



Contribution à la Modélisation et au Développement des Systèmes de Chauffage Solaire à Usage Individuel

Abdellatif Oudrane

► To cite this version:

Abdellatif Oudrane. Contribution à la Modélisation et au Développement des Systèmes de Chauffage Solaire à Usage Individuel. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Polytechnique d'Oran Maurice Audin, 2018. Français. <NNT : >. <tel-02022473v2>

HAL Id: tel-02022473

<https://hal.science/tel-02022473v2>

Submitted on 3 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

République Algérienne Démocratique et Populaire
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique**

Ecole Nationale Polytechnique d'Oran - Maurice Audin



ENP - ORAN - MA

Département de Génie Mécanique

Thèse pour l'Obtention du Titre de Doctorat Es-Science en Génie Mécanique

Option : Génie Mécanique

Thème:

**Contribution à la Modélisation et au
Développement des Systèmes de Chauffage
Solaire à Usage Individuel**

Soutenu le 05 Mars 2018

Préparée par : Mr. OUDRANE Abdellatif

Devant le jury composé de :

 MADANI Yessad Habib	Prof. (ENP-Oran)	Président
 AOUB Benaoumer	Prof. (ENP-Oran)	Encadreur
 ZEGHMATI Belkacem	Prof. (Univ. Perpignan)	Co-encadreur
 HAMOUDA Messaoud	Prof. (URER'MS Adrar)	Examineur
 NEHARI DRISS	Prof. (Univ. Ain Temouchent)	Examineur
 ZANOUN Abdelouahab	Prof. (C. Univ. Elbayadh)	Examineur

Année Universitaire : 2017/ 2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère,

Mon père,

Mes frères,

Ma femme.

Remerciements

Je tiens à témoigner de mon respect et ma profonde gratitude aux Professeurs AOURL B., ZEGHMATI B., et CHESNEAU X., qui ont été toujours disponibles pour me faire profiter de leurs expériences et leurs compétences, pour mener à bien l'élaboration de ce travail.

Je désire exprimer également ma reconnaissance au Président du Jury Pr. MADANI Y.H. (ENPO-MA) et aux Membres du Jury Pr. HAMOUDA M. (UREM'MS Adrar), Pr. NEHARI D. (Univ. Ain Temouchent) et Pr. ZANOUN A. (C. Univ. ELBayaydh) d'avoir bien accepté l'examinations de ce modeste travail.

J'adresse aussi mon affection et ma reconnaissance, à tous mes collègues, mes frères et mes sœurs, et une marque d'appréciation très spéciale s'adresse à mes parents qui m'ont soutenu moralement et partagé en silence mon épreuve.

Résumé

- **Résumé**

Ce travail de thèse porte sur la modélisation numérique du comportement thermique d'une enceinte habitable située dans une région désertique afin d'améliorer le confort thermique. Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé dans une première partie par la modélisation des transferts thermiques de l'écoulement de l'eau chaude dans une canalisation de section rectangulaire. Pour cela, nous avons résolu numériquement les équations de Navier-Stokes et de la chaleur qui régissent cet écoulement. Ces équations ont été discrétisées par une méthode implicite aux différences finies. Le système d'équations algébriques ainsi obtenu a été résolu par les algorithmes de Gauss et Thomas. Ensuite, dans une seconde phase, nous avons résolu l'équation de la conduction dans la dalle en béton à l'aide de la même méthodologie que pour celle de l'écoulement. Les transferts de chaleur qui se déroulent dans un modèle d'habitat assimilé à une cavité parallélépipédique ont été également modélisés en utilisant les bilans thermiques établis au niveau de chaque paroi de l'habitat et en tenant en compte des échanges thermiques par convection, conduction et rayonnement. Les modèles ainsi élaborés ont été validés en utilisant des données climatiques mesurées récemment au niveau de l'unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien d'ADRAR. Une analyse détaillée des différents paramètres géométriques et thermiques sur le confort thermique dans l'habitat a été présentée et discutée. Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont montré que la matière de construction utilisée actuellement dans cette région représente une valeur ajoutée à la surchauffe indésirable au niveau de cette région désertique. Des recommandations pour améliorer le confort thermique au niveau de cette zone sont proclamées à la fin de ce travail.

Mots-clés : Densité du flux solaire ; Enveloppe habitable ; Méthode nodale ; Echange thermique ; Différences finies ; Région désertique.

- **Abstract**

This thesis work focuses on the numerical modeling of the thermal behavior of a living space located in a desert region in order to improve thermal comfort. To achieve this goal, we first began by modeling thermal transfers of the hot water flow in a pipe of rectangular cross-section. To this end, we solved numerically the Navier-Stokes equations and the heat that governs this flow. These equations have been discretized by an implicit finite difference method. The system of algebraic equations thus obtained was solved by the Gauss and Thomas algorithms. Then, in a second part, we solved the conduction equation in the concrete slab using the same methodology as for the flow. The heat transfers taking place in a habitat model assimilated to a parallelepipedic cavity were also modeled using thermal balances established at each wall of the habitat and taking into account convective, conduction and radiation heat exchanges. The models developed in this way were validated using climatic data recently measured at the renewable energy research unit in the Saharan medium of ADRAR. A detailed analysis of the different geometric and thermal parameters on thermal comfort in the habitat was presented and discussed. The results obtained in this thesis have shown that the construction material currently used in this region represents a value added to undesirable overheating in this desert region. Recommendations for improving thermal comfort in this area are proclaimed at the end of this work.

Keywords: Density of solar flux; Habitable envelope; Nodal method; Heat exchange; Finite differences; Desert region.

. الملخص

يرتكز هذا العمل المنجز في إطار رسالة الدكتوراه على النمذجة والمحاكات العددية للسلوك الحراري لمحيط سكني يقع في منطقة صحراوية جنوب الجزائر بالضبط منطقة أدرار. ان الهدف الأساسي من هذه الدراسة العددية هو تحسين مردودية الراحة الحرارية داخل هذا الحيز السكني. ولتحقيق هذا الهدف، بدأنا في الجزء الأول من هذه الرسالة بنمذجة تدفق الماء الساخن في انابيب بلاطة التدفئة الشمسية (PSD)، والتي اعتبرناها انابيب مستطيلة الشكل كفرضية لتسهيل عملية النمذجة العددية. ولهذا، حلنا عدديا معادلات (Navier-Stokes) التي تتحكم في حركة هذا التدفق والحرارة التي ينقلها. من اجل هذا الغرض تم استنباط وتحليل المعادلات التفاضلية بواسطة طريقة الفرق المحدود الضمني (MDF)، ثم حل نظام المعادلات الجبرية التي تم الحصول عليها من بواسطة خوارزميات (Gauss et Thomas). ثم في المرحلة الثانية قمنا بحل معادلة التدفق الحراري في خرسانة بلاطة التدفئة وهذا باستخدام نفس المنهجية كما في تدفق الماء الساخن داخل الانابيب. بالاضافة الى هذا قمنا بنمذجة كل التحولات الحرارية التي تجري في الحيز السكني والذي يشبه في منظوره إلى حد بعيد تجويف متوازي الأضلاع. حيث اعتمدنا على مبادئ التوازنات الحرارية في كل جدار من جدران الحيز السكني مع الأخذ بعين الاعتبار كل أصناف التبادلات الحرارية. في نهاية المطاف حيث تم التحقق من النتائج المتحصل عليها من المحاكات العددية وذلك بمقارنتها بنتائج ميدانية مقاسة وحدة البحث في الطاقات المتجددة للأوساط الصحراوية بولاية أدرار. قدمنا في عرض هذه الرسالة تحليلا مفصلا لمختلف المعلمات الهندسية والحرارية التي لها تأثير مباشر على الراحة الحرارية في الحيز السكني في ظل الظروف المناخية الخاصة بهذه المنطقة الصحراوية الجافة. وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الرسالة أن مواد البناء المستخدمة حاليا في هذه المنطقة تمثل قيمة مضافة إلى ارتفاع درجة الحرارة غير المرغوب فيها في هذه المنطقة الصحراوية. حيث اعطينا توصيات هامة لتحسين الراحة الحرارية في هذا المجال في نهاية هذا العمل.

كلمات المفتاح: كثافة التدفق الشمسي؛ حيز سكني؛ طريقة العقد. التبادل الحراري؛ فروق محددة. الصحراء.

Table des Matières

Dédicace	ii
Remerciements	iii
Résumé	v-vii
Table des matières	viii-xi
Nomenclatures	xiii-xvi
Liste des figures	xvii-xxii
Liste des tableaux	xxiii-xxiv
Introduction générale	01-06

Chapitre N° 01 **Le Gisement Solaire dans la Région d'Adrar**

I.1 Introduction	08
I.2 Gisement solaire	08
I.3 Repérage et mesures d'ensoleillement	09
I.3.1 Repérage du soleil dans le ciel	09
I.3.1.1. Longitude λ	09
I.3.1.2 Latitude ϕ	10
I.3.1.3 Déclinaison solaire δ	10
I.3.1.4 Angle horaire ω (ou AH)	11
I.4 Les cinq temps	12
I.4.1 Temps universel	12
I.4.2 Temps solaire local	12
I.4.3 Equation du temps	13
I.4.4 Temps solaire vrai	14
I.5 Mouvement apparent	14
I.5.1 Hauteur angulaire	15
I.5.2 Azimut	15
I.6 Orientation d'un plan	16
I.6.1 Angle d'incidence des radiations	17
I.7 Système de coordonnées équatoriales	17
I.8 Mesure des rayonnements solaires	18
I.8.1 Fraction d'insolation σ	18
I.8.2 Rayonnement solaire direct	18
I.8.3 Rayonnement solaire diffus	19
I.8.4 Rayonnement solaire réfléchi	19
I.8.5 Rayonnement solaire global sur un plan incliné	20
I.9 Région désertique d'Adrar	20
I.10 Concept de la foggara	21
I.11 Situation géographique de la région	22
I.12 Caractères climatologie de la région	23
I.12.1 Températures	23
I.12.2 Pluviométrie	23
I.12.3 Vent	23
I.13 Architecture domestique de la région	24
I.14 Paramètres météorologiques	25
I.15 Outils de mesures des données climatiques	29
I.16 Conclusion	30
Références bibliographies	31

Chapitre N° 02

Etat de l'Art

II.1.3 L'énergie solaire thermodynamique	33
II.1.4 Applications thermiques de l'énergie solaire	33
II.2 Exploitation de l'énergie solaire dans le chauffage de l'habitat	34
II.2.1 Principe du chauffage solaire	34
II.3 Chauffage solaire de l'habitat	35
II.3.1 Systèmes de chauffage solaire de l'habitat	36
II.3.1.1 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'air chaud	36
II.3.1.2 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'eau chaude	37
II.3.1.3 Chauffe-eaux solaires individuels et collectifs	37
II.3.1.3.1 Système direct	37
II.3.1.3.2 Système à circulation forcée	38
II.3.1.3.3 Systèmes solaires combinés pour le chauffage d'habitat	38
II.3.1.3.4 Système solaire combiné (SSC) avec stockage de l'eau de chauffage en ballon	39
II.3.1.3.5 Plancher solaire direct	39
II.4 Comportement thermique d'un habitat dans un milieu désertique	40
II.4.1 Cadre conceptuel de la problématique	41
II.5 L'art de la modélisation du système du chauffage d'habitat	42
II.5.1 Etude du confort thermique dans l'habitat	43
II.5.1.1 Notion de confort thermique	43
II.5.1.2 Paramètres affectant le confort thermique	44
II.5.1.3 Paramètres liés à l'ambiance extérieure	45
II.5.1.4 Paramètres liés à l'individu	46
II.5.1.5 Paramètres liés aux gains thermiques internes	47
II.6 Approche adaptative du confort thermique	48
II.6.1 Facteurs d'inconfort thermique	48
II.7 Évaluation du confort thermique	50
II.7.1 Température de l'air ambiant (T_a)	50
II.7.2 Température opérative (T_{op})	50
II.7.3 Outils graphiques d'évaluation du confort thermique	51
II.7.3.1 Diagramme bioclimatique	51
II.7.3.2 Diagramme de Givoni	53
II.8 Conclusion	54
Références bibliographiques	55

Chapitre N° 03

Formulation de la Problématique

III.1 Introduction	58
III.2 Modélisation d'écoulement du fluide dans la canalisation de la dalle	58
III.2.1 Description du problème physique	58
III.2.2 Hypothèses simplificatrices	59
III.2.3 Equations régissant le champ hydrodynamique, thermique et massique	59
III.2.4 Conditions initiales et les conditions aux limites	61
III.2.5 Variables adimensionnelle des équations locales	62
III.2.6 Nombres sans dimension caractérisant le phénomène	62
III.3 Physique de la diffusion thermique au sein de la dalle chauffante	63
III.3.1 Diffusion thermique d'un solide	63
III.3.2 Bilan thermique de la diffusion	63
III.3.3 Diffusion de chaleur dans la dalle chauffante de l'habitat	64
III.3.3.1 Conditions initiales et aux limites	65
III.3.3.2 Conditions initiales	65

III.3.3.3 Conditions aux limites	65
III.4 Modélisation numérique des transferts thermiques dans l'habitat	66
III.4.1 Modèle physique de l'enveloppe habitable étudié	66
III.4.2 Stratégie de la modélisation des échanges thermiques de l'enveloppe habitable	67
III.4.3 Physique des transferts thermiques dans l'habitat	68
III.4.4 Paramètres mise en jeu dans le transfert thermique au sien de l'habitat	69
III.4.4.1 Transfert de chaleur par conduction	69
III.4.4.2 Transfert de chaleur par convection naturelle	70
III.4.4.3 Transfert de chaleur par rayonnement	70
III.4.4.4 Coefficients de transfert de chaleur par conduction	71
III.4.4.5 Coefficients de transferts de chaleur par rayonnement	72
III.5 Modélisation de l'évolution journalière de la température ambiante et du rayonnement solaire global	75
III.6 Conclusion	75
Références bibliographiques	76

