

Une autre formulation simplifiée consiste à représenter le système dynamique de la paroi multicouche par un modèle basé sur une analogie électrique. Il se compose de 2 résistances et de 3 capacités (2R-3C). Ce modèle est proposé par Rumianowski et al en (1989), et repris par (Cron, Inard, Belarbi, et L.Mora en 2003). Le schéma de la figure (3.8) représente la décomposition d'une paroi en réseau nodal équivalent.

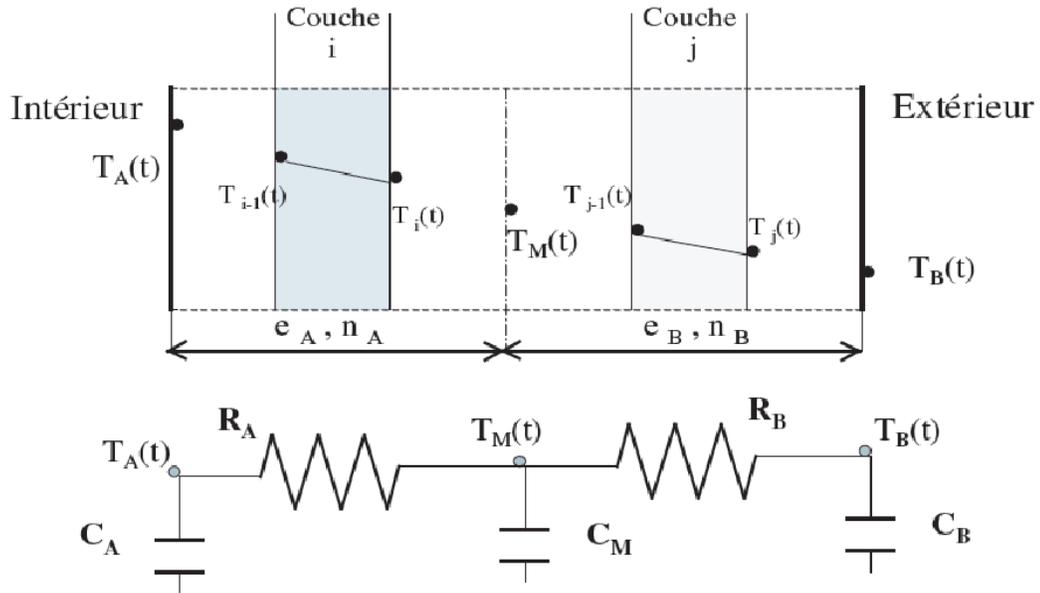


Figure (3.8) Schéma de décomposition d'une paroi en réseau nodal [40]

Les résistances R_A , et R_B sont calculées par les formules suivantes [40]:

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \dots \dots \dots (3.24)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \dots \dots \dots (3.25)$$

Avec : $n_A + n_B = n$

Le calcul des capacités est comme suit :

$$C_A = \sum_{i=1}^{n_A} \rho_i C p_i e_i S_i (1 - \beta_i) \dots \dots \dots (3.26)$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C p_j e_j S_j \delta_j \dots \dots \dots (3.27)$$

$$C_M = \sum_{i=1}^{n_A} \rho_i C p_i e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C p_j e_j S_j (1 - \delta_j) \dots \dots \dots (3.28)$$

Avec :

$$\beta_i = \frac{\frac{e_i}{2S_i\lambda_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \dots \dots \dots (3.29)$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2S_j\lambda_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \dots \dots \dots (3.30)$$

3.3.3 Bilan énergétique sur une paroi

L'application du modèle nodale, défini au dessus, permet d'écrire :

Le bilan thermique sur le nœud (A) :

$$\frac{dT_A}{dt} = \frac{1}{C_A} \left(\sum_j S F_{\text{paroi-j}} \sigma (T_j^4 - T_A^4) + S h_{\text{conv}} (T_{\text{air}} - T_A) + \frac{(T_M - T_A)}{R_A} \right) \dots \dots \dots (3.31)$$

Le bilan thermique sur le nœud (B) :

$$\begin{aligned} \frac{dT_B}{dt} = \frac{1}{C_B} \left(\alpha S G + \varepsilon \cdot S \cdot \left(\frac{(1 - \cos\beta)}{2} (T_{\text{sol}}^4 - T_B^4) \right) + \varepsilon \cdot S \cdot \left(\frac{(1 + \cos\beta)}{2} (T_{\text{ciel}}^4 - T_B^4) \right) \right. \\ \left. + S \cdot h_{\text{conv ambient}} (T_{\text{ambient}} - T_B) + \frac{(T_M - T_B)}{R_B} \right) \dots \dots \dots (3.32) \end{aligned}$$

Le bilan thermique sur le nœud (M) :

$$\frac{dT_M}{dt} = \frac{1}{C_M} \left(\frac{(T_A - T_M)}{R_A} + \frac{(T_B - T_M)}{R_B} \right) \dots \dots \dots (3.33)$$

3.3.4 Bilan énergétique sur le volume interne

Comme déjà énoncé, la température de l'air intérieur est considérée comme uniforme, donc on peut représenter tout le volume interne par un seul nœud. Le bilan thermique sur ce nœud est exprimé par :

$$\frac{dT_{\text{air}}}{dt} = \frac{1}{\rho_{\text{air}} C_{p_{\text{air}}} V_{\text{volume}}} \sum_j S h_{\text{conv}} (T_A - T_{\text{air}}) \dots \dots \dots (3.34)$$

3.3.5 Système d'équations à résoudre

Pour les parois nord, sud, est, ouest, et toit, nous calculons la température des trois (03) nœuds (A, B et M). Posant (i) l'indice caractérisant une paroi de la cellule, le système d'équations différentielles décrivant le système thermique de ces parois est donc :

$$\frac{dT_{Ai}}{dt} = \frac{1}{C_{Ai}} \left(\sum_j S_i F_{i-j} \sigma (T_j^4 - T_{Ai}^4) + S_i h_{conv i} (T_{air} - T_{Ai}) + \frac{(T_{Mi} - T_{Ai})}{R_{Ai}} \right) \dots \dots \dots (3.35)$$

$$\frac{dT_{Bi}}{dt} = \frac{1}{C_{Bi}} \left(\alpha_i S_i G_i + \varepsilon_i \cdot S_i \cdot \left(\frac{(1 - \cos \beta_i)}{2} (T_{sol}^4 - T_{Bi}^4) \right) + \varepsilon_i \cdot S_i \cdot \left(\frac{(1 + \cos \beta_i)}{2} (T_{ciel}^4 - T_{Bi}^4) \right) + S_i \cdot h_{conv ambient} (T_{ambient} - T_{Bi}) + \frac{(T_{Mi} - T_{Bi})}{R_{Bi}} \right) \dots \dots \dots (3.36)$$

$$\frac{dT_{Mi}}{dt} = \frac{1}{C_{Mi}} \left(\frac{(T_{Ai} - T_{Mi})}{R_{Ai}} + \frac{(T_{Bi} - T_{Mi})}{R_{Bi}} \right) \dots \dots \dots (3.37)$$

Pour le sol, nous calculons seulement la température des nœuds (A et M). La température du nœud (B) est considérée comme condition à la limite, elle est supposée égale à 20°C.

Le système d'équations différentielles décrivant le système thermique du sol est donc :

$$\frac{dT_{Asol}}{dt} = \frac{1}{C_{Asol}} \left(\sum_j S_{sol} F_{sol-j} \sigma (T_j^4 - T_{Asol}^4) + S_{sol} h_{conv sol} (T_{air} - T_{Asol}) + \frac{(T_{Msol} - T_{Asol})}{R_{Asol}} \right) \dots \dots \dots (3.38)$$

$$\frac{dT_{Msol}}{dt} = \frac{1}{C_{Msol}} \left(\frac{(T_{Asol} - T_{Msol})}{R_{Asol}} + \frac{(293.15 - T_{Msol})}{R_{Bsol}} \right) \dots \dots \dots (3.39)$$

La température de l'air à l'intérieur de la cellule est calculée par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dT_{air}}{dt} = \frac{1}{\rho_{air} C p_{air} V_{volume}} \sum_i S_i h_{conv i} (T_{Ai} - T_{air}) \dots \dots \dots (3.40)$$

Le système thermique général à résoudre comprend donc dix-huit (18) équations différentielles.

3.4 Simulation du comportement thermique de la cellule et validation

3.4.1 Déroulement de la simulation

Dans ce qui suit, nous procédons à la simulation de comportement thermique de la cellule en résolvant le système des équations de l'énergie décrites précédemment. Pour ce faire, nous avons jugé utile l'utilisation de l'environnement MATLAB afin de profiter des fonctions prédéfinies, fournies par ce dernier, permettant la résolution des systèmes des équations différentielles ordinaires par la méthode de Runge-Kutta.

En parallèle à la résolution de notre modèle, nous simulons dans le logiciel de simulation thermique dynamique, TRNSYS, le même système thermique. Ceci dans le but de valider notre modèle tout en confrontant les résultats ressortis avec ceux obtenus par TRNSYS.

Afin de garantir que le système thermique introduit dans TRNSYS représente mieux celui qui est supposé, nous avons utilisé les mêmes géométries, les mêmes orientations, la même constitution de l'enveloppe de la cellule, et les mêmes caractéristiques des matériaux de construction. Ainsi, nous avons annulé les infiltrations d'air, le renouvellement d'air par ventilation, les différents gains dû aux occupants, appareils électriques, etc.

Quant aux paramètres du climat, nous avons utilisé pour la simulation, par notre modèle et par TRNSYS, les conditions météorologiques de Béchar appartenant au fichier METEONORM (base de données météorologiques, utilisée par TRNSYS).

La simulation est effectuée dans deux journées différentes de l'année, le 15 février, et le 08 juillet.

3.4.2 Résultats et discussion

Afin de pouvoir confronter les résultats obtenus avec ceux de TRNSYS, nous avons introduit les mêmes conditions initiales de température. Nous avons supposé pour les conditions initiales que tous les nœuds sont à une température initiale de 17 °C le 15 Février, et 34°C le 08 Juillet.

Les figures de (3.9), (3.10) représentent la variation de la température de l'air respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

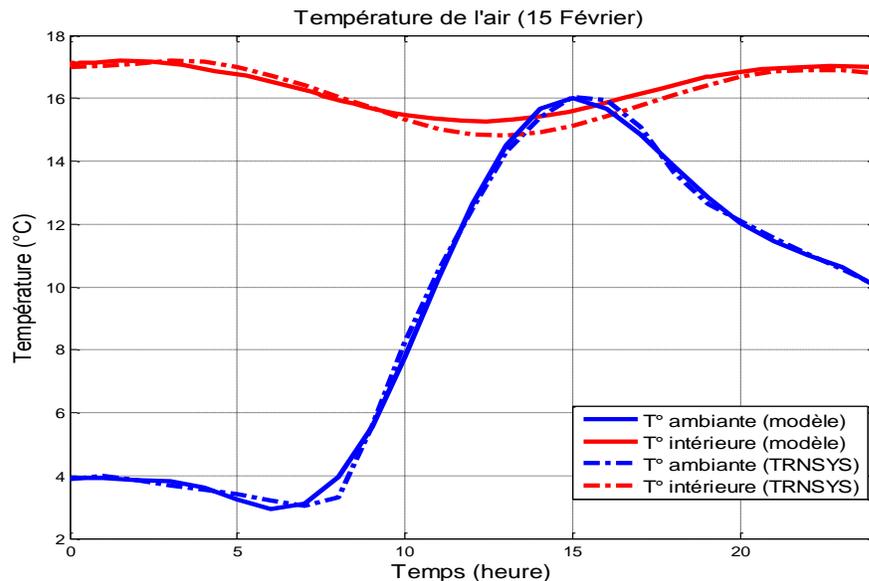


Figure (3.9): Variation de la température interne et externe de l'air, le 15 Février. Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle et par TRNSYS.

D'après les résultats représentés dans la figure (3.9), nous constatons que l'évolution de la température interne de la cellule obtenue par le modèle adopté est presque similaire à celle obtenue par TRNSYS avec un écart qui ne dépasse pas 0.5°C enregistré à 13^h:00. Ce qui représente une erreur relative de 3.4%.

Dans la période estivale, figure (3.10), la comparaison entre les résultats montre que les courbes se différencient avec un écart maximum de 1°C enregistré dans les premiers temps du calcul (2^h:00), soit une erreur relative de 3%.

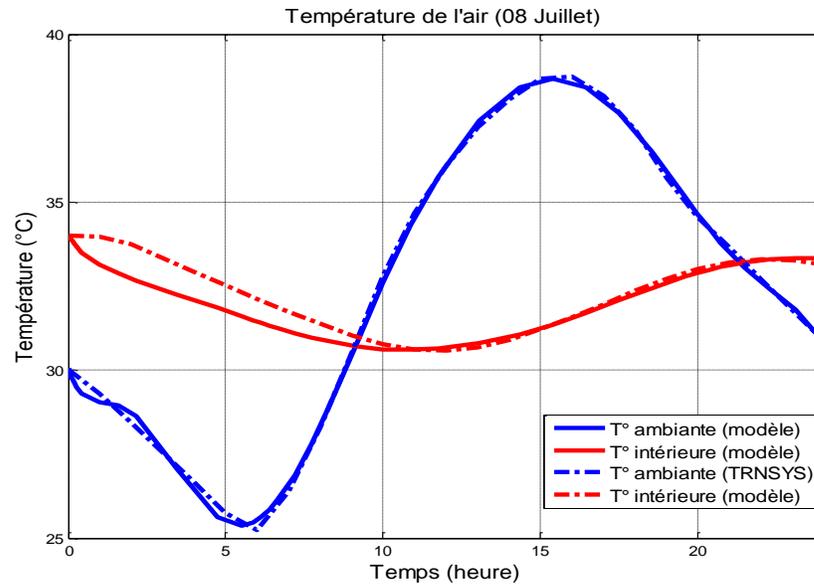


Figure (3.10):Variation de la température interne et externe de l'air, le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle et par TRNSYS.

Les figures (3.11), (3.12) représentent respectivement la variation de la température interne et externe du mur Est le 15 février et le 08 juillet.

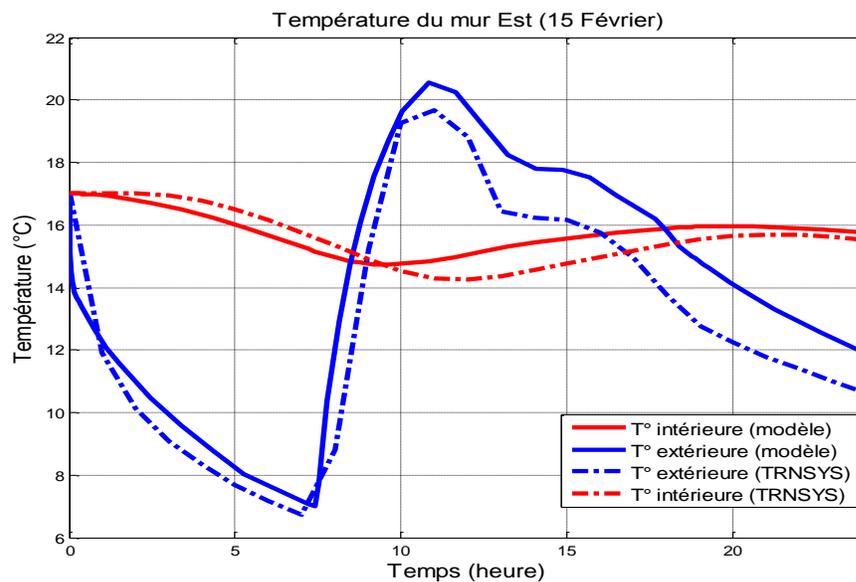


Figure (3.11):Variation de la température interne et externe du mur Est, le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

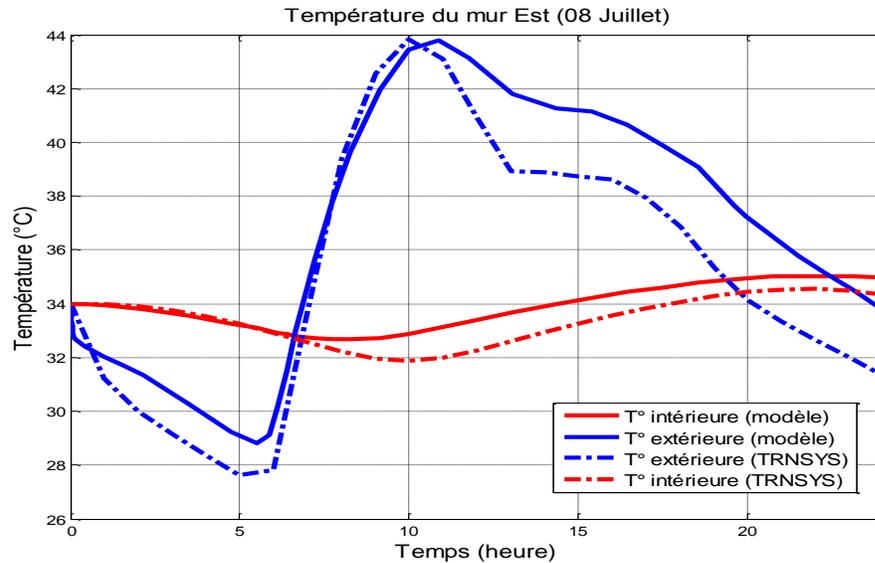


Figure (3.12): Variation de la température interne et externe du mur Est, le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

La comparaison entre les résultats du modèle avec ceux de TRNSYS, nous permet de calculer les écarts maximums suivants.