Chapitre N° 04

Méthodologie et Traitement Numérique

IV.1 Introduction	78
IV.2 Concept de la résolution numérique	78
IV.2.1 Méthode des différences finies	79
IV.2.2 Maillage du domaine de calcul	80
IV.2.3 Maillage non-structuré	81
IV.3 Méthode nodale	81
IV.4 Traitement numérique d'écoulement du fluide dans la canalisation rectangulaire	82
IV.4.1 Organigramme de traitement numérique de l'écoulement du fluide	84
IV.5 Traitement numérique de la diffusion thermique dans la dalle chauffante	85
IV.5.1 Equations adimensionnelles de la conduction thermique dans la dalle en béton	85
IV.5.2 Organigramme de traitement numérique de conduction thermique dans la dalle en béton	86
IV.6 Traitement numérique des transferts thermiques dans l'enveloppe habitable	89
IV.6.1 Analyse nodale et échange par conduction et couplage avec les échanges superficiels	89
IV.6.2 Organigramme de traitement numérique de la densité du flux solaire incident sur les différentes façades de l'enveloppe habitable	97
IV.7 Traitement numérique du couplage thermique Fluide/Dalle	98
IV.7.1 Organigramme du couplage thermique (Fluide/Dalle)	100
IV.8 Conclusion	102
Références bibliographies	103

Chapitre N° 05

Résultats et Discussions

V.1 Introduction	104
V.2 Validation de la théorie et confrontation avec l'expérience	106
V.2.1 Densités moyennes du flux solaire horaire	106
V.2.2 Evolution de la densité du flux solaire des parois inclinée.	107
V.3.1 Conditions aux limites pour la canalisation de la dalle en béton	115
V.3 Investigation de l'écoulement du fluide dans la canalisation de la dalle	115
V.3.2 Evolution du profil de la vitesse du fluide caloporteur dans la canalisation de la dalle	116
V.4 Investigation de la diffusion thermique au sien de la dalle chauffante	118
V.4.1 Evolution du profil de la température de la dalle en béton	118
V.4.2 Effet de la conductivité thermique sur l'évolution de la température au sien du béton	120

V.5 Gisement solaire des journées typiques choisies dans la région d'Adrar	122
V.5.1 Données astronomiques et météorologiques des journées typiques considérées	122
V.5.2 Hauteur angulaire et l'azimut soleil dans la journée typique	123
V.5.3 Evolution de l'angle horaire du soleil dans la journée typique	124
V.5.4 Analyse de la densité du flux solaire pour une façade horizontal (toiture de l'habitat)	124
V.5.5 Évolution des angles d'incidences des rayonnements solaires pour une façade inclinée	126
V.5.6 Analyse de la température de l'environnement externe de l'habitat	127
V.5.7 Analyse comparative entre les températures externes des différentes façades de l'habitat avec celles de la station radiométrique	129
V.5.8 Analyse de la densité du flux solaire moyen de la journée typique	130
V.6 Analyse des différents échanges thermiques d'une enveloppe habitable	134
V.6.1 Evolution de la température de l'environnement interne de l'habitat	134
V.6.2 Effet de l'épaisseur des parois du béton sur l'évolution de la température interne	139
V.6.3 Effet de l'émissivité du béton sur la température de l'environnement chauffé	140
V.6.4 Influence du coefficient d'absorption du béton sur la température de l'ambiance interne	141
V.6.5 Evolution du profil de la température moyenne de l'environnement externe de l'habitat	141
V.6.6 Evolution de la température de l'ambiance interne en fonction du matériau de construction de l'enveloppe	146
V.7 Investigation du confort thermique de l'environnement habitable	150
V.7.1 Effet des déperditions thermiques par renouvellement d'air	150
V.7.2 Analyse de l'effet des déperditions par infiltration d'air sur l'environnement interne de l'enveloppe	150
V.7.3 Effet des déperditions thermiques par le degré d'étanchéité sur le chauffage interne	151
V.7.4 Evolution de la température d'espace chauffé en fonction de la variation du facteur d'exposition au vent	152
V.7.5 Effet du nombre d'occupants de l'enveloppe habitable sur l'évolution de la température interne	153
V.8 Evolution de la température opérative et la température du confort thermique dans l'enveloppe habitable	154
V.8.1 Evolution de la température opérative pour les quatre journées typiques saisons de l'année	154
V.8.2 Evolution horaire de la température du confort thermique de l'enveloppe habitable	155
V.9 Vérification de la température du confort à l'aide du diagramme de Givoni	156
V.9.1 Positionnement sur le diagramme bioclimatique (Givoni) de la température du confort d'un habitat en fonction des différents matériaux de construction	156
V.9.2 Positionnement de température du confort sur le diagramme bioclimatique (Givoni) pour les journées typiques des quatre saisons de l'année	157
V.10 Conclusion	158
Références bibliographies	160
Publications internationales	161
Travaux scientifiques	

Nomenclatures

a	Azimut soleil	-
C_p	Chaleur spécifique	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$
C_w	Chaleur spécifique	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$
D_0	Durée du jour astronomique	h
D_{te}	Diamètre extérieur	m
D_{ti}	Diamètre intérieur	m
D	Rayonnement diffus	$W.m^{-2}$
Ep	Epaisseur de paroi	m
Et	Correction du temps	min
e_k	épaisseur	m
e_i	Coefficient d'exposition au vent	-
F_{surf-i}	Facteur de forme géométrique	-
f	Coefficient de frottement	-
G	Rayonnement global	$W.m^{-2}$
g	Accélération de la gravité	$(9.8m.s^{-2})$
Gr	Nombre adimensionnel de Grashof	-
h_t	Coefficient d'échange convectif entre le fluide et la dalle	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h	Hauteur du soleil	(°)
$h_{c,sup}$	Coefficient d'échange convectif de la surface supérieure	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$h_{c,inf}$	Coefficient d'échange convectif de la surface inférieure	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_{c-ext}	Coefficient d'échange convectif avec l'air extérieur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$I_{b\beta}$	Rayonnement solaire direct	$W.m^{-2}$
I_{bn}	Intensité du rayonnement direct	$W.m^{-2}$
I_{dn}	Rayonnement solaire diffus	$W.m^{-2}$
$I_{r\beta}$	Rayonnement solaire réfléchi	$W.m^{-2}$
I_{gh}	Rayonnement solaire global reçu par une surface horizontale	$W.m^{-2}$
J	Jour type	-
L^3	Longueur caractéristique	m
L	Longueur	m
M_b	Nombre des pas d'espace dans le Domain du béton	-
M_f	Nombre des pas d'espace dans le Domain du fluide	-
Nu	Nombre de Nusselt	-
$\dot{m}$	Débit massique	$g.s^{-1}$
N	Nombre du jour écoulés depuis 1 ^{ère} Janvier	-
P	Pression	Pas
P_{tr}	Quantité de la chaleur transportée par le fluide	W
Pr	Nombre de Prandtl	-
P_{dis}	Puissance dissipée	$W.m^{-2}$

$q_{conv,inf}$	Quantité de la chaleur du à la convection par la surface inférieure	W
$q_{conv,sup}$	Quantité de la chaleur du à la convection par la surface supérieure	W
$Q_{émis}$	Quantité de la chaleur émise par un corps	W
Q_{absor}	Quantité de la chaleur absorbée par un corps	W
$q_{r1→2}$	Quantité de la chaleur échangée de la surface 1 vers la surface 2	W
Q_s	Source de la chaleur	W
Re	Nombre adimensionnel de Reynolds	-
R_t	Résistance thermique du tube	$m^2.k.W^{-1}$
R_{ft}	Résistance thermique du fluide	$m^2.k.W^{-1}$
Ra	Nombre adimensionnel de Rayleigh	-
S	Surface	m^2
S_0	Durée d'insolation maximale	h
S_{petite}	surface de la petite ouverture d'introduction de l'air dans l'espace chauffé	m^2
S	Durée d'insolation	h
T_1	Température d'entre de fluide	°C
T_2	Température de sortie de fluide	°C
T_e	Température d'entre de fluide	°C
T_m	Température moyenne de la dalle en béton	°C
$T_{s,sup}$	Température de la surface supérieure	°C
$T_{s,inf}$	Température du plancher	°C
T_{air}	Température de l'air	°C
T_{ciel}	Température de ciel	°C
T_{int}	Température interne	°C
T_{VC}	Température de la voute céleste	°C
T_{COF}	Température du couplage par la surface supérieure de fluide	°C
T_{COB}	Température du couplage par la surface inférieure de la dalle en béton	°C
Temps – G	Temps global du calcul	s
T_{sol}	Température du sol	°C
T_{amb}	Température de l'ambiance	°C
TSV	Temps solaire vrai	h
TSL	Temps solaire local	h
TSL	Temps solaire local	h
TU	Temps universel	h
t	Temps	s
T_a	Température d'ambiance	°C
T_{OP}	Température opérative	°C
T_{mrt}	Température moyenne radiante	°C

U	Vitesse d'écoulement	m.s^{-1}
V_i	Débit volumique de l'air	l/s
$V_{\min}$	Débit d'air minimal	l/s
V_{vent}	Vitesse moyenne du vent	m.s^{-1}
V	Volume	m^3

Caractères grecs

α	Coefficient d'absorption	-
β	Coefficient de dilatation	-
β	Angle inclinaison	(°)
Δy	Pas d'espace pour la fraction (oy)	m
Δx	Pas d'espace pour la fraction (ox)	m
Δt	Ecart du temps	s
δ	Déclinaison	(°)
ε	Facteur émissivité	-
ε_i	Facteur correctif selon la hauteur volume chauffé	-
η_{50}	Taux horaire de renouvellement d'air	$1/\text{h}$
φ	Latitude de lieu	(°)
λ	Longitude de lieu	(°)
λ_i	Conductivité thermique de matériau (i)	$\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$
λ_f	Conductivité thermique du fluide	$\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$
λ_t	Conductivité thermique du tube	$\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	$\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
ν	Viscosité cinématique	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
ρ	Masse volumique	Kg.m^{-3}
<i>Albédo</i>	Coefficient de réflexion du sol	-
σ	Constante de Stefan-Boltzman	$\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-4}$
ω	Angle horaire	(°)

Abréviation

PS	Paroi Sud
PN	Paroi Nord
PE	Paroi Est
PO	Paroi Ouest
PF	Paroi fond
PSI	Paroi Sud interne
PNI	Paroi Nord interne
PEI	Paroi Est interne
POI	Paroi Ouest interne
PFPI	Paroi fond plafond interne
PSE	Paroi Sud externe
PNE	Paroi Nord externe
PEE	Paroi Est externe
POE	Paroi Ouest externe
PFPE	Paroi fond plafond externe

Clo	Unité d'isolement vestimentaire, $1\text{Clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C.W}^{-1}$
URAER	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables
TRANSY	Logiciel commercial de la simulation numérique de thermique solaire
ERRTCO	Erreur relative de la température du couplage
EDP	Equation de dériver partielle
DFSA _i	Densité du flux solaire absorbée
CESI	Chauffe-eau solaire individuel
SSC	Systèmes solaires combinés
ECS	L'eau chaude sanitaire
PSD	Plancher solaire direct

Liste des figures

Fig. I.1	: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	08
Fig. I.2	: Les coordonnées terrestres d'un lieu donné	09
Fig. I.3	: Les fuseaux horaires dans le monde	10
Fig. I.4	: Mouvement et rotation de la terre	10
Fig. I.5	: Repère équatorial	12
Fig. I.6	: Graphe des variations annuelles de l'équation du temps	13
Fig. I.7	: Trajectoire solaire diurne en zone intertropicale, en zone tempérée et en zone polaire	14
Fig. I.8	: Azimut du soleil pour des journées typiques de l'année	15
Fig. I.9	: Angle d'inclinaison d'un capteur solaire	16
Fig. I.10	: Repérage du soleil dans le ciel	17
Fig. I.11	: Rayonnement direct, diffus et global	19
Fig. I.12	: Carte de localisation de la Wilaya d'Adrar, Algérie	20
Fig. I.13	: Système d'irrigation « El_foggara » dans la région d'Adrar	21
Fig. I.14	: Frontières de la région d'Adrar	22
Fig. I.14	: Tracé de la carte des vents à 10 mètres d'altitude	23
Fig. I.15	: Photos représentatives de la nouvelle architecture de la région d'Adrar	24
Fig. I.16	: Photos représentatives de l'ancienne architecture de la région d'Adrar	24
Fig. I.17	: Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale	25
Fig. I.18	: Evolution horaire de la densité du flux solaire (Adrar/17-07-2014)	26
Fig. I.19	: Evolution horaire de la température ambiante et l'humidité relative (Adrar/17-07-2014)	27
Fig. I.20	: Evolution horaire de la vitesse moyenne du vent (Adrar/17-07-2014)	27
Fig. I.21	: Photo de la station radiométrique de l'URER'MS d'Adrar : (a) mesure le rayonnement global horizontal, (b) mesure le rayonnement	29

incliné suivant la latitude, (c) mesure le rayonnement avec une inclinaison variable.