Pour la température interne du mur Est, l'écart atteint 0.9°C , et 1.2°C respectivement le 15 février et le 08 juillet.

Pour la température externe du mur Est, l'écart atteint 2°C , et 3°C respectivement le 15 février et le 08 juillet.

Les figures (3.13), (3.14) représentent la variation de la température interne et externe du mur Ouest, le 15 février et le 08 juillet.

Dans le cas du mur Ouest, les résultats obtenus présentent les écarts dont les maximums sont à l'ordre de:

- * 0.5°C , et 1.1°C enregistrés dans la température interne, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

- * 3.1°C , et 8.6°C enregistrés dans la température externe, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

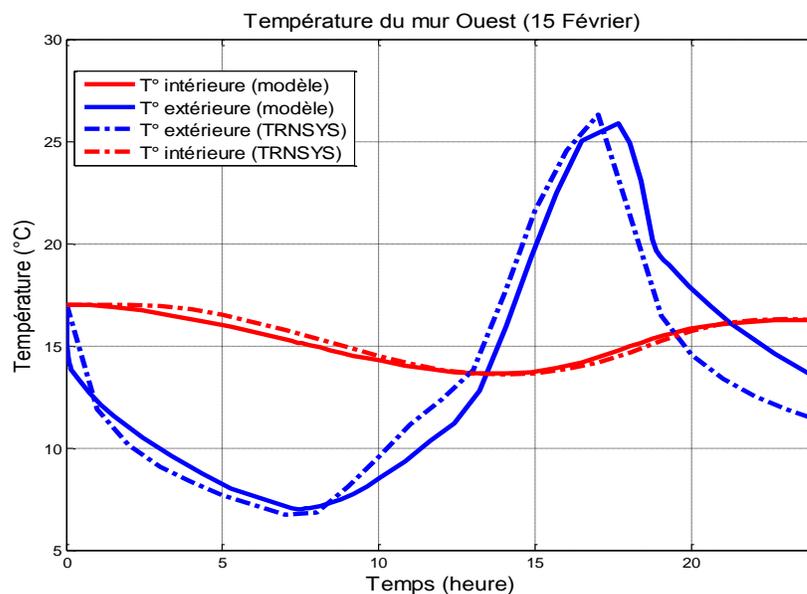


Figure (3.13): Variation de la température interne et externe du mur Ouest, le 15 Février, comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

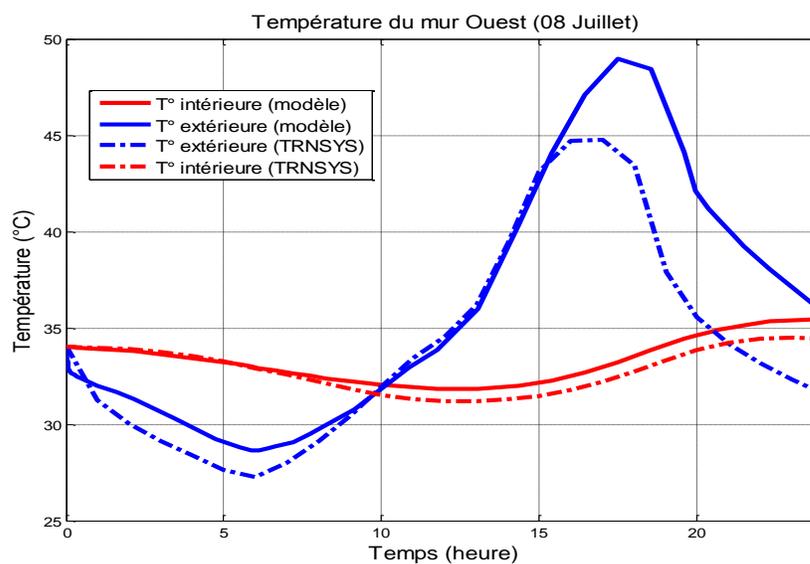


Figure (3.14): Variation de la température interne et externe du mur Ouest, le 08 Juillet, comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

Les figures (3.15), (3.16) représentent la variation de la température interne et externe du mur Sud, le 15 février et le 08 juillet.

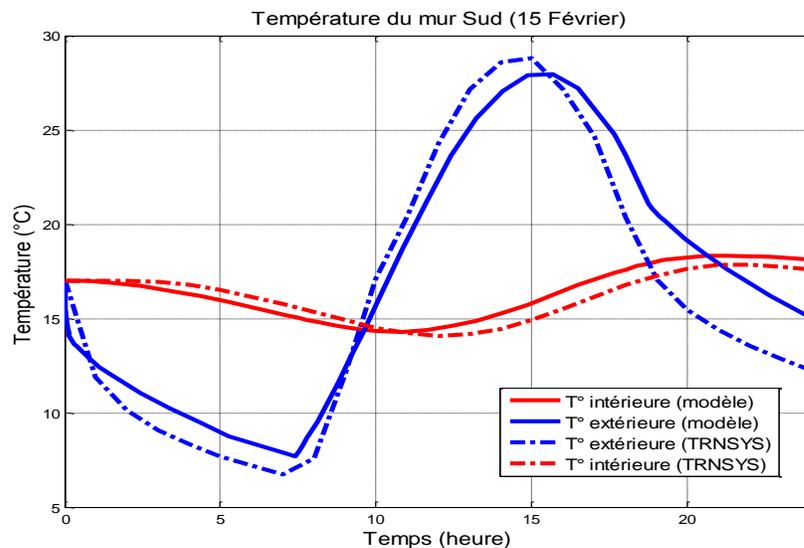


Figure (3.15):Variation de la température interne et externe du mur Sud, le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

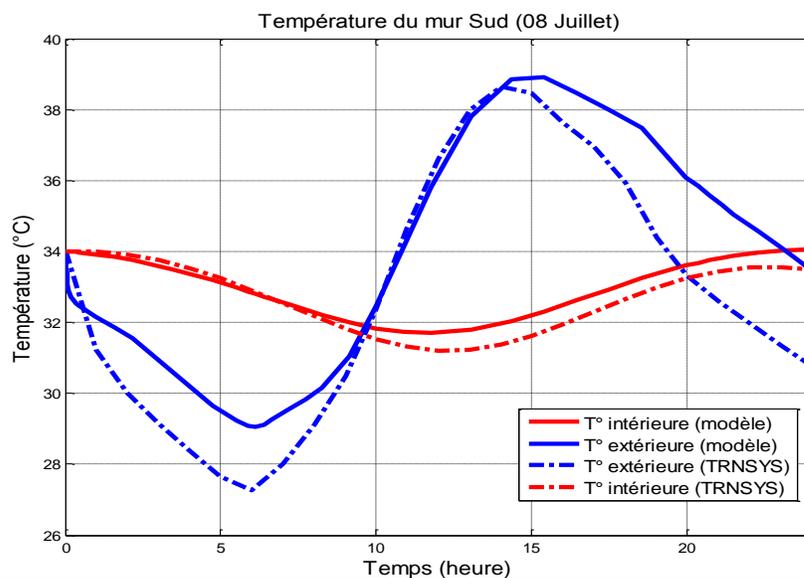


Figure (3.16):Variation de la température interne et externe du mur Sud, le 08 Juillet, Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

Les écarts maximums entre les résultats du modèle et ceux de TRNSYS concernant les températures interne et externe du mur Sud sont à l'ordre de :

* 0.9°C, et 0.6°C enregistrés dans la température interne du mur Sud, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

* 3.6°C, et 2.7°C enregistrés dans la température externe du mur Sud, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

Les figures (3.17), (3.18) représentent la variation de la température interne et externe du mur Nord, le 15 février et le 08 juillet.

Les écarts enregistrés atteignent :

* 0.6°C, 0.4°C enregistrés dans la température interne du mur Nord, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

* 1.6°C, 2.8°C enregistrés dans la température externe du mur Nord, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

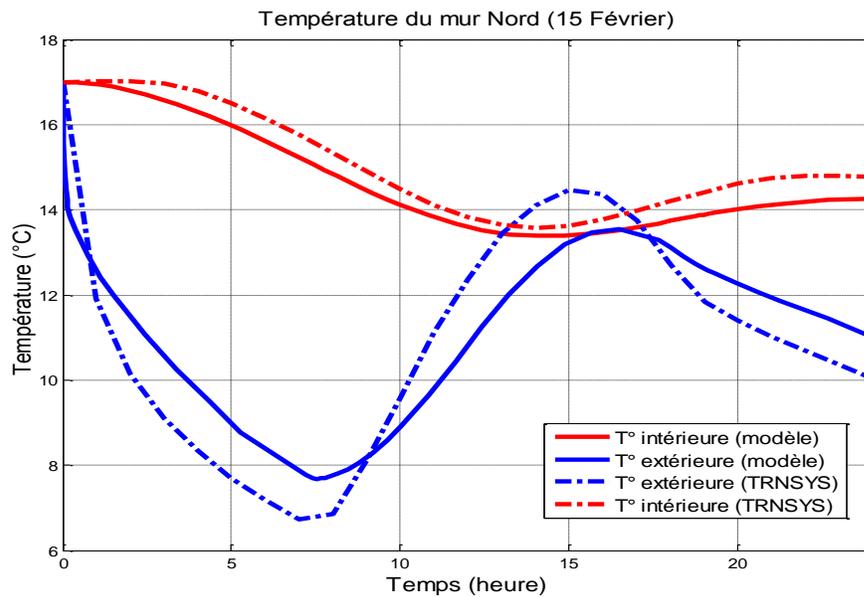


Figure (3.17): Variation de la température interne et externe du mur Nord, le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

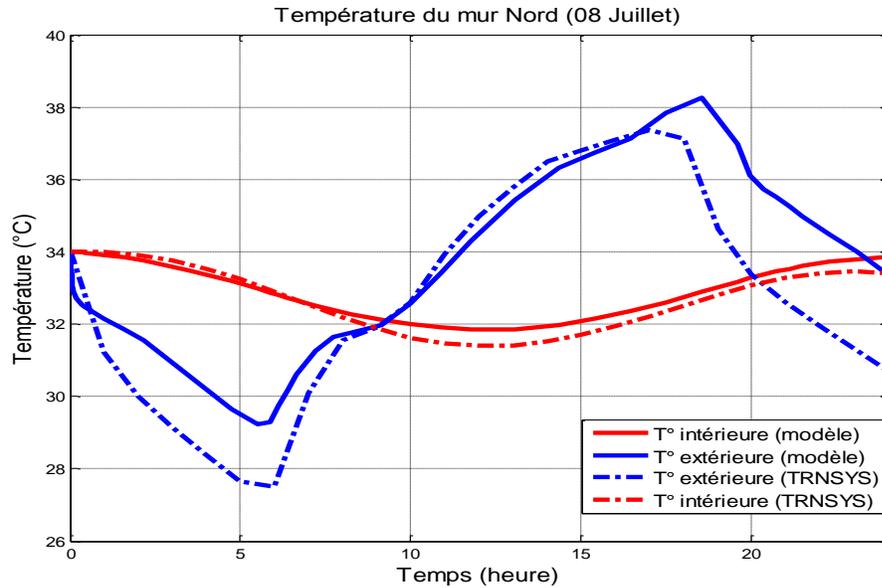


Figure (3.18): Variation de la température interne et externe du mur Nord, le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

Les figures (3.19), (3.20) représentent la variation de la température interne et externe du toit.

Les écarts enregistrés atteignent :

* 0.9°C, 2.4°C enregistrés dans la température interne du toit, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

* 3.2°C, 5.7°C enregistrés dans la température externe du toit, respectivement, le 15 février et le 08 juillet.

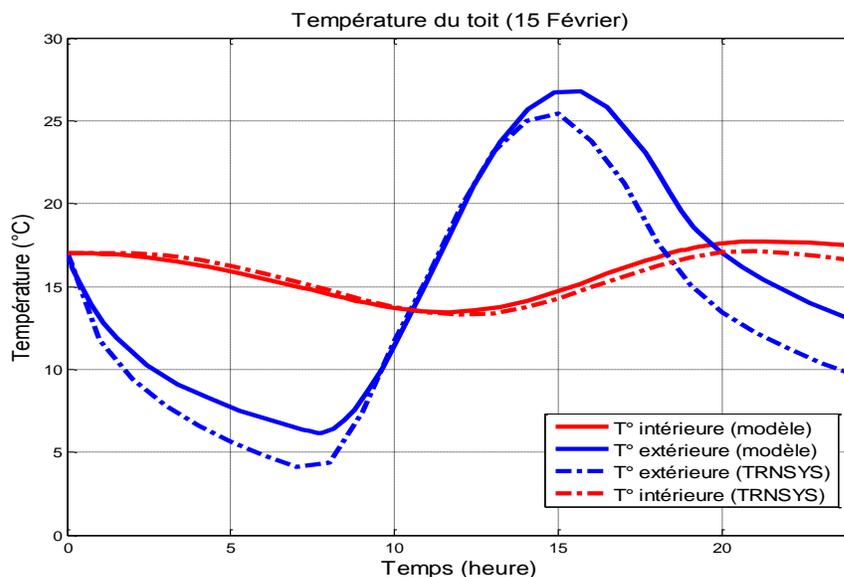


Figure (3.19): Variation de la température interne et externe du toit, le 15 Février. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

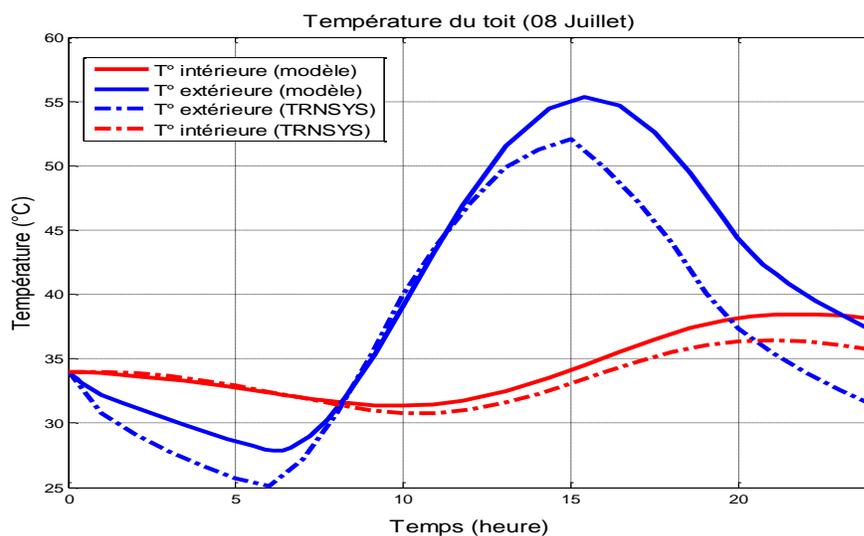


Figure (3.20): Variation de la température interne et externe du toit, le 08 Juillet. Comparaison entre les résultats du modèle et de TRNSYS.

La confrontation des résultats obtenus par les deux méthodes, permet de constater que dans le cas des températures internes des parois ainsi que de l'air intérieur les résultats sont plus proches et représentent donc, moins d'écart. En effet,

il ne dépasse pas 1.1°C , sauf dans le cas de la température interne du toit, où l'écart maximum enregistré le 08 juillet est de 2.4°C .

Or les résultats concernant les températures des faces externes de différentes parois présentent des écarts plus grands. Il atteint au pire des cas, 8.6°C enregistré, le 08 juillet, pour la température externe du mur ouest.

Certains facteurs peuvent être à l'origine de ces écarts enregistrés entre les résultats obtenus par notre modèle et ceux obtenus par TRNSYS. Par exemple :

- La méthode nodale appliquée pour modéliser le stockage et le transfert de chaleur par conduction est différente de celle optée par TRNSYS.
- La modélisation du transfert de chaleur par rayonnement entre les faces extérieures des parois et le milieu environnant peut être différente de celle de TRNSYS.
- La méthode appliquée pour déterminer la température du sol à l'intérieur de la cellule. Dans notre modèle nous avons calculé la température du sol par la méthode nodale. Or, dans TRNSYS, on a considéré une température constante à la surface du sol (condition à la limite).

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré un modèle mathématique décrivant le système thermique d'une cellule parallélépipédique totalement fermée. Ensuite, nous avons utilisé, pour la résolution, l'environnement MATLAB. Ainsi, nous avons simulé dans le logiciel TRNSYS le même système thermique. Les résultats obtenus nous ont permis de connaître la distribution de la température. Après la comparaison des résultats obtenus par notre modèle et par TRNSYS, nous avons constaté des écarts plus importants dans le cas des températures externes que dans le cas des températures internes.

Nous pouvons juger, en conséquence, que le modèle adopté peut donner des résultats satisfaisants surtout pour les températures internes de l'enveloppe de la cellule, ainsi que de l'air intérieur.

CHAPITRE 4 : SIMULATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE LA CELLULE A GHARDAIA

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons effectuer une étude, par simulation, sur le comportement thermique d'une cellule à Ghardaïa en utilisant le modèle élaboré, défini dans le chapitre précédent. Ensuite, nous allons étudier l'influence de quelques matériaux de construction sur la distribution de la température dans la cellule. Pour ce faire nous proposons quelques méthodes de construction utilisant des matériaux différents, ce qui nous permet de comparer entre eux et de les évaluer du point de vue thermique. Ainsi, les effets de quelques autres paramètres sont étudiés, à savoir l'introduction des isolants dans les parois, l'orientation de la cellule, ainsi que la couleur extérieure de son enveloppe.

Ceci après l'étude des conditions météorologiques prises en compte dans la simulation. Elles concernent la température ambiante et l'éclairement solaire sur toutes les directions dans la région de Ghardaïa.

4.2 Température ambiante et estimation de l'éclairement solaire à Ghardaïa

4.2.1 Température ambiante

Les mesures effectuées le 15 février et le 08 juillet/2011, par K. CHRIAR (Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables. URAER. Ghardaïa) ont permis d'établir des relevés de températures avec un pas de temps de 5 minutes.

Ces données sont représentées dans les figures (4.1), (4.2).

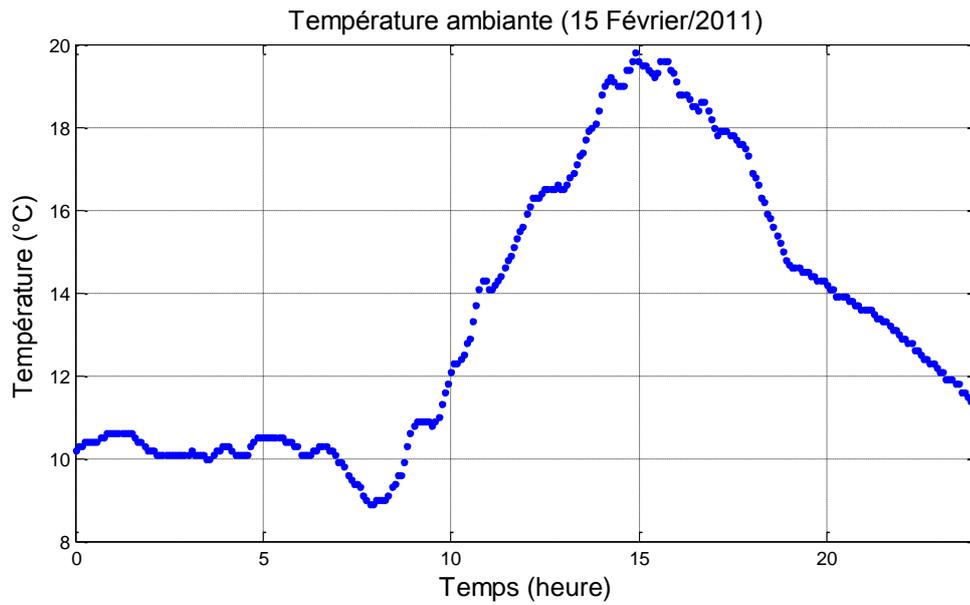


Figure (4.1): Variation de la température ambiante (journée du 15 Février/2011)

Température maximale mesurée : 19.8°C à 14h:55

Température minimale mesurée : 8.9 °C à 07h:50

Ecart diurne : 10.9 °C.

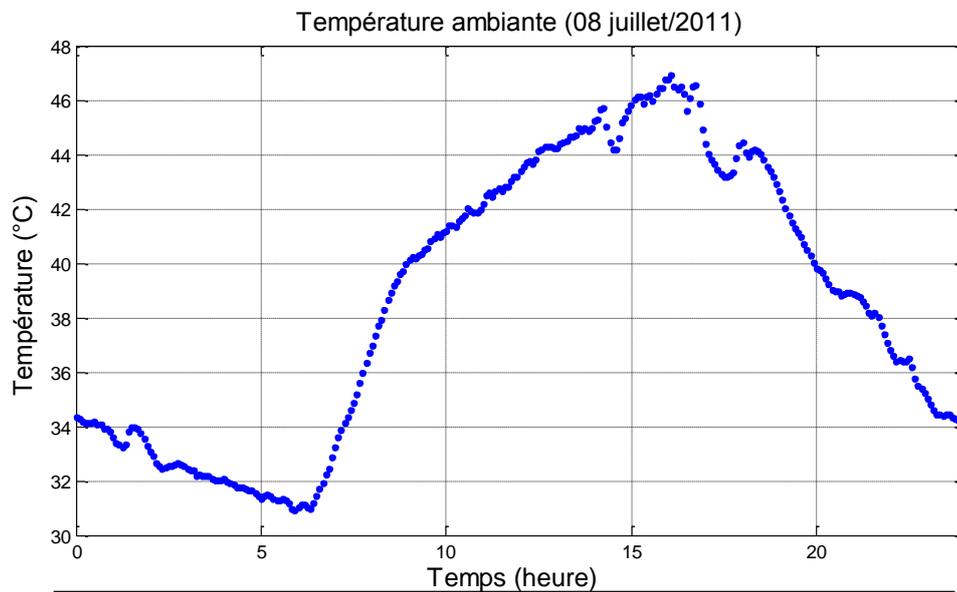


Figure (4.2): Variation de la température ambiante (journée du 8 Juillet/2011)

Température maximale mesurée : 46.7 °C à 15h:55

Température minimale mesurée : 30.9 °C à 05h:55

Ecart diurne : 15.8 °C

4.2.2 Estimation de l'éclairement solaire

Pour estimer l'éclairement solaire à Ghardaïa, sur les différentes orientations, nous utilisons le modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie de Capderou, défini dans le premier chapitre.

Les variations de l'éclairement solaire global à Ghardaïa selon les différentes orientations d'un plan, pour les journées de 15 février, et 08 juillet, sont représentées dans les figures (4.3), (4.4).

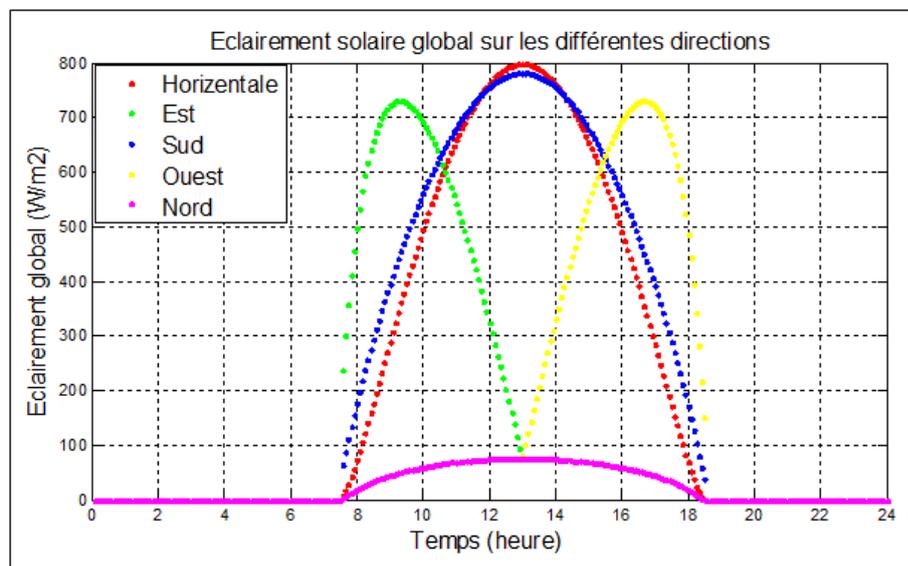


Figure (4.3) : Variation de l'éclairement solaire par ciel clair selon les différentes orientations d'un plan incliné (Journée 15 Février)

D'après la figure (4.3), on constate que :

- Le plan qui reçoit plus de l'éclairement solaire est le plan horizontal. Il atteint à 12^h:55 son maximum avec 796,57 W/m².
- L'éclairement solaire sur la paroi sud est très important. Il atteint à 12^h:55 un maximum de 779,93 W/m².

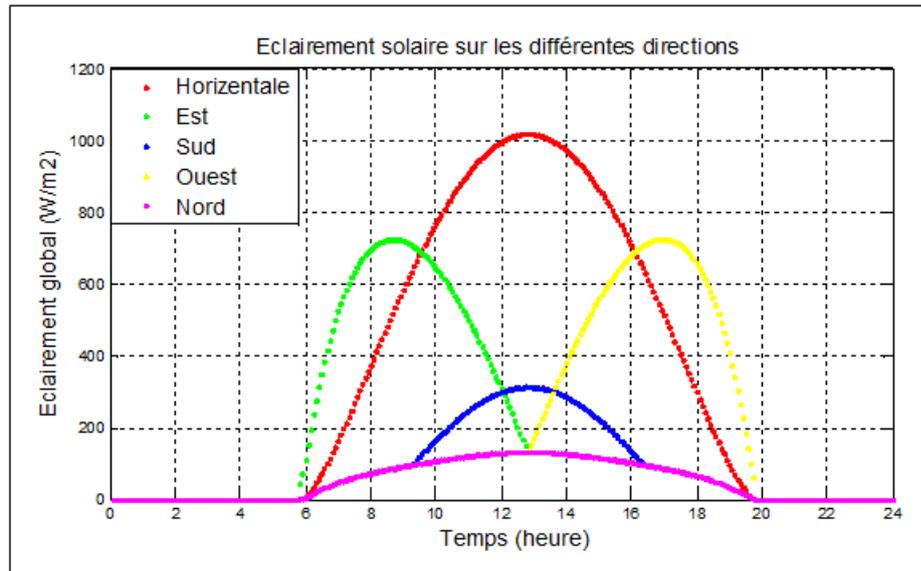


Figure (4.4) : Variation de l'éclairement solaire par ciel clair selon les différentes orientations d'un plan incliné (Journée 08 juillet)

Les courbes de la figure (4.4) permettent de constater que :

- L'éclairement solaire sur le plan horizontal est toujours plus important. Il atteint à 12^h:45 un maximum de 1018,75 W/m².
- Une diminution de l'éclairement solaire sur la paroi Sud (par rapport à la journée de 15 Février). Il ne dépasse pas 312.69 W/m² atteint à 12^h:45.
- Les parois Est et Ouest sont fortement éclairées respectivement le matin et durant l'après-midi. Le maximum atteint est de 726,05 W/m² sur la direction Est, et 725,98 W/m² sur la direction Ouest.

4.3 Simulation du comportement thermique de la cellule à Ghardaïa

4.3.1 Résultats et discussion

4.3.1.1 Température de l'air

La figure (4.5) représente la variation de la température interne et externe de l'air, pour les journées de 15 Février, et de 08 juillet.

D'après la figure (4.5), nous tirons les constations suivantes :

Durant la période hivernale, la température interne de l'air oscille entre 16.3 °C (à 10^h:00) et 18.5°C (à 20^h:18) soit un écart de 2.2°C. Tandis que, la température externe de l'air a atteint un minimum de 9.2°C (à 08^h:00) et un maximum de 19.4°C (à 15^h:20) soit un écart de 10.2°C. Nous Remarquons, d'après ces résultats, un déphasage de presque de 05 heures de temps entre les maximums de température interne et externe.

Cela, est peut être dû à l'inertie thermique importante de l'enveloppe de la cellule considérée. Donc, ces résultats nous permettent de comprendre le rôle qui joue la masse thermique de la cellule dans leur comportement thermique, elle minimise d'une part la fluctuation de la température interne, et elle ralentit, de l'autre part le flux de chaleur échangé avec l'extérieur.

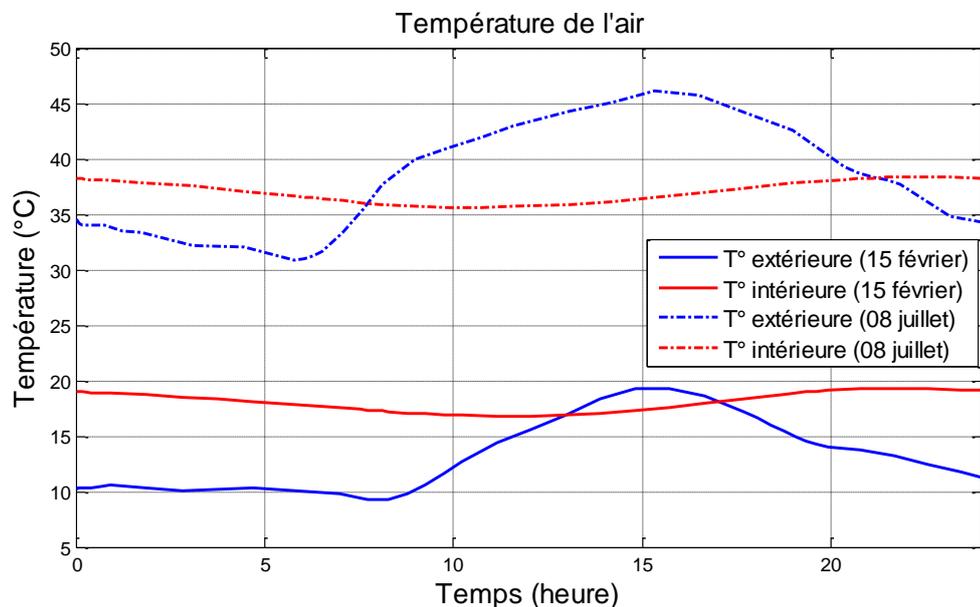


Figure (4.5) : Variation de la température de l'air intérieur et extérieur, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet

Quant à la période estivale, le minimum de la température de l'air intérieure est de 32.6°C à 10^h:20, son maximum est de 35.7°C (à 21^h:10), soit un écart de 3.1°C). Alors que, l'écart diurne de la température externe est de 15.3°C) entre un maximum de 46.2°C (à 15^h:40) et un minimum de 30.9°C (à 5^h:50). Le déphasage de temps entre le maximum de la température interne et celui de la température externe est de (05 h et 30 min).

Le déphasage de temps est plus grand que celui enregistré durant la période hivernale.

4.3.1.2 Température des parois

4.3.1.2.a Température des murs Est et Ouest

Les résultats du calcul de la température des murs Est et Ouest sont représentés par les courbes des figures (4.6) et (4.7).

La lecture de ces courbes nous permet d'enregistrer que le mur Ouest commence à s'échauffer plus tard que le mur Est. Par exemple, le 08 Juillet, la température externe du mur Est commence à s'élever à (05^h:40) et continue jusqu'à midi, alors que la température externe du mur Ouest ne commence à s'élever qu'à partir de (07^h:00), et continue jusqu'à 19^h:00.

Ce retard est certainement expliqué au fait que les murs Est et Ouest ne sont pas éclairés simultanément.

En outre, ces courbes nous montrent que la température du mur Ouest augmente plus que celle du mur Est, que ce soit en été ou en hiver.

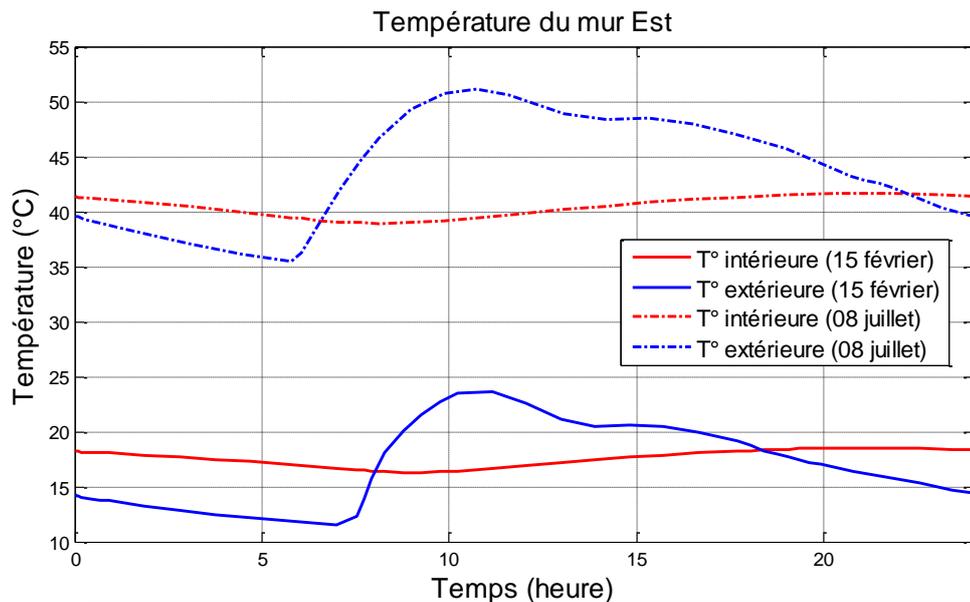


Figure (4.6) : Variation de la température interne et externe du mur Est, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet

Quant à la température interne des murs Est et Ouest, elle connaît une fluctuation beaucoup moins importante. Dans ce qui suit, on montre les valeurs extrêmes de la température interne des murs Est et Ouest.

Le 15 Février :

Mur Est : Minimum 14.5°C (à 08^h:30), maximum 17.7°C (à 20^h:00), soit un écart de 3.2°C.