Fig. II.1	: Principe du mur trombe	36
Fig. II.2	: Système à thermosiphon	37
Fig. II.3	: Système à circulation forcée	38
Fig. II.4	: Schéma de fonctionnement d'un SSC	38
Fig. II.5	: Schéma descriptif de fonctionnement de système PSD	39
Fig. II.6	: Description du modèle de l'enveloppe habitable étudiée	41
Fig. II.7	: Description physique d'une enveloppe habitable avec une dalle chauffante	42
Fig. II.8	: Valeurs exprimées en "Clo" des tenues vestimentaires	45
Fig. II.9	: Gains thermiques internes d'un espace	46
Fig. II.10	: Diagramme bioclimatique	51
Fig. II.11	: Zones de confort selon le diagramme bioclimatique de Givoni	52
Fig. III.1	: Représentation schématique du modèle	59
Fig. III.2	: Illustration d'un élément de volume du domaine solide considéré	63
Fig. III.3	: Schématisation du modèle physique de l'élément de la dalle en béton	65
Fig. III.4	: Descriptif du modèle physique de l'enveloppe habitable étudié	66
Fig. III.5	: Descriptions de deux plans perpendiculaires	73
Fig. III.6	: Descriptions de deux plans parallèles	73
Fig. IV.1	: Grilles de calcul par la méthode des différences finis	80
Fig. IV.2	: Eléments de maillage du domaine de calcul en (i, j) de 2D	80
Fig. IV.3	: Organigramme de la modélisation numérique de l'écoulement du fluide dans les tubes de la dalle de l'enveloppe habitable.	85

Fig. IV.4	: Organigramme de la modélisation numérique de la diffusion thermique au sein de la dalle en béton de système PSD	87
Fig. IV.5	: Discrétisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé	88
Fig. IV.6	: Discrétisation spatiale d'un mur et modèle de conduction	89
Fig. IV.7	: Schéma descriptif des différents modes d'échanges thermiques dans l'enveloppe habitable	92
Fig. IV.8	: Schématisation des différents types d'échanges thermiques d'une paroi de l'habitat	93
Fig. IV.8	: Organigramme de la modélisation de la densité du flux solaire des parois de l'enveloppe habitable	96
Fig. IV.9	: Maillage à l'interface Fluide-Dalle	98
Fig. IV.10	: Organigramme du couplage thermique (Fluide/Dalle)	100
Fig. V.1	: Evolution horaire des densités des flux solaires global, direct et diffus sur le plan horizontal de la journée typique.	107
Fig. V.2	: Évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade inclinée Est (90°) en fonction du temps solaire pour les trois mois sélectionnés de l'année 2014.	108
Fig. V.3	: Évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade inclinée Nord (90°) en fonction du temps solaire pour les trois mois sélectionnés de l'année 2014.	109
Fig. V.4	: Évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade inclinée Sud (90°) en fonction du temps solaire pour les trois journées typiques des trois mois sélectionnés de l'année 2014.	110
Fig. V.5	: Evolution des densités des flux solaires incidents pour les différentes parois de l'enveloppe habitable localisée à Adrar au cours de la journée typique.	111
Fig. V.6	: Évolution des profils des vitesses du fluide caloporteur dans le canal en fonction du pas d'espace.	116
Fig. V.7	: Variation de la température en fonction de Y.	119
Fig. V.8	: Evolution de la température de la dalle chauffante pour différentes catégories du béton	119
Fig. V.9	: Evolution de la température de la dalle en fonction du pas	120

d'espace de l'épaisseur de la dalle pour différentes valeurs de conductivité thermique du béton.

Fig. V.10	: Evolution de la hauteur du soleil en fonction du temps.	123
Fig. V.11	: Variation de l'azimut du soleil en fonction du temps.	123
Fig. V.12	: Evolution de l'angle horaire du soleil en fonction du temps.	124
Fig.V.13	: Evolution de la densité du flux solaire global horizontal au cours de la journée solaire typique.	125
Fig.V.14	: Evolution des trois composantes de la densité du flux solaire horizontal au cours de la journée typique.	125
Fig. V.15	: Evolution horaire des cosinus des angles d'incidences des rayonnements solaires pour les parois (a) Sud, (b) Nord, (c) Est et (d) Ouest de l'enveloppe habitable dans la journée solaire typique.	127
Fig.V.16	: Evolution de la température ambiante externe au cours de la journée typique.	128
Fig.V.17	: Evolution de la température ambiante externe au cours des quatre jours types choisis au milieu de chaque saison de l'année considérée.	128
Fig. V.18	: Evolution de la température mesurée de l'air externe par rapport aux températures des différentes façades externes de l'habitat.	130
Fig. V.19	: Evolution horaire de la densité du flux solaire pour les quatre journées typiques des saisons de l'année considérée.	132
Fig.V.20	: Evolution de la température de l'air interne de l'enveloppe habitable en fonction du temps local (TLG).	134
Fig. V.21	: Evolution des températures de l'ambiance interne et des façades internes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local au cours de journée typique de la saison d'été.	135
Fig. V.22	: Evolution des températures de l'ambiance interne et des façades internes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison d'hiver.	136
Fig. V.23	: Evolution des températures de l'ambiance interne et des façades internes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison du printemps.	137
Fig. V.24	: Evolution des températures de l'ambiance interne et des façades	138

internes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison de l'automne.

Fig. V.25	: Evolution de la température de l'ambiance interne de l'habitat en fonction du temps local pour différentes saisons de l'année 2014.	139
Fig.V.26	: Evolution de la température de l'ambiance interne durant la journée typique en fonction de l'épaisseur des parois de l'habitat.	140
Fig.V.27	: Evolution de la température de l'air de l'ambiance interne durant la journée typique en fonction de l'émissivité du béton.	140
Fig.V.28	: Evolution de la température interne en fonction du coefficient d'absorption du matériau de construction.	141
Fig.V.29	: Evolution de la température des façades externes de l'enveloppe habitable en fonction du temps local.	142
Fig.V.30	: Evolution des températures de l'ambiance externe et des façades externes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison d'été.	143
Fig.V.31	: Evolution des températures de l'ambiance externe et des façades externes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local au cours de la journée typique de la saison d'hiver.	144
Fig.V.32	: Evolution des températures de l'ambiance externe et des façades externes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison du printemps.	145
Fig.V.33	: Evolution des températures de l'ambiance externe et des façades externes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et du toit de l'enveloppe habitable en fonction du temps local au cours de la journée typique de la saison de l'automne.	146
Fig.V.34	: Evolution des températures de l'ambiance interne des façades internes des parois de l'habitat pour différents matériaux de construction.	148
Fig.V.35	: Evolution de la température de l'espace chauffé en fonction du temps pour deux différentes vitesses du vent (renouvellement d'air) au cours de la journée typique.	150
Fig.V.36	: Evolution de la température de l'espace chauffé en fonction du taux d'infiltration d'air dans l'enveloppe habitable au cours de la journée typique.	151

Fig.V.37	: Variation de la température de l'ambiance interne en fonction de degré d'étanchéités de l'habitat pour la journée typique.	152
Fig.V.38	: Evolution de la température de l'espace chauffé en fonction du facteur d'exposition au vent.	153
Fig.V.39	: Evolution des températures pour différents nombres d'occupants à l'intérieur de l'enveloppe habitable en comparaison avec les températures des ambiances externes et interne en fonction du temps local pour la journée typique du 17 Juillet 2014.	154
Fig.V.40	: Evolution de la température opérative de l'habitat pour différentes saisons de l'année 2014 en fonction du temps local.	155
Fig.V.41	: Evolution de la température du confort thermique et de l'espace chauffé au sien de l'enveloppe habitable pour différentes catégories de matériaux de construction dans la journée typique de l'année 2014.	156
Fig.V.42	: Positionnement des températures du confort thermique au sien de l'enveloppe habitable pour différents matériaux de construction au cours de la journée typique (17 Juillet 2014).	157
Fig.V.43	: Positionnement des températures du confort thermique de l'enveloppe habitable pour les journées typiques choisies des quatre saisons de l'année 2014.	158

Liste des Tableaux

Tableau I.1	: Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique	09
Tableau I.2	: Les quatre points essentiels dans la cours de la terre	11
Tableau II.1	: Paramètres influents sur la sensation de confort thermique	43
Tableau II.2	: Valeurs de référence de température de l'air	44
Tableau II.3	: Valeurs de α en fonction de la vitesse d'air	49
Tableau III.1	: Variables adimensionnelle des équations locales	62
Tableau III.2	: Propriétés thermiques de l'eau à 20°C sous pression constante	63
Tableau III.3	: Propriétés thermiques du béton	65
Tableau III.4	: Paramètres thermiques et géométriques de l'enveloppe habitable	66
Tableau IV.1	: Expression des coefficients de transfert convectifs	91
Tableau IV.2	: Propriétés thermiques de l'air atmosphérique à 25°C	95
Tableau V.1	: Comparaison des résultats obtenus numériquement avec les données mesurées expérimentalement : Cas de densité du flux solaire global incident sur un plan horizontal au cours de la journée du 17 juillet 2014.	112
Tableau V.2	: Comparaison des résultats obtenus numériquement avec les données mesurées expérimentalement : Cas de densité du flux solaire direct de plan horizontal au cours de la journée du 17 juillet 2014.	112
Tableau V.3	: Comparaison des résultats obtenus numériquement avec les données mesurées expérimentalement : Cas de densité du flux solaire diffus de plan horizontal au cours de la journée du 17 juillet 2014.	113
Tableau V.4	: Données du calcul pour la grille de la canalisation de la dalle en béton (NI et NJ sont respectivement les indices des nœuds sur l'axe des abscisses et des ordonnées).	115
Tableau V.5	: Données de la grille du calcul dans la dalle chauffante	118
Tableaux V.6	: Données astronomiques pour les journées typiques sélectionnées.	123
Tableaux V.7	: Données des densités du flux solaire mesurées au cours des quatre	131

journées typiques des saisons de l'année considérée.

Tableau : V.8 : Propriétés thermo-physiques des matériaux de constructions. 147

Introduction Générale

• Introduction générale

Au cours des dix dernières années, nous avons assisté à un véritable engouement autour des actions en faveur de la haute qualité environnementale. En effet, le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire est l'un des secteurs le plus consommateur d'énergie [1]. Cependant, les bâtiments et les maisons individuelles sont conçus pour jouer un rôle de filtre thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. La forme, l'orientation, l'agencement et la composition des éléments constitutifs déterminent les caractéristiques de ce filtre. Les ambiances intérieures ne répondant pas toujours aux exigences du confort des occupants, la réponse de l'habitat est corrigée par des appareils de climatisation ou du chauffage agissant comme des sources contrôlées de chaleur ou de froid, et ayant parfois un effet sur les conditions de confort [2].

Dans les milieux bâtis, le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le concepteur doit apporter les réponses nécessaires. La définition du confort thermique est ainsi d'une grande importance pour le bâtiment afin de lui permettre d'atteindre ses objectifs de fonctionnalité tout en justifiant, à tort ou à raison, l'installation des équipements d'ambiance (chauffage, ventilation et climatisation) [3].

Dans le cadre de changement climatique où la limitation des gaz à effet de serre est essentielle, et devant la menace d'épuisement des combustibles fossiles, le défi présenté est de trouver des sources d'énergie innovantes pour répondre à une nécessité toujours plus pressante. En effet, les énergies renouvelables peuvent être des solutions en raison de leur abondance [4].

Une énergie renouvelable est une source d'énergie considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain.

Les énergies renouvelables se présentent sous cinq usages :

- **La biomasse** désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par combustion (par exemple : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agrocarburant).
- **L'énergie éolienne** est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie provenant du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur.
- **La géothermie** désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

- **L'énergie hydraulique** est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.
- **L'énergie solaire** pourrait permettre de répondre à une grande partie de la demande mondiale en électricité. Il existe trois gammes :
 - Le solaire photovoltaïque demande l'utilisation exclusivement de très grandes surfaces (contrairement à des éoliennes installées sur des surfaces agricoles). Le stockage par batterie étant très limité, cette technologie n'est envisageable qu'à petite échelle sur des surfaces comme les toitures, et des abris de parking qui ne sont pas valorisables autrement.
 - Le solaire thermique sans concentration permet de fournir de l'eau chaude sanitaire. C'est une bonne alternative au chauffe-eau électrique. Mais ce n'est pas une solution très efficace à grande échelle pour le chauffage ou la production d'électricité.
 - La gamme thermodynamique à concentration semble aujourd'hui être une alternative plausible pour répondre à la problématique mondiale de production d'énergie. Elle n'émet pas de gaz à effet de serre. Les technologies disponibles pour le stockage de chaleur peuvent permettre de garantir la production électrique en l'absence de soleil pendant certaines périodes.

De plus, les modèles décrivant le comportement thermodynamique des maisons individuelles permettent de mieux comprendre et concevoir l'enveloppe passive en vue d'obtenir les moindres consommations énergétiques et un plus grand confort, de prédire la réponse de l'habitat à des situations extrêmes afin de dimensionner les installations et, enfin, d'aider à mettre au point de nouveaux systèmes ou stratégies de contrôle [3].

La problématique abordée dans cette thèse est de rationaliser le recours à des énergies coûteuses et de concevoir des enveloppes habitables plus confortables ce qui nous a amené à chercher de mieux connaître et de bien maîtriser le comportement du processus de conception et de gestion des maisons en se basant sur l'optimisation énergétiques des paramètres géométriques et thermiques influençant le confort dans l'habitat. Ceci représente l'objectif principal de cette thèse.

Pour atteindre cet objectif, nous nous intéresserons ici aux méthodes de calcul qui permettent de modéliser les locaux habitables ; il s'agit de prévoir et expliquer l'évolution de leur comportement thermique et les conséquences qui en découlent en réponse aux excitations que lui appliquent leur environnement climatique naturel et les exigences thermiques que nous devons tenir en considérations.

Autrement dit, la détermination des consommations énergétiques dans une maison individuelle peut se limiter à des bilans de masse et d'énergie. De plus, la connaissance du champ de température et l'allure des mouvements d'air sont nécessaires pour effectuer une étude plus poussée [5]. D'ailleurs ces données permettent d'évaluer le confort thermique des occupants (problèmes de renouvellement d'air, forts gradients de température, courants d'air, stratification) [5].

D'un autre côté, le local habitable est un système complexe où de nombreux phénomènes physiques interviennent. Ils sont généralement traduits par des équations résolues à l'aide des méthodes numériques. Cette démarche constitue l'élaboration de modèles qui contribuent étroitement au développement de la connaissance et de la quantification des phénomènes. Le modèle le plus connu, trouvant notamment son application dans le domaine des locaux habitables, est certainement celui de Joseph Fourier [6]. Il caractérise les transferts de chaleur par conduction dans un milieu solide. La première proposition de résolution, suggérée par Joseph Fourier, est basée sur une méthode de séparation des variables. Depuis ce premier modèle de paroi, les expériences de Joseph Fourier sur la conduction des anneaux en fers ont été remplacées par des suivis du comportement thermique des enveloppes habitables entières [7].

Le choix de la région d'Adrar est basé sur l'effet que l'Algérie en particulier et les pays de l'Afrique du Nord en général, ont un grand potentiel solaire [7]. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites de l'Agence Spatiale Allemande (ASA), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de $1200 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de $800 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ limités à la partie sud de l'Europe [7]. Suite à une évaluation satellites fait par l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit de $169\,000 \text{ TWh/an}$ pour le solaire thermique, 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien. Cette énergie renouvelable présente à l'heure actuelle une réponse aux problèmes environnementaux et aux émissions de gaz à effet de serre qui menace la planète entière et une solution durable à la crise actuelle de l'énergie, avec l'abaissement du prix du baril de pétrole, ce qui place les énergies renouvelables (hydraulique, éolien, photovoltaïque, solaire thermique, géothermie, biomasse, biogaz et pile à combustible), au centre des débats portant sur l'environnement, et plus généralement le développement durable [7].

La présente thèse est structurée en cinq grandes chapitres en plus d'une conclusion générale et des perspectives.

Le premier chapitre est consacré pour la présentation des notions fondamentales sur le gisement solaire. Les principales formules générales exprimant les rayonnements solaires sur un plan d'orientation quelconque sont également présentées.

Dans le second chapitre, nous présentons une synthèse biographique sur les différents types des systèmes de chauffage les plus connus dans les locaux habitables. Nous avons mis l'accent sur la technique du chauffage solaire à usage individuel, et en particulier la technique de plancher solaire direct qui fait l'objet de ce travail de thèse.

Le troisième chapitre est dédié pour le développement des bases théoriques de la modélisation des systèmes de chauffage solaire à usage individuel. En effet, la modélisation des différents échanges thermiques au sein de l'habitat est bien détaillée dans ce chapitre.

Le quatrième chapitre est réservé pour l'évaluation du confort thermique et la validation des modèles utilisés. Une comparaison des valeurs obtenues par la simulation numérique avec les valeurs mesurées par la station radiométrique de l'unité de recherche en énergies renouvelables au milieu saharien d'Adrar est présentée à la fin de ce chapitre.

Le cinquième et le dernier chapitre est réservé à l'interprétation des résultats obtenus par la simulation numérique, à savoir, la densité du flux solaire incident sur les différentes façades de la maison individuelle, la température restituée par chaque façade de l'enveloppe habitable et la température du confort thermique à l'intérieur de l'enceinte étudiée.

En fin, une conclusion sur les résultats obtenus avec des perspectives sur les travaux à développer sont présentées à la fin de ce manuscrit.

Références bibliographiques

- [1] I. Traore, Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois, thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré – Nancy Université en Mécanique et Energétique, 2011.
- [2] G. Lefebvre, Comportement thermique dynamique des bâtiments : Simulation et analyse, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, B 2 041 – 1.
- [3] B. Moujalled, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, thèse de doctorat de Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'Ecole Nationale des Tavaux Publics de l'Etat, Département Génie Civil et Bâtiment (DGCB), URA CNRS 1652, 2007.
- [4] A. Kaddour, Modélisation et simulation d'un concentrateur parabolique solaire à moteur Stirling en vue d'un rendement optimal, thèse de doctorat de l'Université université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2013.
- [5] E. Wurtz, Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérauliques dans le bâtiment en environnement orienté objet, thèse de doctorat école nationale des Ponts et Chaussees, 2010.
- [6] J. Berger, Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle, thèse de docteur de l'université de Grenoble, Spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat, 2014.
- [7] S. Ben Touba, L'énergie renouvelable en Algérie et l'impact sur l'environnement, Journal of Scientific Research, Université de Bechar N° 0 vol. 1 (2010).

Chapitre 01

Le Gisement Solaire dans la Région d'Adrar

La quantité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde.

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques modèles fondamentaux pour la modélisation du gisement solaire pour les sites d'implantations des locaux habitables. Ces modèles de rayonnement solaire permettent de prendre en compte les interactions adaptatives entre la position astronomique du soleil au ciel avec la densité du flux solaire incident sur les différents types du plan dans l'environnement.

I.2 Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.1[1].

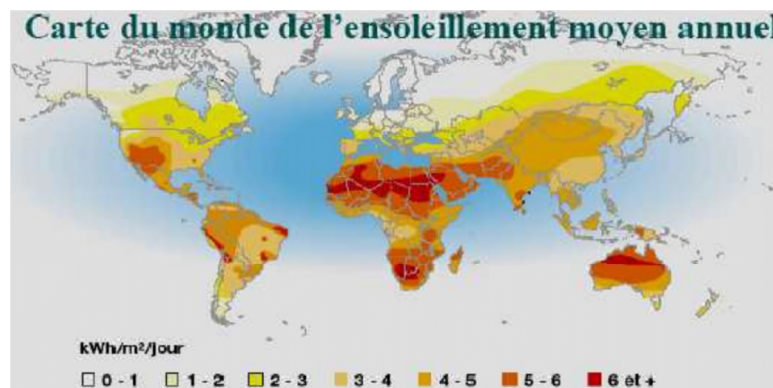


Fig. I.1: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [1].

L'irradiation solaire annuelle sur l'ensemble de la planète au niveau de la mer (754 million de TWh) représente plus de 5 000 fois l'énergie que nous consommons [2]. Sur le long terme (environ 50 ans) le potentiel extractible des différentes sources d'énergie renouvelable pourrait en pratique couvrir la consommation mondiale actuelle : La photosynthèse en premier avec 6 Gtep (70 000 TWh), puis le vent avec 1.7 Gtep (20 000 TWh), l'hydraulique 14 à 20 000 TWh, dont le potentiel théorique mondial est d'environ 40 000 TWh, le solaire installé sur les toits des bâtiments industriels, commerciaux, tertiaires et domestique 0.25 Gtep (2 900 TWh), et la géothermie des couches profondes 0.2 Gtep (2 300 TWh) [2].

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement [1].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1: Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique.

I.3 Repérage et mesures d'ensoleillement

I.3.1 Repérage du soleil dans le ciel

La hauteur du soleil est une donnée principale pour les cause suivantes :

- ✓ Cette hauteur contribue clairement dans les calculs énergétiques.
- ✓ L'installation dans un site donné exige une étude des effets appuyés par l'environnement.

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, appelées cordonnées terrestres, à savoir : sa latitude " φ ", qui est positive dans l'hémisphère Nord, elle est négative dans l'hémisphère Sud, et sa longitude " λ " positive à l'Ouest négative à l'Est (voir Fig. I.2). Le méridien origine, servant à la mesure de la longitude, est celui de Greenwich.

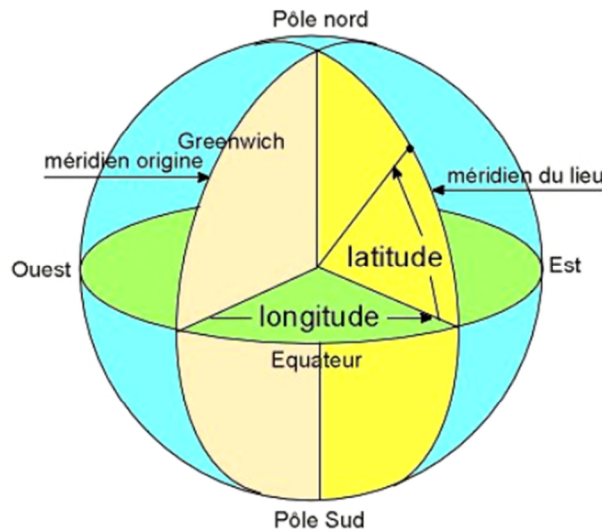


Fig.I.2 : Les coordonnées terrestres d'un lieu donné [3].

I.3.1.1. Longitude λ

Un point à la surface de la terre est localisé par deux coordonnées angulaires : la latitude " φ " et la longitude " λ ". Cette dernière la mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich en Angleterre). Les régions qui sont situées à l'Est sont comptées avec le signe "+". Le grand arc de cercle qui joint le pôle Nord, Greenwich et le pôle Sud s'appelle méridien origine. Il y a 23 méridiens séparés de 15° donnant naissance aux 24 fuseaux horaires (voir Fig. I.3) [4].

Il est à noter que la ligne de modification de date est fixée sur le méridien n° 12 au beau milieu du Pacifique. Quand il est midi le jour ‘‘J’’ à Greenwich, il est minuit du même jour sur la bordure Ouest de la ligne de changement de date et minuit du jour ‘‘J-1’’ sur la bordure Est. Pour le comprendre, il suffit de montrer mentalement la projection cylindrique de la sphère terrestre.

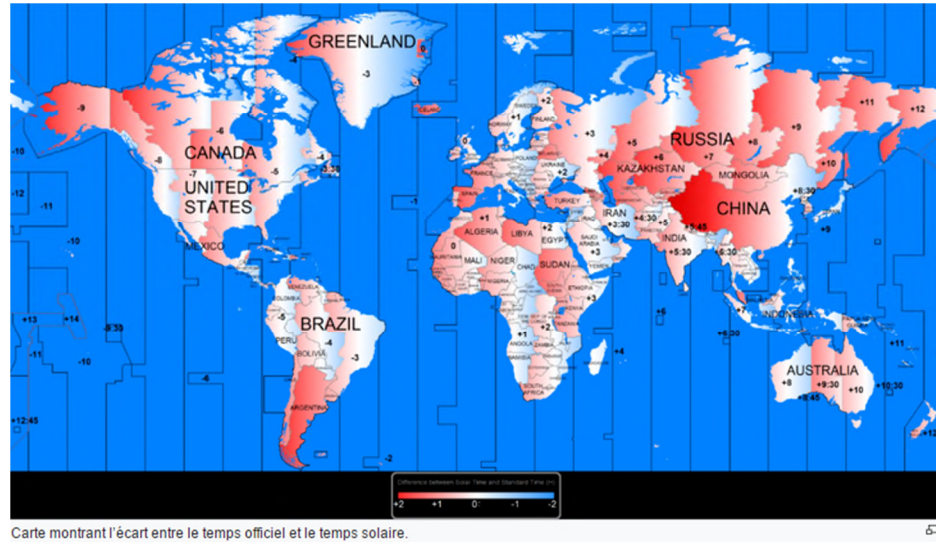


Fig. I.3 : Les fuseaux horaires dans le monde [5].

I.3.1.2 Latitude ϕ

La latitude ‘‘ ϕ ’’ permet de localiser la distance angulaire d’un point arbitraire par rapport à l’équateur. Elle change de 0° à l’équateur à 90° au pôle Nord [6,7].

I.3.1.3 Déclinaison solaire δ

La déclinaison solaire ‘‘ δ ’’ est un angle formé de la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons. La figure I.4 en donne les valeurs notables.

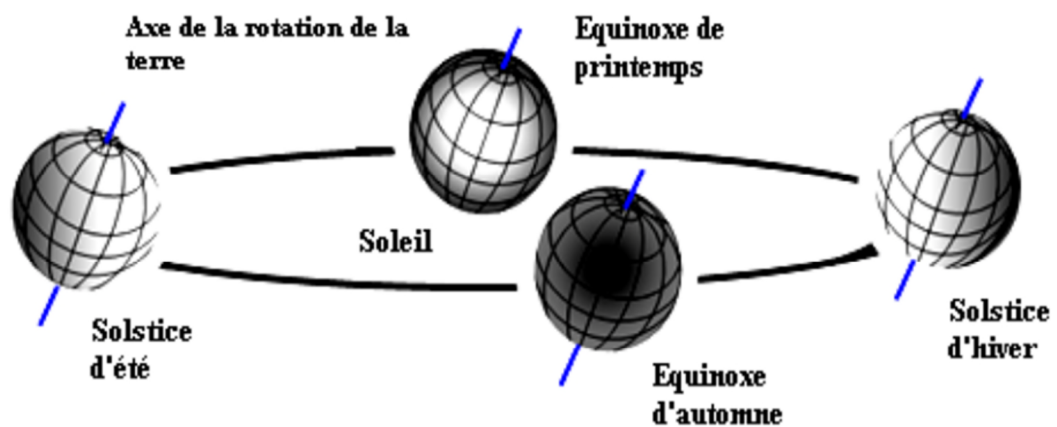


Fig. I.4 : Mouvement et rotation de la terre [8].

Equinoxe de printemps	21 Mars	$\delta = 0$
Solstice d'été	22 Juin	$\delta = +23^{\circ}27'$
Equinoxe d'automne	23 Septembre	$\delta = 0$
Solstice d'hiver	22 Décembre	$\delta = -23^{\circ}27'$
Approche maximale	2 Janvier	Périhélie
Approche minimale	2 Juillet	Aphélie

Tableau I.2 : Les quatre points essentiels dans la cours de la terre [8].

Entre ces 4 points remarquables, “ δ ” prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation :

$$\sin(\delta) = 0.4 \times \sin(t) \quad (\text{I-1})$$

où ;

$$t = N \times \frac{360}{365} \quad (\text{I-2})$$

avec ;

N : Nombre de jours écoulés depuis 1^{er} janvier.

Et :

$$\delta = 23.45^{\circ} \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (N + 284)\right) \quad (\text{I-3})$$

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des équinoxes (0,4°/ jour) alors qu'elle est pratiquement stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver.

I.3.1.4 Angle horaire ω (ou AH)

C'est l'angle entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu [9].

$$\omega = 15 \times (TSV - 12) \quad (\text{I-4})$$

Il peut être aussi défini comme étant l'angle compris entre le méridien origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial (voir Fig. I.5), il mesure la course du soleil dans le ciel [10].

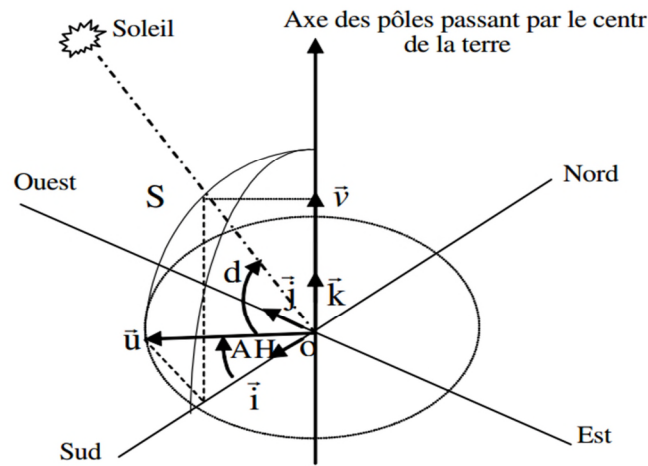


Fig. I.5: Repère équatorial [10].