Mur Ouest : Minimum 14.2°C (à 12^h:00), maximum 19.1°C (à 21^h:20) soit un écart de 4.9°C.

Le 08 Juillet :

Mur Est : Minimum 37.4°C (à 08^h:00), maximum 41.9°C (à 20^h:35) soit un écart de 4.5°C

Mur Ouest : Minimum 36.9.8°C (à 10^h:05), maximum 43.5°C (à 22^h:05) soit un écart de 6.6°C.

D'après ces résultats, nous constatons toujours que le mur Ouest commence à s'échauffer plus tard que le mur Est et atteint en fin de journée une température plus grande que celle atteint par le mur Est.

Nous pouvons constater ainsi que les températures internes sont plus fluctuantes en été qu'en hiver. Cela est peut être dû à l'insolation intense connue en période estivale.

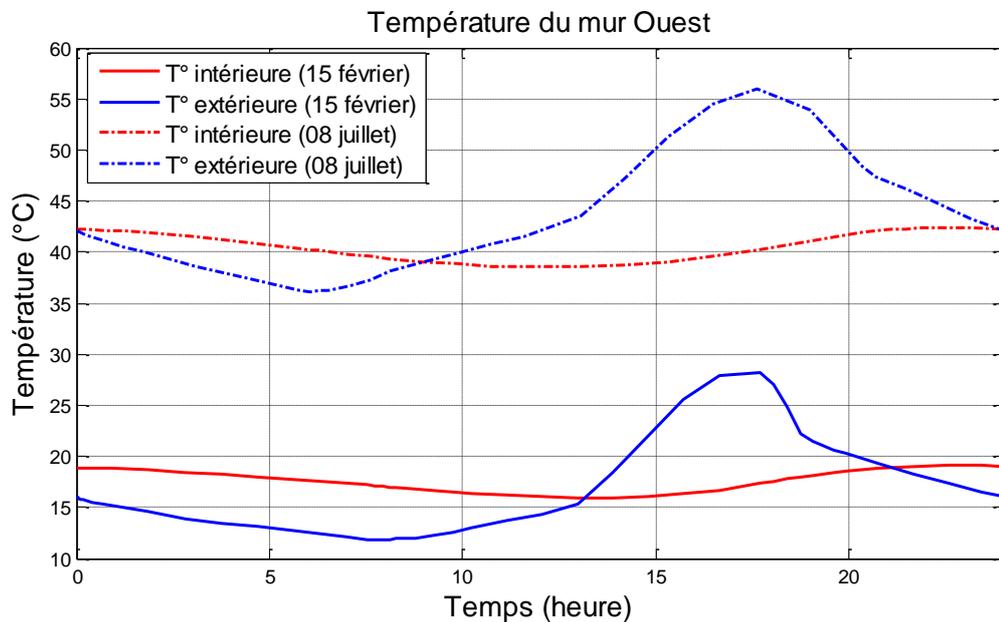


Figure (4.7) : Variation de la température interne et externe du mur Ouest, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet

Cependant, dans tous les cas la variation de la température aux faces intérieures est beaucoup amortie par rapport aux faces extérieures. Par exemple

l'écart maximum de la température du mur Ouest enregistré en été est de 6.6°C à l'intérieur et 16.1°C à l'extérieur. En plus, le déphasage de temps entre les maximums atteints par les températures internes et externes des murs est bien constaté, surtout dans la paroi Est. Nous pouvons expliquer cet effet d'amortisseur et retardataire par deux raisons :

Par l'inertie thermique des murs Est et Ouest. Donc, ces résultats rejoignent ceux de beaucoup de travaux qui ont été effectués pour déterminer le rôle de l'inertie thermique (Etude réalisée par CSTB (France), Etude réalisée au Cameroun, Etude réalisée à Guelma,...).

1. Les faces intérieures de la cellule subissent un échange thermique radiatif entre elles et convectif avec de l'air intérieur, cela conduit à retarder l'échauffement de la paroi Est et son refroidissement au début et à la fin de la journée, donc équilibrer relativement les températures internes.

4.3.1.2.b Température des murs Sud et Nord

D'après la figure (4.8), la température externe du mur sud en hiver connaît une grande fluctuation; de fait, l'écart entre son minimum 12.2°C (à $7^{\text{h}}:25$) et son maximum 27.8°C (à $16^{\text{h}}:05$) est de 15.6°C . En été, le minimum et le maximum enregistrés respectivement sont 34.5°C (à $06^{\text{h}}:55$), et 44.8°C (à $16^{\text{h}}:13$) soit un écart de 10.3°C .

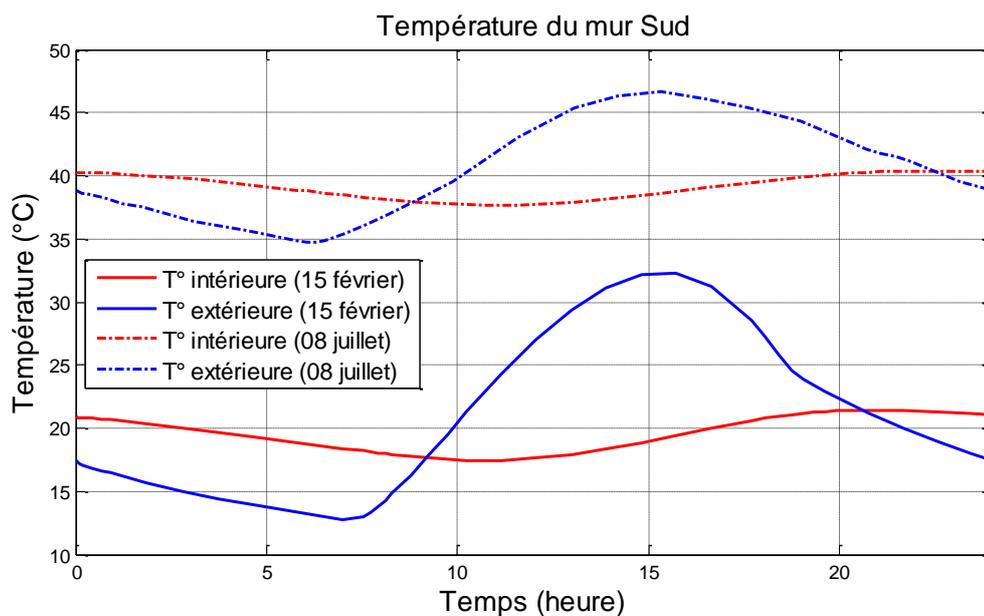


Figure (4.8) : Variation de la température interne et externe du mur Sud, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet

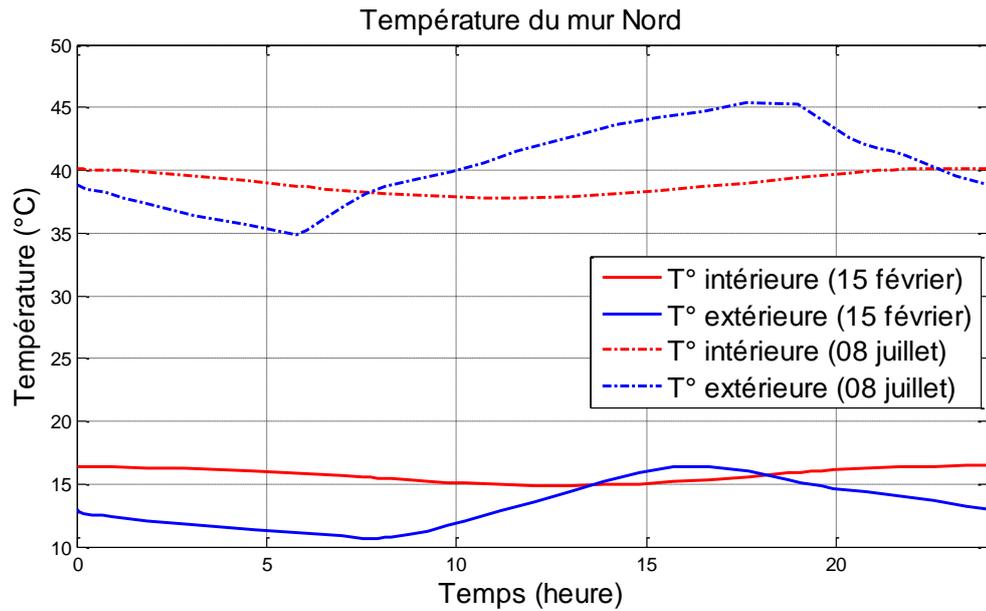


Figure (4.9) : Variation de la température interne et externe du mur Nord, pour les journées du 15 Février, et 08 juillet

D'après ces résultats, nous constatons qu'en hiver, la paroi Sud s'échauffe plus que les parois Est et Ouest. Alors qu'en été, c'est le contraire. Cela est dû au fait qu'en hiver, la paroi sud subit un éclairage solaire direct pendant toute la journée. Or, en été, cette même paroi est moins éclairée. L'explication de cela est comme suit : la trajectoire que fait le soleil est variable. En été, le soleil passe plus haut dans le ciel qu'en hiver, figure (4.10). En conséquence, la direction sud se trouve moins éclairée.

Quant à la température interne du mur Sud, elle varie le 08 juillet entre le minimum 36.5°C (à 10^h:05) et le maximum 41.3°C (à 20^h:35), soit un écart de 4.8°C. Le 15 février, elle varie d'un écart plus grand 5.8°C entre le minimum 15°C à (09^h:10) et le maximum 20.8°C (à 19^h:07).

Contrairement au mur Sud, le mur Nord, figure (4.9), représente un écart maximum de température, plus grand en été que celui en hiver (écart maximum le 15 février est de 2.8°C, et 4.4 °C le 08 juillet) Cela est toujours expliqué par la variation de la trajectoire du soleil. En effet, la direction nord est totalement privée du rayonnement direct en hiver. Alors qu'en été, cette même direction est éclairée directement par le soleil.

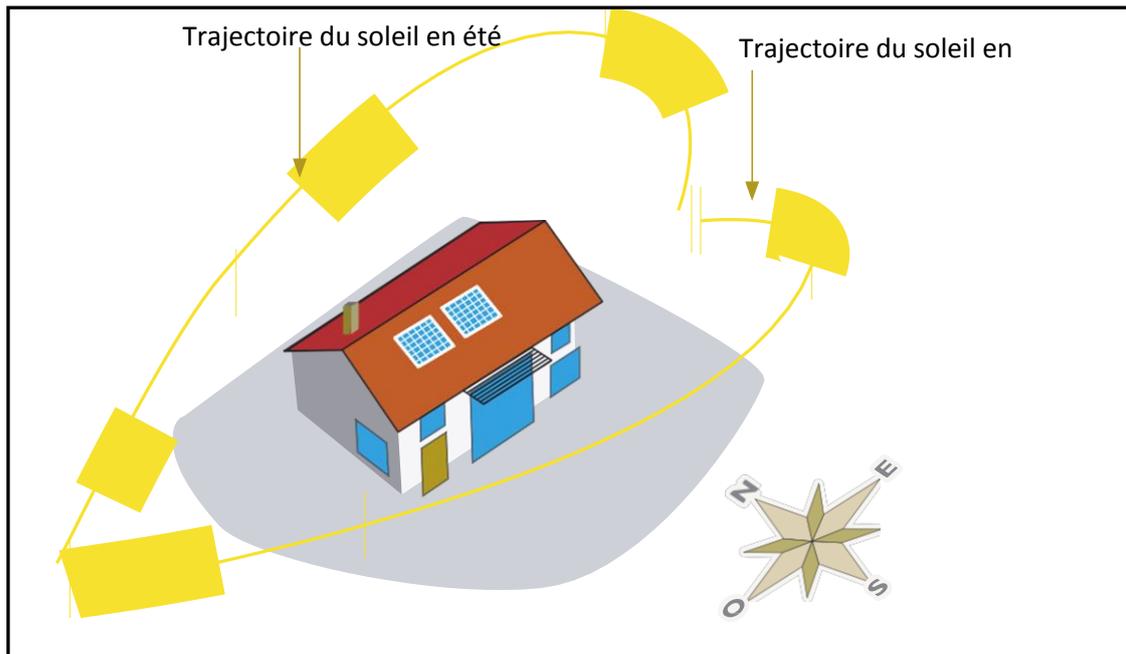


Figure (4.10) : Mouvement apparent du soleil, en hiver et en été.

4.3.1.2.c Température interne des parois

Les figures (4.11), (4.12) montrent l'évolution des températures internes de toutes les parois, elles nous permettent de saisir la contribution de chaque paroi dans l'évolution de la température à l'intérieur de la cellule. Les résultats obtenus de cette comparaison peut aider à trouver des solutions permettant d'améliorer les performances thermiques des habitats en minimisant les déperditions thermiques en hiver, à travers les parois, et les apports solaires en été.

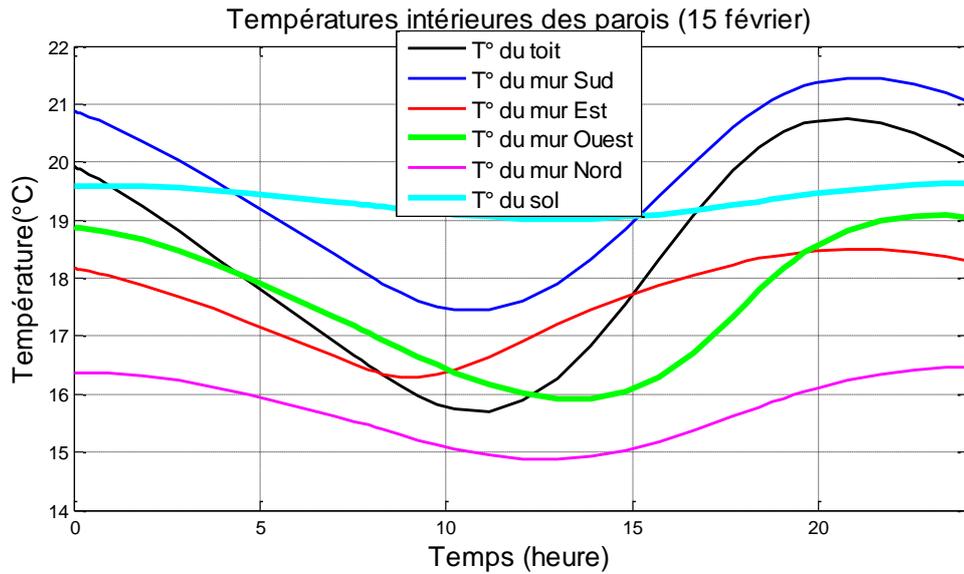


Figure (4.11) : Variation des températures internes des différentes parois, pour les journées du 15 Février.

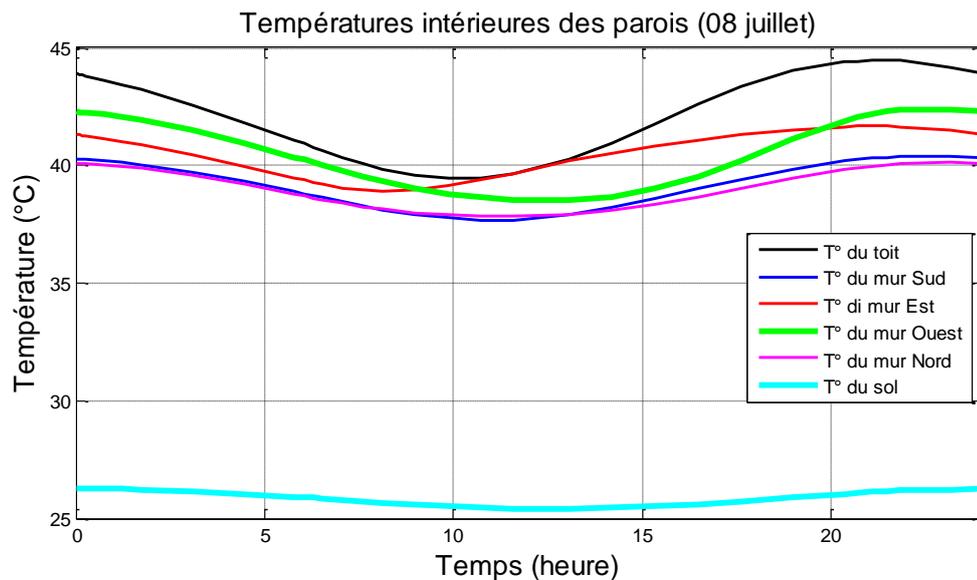


Figure (4.12) : Variation des températures internes des différentes parois, pour les journées du 08 juillet.

D'après la figure (4.12), nous pouvons constater que :

1. Dans la période estivale, le toit et la paroi Ouest s'échauffent plus que toutes les autres parois.
2. En été, le mur Sud s'échauffe moins que les murs Est et Ouest. Sa température reste toute la journée inférieure de celle des murs Est et Ouest.

3. La température du sol ne varie pas beaucoup. Elle oscille entre 31°C et 34.5°C le 08 juillet et 16.7°C et 18.9°C le 15 février.
4. En hiver, la température du mur Nord reste presque toute la journée inférieure à celle des autres parois. Elle ne dépasse pas 13.7°C.
5. Contrairement à la période estivale, en hiver le mur Sud s'échauffe plus que les autres parois. Donc, il apporte plus de gain solaire à la cellule.