A chaque heure qui s'écoule correspond un accroissement de l'angle horaire de 15° , soit encore 4 mn de temps par degré de longitude. A la latitude de 45° , une minute de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur. $AH = 90^\circ$ à 18 h (temps solaire vrai "TSV").

I.4 Les cinq temps

I.4.1 Temps universel

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire [10].

$$TL = TU + \text{décalage} \quad (\text{I-5})$$

I.4.2 Temps solaire local

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude. La correction de longitude est donnée par la formule [10]:

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I-6})$$

I.4.3 Equation du temps

Jusqu'en 1964, la mesure du temps était basée sur la rotation de la terre : le jour était défini comme l'intervalle de temps entre deux passages du soleil par le même méridien. Toutefois, les jours solaires ne sont pas égaux, car l'angle "AH" que fait le soleil avec le méridien du lieu ne correspond pas exactement au temps solaire local bien que la terre tourne régulièrement sur elle-même.

En effet, l'expérience montre que les passages du soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas exactement 24 heures d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16 minutes ou un retard de 14 minutes par rapport à 12 heures, selon l'époque de l'année.

Deux facteurs interviennent dans cette variation :

- De l'excentricité de l'ellipse qui décrit la course de la terre autour du soleil, il résulte, d'après la loi de Kepler (loi des aires) que la vitesse orbitale au périhélie (Décembre) est plus grande qu'à l'aphélie (Juin). La terre a donc une variation saisonnière de sa vitesse orbitale qui affecte l'heure de passage du soleil au méridien.
- D'autre part, l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport au plan de l'écliptique introduit une oscillation supplémentaire de la durée du jour solaire.

Cet écart'' Δt '' entre temps solaire local ''TSL'' et temps solaire vrai ''TSV'' est désigné sous le terme d'équation du temps. En plus, le mouvement de la terre consommant de l'énergie à la perte de son énergie cinétique, celle-ci diminue, et des mesures précises ont constaté qu'entre 1900 et 1974, la terre a accumulé 44 secondes de retard dans sa rotation annuelle, ce qui signifie que la durée du jour moyen augmente de 1.6 s par an (voir Fig. I.6).

Nous reprenons l'expression suivante [11] :

$$E_t = 9.87 \times \sin\left(720 \times \left(\frac{N-81}{365}\right)\right) - 7.53 \times \cos\left(360 \times \left(\frac{N-81}{365}\right)\right) - 1.5 \times \sin\left(360 \times \left(\frac{N-81}{365}\right)\right) \quad (I-7)$$

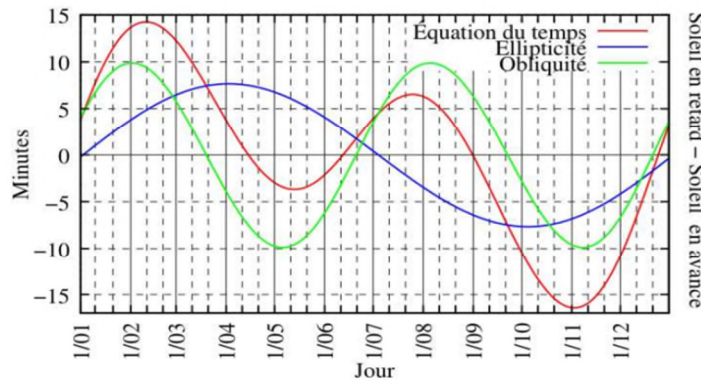


Fig. I.6: Graphique des variations annuelles de l'équation du temps [4].

I.4.4 Temps solaire vrai

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil :

$$TS = TSL + \Delta t \quad (I-8)$$

Pour un lieu de longitude “ λ ”, il existe une correspondance directe entre angle horaire “AH”, temps solaire vrai “TSV”, temps solaire local “TSL” et temps universel “TU” [4] :

$$AH = 15 \times (TSV - 12) \quad (I-9)$$

$$TS = TSL + \Delta t \quad (I-10)$$

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} = 15 \times \left(TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t \right) - 12 \quad (I-11)$$

I.5 Mouvement apparent

La fig. I.7 donne l'aspect de la trajectoire solaire de diurne en zone intertropicale, en zone tempérée et en zone polaire.

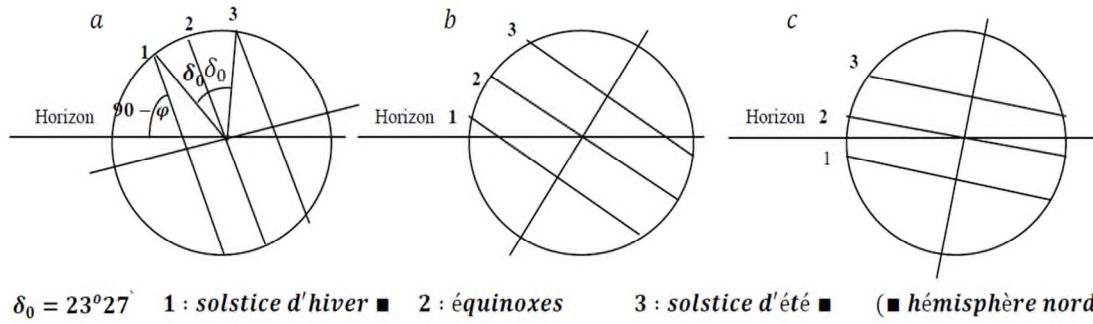


Fig. I.7 : Trajectoire solaire diurne en zone intertropicale, en zone tempérée et en zone polaire [6].

Nous remarquons en particulier :

- Qu'au moment des équinoxes et pour toutes les latitudes le soleil se lève exactement à l'Est et se couche exactement à l'Ouest ;
- Que dans la zone intertropicale, la culmination solaire peut s'effectuer soit au Nord soit au Sud, selon la saison. Ceci ne manquera pas de poser des questions quant à l'orientation des panneaux solaires dans cette zone ;
- Que dans les calottes polaires, le soleil peut rester sous l'horizon pendant plusieurs jours, et six mois plus tard rester visible pendant plus d'un jour.

I.5.1 Hauteur angulaire

C'est l'angle “ h ” formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il est donné par la relation [9, 12] :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \times \sin(\delta) + \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (I-12)$$

où l'on rappelle que " φ, δ, ω ", sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire. De la hauteur h , nous pouvons déduire les heures de lever et de coucher de soleil.

Nous trouvons, en faisant $h = 0$;

$$\cos \omega_0 = -\tan(\varphi) \times \tan(\delta) \quad (\text{I-13})$$

La durée astronomique du jour s'obtient tout aussi facilement en faisant [12, 13] :

$$D_0 = \frac{2}{15} \times \text{Arc cos}(-\tan(\varphi) \times \tan(\delta)) \quad (\text{I-14})$$

I.5.2 Azimut

Il correspond à l'angle formé par la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le méridien du lieu. Il est compté positivement vers l'est et négativement vers l'ouest. Il est donné par la relation suivante [14,13] :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{I-15})$$

L'évolution de l'azimut du soleil pour des journées exceptionnelles de l'année pour un site donné (Alger) est représentée sur la fig. I.8 ci-dessous.

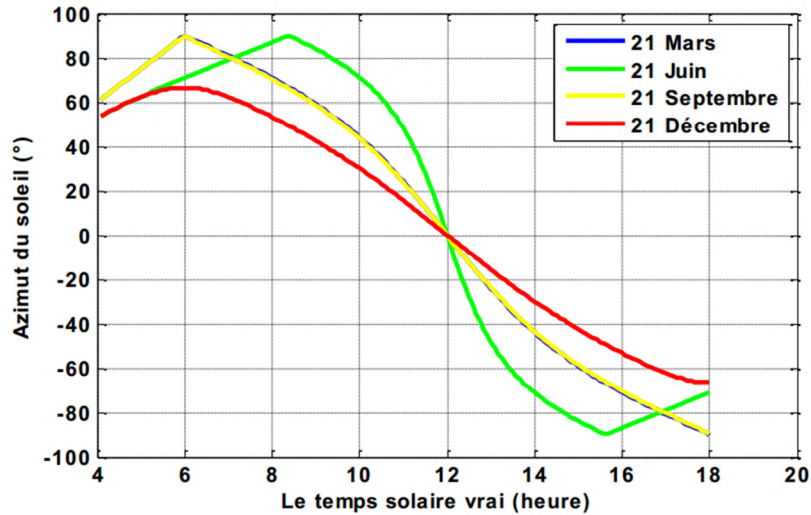


Fig. I.8 : Azimut du soleil pour des journées typiques de l'année [14].

I.6 Orientation d'un plan

Dans les applications solaires, le positionnement de la surface des dispositifs solaire (capteur plan par exemple) est essentiel. Deux angles sont importants à la définition d'un plan quelconque.

➤ L'inclinaison du plan β

Correspond à l'angle que fait le plan de la captation de rayonnement solaire avec l'horizontale. Le calcul de l'angle d'inclinaison se fait en déduisant la déclinaison du soleil de la latitude géographique du lieu de l'emplacement du capteur. En général, il correspond à la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15°. Il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison plus élevé à la latitude de 10 à 15 degrés durant les mois d'hiver lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel (position hivernale). Par contre, en été (position estivale), lorsque la trajectoire du soleil est plus haute dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison moins élevé à la latitude de moins 10 à 15 degrés (voir Fig. I.9). Pour un captage annuel, l'angle d'inclinaison du capteur est fixé à la latitude du lieu.

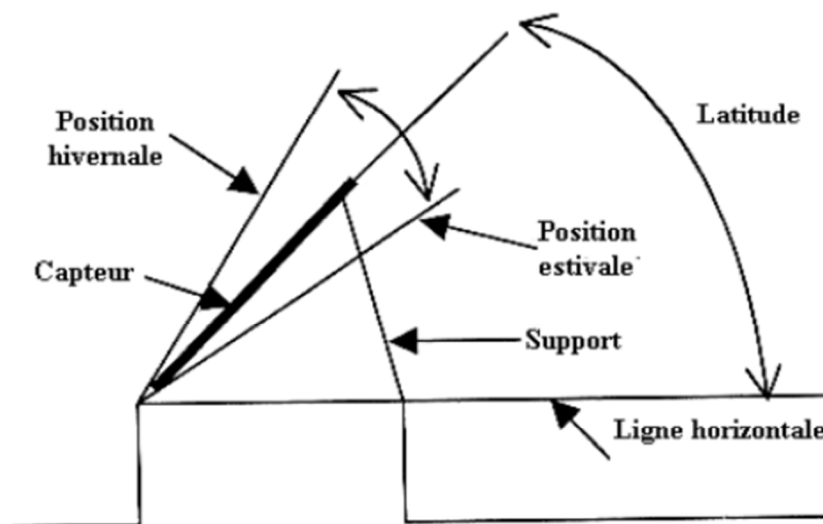


Fig. I.9 : Angle d'inclinaison d'un capteur solaire [14].

I.6.1 Angle d'incidence des radiations

On se propose de calculer l'angle θ entre un rayon arrivant directement du soleil et la normale à un plan quelconque, l'orientation de la surface est précisée par :

- Son inclinaison β : qui est l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.
- Son azimut γ : c'est-à-dire l'angle entre la normale au plan horizontal et le plan méridien (compté comme précédemment, positivement vers l'ouest et négativement vers l'est).

L'angle d'incidence des radiations solaire direct sur une surface inclinée d'un angle " β " Orientée vers le sud ce qui est le cas des capteurs solaires [15, 13].

$$\begin{aligned}
\cos(\theta) = & \sin(\delta) \times \sin(\phi) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\phi) \times \\
& \sin(\beta) \times \cos(\gamma) + \cos(\delta) \times \cos(\phi) \times \cos(\beta) \\
& \times \cos(\omega) + \cos(\delta) \times \sin(\phi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma) \\
& \times \cos(\omega) + \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \sin(\gamma) \times \sin(\omega)
\end{aligned}
\tag{I-16}$$

I.7 Système de coordonnées équatoriales

La position du soleil en un lieu et en un temps donné peut être représentée par la fig. I.10. Le mouvement du soleil sur la sphère céleste consiste à prendre comme centre de la sphère le lieu considéré : le plan équatorial devient l'horizontale du lieu et l'axe de la sphère est la verticale du lieu.

Dans le triangle sphérique Pôle-Soleil-Zénith (P-S-Sm), nous avons les relations suivantes :

Pour la hauteur du soleil :

$$\sin(h) = \sin(\phi) \times \sin(\delta) + \cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \tag{I-17}$$

Pour la trace du soleil dans le plan horizontal qui est donnée par l'azimut soleil a tel que :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(\omega)}{\cos(h)} \tag{I-18}$$

où l'angle horaire $\omega = AH$.

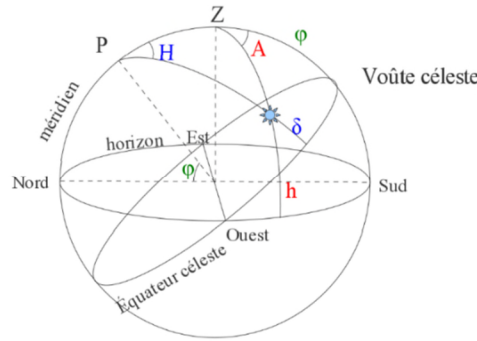


Fig. I.10: Repérage du soleil dans le ciel [8].

I.8 Mesure des rayonnements solaires

I.8.1 Fraction d'insolation σ

C'est le paramètre représentatif des conditions de nébulosité et le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale du ciel au-dessus du territoire correspondant. Cette notion n'étant que descriptive, nous la relierons à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès que nous connaissons les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe et qui s'en déduit par le rapport :

$$\sigma = S/S_0 \quad (I-19)$$

avec S = durée d'insolation mesurée et " S_0 " durée maximale d'insolation.