Ces constatations, nous conduisent à déduire que:

1. La paroi Sud représente la direction à laquelle le contrôle des gains solaires est facile (éclairage solaire plus intense en hiver qu'en été).
2. Durant la période estivale la paroi Ouest apporte énormément de chaleur à la cellule et cause de surchauffe. Cependant, en hiver sa température est inférieure à celle de la paroi Sud.
3. La paroi Nord est caractérisée par un comportement thermique meilleur en été, car sa température reste presque toute la journée inférieure à celle des autres parois, elle apporte donc moins de chaleur à la cellule. Mais en hiver, cette même paroi peut causer des déperditions de chaleur considérables.
4. La température du toit connaît une grande fluctuation, comparativement aux autres parois que ce soit en hiver ou en été.

D'après ces remarques, nous pouvons déduire que les fluctuations des températures des différentes parois sont beaucoup amorties à l'intérieure, et leur évolution subit un retard important par rapport à celle des températures externes. Certainement, cet effet est causé par la forte inertie thermique de l'ensemble de la cellule qui joue un rôle volant dans la variation de la température à l'intérieure des habitats. Il faut noter que le cas d'étude considéré est choisi pour représenter les constructions, dont la masse thermique importante, utilisées généralement dans les régions arides (exemple ; Ghardaïa).

De plus, la comparaison des températures des différentes parois nous a conduit à déterminer d'une part, les parois qui apporte plus de chaleur à la cellule, en été (toit, mur Ouest, mur Est), et de l'autre part celles qui causent plus de déperditions, en hiver (mur Nord, toit). Le Sud représente la meilleure direction de point de vue, contrôle des gains solaires et limitation des déperditions thermiques.

Ces résultats peuvent être confirmés par les recommandations de Thierry SALOMON (voir chapitre 3, paragraphe : Conception architecturale).

4.4 Etude de l'effet des matériaux de construction

4.4.1 Introduction

Le calcul des besoins énergétiques nécessaires pour le confort thermique dans un habitat dépend fortement des propriétés thermiques des matériaux constituant son enveloppe.

Dans le but de mettre en évidence l'effet des matériaux de construction sur le comportement thermique de la cellule, nous allons mener une étude comparative entre différentes méthodes de construction utilisant des matériaux courants, tel que ; La pierre locale, le bloque du béton, et la brique rouge. Ceci, en simulant le comportement thermique de la cellule pour chaque méthode de construction, avec l'utilisation du modèle adopté, défini dans le chapitre précédent.

En fixant d'autres paramètres (l'orientation de l'habitat, type de construction, ...etc.), nous faisons varier les matériaux de construction. Donc, nous allons proposer quelques types de construction utilisant des matériaux différents. A ce propos, notre étude sera effectuée sur quatre (04) méthodes de construction définies dans le tableau (4.1).

Tableau (4.1) Les types de construction proposés

	Parois verticales				Parois horizontales	
	Est	Sud	Ouest	Nord	Toit	Sol
Type (A)	M.Ch1.5 cm Pierre30cm M.Ch1.5 cm	M.Ch1.5 cm Pierre30cm M.Ch1.5 cm	M.Ch1.5 cm Pierre30cm M.Ch1.5 cm	M.Ch1.5 cm Pierre30cm M.Ch1.5 cm	E.C 1 cm Hourdi20 cm Béton 5 cm M.Ch 2 cm	Carrl 2cm C.M 2 cm Béton10cm
Type (B)	M.Ch1.5 cm Pierre 30cm M.Ch1.5 cm	Plâtre 2 cm Pierre 5 cm Tuf 40 cm M.Ch 2 cm	Pierre20 cm Tuf 40 cm			
Type (C)	E.C 1 cm Brique20cm	E.C 1 cm Brique20cm	E.C 1 cm Brique20cm	E.C 1 cm Brique20cm	E.C 1 cm Hourdis20cm	Carrl 2cm C.M 2 cm

	E.C1cm	E.C1cm	E.C1cm	E.C1cm	Béton 5 cm C.M 2 cm	Béton10cm
Type (D)	E.C 1 cm Parp20cm E.C1cm	E.C 1 cm Parp20cm E.C1cm	E.C 1 cm Parp20cm E.C1cm	E.C 1 cm Parp20cm E.C1cm	E.C 1 cm Hourdis20cm Béton 5 cm C.M 2 cm	Carrl 2cm C.M 2 cm Béton10cm

E.C: Enduit de ciment, **C.M:** Ciment mortier, **Parp:** Parpaing, **M.Ch:** Mortier de Chaux, **Carrl:** carrelage

4.4.2 Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction

L'analyse du comportement thermique de l'habitat exige une connaissance détaillée des propriétés thermo physiques des matériaux utilisés. Plusieurs laboratoires dans le domaine ont établi pour les différents matériaux des valeurs de conductivité, chaleur spécifique...etc. Cependant, de nombreux travaux montrent que les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction sont liées aux conditions d'utilisation, notamment, à la température et à la teneur en eau [38].

Dans la littérature, les données concernant les propriétés thermo-physiques des matériaux sont différentes d'une source à une autre. De plus, les matériaux locaux ont des propriétés largement différentes selon la région à laquelle ils appartiennent, ce qui nous oblige à déterminer les propriétés des matériaux de chaque région.

Comme déjà énoncé, les valeurs de conductivité et la chaleur spécifique de la pierre sont approximatives. Quant au tuf, nous considérons qu'il est sableux, donc nous avons approximé ses propriétés à celles du sable sec.

Tableau (4.2) : Propriétés thermo physiques de matériaux de construction, d'après DTR, [19] et [24]

Matériau	Masse volumique (Kg/m³)	Chaleur spécifique (J/Kg.°K)	Conductivité (W/m.°K)
Pierre	2580 ^{DTR}	936 ^{DTR}	2.4 ^{DTR}
Brique creuse	900 ^{DTR}	936 ^{DTR}	0.48 ^{DTR}
Parpaing 20cm	1300 ^{DTR}	1080 ^{DTR}	1.1 ^{DTR}
Béton	2500 ^[24]	1080 ^[24]	1.75 ^[24]
0Ciment mortier	2200 ^{DTR}	1080 ^{DTR}	1.4 ^{DTR}
Carrelage	2400 ^[19]	875 ^[19]	2.4 ^[19]
Hourdis	1300 ^{DTR}	1080 ^{DTR}	1.1 ^{DTR}
Tuf (sable)	1300 ^{DTR}	823 ^{DTR}	0.6 ^{DTR}
Mortier de chaux	1800 ^{DTR}	1080 ^{DTR}	0.87 ^{DTR}
Plâtre	1000 ^{DTR}	936 ^{DTR}	0.35 ^{DTR}

^{DTR} : Document Technique Réglementaire

4.4.3 Résultats et discussion

4.4.3.1 Température de l'air

La température interne de la cellule pour les différents types de construction pour la journée du 15 février et du 08 juillet est représentée dans les figures (4.13), (4.14).

Les constatations ressortis de la figure (4.13) sont :

1. Les écarts maximums de température enregistrés dans les différents types sont:

Dans le type (A) : 2.3°C, le 15 Février, et 2.8°C, le 08 Juillet.

Dans le type (B) : 1.6°C, le 15 Février, et 2°C, le 08 Juillet.

Dans le type (C) : 4°C, le 15 Février, et 4.8°C, le 08 Juillet.

Dans le type (D) : 5°C, le 15 Février, et 5.8°C, le 08 Juillet.

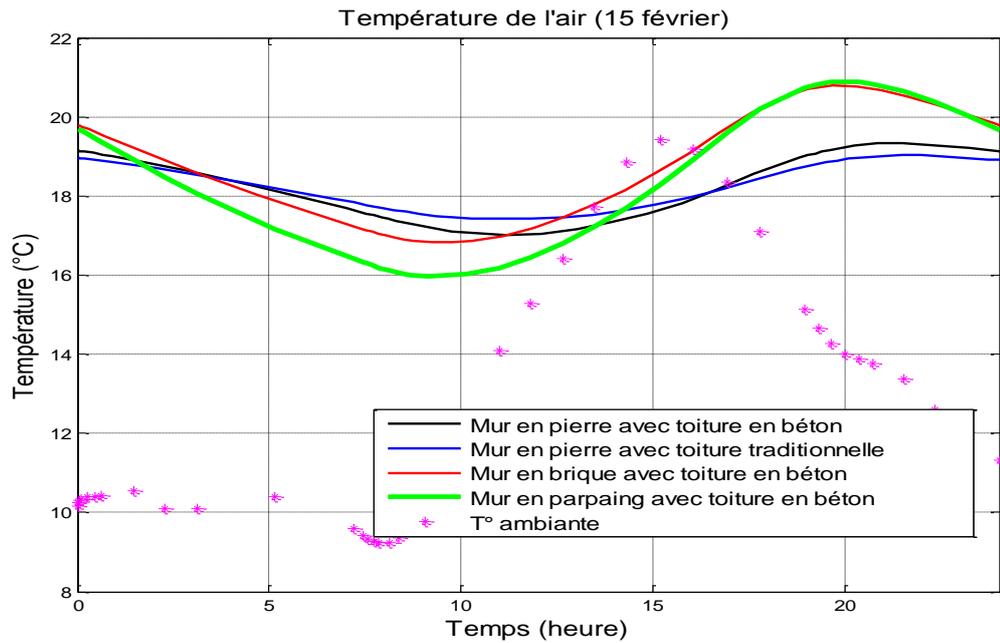


Figure (4.13) : Variation de la température ambiante et de la température de l'air, dans les différents types de construction, 15 Février.

2. Durant la période estivale (08 juillet), Le maximum de la température interne du type (B) ne dépasse pas 37.3°C, alors que la température interne de type (A) atteint 39°C. Pour les types (C) et (D), les maximums de la température interne sont respectivement de 38.2 °C, et de 39.9°C.

3. Les températures minimales enregistrées en hiver (15 Février) sont : 17°C dans le type (A), 17.4°C dans le type (B), 16.8°C dans le type (C), et 15.9°C dans le type (D)

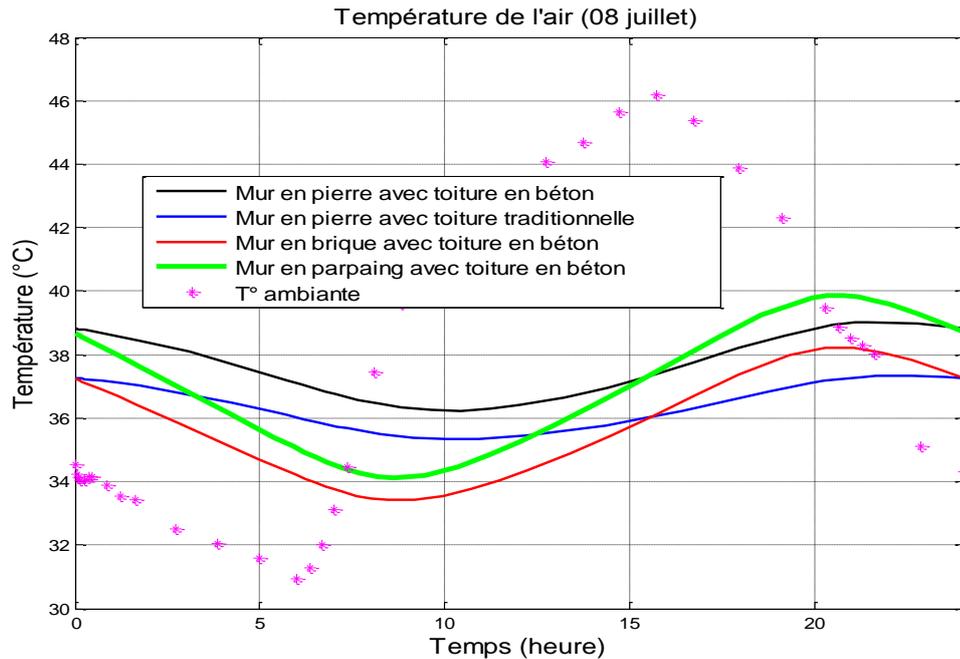


Figure (4.14) : Variation de la température ambiante et de la température de l'air, dans les différents types de construction, 08 juillet.

D'après la figure (4.14), nous pouvons déduire que :

1. La fluctuation de la température dans les types (C) et (D) est plus importante que dans les types (A) et (B), que ce soit en hiver ou en été.
2. La température interne du type (D) abaisse plus que celles des autres types, en hiver. Alors qu'en été (08 juillet), la cellule de ce même type s'échauffe plus.
3. Le type (A) représentant la construction massive des parois verticales en pierre avec une épaisseur de 30cm, offre une température interne agréable.
4. Dans le type (B), similaire au type (A), sauf que la toiture est en construction traditionnelle, (pierre, tuf et chaux), la température à l'intérieur est plus stable.
5. Dans les types (A), et (B) on observe, nettement, l'effet de l'inertie thermique en hiver et en été sur l'évolution de la température interne, et cela sous deux (02) aspects :
 1. Aspect isolation : Dans l'amortissement des fluctuations de la température.
 2. Aspect retard de réponse : dans le déphasage de temps en comparant avec les autres types.

6. Le type (D) présente le mauvais cas et cela pour les raisons suivantes :

1. Grande variation de la température.
2. En hiver, Plus de froid dans la nuit. En été, plus de surchauffe.

7. Grâce à la résistance thermique importante de la brique rouge par rapport à celle de la pierre et du parpaing, la température interne de la cellule construite par ce matériau est la moins élevée en été malgré sa faible masse thermique. Toutefois, la température dans ce type de construction est très fluctuante.

4.4.3.2 Température du toit

Dans le but de voir l'influence des matériaux traditionnels utilisés dans la construction du toit (type (B)), nous avons comparé, dans les figures (4.15), (4.16) l'évolution de la température de la face intérieure du toit des différents types.

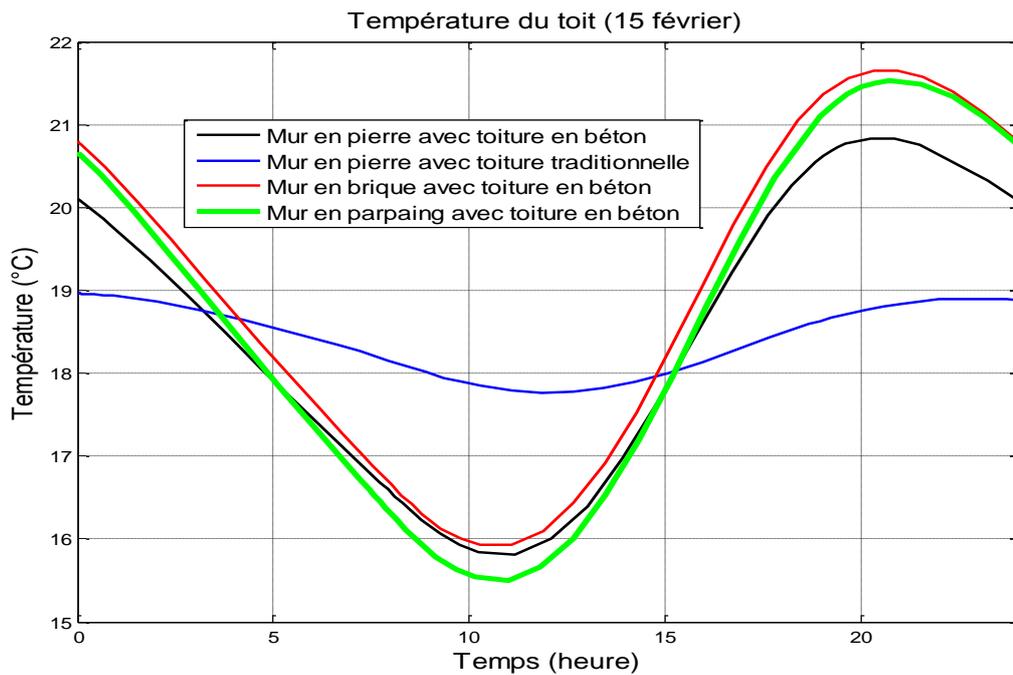


Figure (4.15) : Variation de la température interne du toit, dans les différents types de construction, 15 Février.