I.8.2 Rayonnement solaire direct

Le rayonnement solaire direct " $I_{b\beta}$ ", qui dépend de la hauteur du soleil et de l'état du ciel, est calculé à partir de la relation [15] :

$$I_{b\beta} = I_{bn} \times \cos(\theta) \quad (I-20)$$

où " I_{bn} " est l'intensité du rayonnement solaire direct reçu par une surface réceptrice normale aux rayons du soleil. Elle est calculée en fonction de la hauteur h du soleil à partir de la relation :

$$I_{b\beta} = \frac{I_{bn}}{\sin(h)} \quad (I-21)$$

I.8.3 Rayonnement solaire diffus

Le rayonnement solaire diffus " $I_{d\beta}$ " dépend de l'état de clarté du ciel et de la position du soleil dans le ciel. En considérant que l'atmosphère au-dessus du récepteur est isotrope (pas de direction privilégiée du rayonnement diffus), le rayonnement solaire diffus reçu par une surface quelconque est donné par la relation [15] :

$$I_{d\beta} = I_{dh} \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (I-22)$$

dans laquelle: I_{dh} : est la composante diffuse du rayonnement solaire d'une surface horizontale $(1 + \cos(\beta)) / 2$ est un facteur géométrique qui tient compte de la partie de la voûte céleste vue par la surface réceptrice.

I.8.4 Rayonnement solaire réfléchi

Le rayonnement solaire réfléchi par le sol environnant " $I_{r\beta}$ " (voir Fig. I11) est calculé à partir de l'expression suivante :

$$I_{r\beta} = \rho \times I_{gh} \times \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (I-23)$$

dans laquelle: I_{gh} : est le rayonnement solaire global reçu par une surface horizontale, ρ : coefficient de réflexion du sol ou albédo qui varie selon la nature du sol, et dont la valeur moyenne est estimée à $\rho = 0.25$.

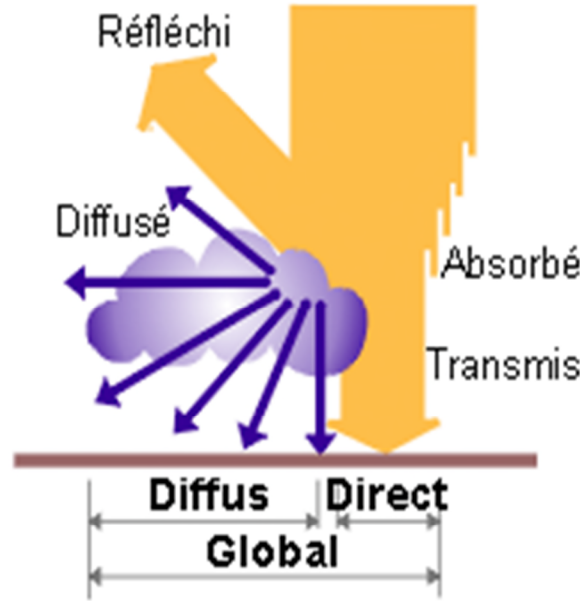


Fig. I.11 : Rayonnement direct, diffus et global [15].

I.8.5 Rayonnement solaire global sur un plan incliné

La somme des trois composantes " $I_{b\beta}$ ", " $I_{d\beta}$ " et " $I_{r\beta}$ " permet d'obtenir, à chaque instant, l'éclairement global d'une surface d'inclinaison et d'orientation quelconques [16, 17] :

$$I_{g\beta} = I_{bh} \times \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} + I_{dh} \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \rho \times I_{gh} \times \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \quad (I-24)$$

La composante diffuse " I_{dh} " est estimée dans le modèle avec une bonne approximation à partir de la relation [16, 17] :

$$I_{dh} = 125 \times [\sin(h)]^{0.4} \quad (I-25)$$

La composante directe " I_{gh} " est déduite par différence entre la composante diffuse :

$$I_{bh} = I_{gh} - I_{dh} \quad (I-26)$$

I.9 Région désertique d'Adrar

Le mot Adrar signifie en langue berbère "montagne". Issue du découpage administratif de 1974, la Wilaya d'Adrar s'étend sur la partie Nord du Sud-Ouest Algérien, couvrant ainsi une superficie de 427.968 km² soit 17,97% du territoire national. Généralement occupée par le Sahara, Adrar est peu peuplée avec une densité de population de 0.75 hab./km² (voir la figure I.12) [18, 19, 20].



Fig. I.12 : Carte de localisation de la Wilaya d'Adrar, Algérie [20].

Zone à vocation hydro agricole, la Wilaya d'Adrar recèle des potentialités valorisables dans le domaine de l'agriculture. Les oasis de cette zone d'étude se distinguent des autres oasis du pays par un système de distribution d'eau creusé dans des formations hydrogéologiques du continental intercalaire. Cette immense réserve d'eau occupe presque la totalité du Sahara septentrional et c'est grâce à la création de cet ingénieux système, la « foggara », qu'un chapelet d'oasis a permis, pendant des siècles, le développement d'une agriculture de subsistance et le maintien des populations dans des espaces désertiques rudes et assez hostiles.

« Il ne pleut pour ainsi dire jamais au pays des fgaguir, et cependant depuis plus de dix siècles, à chaque heure, la moindre foggara soutire plusieurs mètres cubes d'eau souterraine dont le remplacement pluviométrique est manifestement impossible ». (J.Savorin) d'où l'importance de ce système ingénieux qui mérite une grande considération quand à sa préservation [21].

I.10 Concept de la foggara

La foggara la figure est une canalisation souterraine creusée dans la zone de l'exutoire naturel de la nappe du continental intercalaire, elle est constituée de plusieurs puits communiquant successifs de profondeurs variables, réunis à la base par une galerie drainante appelée couramment « N'fad ».

Les eaux mobilisées par les canalisations qui suivent une légère pente sont par la suite drainées par des seguias secondaires pour irriguer les palmeraies. La distance respectée entre deux foggaras ne doit pas être inférieure à deux cents mètres environ sur terrain. Les puits sont séparés l'un de l'autre de six à douze mètres et même plus, une foggara peut atteindre 500 à 600 puits, sa longueur varie de 1 à 15 km, la distance entre les puits n'est pas forcément respectée, l'intervalle qui sépare deux puits s'appelle « N'fad » ou galerie drainante (voir la figure I.13) [21].



Fig. I.13 : Système d'irrigation « El_foggara » dans la région d'Adrar.

I.11 Situation géographique de la région

La région d'Adrar, compte onze (11) Daïra et (28) vingt-huit communes répartie à travers un chapelet de 294 Ksours (localités) éparpillées au niveau de trois régions : le Gourara (Timimoun), le Touat (Adrar) et le Tidikelt (Aoulef). Cette Wilaya est limitée par [21]:

- La Wilaya d'El-Bayedh : au Nord.
- La Wilaya de Bechar : au Nord-Ouest.
- La Wilaya de Tindouf : à l'Ouest
- Le Mali : au Sud.
- La Mauritanie : au Sud-Ouest.
- La Wilaya de Tamanrasset : au Sud-Est.
- La Wilaya de Ghardaia : au Nord-Est.



Fig.I.14 : Frontières de la région d'Adrar.

I.12 Caractères climatologie de la région

La Wilaya d'Adrar est scindée en deux zones climatiques distinctes [21] :

- Une zone semi désertique qui part de Timimoun vers Bechar.
- Une zone désertique partant de Timimoun vers Timiaouine.

I.12.1 Températures

Des écarts de températures considérables ; la température maximale est de plus 45°C en Juin, Juillet et en Aout. En saison hivernale les températures sont souvent basses et peuvent atteindre 12°C à 7°C en Décembre et Janvier.

I.12.2 Pluviométrie

Elle se caractérise par sa faiblesse et son extrême irrégularité, le total annuel est souvent inférieur à 20 mm.

I.12.3 Vent

Afin de déterminer la carte de l'énergie éolienne en Algérie (voir fig.I.14), Mme Kasbadji [22] s'est basé sur des mesures de la vitesse moyenne de 64 stations, 48 d'entre elles appartiennent au continent

Algérien, le reste au nombre de 16, appartient à des pays voisins. Les mesures sont prises à une hauteur de 10 m et durant une période pas moins de 10 ans.

Il a été observé que la vitesse varie entre 1 et 6 m/s, la région la plus ventée a été localisée dans la région Sud-Ouest de l'Algérie.

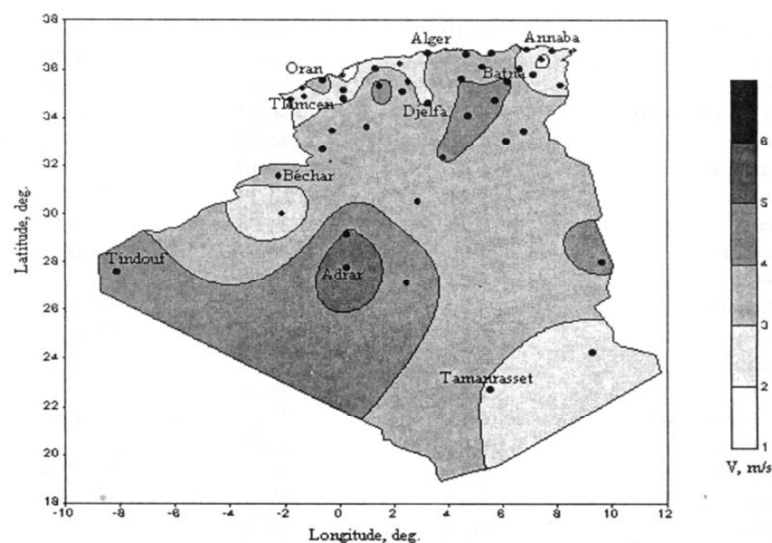


Fig. I.14: Tracé de la carte des vents à 10 mètres d'altitude [23].

I.13 Architecture domestique de la région

La terre crue, matière disponible partout dans la planète, fut le matériau universel privilégié et le plus facile à manipulé par l'être humain pour se faire un abri pendant plusieurs millénaires. Au niveau mondial, le parc bâti en terre crue abrite aujourd'hui plus d'un tiers de la population du globe (Zerhouni et Guillaut, 2001) [24]. Ce matériau, baptisé respectueux de l'homme et de l'environnement, est parfaitement recyclable. Il assure par ses caractéristiques le confort thermique, phonique et hygrométrique et présente une commodité économique avantageuse. Partout à travers le monde, les peuples bâtissent encore en terre, en apportant à chaque fois des améliorations à cet usage naturel.

L'Algérie, cette vaste étendue territoriale a connu une architecture de terre diversifiée selon la diversité des zones climatiques. La conception domestique de la région d'Adrar, au Sud-Ouest du Sahara, diffère de celle d'Alger, la capitale, ou celle de la vallée de M'zab à Ghardaia, au bas Sahara.

Le modelage de la terre permet une réelle diversité de langage architectural et plastique où s'expriment les pulsions créatives les plus profondes (Aggerabi, 2009) [24]. Malheureusement depuis les inondations de 2009, l'utilisation de ce matériau est bannie, pour être remplacée par le ciment, vu comme symbole de modernité et de promotion sociale.

Le présent article dévoilera les spécificités spatiales de la maison du Tidikelt, ses procédés de constructions ancestraux, les causes qui ont conduit à leurs déclin ainsi que les tentatives de leur mise en valeur.

La photo de la figure I.15, présente la nouvelle architecture dans la région d'Adrar qui permet à base béton armé son isolation thermique.



Fig. I.15 : Photos représentatives de la nouvelle architecture de la région d'Adrar.

Par contre, la photo de la figure I.16 présente l'ancien architecture de cette région et permet une isolation thermique à base d'argile. Ce dernier a joué le rôle d'une matière d'isolation thermique contre l'excès des rayonnements solaires.



Fig. I.16 : Photos représentatives de l'ancien architecture de la région d'Adrar.

I.14 Paramètres météorologiques

Les Paramètres météorologiques de la région la région d'Adrar où l'installation du chauffage solaire sera installée, contribuent d'une manière considérable sur sa performance. En effet la maîtrise de l'évolution et de la variabilité des paramètres météorologiques du site permettra d'avoir une vue globale et claire sur les périodes optimales du chauffage.

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 9h/j et peut arriver jusqu'à 14h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 10h/j en période estivale [25].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie comme l'indique la figure. I.17.

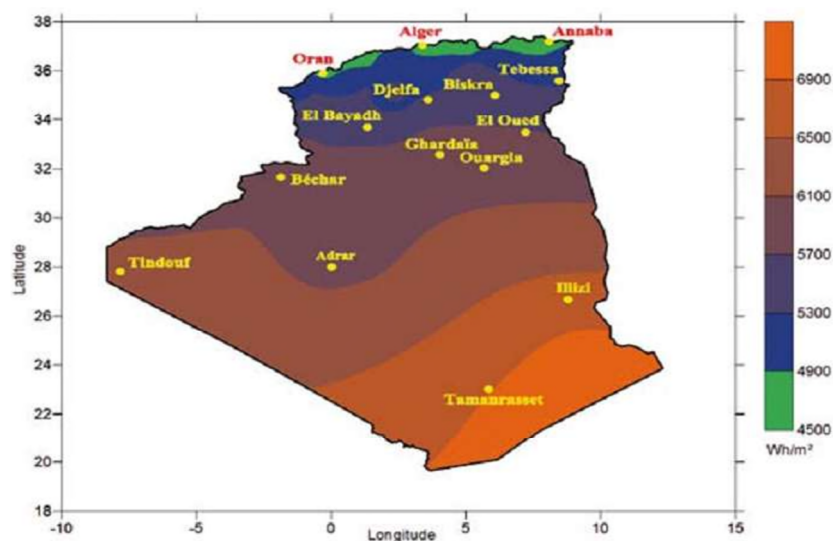


Fig. I.17 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale [25].

La figure I.18 donne les évolutions horaires des flux solaires global, direct et diffus incidents sur un plan horizontal dans la région d'Adrar. Ces évolutions de la densité du flux solaire ont été mesurées durant la journée du 17 Juillet 2014, par une station radiométrique implantée dans l'Unité de Recherche des Energies Renouvelables aux Milieux Sahariens (URER'MS) d'Adrar.

On constate que l'évolution horaire de la composante du flux solaire global incident sur le plan horizontal domine les évolutions horaires autres composantes du flux solaire telles que : la composante directe et la composante diffuse. Ainsi que nous avons remarqué que cette évolution est liée totalement avec l'orientation du plan et aussi la course du soleil dans la journée.

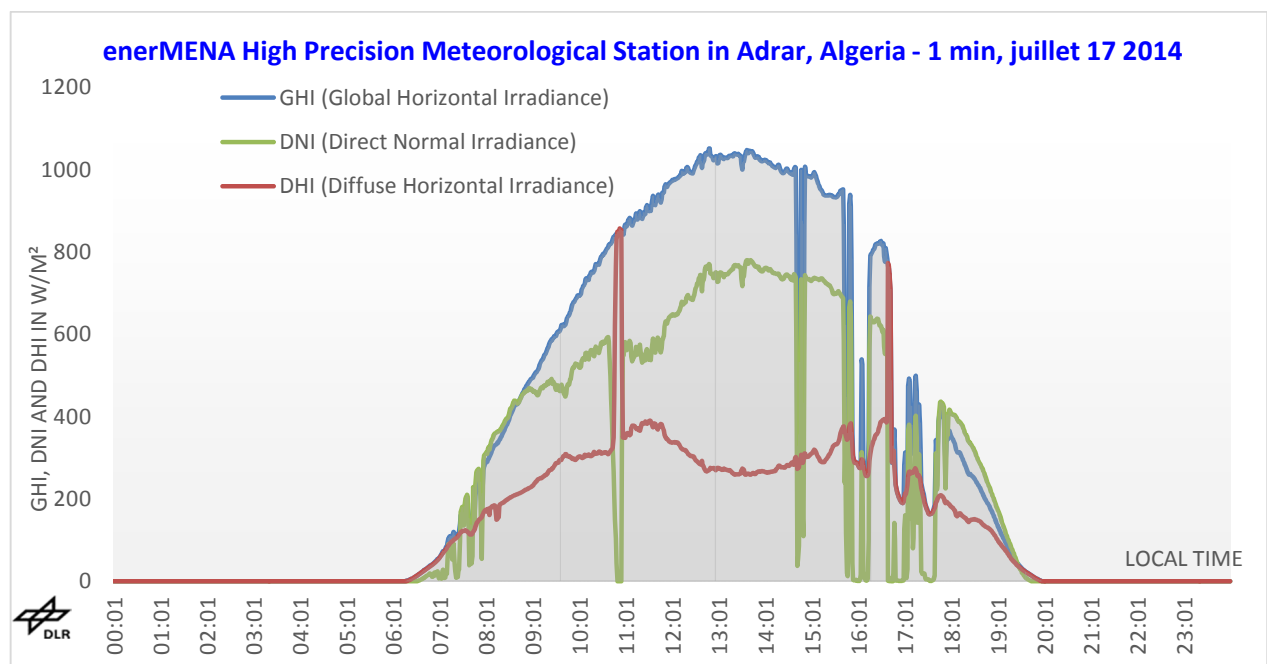


Fig. I.18 : Evolution horaire de la densité du flux solaire (Adrar/17-07-2014) [26].

La figure I.19 représente l'évolution horaire de la température moyenne de l'ambiance extérieure et l'humidité relatif pour une journée typique dans le mois de juillet. On constate que, la température de l'ambiance extérieure entre 15h00 à 16h00 est visiblement plus grande que celle des périodes avant midi et même à midi-pile et surtout plus grand par rapport à la période nocturne. Cette différence est due à l'effet de la course du soleil durant une journée dans la saison d'été qui peut atteindre 48 °C vers 15h30. En effet, on remarque une légère présence d'humidité durant toute la journée presque nulle à partir du 07h00 du matin.

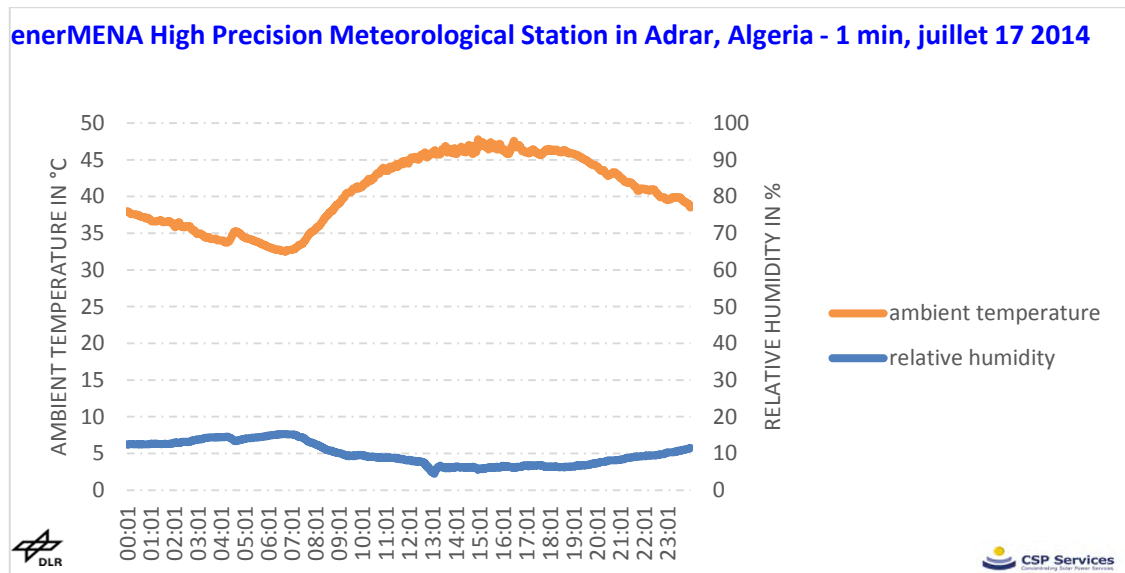


Fig. I.19 : Evolution horaire de la température ambiante et l'humidité relative (Adrar/17-07-2014) [26].

La distribution horaire des vitesses du vent représente un indicateur pour le potentiel éolien. Sa connaissance permet l'estimation de l'énergie éolienne disponible sur le site. La figure I.20 présente la distribution des fréquences des vitesses moyennes mesurées pour une journée donnée en terme de pourcentage pour le site d'Adrar. L'analyse de ces courbes montre que le site d'Adrar dispose d'un potentiel énergétique éolien important et qui est plus favorable à l'exploitation de ce type d'énergie pour la production d'électricité. La vitesse moyenne atteinte est de 5 à 6 m/s au mois de juillet.

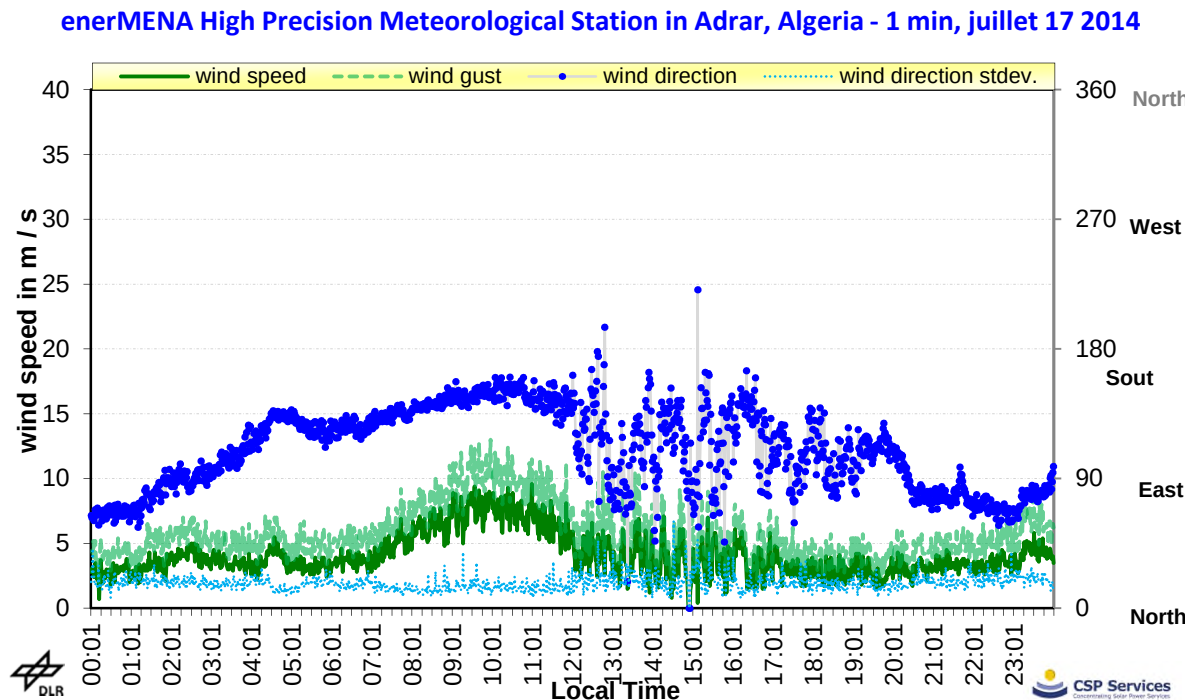


Fig. I.20 : Evolution horaire de la vitesse moyenne du vent (Adrar/17-07-2014) [26].

I.15 Outils de mesures des données climatiques

Les données climatologiques de la distribution de la densité du flux solaire (Fig. I.18), de la température moyenne et l'humidité relative (Fig. I.19) ainsi que de la vitesse horaire moyenne du vent (Fig. I.20) dans la région d'Adrar ont été mesurées à l'aide de la station radiométrique implémentée dans l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien "URER'MS" d'Adrar [27].

Cette station de mesure radiométrique autonome est réalisée à la fin de l'année 2010. Ainsi, pour exploiter cette ressource énergétique des études expérimentales et théoriques ont été abordées par l'équipe du gisement solaire afin de caractériser d'une manière efficace le site d'Adrar du point de vue gisement solaire.

Cependant, cette station radiométrique de haute précision a été installée à l'Unité de Recherches en Energies Renouvelables d'Adrar, celle-ci utilise un système de poursuite tridimensionnel (Sun-Tracker), comporte deux parties : Une partie fixe qui est constituée d'un pyranomètre type EKO, pour la mesure du rayonnement global reçu sur un plan horizontal, d'un thermohygromètre type TECNOEL pour la mesure de la température et de l'humidité, et d'un solarimètre.

Une partie mobile, qui est capable de suivre la trajectoire du soleil depuis le coucher jusqu'au lever, grâce à un système robotique. Cette partie est pourvue d'un pyréliomètre qui est pointé vers le disque solaire, pour la mesure du rayonnement solaire direct intégré sur toute les longueurs d'ondes (entre 0,2 et 0,4 micromètre) reçues sur un plan normal, et d'un pyranometre type EKO pour la mesure de l'éclairement diffus sur un plan horizontal muni d'une boule sphérique pour cacher le flux radiatif venant directement du disque solaire. La somme de ces deux mesures (diffus + direct), donne le rayonnement global.

Ces données sont ainsi analysées et exploitées dans le but de les utiliser dans beaucoup d'applications énergétiques notamment pour les systèmes à conversion thermique et photovoltaïque. La figure I.21, présente une photo illustrative de cette station radiométrique d'URER'MS d'Adrar [27].



Fig.I.21 : Photo de la station radiométrique de l'URER'MS d'Adrar : (a) mesure le rayonnement global horizontal, (b) mesure le rayonnement incliné suivant la latitude, (c) mesure le rayonnement avec une inclinaison variable.

I.16 Conclusion

Le présent chapitre est consacré à la connaissance de l'évaluation du potentiel énergétique solaire à travers l'Algérie et particulièrement dans la région d'Adrar. Des modèles de calcul ont été présentés pour l'estimation du gisement solaire.

Ces modèles sont basés essentiellement sur les calculs empiriques et semi empiriques pour estimer le rayonnement solaire global, diffus sur un plan horizontal et incliné. De plus, des données météorologiques et radiométriques rassemblées dans des stations de mesure implémentées dans le site de l'URER'MS d'Adrar ont été également présentée à la fin de ce chapitre. Ces données concernent, l'heure de lever et coucher du soleil, la densité du flux, la vitesse du vent, les composantes du rayonnement direct, diffus et global.