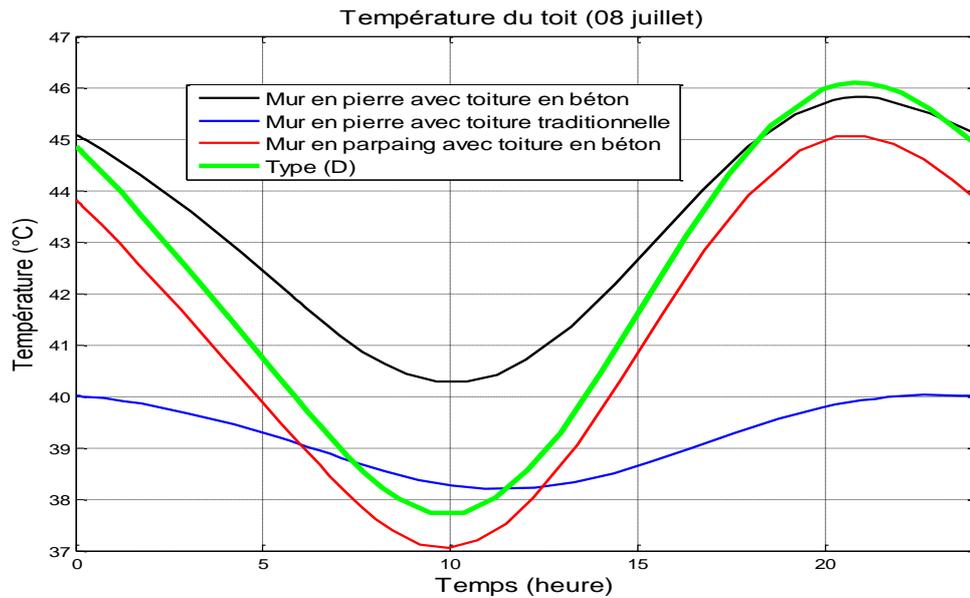


Figure (4.16) : Variation de la température interne du toit, dans les différents types de construction, 08 juillet.

D'après les figures (4.15) et (4.16), nous pouvons constater évidemment que la température interne du toit dans le type (B) est beaucoup moins fluctuante que dans les autres types. En été (08 juillet), le toit de ce type s'échauffe moins, et se refroidit moins en hiver (15 Février). Donc, il isole parfaitement l'intérieur de la cellule de son extérieur.

Les résultats obtenus de l'étude de l'effet des matériaux de construction sont:

- La masse thermique des parois construites par la pierre permet à l'enveloppe de la cellule de stocker une grande quantité de la chaleur provenant de l'extérieur durant le jour, et la restituer durant la nuit. Donc, malgré la faible résistance thermique des parois en pierre, elles offrent quand même à l'intérieur de la cellule une température moins fluctuante dont l'évolution, que ce soit en hiver ou en été, est mieux de celle dans le cas du parpaing. Cela, est grâce à l'inertie thermique importante des parois en pierre. Ce résultat rejoint ceux qui sont trouvés par CSTB [26] (étude effectuée en France), A. Kemajou et L. Mba [23] (étude effectuée au Cameroun), et Medjelekh [4] (étude effectuée à Guelma).

- La construction en pierre avec toiture traditionnelle présente le meilleur comportement thermique que ce soit en hiver ou en été, cela est grâce à l'inertie thermique importante et à la forte résistance thermique de ce type de toiture.

- Avec leur forte résistance thermique par rapport au parpaing, les parois en brique rouge alvéolaire protègent plus la cellule des conditions environnantes. Ce résultat rejoint ceux qui sont obtenus par A. Mokhtari, K. Brahim et R. Benziada [25], dans leur étude réalisée à Béchar, et Medjelekh [4], dans son étude réalisée à Guelma.

4.5 Etude de l'effet de l'isolation

4.5.1 Introduction

Dans le domaine de bâtiment, il existe une grande variété des matériaux isolants. Le polystyrène est parmi les isolants utilisés couramment. Cependant, la technique de paroi double avec une lame d'air est ainsi utilisée largement pour l'isolation thermique et sonore.

Les méthodes d'isolation sont aussi différentes : l'isolation intérieure, l'isolation extérieure, l'isolation intermédiaire, l'isolation complète, l'isolation partielle,...etc. A ce propos, nous allons comparer entre l'isolation par le polystyrène et par la lame d'air, et entre l'isolation complète et l'isolation partielle.

Dans le cas de l'isolation partielle, en basant sur les résultats obtenus précédemment, nous faisons le choix des parois à isoler.

Rappelons dans le chapitre précédent, nous avons constaté que la température du toit est la plus fluctuante et qu'elle augmente plus en été et s'abaisse plus en hiver que celles des autres parois.

Rappelons ainsi que la paroi Ouest apporte beaucoup de chaleur à la cellule et cause de surchauffe importante en fin de journée.

Quant à la paroi Nord, elle peut causer des déperditions importantes de la chaleur en période hivernale car durant cette saison, elle est totalement privée du rayonnement solaire direct.

D'après les résultats que nous avons trouvés, nous avons déduit aussi que les gains solaires par la paroi Sud sont faciles à contrôler.

D'après ces constatations, l'isolation partielle que nous adoptons dans notre étude consiste à isoler la paroi Nord pour limiter les déperditions de chaleur en hiver, la paroi Ouest pour éviter la surchauffe en été, et le toit pour ces deux raisons.

4.5.2 Proposition de types d'isolation

Le tableau (4.3) représente les méthodes d'isolation proposées.

Tableau (4.3): Types d'isolation proposés

Modèle	Parois verticale				Parois horizontales	
	Mur Sud	Mur Est	Mur Ouest	Mur Nord	Toit	Sol
Isolation (A)	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	M.Ch1.5cm	M.Ch 1.5cm	E.C 1cm	Carri 2cm
	Pierre15cm	Pierre 15cm	Pierre15cm	Pierre 15cm	Hourdi 20cm	C.M 2cm
	L.A 5 cm	L.A 5cm	L.A 5cm	L.A 5cm	Béton 5cm	Béton10cm
	Pierre 15cm	Pierre 15cm	Pierre15cm	Pierre 15cm	Poly 5cm	
	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	C.M 2cm	
Isolation (B)	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	M.Ch1.5cm	M.Ch1.5cm	E.C 1cm	Carri 2cm
	Pierre 30cm	Pierre 30cm	Pierre15cm	Pierre15cm	Hourdi 20cm	C.M 2cm
	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	L.A 5cm	L.A 5cm	Béton 5cm	Béton10cm
			Pierre15cm	Pierre15cm	Poly 5cm	
			M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	C.M 2cm	
Isolation (C)	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	M.Ch1.5cm	M.Ch1.5cm	E.C 1cm	Carri 2cm
	Pierre 30cm	Pierre 30cm	Pierre15cm	Pierre15cm	Hourdi 20cm	C.M 2cm
	M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	Poly 5cm	Poly 5cm	Béton 5cm	Béton10cm
			Pierre15cm	Pierre15cm	Poly 5cm	
			M.Ch 1.5cm	M.Ch 1.5cm	C.M 2cm	

E.C: Enduit de ciment, **C.M:** Ciment mortier, **Poly:** Polystyrène, **Carri:** carrelage, **M.Ch:** Mortier de Chaux

Les propriétés thermo-physiques de la lame d'air et du polystyrène sont représentées dans le tableau suivant

Tableau (4.4): Propriétés thermo-physique du polystyrène et de la lame d'air

Matériau	Masse Volumique	Chaleur spécifique	Conductivité
Lame d'air	1.29 ^[6]	1005 ^[6]	0.31 ^[6]
Polystyrène	14 ^{DTR}	1404 ^{DTR}	0.043 ^{DTR}

4.5.3 Résultats et discussion

4.5.3.1 Température de l'air

Les figures (4.17), et (4.18), montrent l'évolution de la température interne de la cellule pour les différents types d'isolation.

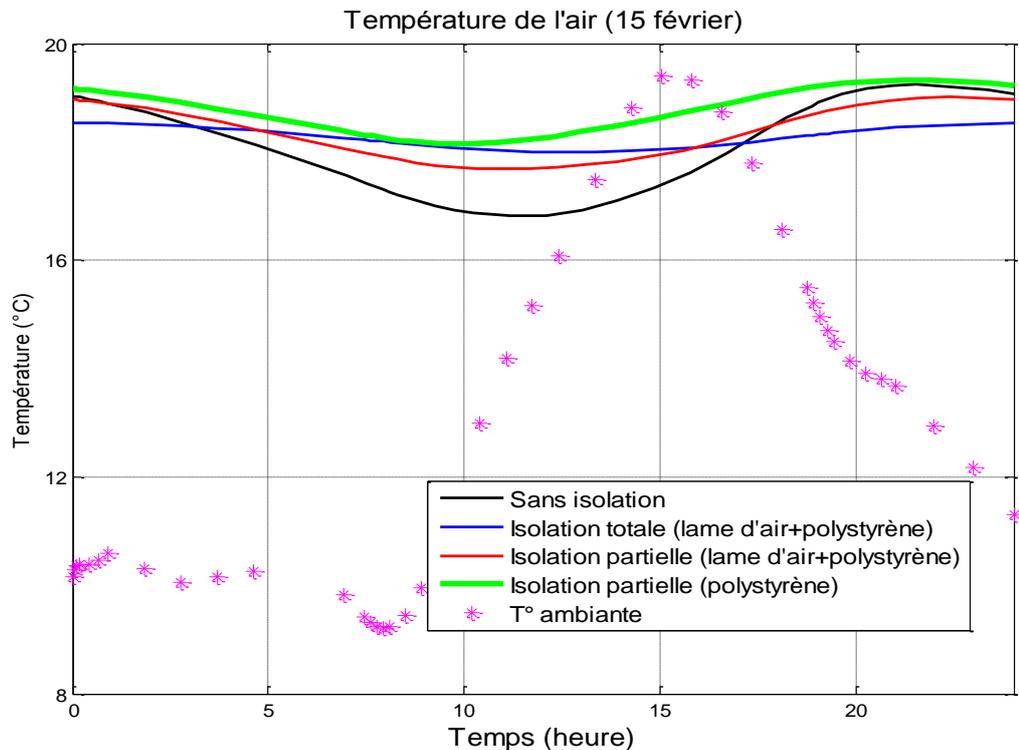


Figure (4.17) Variation de la température ambiante et de la température de l'air, pour les différents types d'isolation, 15 février.

D'après ces résultats, nous remarquons que :

- L'isolation de la cellule du type (A) améliore l'évolution de la température interne en période hivernale et estivale. En effet, les fluctuations sont amorties et la température minimale ne tombe pas au-dessous de 17.2°C, en hiver, et elle ne dépasse pas 35.3°C, en été, quel que soit le type d'isolation.
- Dans le cas de l'isolation partielle par le polystyrène, la température à l'intérieur de la cellule reste toute la journée du 15 février supérieure à celles des autres types d'isolation. Tandis que durant la journée du 08 juillet reste la plus basse.

- Durant la journée du 15 février, la température interne de la cellule dans le cas de l'isolation complète est supérieure à celles des autres types d'isolation à partir de 04h:50 jusqu'à 15h:50.

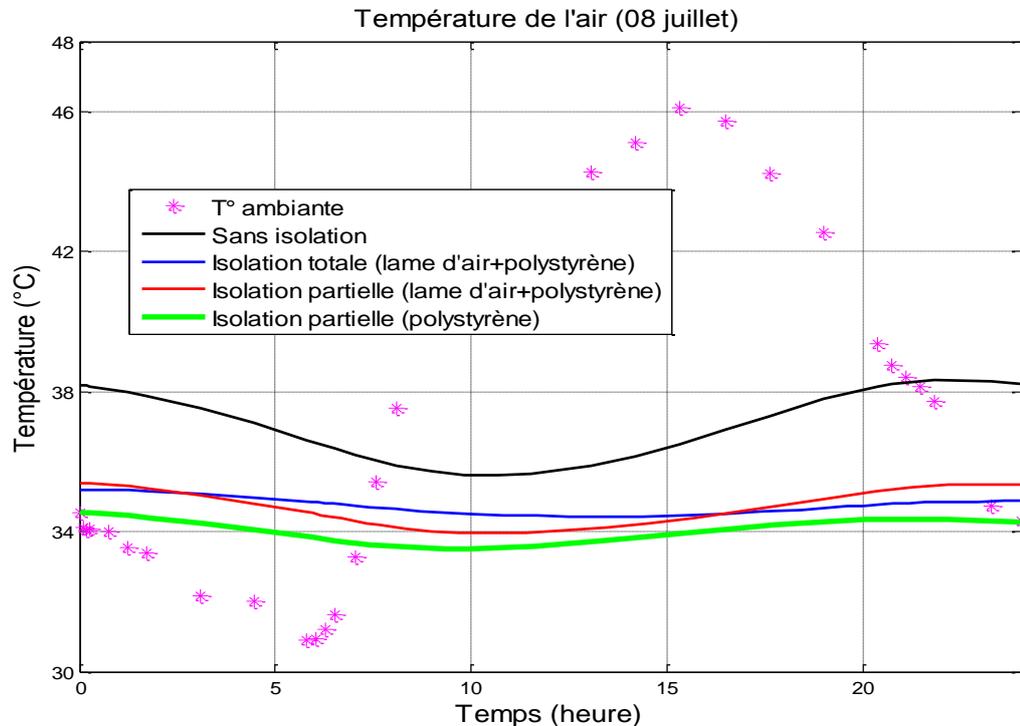


Figure (4.18) Variation de la température ambiante et de la température de l'air, pour les différents types d'isolation, 08 Juillet.

Nous pouvons déduire, en conséquence qu'en hiver l'isolation partielle offre à l'intérieur de la cellule, en fin de journée et durant la nuit, une température plus élevée que l'isolation totale. Pour expliquer cela, nous avons calculé la température du mur Sud, pour la journée du 15 février, et pour les différents types d'isolation. Les résultats sont illustrés dans la figure (4.19).

4.5.3.2 Température du mur sud

La figure (4.19) représente la variation de la température interne du mur sud le 15 février, pour les différents types d'isolation.

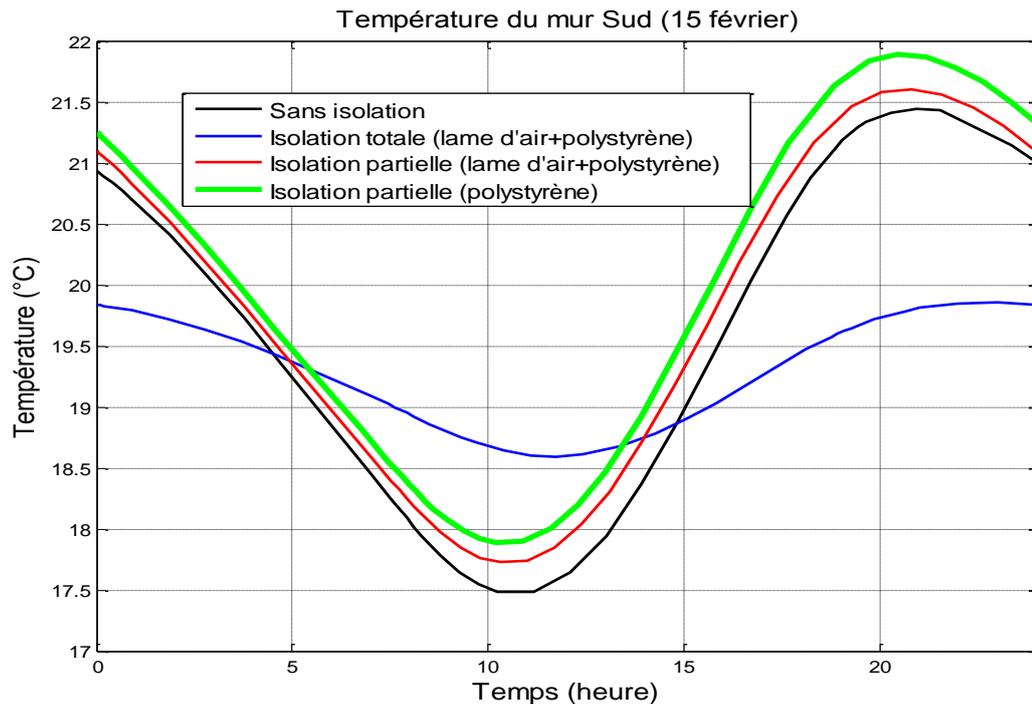


Figure (4.19) : Variation de la température interne du mur sud, pour les différents types d'isolation, 15 février.

D'après ces résultats, nous constatons que la face intérieure du mur Sud s'échauffe moins dans le cas de l'isolation complète, cela est dû au fait qu'une partie des apports provenant des irradiations solaires sur le mur Sud est arrêtée par l'effet d'isolation dans le côté extérieur du mur. En conséquence, la température interne de la cellule sera moins élevée.

4.5.3.3 Evolution de la température du toit

Les figures (4.20), et (4.21) représentent respectivement, l'évolution de la température interne du toit durant les périodes hivernale et estivale. Nous pouvons constater le grand écart de température entre la cellule de type (A) et les cellules isolées. De plus, en été, la toiture non isolée reste toute la journée plus chaude par rapport aux toitures isolées. Cela nous ramène à déduire que l'isolation du toit est primordiale, en hiver comme en été, pour protéger la cellule des conditions extérieures.

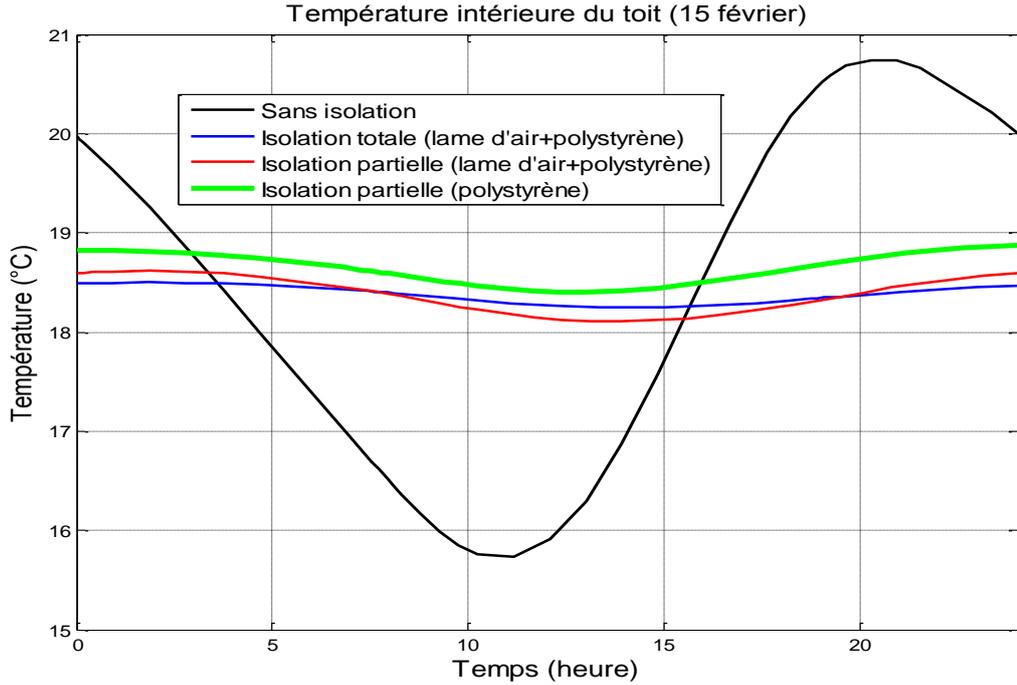


Figure (4.20) : Variation de la température interne du toit, pour les différents types d'isolation, 15 février.

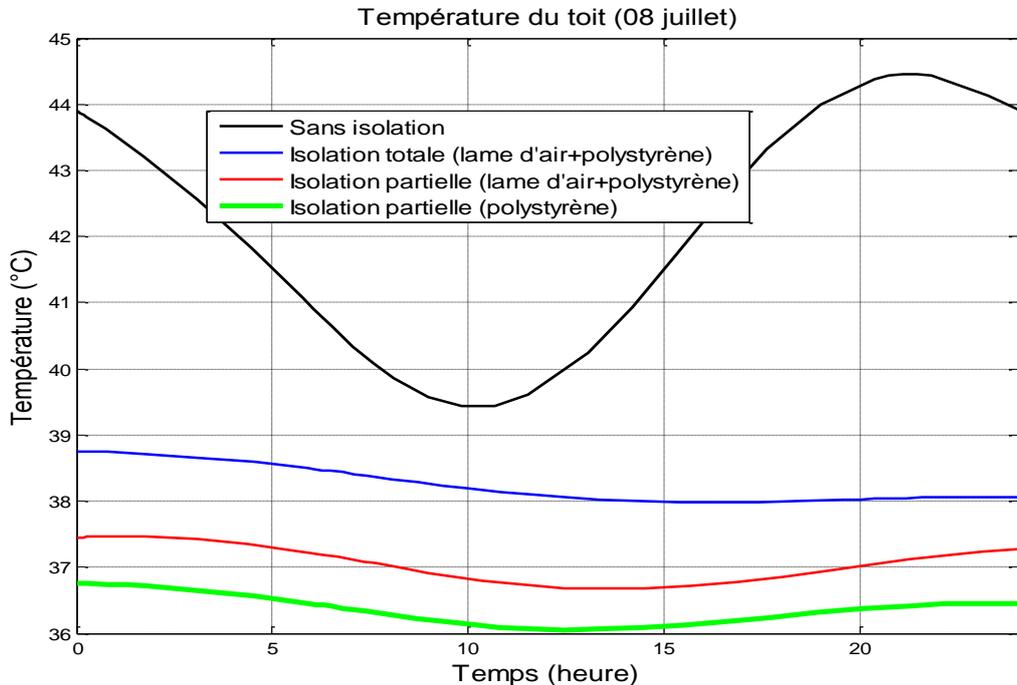


Figure (4.21) : Variation de la température interne du toit, pour les différents types d'isolation, 08 juillet.

D'après l'étude de l'effet de l'isolation sur le comportement thermique de la cellule, nous avons déduit que :

- Que ce soit en été ou en hiver, l'isolation par le polystyrène est plus efficace par rapport à l'isolation par la lame d'air.
- L'isolation partielle par le polystyrène fait minimiser considérablement les échanges thermiques avec l'extérieur. En conséquence, la variation de la température à l'intérieur de la cellule est amortie.
- Dans le cas où l'isolation de la cellule n'est pas complète, il faut bien choisir les parois à isoler. Dans notre étude nous avons supposé que toutes les parois extérieures sont exposées à la même vitesse du vent et qu'aucune paroi n'est ombrée. Les résultats obtenus suggèrent que :
 - Afin de profiter des irradiations solaires importantes en hiver sur le mur sud, ce dernier ne doit pas être isolé.
 - Les irradiations solaires sur le plan horizontal sont les plus importants, ce qui fait les apports solaires en été provenant du toit causent la surchauffe de la cellule. En hiver, cette même paroi se refroidit beaucoup, donc laisse une grande partie de la chaleur de se dissiper. D'où l'isolation de la toiture est nécessaire. pour diminuer les échanges thermiques avec l'extérieur et éviter la cellule de se surchauffer en été.
 - L'isolation du toit et des parois Ouest et Nord est suffisante et peut être plus efficace. Car, elle permet de profiter des irradiations solaires sur le mur sud, en hiver, et d'éviter la surchauffe en fin de journée en été. A ce propos, nous trouvons dans des études antérieures quelques suggestions sur l'isolation des parois. Par exemple :
 - N. Kadri, et A. Mokhtari [24], ont suggéré dans leur étude sur la réhabilitation thermique de l'enveloppe de bâtiment, que La forte isolation peut causer des surchauffes importantes, si la ventilation n'est pas bonne.
 - S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz et A. Cheknane [30], dans leur étude par simulation de l'effet d'isolation thermique d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa ont suggéré la meilleure façon de l'isolation, c'est isoler uniquement les murs exposés au soleil.

4.6 Etude de l'effet de l'orientation

Dans cette partie, nous tentons de voir l'effet de l'orientation de la cellule sur l'évolution de sa température interne. Pour ce faire, nous allons changer la disposition actuelle de la cellule (Nord Sud) aux directions suivantes : Est Ouest, Nord-Ouest Sud-Est, Nord-Est Sud-Ouest. Et nous calculons pour chaque direction la température à l'intérieur de la cellule.

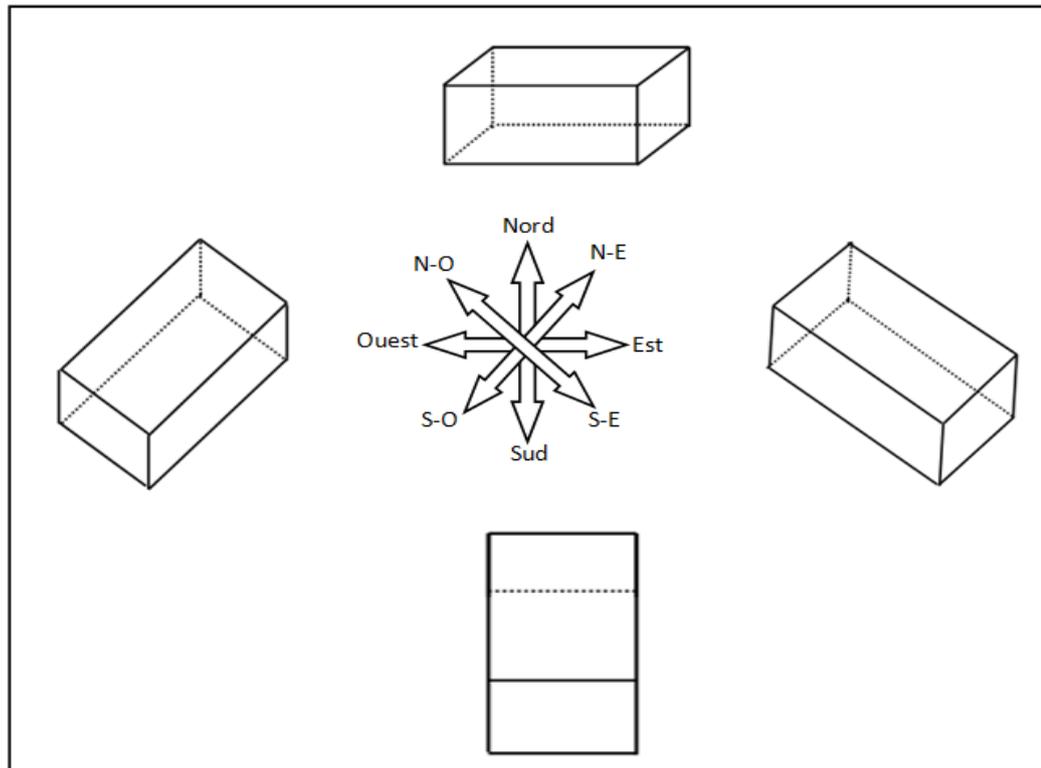


Figure (4.22) : Orientations de la cellule proposées

4.6.1 Présentation des résultats

La figure (4.23) représente l'évolution de la température à l'intérieur de la cellule au 15 Février. Les résultats que nous pouvons ressortir sont :

- La température interne dans le cas de l'orientation Nord-Sud reste toute la journée supérieure de celles des autres orientations.

- En été, figure (4.24), montre que l'intérieur de la cellule dont l'orientation Est-Ouest est le moins chaud par rapport aux autres cas. L'évolution de la température interne est presque identique dans les autres orientations.

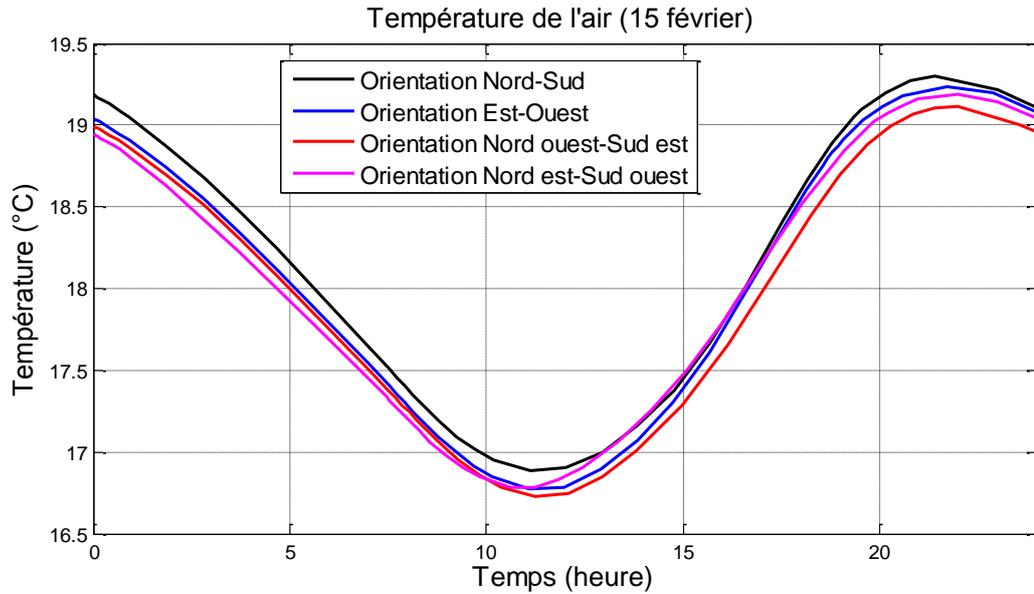


Figure (4.23) : Variation de la température de l'air, pour les différentes orientations de la cellule, 15 février

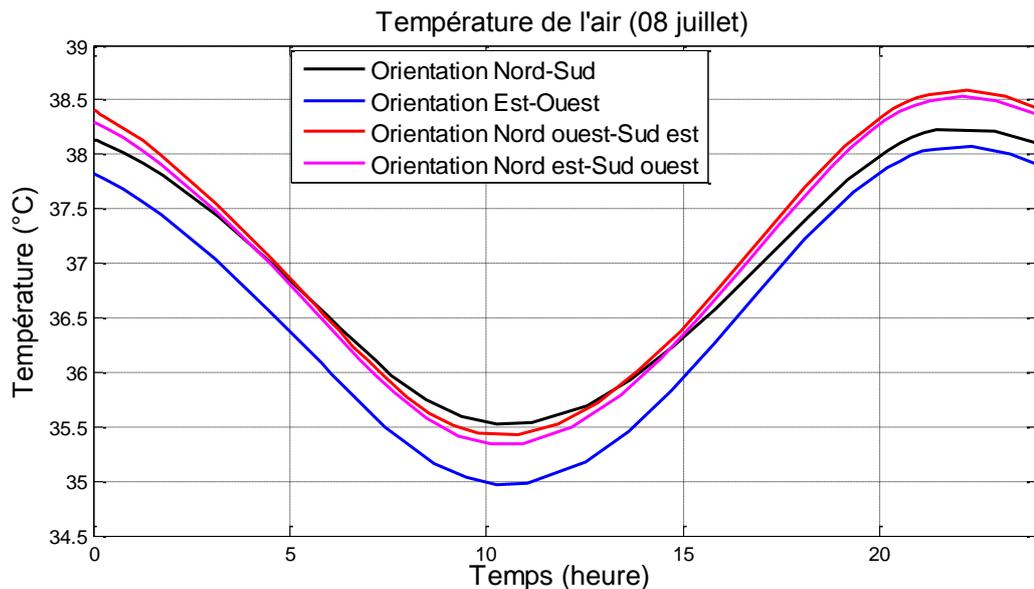


Figure (4.24) : Variation de la température de l'air, pour les différentes orientations de la cellule, 08 juillet

D'après ces constatations, nous pouvons déduire que l'orientation optimale, pour la période hivernale est celle du Nord-Sud (température plus élevée). Tandis que, durant la période estivale, la direction recommandée est celle de l'Est-Ouest (température moins élevée). Cela peut expliquer l'exigence d'orienter les façades

les plus longues au nord et ou sud, d'après [Notice technique, pour l'application du règlement de la construction en Algérie, exigences hygrothermiques] [29].

4.7 Etude de l'effet de la couleur

Le choix de la couleur des façades extérieures de l'enveloppe est l'une des stratégies suivies dans les régions sahariennes pour protéger les habitats des irradiations solaires intenses durant la période estivale. En effet, à cause de leur faible coefficient d'absorption et leur fort coefficient de réflexion, les couleurs claires ont toujours être d'avantages utilisées.

A ce propos, nous allons tester l'influence de la couleur extérieure sur l'évolution de la température interne de la cellule. Pour ce faire, nous supposons trois valeurs du coefficient d'absorption (α) (0.5 : couleur claire, 0.75 :couleur moyenne, 0.85 :couleur sombre) et nous calculons à chaque fois la température à l'intérieur de la cellule.

Présentation des résultats

D'après la figure (4.25), la température à l'intérieur de la cellule dans le cas de la couleur claire ($\alpha=0.5$) ne dépasse pas 36.2°C, alors qu'elle atteint 38.3°C dans le cas de la couleur moyenne ($\alpha=0.75$) et 39.2°C, dans le cas de la couleur sombre ($\alpha=0.85$).

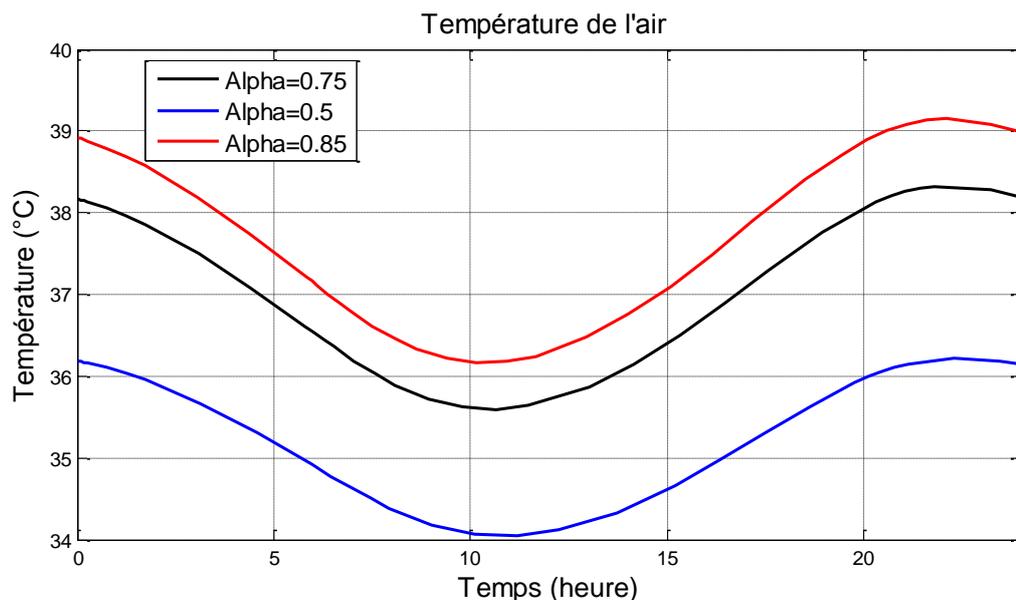


Figure (4.25) : Variation de la température de l'air, pour les différentes valeurs de (α), journée du 08 juillet.

D'où, nous pouvons déduire que plus la couleur des faces extérieures est claire, plus la température à l'intérieur est moindre, et inversement.

Ce résultat confirme celui trouvé par Medjelekh [4], dans son étude réalisée à Guelma. A ce propos, d'après [Notice technique, pour l'application du règlement de la construction en Algérie, exigences hygrothermiques] [29], on a exigé pour la zone climatique (D), une protection contre le rayonnement solaire en toiture par un pare-soleil, ou par un badigeon au lait de chaux.

4.8 Conclusion

La simulation du comportement thermique de la cellule, nous a permis de calculer la température de l'air et celles des différentes parois. Les principaux résultats ressortis indiquent que les fluctuations des températures internes de la cellule sont beaucoup amorties et présentent un déphasage dans le temps par rapport aux températures externes. Ainsi, d'après cette étude nous pouvons conclure que les parois qui apportent plus de chaleur à la cellule, en été, sont le toit, le mur Ouest, et le mur Est. Or, celles qui causent plus de déperditions, en hiver sont le mur Nord, et le toit.

Ainsi, dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet des matériaux de construction sur le comportement thermique d'une habitation. Ceci, en supposant quelques méthodes de construction de son enveloppe et comparer entre les matériaux utilisés.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La masse thermique des parois construites par la pierre permet à l'enveloppe de la cellule de stocker une grande quantité de la chaleur provenant de l'extérieur durant le jour, et la restituer durant la nuit.
- La construction en pierre avec toiture traditionnelle présente le meilleur comportement thermique.
- Les parois en brique rouge alvéolaire protègent plus la cellule des conditions environnantes par rapport au parpaing.

L'étude de l'effet thermique de l'isolation sur la cellule nous a permis de constater que:

- L'isolation des parois fait minimiser considérablement les échanges thermiques avec l'extérieur. En conséquence, la variation de la température à l'intérieur de la cellule est amortie.
- L'isolation du toit et des parois Ouest et Nord est suffisante et peut être plus efficace. Car, elle permet de profiter des irradiations solaires sur le mur sud, en hiver, et d'éviter la surchauffe en fin de journée en été.

Le calcul de la température interne de la cellule de type (A), pour les différentes orientations, nous permet de suggérer que la direction Est Ouest soit l'orientation optimale en été.

Nous avons testé ainsi l'effet de la couleur des parois extérieures en changeant son coefficient d'absorption de rayonnement solaire, les résultats trouvés indiquent que l'utilisation des couleurs claires sur les façades extérieures est un moyen de réduire la température interne.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif essentiel du travail que nous avons mené, était l'étude de la distribution de température dans une cellule implantée utilisant des matériaux locaux et implantée en milieu aride. Puis de comparer les comparer son comportement thermique avec une cellule identique construite à base de parpaing et brique rouge. Cette étude est réalisée par une simulation numérique, en modélisant le système thermique d'une cellule. Nous nous sommes attachés, à élaborer un modèle mathématique permettant de prédire la réponse thermique de la cellule aux sollicitations extérieures. Afin de vérifier la crédibilité de ce modèle, nous avons utilisé le logiciel de simulation dynamique de systèmes thermiques TRNSYS pour valider les résultats obtenus. Il se trouve qu'avec le modèle adopté nous pouvons calculer les différentes températures dans la cellule avec des erreurs modérées.

Ensuite, nous avons procédé à l'étude de l'influence de quelques paramètres sur le comportement thermique de la cellule. Nous avons commencé par l'étude de l'effet des matériaux de construction. La comparaison entre quelques types de construction montre que les méthodes traditionnelles utilisant la pierre pour la construction des parois épaisses offrent à l'intérieur une température moins fluctuante et plus agréable en hiver comme en été.

Toutefois, les conditions climatiques pour lesquelles les régions arides sont connues, (à savoir froid glacial en hiver, surchauffe importante en été et écart diurne de température considérable), font que l'isolation thermique de l'habitat est indispensable. Pour évaluer l'effet de l'isolation thermique sur une habitation, nous avons comparé les distributions de températures pour différentes méthodes d'isolation thermique (y compris le cas de l'absence d'isolation). Nous avons conclu de cette étude que l'isolation amortit considérablement la fluctuation de la température intérieure. Nous avons conclu, aussi que le choix pertinent sur les parois à isoler, ainsi que sur le type de matériau isolant, peut améliorer nettement l'efficacité énergétique de l'habitat.

L'étude que nous avons menée sur l'orientation de la cellule ainsi que sur la couleur extérieure de son enveloppe nous a permis de suggérer qu'avec l'orientation des façades les plus longues au sud et au nord, et l'utilisation de

couleurs claires sur les faces extérieures, les apports solaires sont mieux contrôlés durant la saison de canicule.

Il est évident que la pierre n'est pas le seul matériau de construction utilisé dans les maisons traditionnelles à Ghardaïa. Il existe d'autres matériaux tel que l'adobe, le gypse (Tinchent), etc. Malheureusement, nous n'avons pas pu introduire ces matériaux dans notre étude, faute de données sur leurs propriétés thermo-physiques. Par ailleurs, nous avons adopté des valeurs approximatives concernant les propriétés de la pierre et du tuf. Ce qui peut introduire des erreurs sur les résultats de la simulation.

Dans ce contexte, il serait souhaitable de faire procéder à la caractérisation thermo-physique des matériaux locaux, région par région. Ceci, afin d'affiner les travaux de simulation et sortir avec les bonnes conclusions.

Par ailleurs, sur le plan numérique, il serait intéressant de poursuivre ce travail en examinant les effets de la multiplication des nœuds à l'intérieur des parois sur les résultats obtenus.

Tout comme il serait intéressant de poursuivre ce travail par l'étude de distribution spatiale de la température à interne en multipliant le nombre de nœuds à tous les niveaux. Ceci afin de mettre en évidence l'effet de la géométrie de la cellule sur son comportement thermique.

Pour rester dans le même sujet, on pourrait également s'intéresser à l'effet des nouveaux matériaux conjuguant isolation et inertie.

Enfin, on pourrait étudier la cellule dans un environnement réel avec toutes ses composantes (ouvrants, occupant, infiltrations,...etc.).

NOMENCLATURE

Liste	Unité
a : Azimut de soleil	[°]
b: Effusivité thermique	[W s ^{1/2} /m ² °C]
B : Eclairement direct	[W/m ²]
C: Correction étatique	[-]
C _{t-s} : Correction terre soleil	[-]
C _n : Concentration en impuretés	[-]
C _{n_e} : Concentration en impureté à l'extérieur	[-]
C _s , C _e : Chaleur spécifique, du solide et de l'eau	[J/kg °C]
C _{p_i} : Chaleur spécifique de la couche (i)	[J/kg °C]
C _{p_{air}} : Chaleur spécifique de l'air	[J/kg °C]
C _A , C _B , C _M : Capacités thermiques équivalentes des nœuds (A, B, M)	[J/°C]
d : Diffusivité thermique	[m ² /s]
D : Eclairement diffus	[W/m ²]
e _i : Epaisseur de la couche (i)	[m]
E _t : Equation du temps	[s]
f _{ij} : Facteur de forme tenant compte de la géométrie seulement	[-]
F _{ij} : Facteur de forme tenant compte de la géométrie et de l'émissivité	[-]
G _{abs} : Rayonnement solaire global absorbé par une paroi	[W]
h : Hauteur du soleil	[W]
h _{conv} : Coefficient d'échange convectif entre l'air et les faces intérieures	[W/m ² °C]
h _{conv ambient} : Coefficient de transfert de chaleur par convection mixte entre une paroi et l'air extérieur	[W/m ² °C]
i : Angle d'incidence	[°]
I : Constante solaire corrigée	[W/m ²]
I ₀ : Constante solaire	[W/m ²]
J : Numéro de jour	[-]
Q _v : Débit d'air	[m ³ /s]
R _A : Résistance thermique équivalente entre les nœuds (A) et (M)	[°C/W]
R _B : Résistance thermique équivalente entre les nœuds (B) et (M)	[°C/W]
S _i : Surface de paroi (i)	[m ²]
T _{sv} : Temps solaire vrais	[s]
T _L : Temps local	[s]
T _{L*} : Trouble de Link	[-]
T _a : Température de l'air du milieu environnant	[°C]
T _p : Température des parois environnantes	[°C]
T : Température des vêtements	[°C]
T _r : Température résultante de confort	[°C]
T _{s1} : Température moyenne du solide à l'instant t	[°C]
T _{s0} : Température initiale du solide	[°C]
T _e : Température maximale de l'eau	[°C]

T_{e0} : Température initiale de l'eau	[°C]
T_{em} : Température moyenne de l'eau	[°C]
T_{ciel} : Température du ciel	[°C]
T_{sol} : Température du sol	[°C]
T_{air} : Température de l'air à l'intérieur de la cellule	[°C]
$T_{ambient}$: Température ambiante	[°C]
T_A, T_B, T_M : Température des nœuds (A, B, M)	[°C]
V_{volume} : Volume interne de la cellule	[m ³]
Z : Altitude de lieu	[km]
ω : Angle horaire	[°]
φ : Latitude de lieu	[°]
δ : Déclinaison géocentrique	[°]
γ : Hauteur du plan	[°]
β : Inclinaison du plan par rapport au plan horizontal	[°]
α : Azimut du plan	[°]
δ : Profondeur de pénétration	[m]
λ_a : Conductivité thermique apparente	[W/m °C]
$\varphi_{r\ i-j}$: Flux de chaleur échangé par rayonnement entre les surfaces i, j	[W]
ε_i : Emissivité de paroi (i)	[-]
α_j : Absorption de rayonnements thermiques de paroi (j)	[-]
$\Phi_{convection\ air-paroi}$: Flux de chaleur échangé entre l'air et les faces intérieures	[W]
$\Phi_{convection\ ambient-paroi}$: Flux de chaleur échangé entre l'air ambiant et les faces extérieures	[W]
$\Phi_{r\ ext-paroi}$: Echange radiatif des parois extérieures avec le sol et le ciel	[W]
φ_x : Flux de chaleur par conduction à l'abscisse (x)	[W]
φ_{x+dx} : Flux de chaleur par conduction à l'abscisse (x+dx)	[W]
φ_{st} : Flux de chaleur stocké dans l'élément (dx)	[W]
ρ_i : Masse volumique de la couche (i)	[kg/m ³]
ρ_{air} : Masse volumique de l'air	[kg/m ³]

BIBLIOGRAPHIE

1. N. Morel et E. Gnansounou, “Energétique du bâtiment”, Cours section de Génie Civil, 4ème/5ème année, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse Septembre 2007.
2. Y. Jannot, “Thermique Solaire”, Cours, Ecole des Mines Nancy, France, Mars 2011.
3. K. Gairaa et S. Benkacali, “Modélisation numérique des irradiations globales et diffuses au site de Ghardaïa”, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1129 – 136, Unité de Recherches Appliquées en Energies Renouvelables, Alger 2008.
- 4 D. Medjelekh, “Impact de l’inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment -Cas de l’habitation de l’époque coloniale à Guelma-”, Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2006.
5. S.M.A. Bekkouche, “Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires”, Thèse de Doctorat en physique, Université aboubakr belkaïd de Tlemcen, 2009.
6. P. Bessemoulinet, J. Oliviéri, “Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette”, Revue La Météorologie 8^e série n° 31, France, septembre 2000.
7. F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, A. Recioui, “A contribution in the actualization of win dmap of Algeria”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011) 993–1002, ELSEVIER, www.elsevier.com/locate/rser
8. C. Langlais, S. Klarsfeld, “Isolation thermique à température ambiante. Propriétés”, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie énergétique, BE 9 861, France.
9. P.MEUKAM, “Valorisation de brique de terre stabilisée en vue de l’isolation thermique de bâtiments”, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise et l’université de Yaoundé I, Cameroun Décembre/2004.
10. Office de Protection et de Promotion de la Vallée du M’Zab, “La construction par la pierre”, Brochure, Ghardaïa, 2012.
11. Chambre de Métiers et de l’artisanat, “Les matériaux de construction”, Brochure, Hauts-de-Seine, France.

- 12.** H. Mohamed Lamine, "Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction", Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- 13.** S. Abdulac, "L'utilisation des techniques et matériaux locaux", Rapport d'étude, Section des Constructions et Equipements Educatifs, Division des Politiques et de la Planification de l'Education UNESCO, ED-85/WS-67, Octobre 1985.
- 14.** B.AGGUERABI, "Architecture : de la terre a la terre - l'avenir salubre", Alger, 11 Fév.2009. www.agguerabi.com/pdf/architecte-agguerabi-architecture-de-terre.
- 15.** J-C. Borel, "Etude justificative de la définition des zones climatiques en Algérie".
- 16.** M. AL-MUKHTAR, K. BECK, "Caractéristiques d'un mortier à base de chaux et de poudre de roche pour la restauration des monuments", Rencontre Internationale sur le Patrimoine Architectural Méditerranéen, Meknès, Maroc, Septembre 2005.
- 17.** Office de Protection et de promotion de la Vallée du M'Zab, "La chaux Matériau de construction et de restauration", Brochure.
- 18.** "Architecture Traditionnelle Méditerranéenne, Maison de la vallée du M'Zab, Algérie", Rapport d'étude, programme MEDA de l'Union Européenne, Mai/2001.
- 19.** Y. Jannot, "Transferts thermiques", Cours, Ecole des mines Nancy, France 2011.
- 20.** H. Ezbakhe, S. Bousad, A. El Bakkour, T. Ajjoul et A. El Bouardi, "Etude Thermique de la Terre Stabilisée au Ciment Utilisée en Construction au Nord du Maroc", Revue des énergies renouvelables : Journées de Thermique, 69-72, Alger 2011.
- 21.** "Systématique Ghardaïa", Document, Unité recherches et études géologiques, Entreprise Nationale de Développement et de Recherche Industriels des Matériaux de Construction.
- 22.** M. Dahli et R. Toubal, "Matériau isolant thermique à base de déchets ménagers et oléicoles", Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°2, 339 – 346, Alger 2010.

- 23.** A. Kemajou et L. Mba, "Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude Application au cas des régions climatiques camerounaises", Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°2, 239 – 248, Alger 2011.
- 24.** N. Kadri, et A. Mokhtari, "Contribution à l'étude de réhabilitation thermique de l'enveloppe du bâtiment", Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°2, 301 – 311, Alger 2011.
- 25.** A. Mokhtari, K. Brahim et R. Benziada, "Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2, 307 – 315, Alger 2008.
- 26.** C.S.T.B, "Impact de l'inertie thermique des bâtiments sur le confort d'été", Rapport d'étude, France 2004.
- 27.** Centre d'étude sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, "Le Confort Thermique", Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de constructions publiques, Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer, France, juillet 2003.
- 28.** Agence De l'Environnement Et de la Maitrise de l'Energie ADEME, "Améliorez le confort de votre maison, l'isolation thermique", Brochure, Mars 2008, France
- 29.** DTR, "Notice technique pour l'application du règlement de la construction en Algérie, exigences hygrothermiques".
- 30.** S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz et A. Cheknane, "Etude par simulation de l'effet d'isolation thermique d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa", Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2, 281 – 292, Alger 2007..
- 31.** R. Guechhati, M.A. Moussaoui, A. Mezrhab, et A. Mezrhab, "Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments. Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda", Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°2, 223 – 232, Alger 2010.
- 32.** D. Medjelekh, "Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure", Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°2, 265 – 273, Alger 2010.
- 33.** S. Ben Amor, R. Fathallah, N. Boukadida et L. Guedri, "Contribution à l'étude des transferts thermiques dans un local muni d'une structure à isolation variable", Revue des Energies Renouvelables 79 – 88, CISM'08, Oum El Bouaghi 2008.

- 34.** M. Chabi et M. Dahli, "Le ksar de Tafilelt dans la vallée du M'Zab : une expérience urbaine entre tradition et modernité",
www.umc.edu.dz/vf/images/patrimoine/axe3/CHABI-ARTICLE.pdf
- 35.** CSTB, "Concilier efficacité énergétique et acoustique dans le bâtiment",
Brochure, Réf Y09 12 000049, France.
- 36.** T. Salomon, "Architecture solaire et conception climatique des bâtiments",
www.maison-passive.be/resources/SolaireClimatique.pdf, 2000.
- 37.** Bertrand DELCAMBRE, Johann ZIRNGIBL," Matériaux de construction innovants pour une construction durable (en France)", CSTB, Conférence franco-allemande, Efficacité énergétique des bâtiments, Décembre 2007.
- 38.** Azzedine BELHAMRI, Karima REBAHI, Ali CHIKHI, Lyes BENNAMOUN,
"Etude et Caractérisation des Transferts Thermiques dans des Matériaux de Construction Locaux", 13èmes Journées Internationales de Thermique, Albi, France 2007.
- 39.** F. Cron and C. Inard, "Analysis of hybrid ventilation performance in France",
Eighth International IBPSA Conférence, Eindhoven, Netherlands, 11-14 Août, 2003, LEPTAB, Université de La Rochelle, Pôle Sciences et Technologie, France.
- 40.** 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, université de la Rochelle, UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur, 2003, France.