Références bibliographies

- [1] Gisement solaire, <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf> (29/10/2017).
- [2] A. Kaddour, Modélisation et simulation d'un concentrateur parabolique solaire à moteur Stirling en vue d'un rendement optimal, thèse de doctorat de l'université de Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2013.
- [3] B. Allal El Moubarek, A. Mohammed, Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme Étude de l'onduleur triphasé lié à cette application, mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état, université des sciences et de la technologie d'Oran, 2008.
- [4] A. Ricaud, Gisement solaire et transferts énergétiques Energies Renouvelables, Université de Cergy Pontoise, 2011.
- [5] P.G. Loutzenhiser, H. Manz, Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation, *Solar Energy* Vol. N°: (81), pp.254–267, 2007.
- [6] J. Bahraoui-Buret, M.N. Bargach, Iereetimation du gisement solaire marocain à partir des mesures au sol, 1995.
- [7] J. Bahraoui-Buret Etude du Rayonnement solarire a Rabot A. Khtira, revue internationale d'heliotechnique, pp.207–21, 1984.
- [8] J. Bahraoui-Buret, M.N. Bargach, Le gisement solaire Marocain, Centre de promotion des Energies Renouvelables, 1996.
- [9] A. Djafour, Etude d'un système de production d'hydrogène solaire, thèse de doctorat de l'université de Kasdi Merbah–Ouargla, 2013.
- [10] H. Maamar, Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa, thèse de magister de l'université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen, 2011.
- [11] A. M'Raoui, S. Mouhous, Etude statistique du rayonnement solaire à Alger, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14 N°4, pp.637 – 648, 2011.
- [12] Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, New model to estimate and evaluate the solar radiation, *International Journal of Sustainable Built Environment* Vol. N°:3, pp.225–234, 2014.
- [13] V. Bourdin, Energies renouvelables – Energie solaire thermique, Université Paris-Sud Orsay – Master PAM 2^{ème} année, 2014.
- [14] A. Brahimi, Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau, Mémoire de Master 2, université de Lorraine Faculté des sciences et technologies Nancy-1 et Centre de Développement des Energies Renouvelable CDER de Bouzaréah (Alger), 2016.
- [15] B. Zitani, Etude et Modélisation du Comportement en Régime Transitoire d'un Capteur Solaire Plan, thèse de magistère, université Badji Mokhtar–Annaba, 2007.
- [16] K. Kabidi, Expérimentation et modélisation du comportement énergétique et thermique d'un séchoir solaire sous le climat de la région de Rabat, thèse de doctorat de l'université Mohammed V– Agdal, Rabat, 2014.
- [17] M. Ghodbane1, B. Boumeddane, Study and numerical simulation of solar system for air heating, *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2016.
- [18] <http://www.algerie-monde.com/wilayas/adrar>.
- [19] B.E. Yousfi, Dynamiques urbaines, mobilités et transports dans le Sud-Ouest Algerien (wilayas d'Adrar et de Bechar), Thèse de docteur, université de Franche-Comte, France, 27 juin 2012.
- [20] https://fr.wikipedia.org/wiki/Fuseau_horaire (12/11/2017).
- [21] Ministère de l'agriculture et du développement rural, Institut national des sols de l'irrigation et du drainage. Essai de présentation d'une technique d'irrigation traditionnelle dans la wilaya d'Adrar : la « foggara », (www.insid.dz/realisation/did/D3.pdf), page consulté le 13/12/2017.
- [22] k. Messaitfa T. Chergui, l'eau, l'énergie et le vent à travers la région d'Adrar, Algérie, 2003.
- [23] N. Kasbadji Merzouk, Carte des Vents de l'Algérie (Résultats Préliminaires), *Rev. Energ. Ren. : Valorisation*, pp.209-214, 1999.
- [24] H. Boutabba, M. Mili, S.D. Boutabba, L'architecture domestique en terre entre préservation et modernité : cas d'une ville oasienne d'Algérie "Aoulef" Domestic architecture in the ground between conservation and modernity: If an oasis city in Algeria "Aoulef", *J. Mater. Environ. Sci.* N°7 (10), pp.3558-3570, 2016.
- [25] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_d%27Adrar (12/11/2017).
- [26] EnerMENA High Precision Meteorological Station of Research Unit for Renewable Energies in the Saharan Environment in Adrar, Algeria, 2014.
- [27] Centre de Développement des Energies Renouvelables, l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar "URER'MS", 13/11/2017.

Chapitre 02

Etat de l'Art

L'objectif du chauffage est d'améliorer le confort thermique d'un espace à vivre. Un système de chauffage consomme de l'énergie sous une forme et la restitue sous forme de chaleur

II. Introduction

L'utilisation des énergies renouvelables suscite de plus en plus un intérêt certain dans le monde. La diminution des réserves mondiales en pétrole et en gaz, les problèmes environnementaux ont amené beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables et propres, telles que l'énergie solaire. Cette énergie est l'une des plus facilement exploitable pour la production du chauffage.

Dans ce chapitre nous allons présenter une synthèse bibliographique sur l'énergie solaire thermique et ses différentes applications dans le chauffage solaire. Un bref historique sur le chauffage d'habitat, ainsi que sur les diverses techniques de chauffage habitable, sera également exposé, en particulier la technique du chauffage solaire par le plancher chauffant. Une présentation détaillée sur l'évaluation du confort thermique sera présentée à la fin de ce chapitre.

II.1 Conversion de l'énergie solaire

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, et en électricité.

II.1.1 L'énergie solaire thermique

La conversion photothermique est le processus le plus simple. Il consiste en une transformation du rayonnement solaire en forme thermique (chaleur), qu'on peut utiliser [1, 2] :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

II.1.2 L'énergie solaire photovoltaïque

C'est la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique avec des matériaux semi-conducteurs. La première cellule photovoltaïque, construite en 1914, avait un rendement de 1% ; elle était utilisée pour réaliser des posemètres pour la photographie. Il a fallu attendre 1954 pour que la production d'électricité par effet photovoltaïque commence à se développer, avec la réalisation d'une première cellule en silicium monocristallin d'un rendement de 6%. Ce dernier augmenta rapidement pour atteindre, en laboratoire, 18% aujourd'hui [3].

Le matériau de base utilisé actuellement est le silicium. Celui-ci se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. Cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais restent beaucoup plus onéreux [4].

II.1.3 L'énergie solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliothermoélectriques [5].

Trois principaux types de centrales sont utilisés :

- Centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour des températures entre 300 et 350 °C.
- Centrales à capteurs paraboliques permettant d'obtenir des températures de 1000°C.
- Centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

II.1.4 Applications thermiques de l'énergie solaire

Bien que l'exploitation de l'énergie solaire s'intensifie depuis quelques années et que les technologies évoluent sans cesse, les principes et les phénomènes mis en cause sont très bien connus et font aujourd'hui l'objet de large consensus. Le rayonnement solaire a été le sujet de nombreuses études, recherches et discussions, on peut trouver des applications à basse température (chauffage de l'eau, climatisation des habitations, dessalement de l'eau, réfrigération solaire, etc.) et des applications à température relativement plus élevée (cuisers et fours solaires) nécessitant par conséquent une concentration du rayonnement [6].

Sans être exhaustif on peut citer :

➤ Eau chaude solaire

La production d'eau chaude sanitaire est actuellement l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. L'installation classique comprend essentiellement un groupe de capteurs plans, une capacité de stockage et généralement un dispositif de régulation et une source d'appoint. La température de l'eau chaude sanitaire est en effet relativement réduite et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude [4, 6].

➤ Chauffage solaire des habitations

Le chauffage solaire du bâtiment fait appel à des capteurs à air ou à eau, mais avec des surfaces par logement plus grandes. La chaleur peut être distribuée par des radiateurs à eau chaude ou des planchers ou plafonds chauffants. L'utilisation de la chaleur solaire pour le chauffage du bâtiment demande le recours à une forme de stockage. Il est possible de stocker de l'énergie sous forme d'eau chaude dans des réservoirs de plusieurs mètres cubes, ce système permet de s'affranchir en partie du caractère intermittent de l'énergie solaire [6].

II.2 Exploitation de l'énergie solaire dans le chauffage de l'habitat

Tous les types de bâtiments, qu'ils soient d'habitation ou tertiaires, nécessitent des systèmes plus ou moins complexes pour maintenir, pour leurs occupants, une ambiance confortable. Ces systèmes apportent, suivant les saisons, chaleur ou fraîcheur, avec plus ou moins d'efficacité (meilleure ambiance pour une moindre consommation). Le développement récent de l'énergie solaire dans le bâtiment a mis en évidence l'utilisation de collecteurs plans, couplés à un stockage thermique. Le chauffage des locaux constitue une application particulièrement intéressante de l'énergie solaire par l'utilisation des capteurs à eau par leur développement industriel, ces matériels sont maintenant fiables et performants [7].

Une première démarche, aujourd'hui devenue classique, consiste à remplacer la chaudière d'un chauffage traditionnel à fluide par une cuve de stockage réchauffée par un groupe de capteurs, en respectant diverses contraintes spécifiques, en particulier l'usage de cascades de températures aussi fiables que possible [7].

II.2.1 Principe du chauffage solaire

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe, électrovanne), il s'agira d'un système actif. Un tel système nécessite une énergie autre que solaire ; en général celle-ci est électrique vu sa souplesse d'utilisation. Quand la seule énergie utilisée est celle du soleil, cela sera un système passif. Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau. L'air est utilisé principalement dans les systèmes passifs. On peut en effet se passer facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir.

L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par léchage d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres...). Il peut cependant être intéressant de recourir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée ; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (ventilation mécanique contrôlée).

L'utilisation de l'eau nécessite un échangeur. Son avantage réside dans le volume de stockage nécessaire, beaucoup plus faible qu'avec l'air. Dans ce cas on trouvera sur le circuit, une ou plusieurs pompes (circulateurs), des électrovannes, etc., [4].

II.3 Chauffage solaire de l'habitat

L'avenir du chauffage solaire dépend beaucoup des architectes, qui sont appelés de plus en plus à s'intéresser à ce système de chauffage selon le climat, la situation des bâtiments, leur orientation et leur destination. Pour faire du chauffage solaire, on emploie actuellement des insolateurs plans, ou des « serres captantes » verticales en façades dans le cas particulier du chauffage par air chaud selon le procédé de Trombe et Michel [4].

D'une façon générale, le chauffage est à eau chaude ou à air chaud, les insolateurs étant disposés, selon les cas, sur la toiture ou sur la façade sud, ou même simplement près du sol à l'écart du bâtiment.

Il faut prévoir le stockage de chaleur. Celui-ci peut être fait dans des réservoirs d'eau chaude, ou dans des massifs de maçonnerie ou de pierres, mais l'addition de tels éléments est coûteuse à moins qu'elle ne soit prévue dans la construction.

Les réservoirs d'eau chaude bien calorifugés ont des pertes thermiques relativement faibles et la température de l'eau ne baisse pas de plus de 3° à 4°C en 24 heures [1]. Les systèmes passifs de même que les systèmes actifs de chauffage comprennent essentiellement les parties suivantes :

- Captation,
- Stockage,
- Restitution de l'énergie,
- Contrôles.

La captation s'effectue généralement par des parois vitrées orientées au sud. Le stockage peut se faire soit par des parois à haute inertie spécialement conçues à cet effet ou par les éléments de la structure tels que murs, sol, etc. La restitution ou distribution de l'énergie s'effectue directement à partir du stockage par convection naturelle. Le contrôle est assuré soit manuellement par l'occultation nocturne des surfaces de captation, soit par des effets d'ombre sur les murs capteurs pour minimiser la captation en été [5].

II.3.1 Systèmes de chauffage solaire de l'habitat

Tous les types de bâtiments, qu'ils soient d'habitation ou tertiaire, nécessitent des systèmes de chauffage plus ou moins complexes pour maintenir, une ambiance confortable. Ces systèmes apportent, suivant les saisons, chaleur ou fraîcheur, avec plus ou moins d'efficacité (meilleure ambiance pour une moindre consommation). On distingue, suivant la nature du véhicule de chaleur, les chauffages à eau chaude ou à air chaud [1], [8].

II.3.1.1 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'air chaud

Pour chauffer de l'air, on peut le faire circuler derrière des panneaux métalliques noirs, placés dans des châssis vitrés installés sur le toit ou la terrasse d'un bâtiment, puis on peut faire du chauffage par air pulsé en faisant circuler l'air chaud dans des canalisations [1]. Plusieurs études aussi bien expérimentales que numériques ont été réalisées pour améliorer ce type de chauffage solaire d'habitat, on trouve principalement :

➤ Procédé du professeur Trombe

En France, les études du professeur Félix Trombe ont abouti à la mise au point d'un procédé de chauffage des maisons par air chaud, le chauffage de nuit étant assuré par récupération de la chaleur accumulée pendant la journée dans les murs constituant une masse thermique [1]. Ce système passif est probablement celui qui est actuellement le plus utilisé. Le principe de fonctionnement très simple, consiste en un flux solaire traversant la (ou les) vitres, est absorbé par une paroi verticale qui peut faire partie des éléments de structure du bâtiment. L'échauffement de l'air en contact avec cette paroi déclenche une circulation naturelle. L'air du bas de l'espace est alors admis par des ouvertures dans la partie inférieure du mur et revient à la salle par des ouvertures dans la partie haute (Fig. II.1) [5]. Ce système de chauffage peut continuer à fonctionner après le coucher du soleil, grâce au stockage partiel de la chaleur reçue par le mur [1].

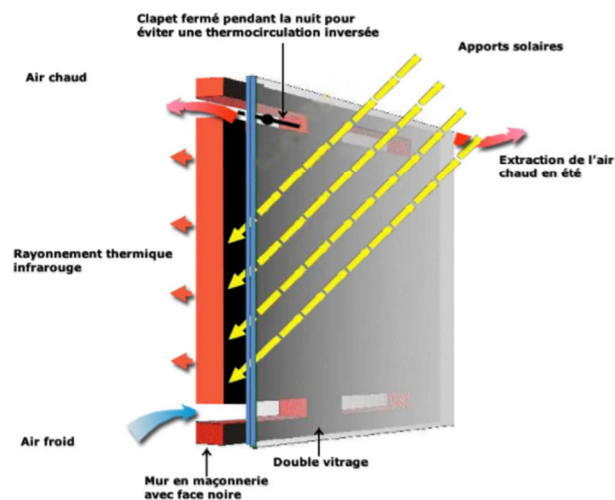


Fig. II.1 : Principe du mur trombe [9].

II.3.1.2 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'eau chaude

Il existe essentiellement deux dispositifs courants de chauffage solaire par circulation d'eau chaude, les chauffe-eaux solaires individuels (CESI) auxquels on peut raccrocher les chauffe-eaux solaires collectifs et les systèmes solaires combinés (SSC) pour le chauffage des locaux [7].

II.3.1.3 Chauffe-eaux solaires individuels et collectifs

On trouve principalement deux sortes d'installations, le système à thermosiphon (ou direct) et le système à circulation forcée.

II.3.1.3.1 Système direct

Dans ce système, c'est l'eau chaude sanitaire (ECS) qui circule elle-même dans le capteur. Cette circulation s'effectue par thermosiphon. L'eau en passant dans le capteur s'échauffe, crée une dépression qui aspire l'eau la plus dense qui entre dans le capteur. Il faut veiller cependant à ce que la perte de charge du circuit ne soit pas trop importante (Fig. II.2). Ce système impose d'installer le ballon de stockage plus haut que le capteur. Celui-ci étant souvent placé en toiture, le ballon de stockage devient le point le plus haut de l'habitation ce qui n'est pas nécessairement recherché. Cette contrainte peut en effet être inacceptable pour des raisons esthétiques. Pour éviter les pertes thermiques en ligne, il faut veiller à réduire les distances séparant les différents organes. Une bonne isolation thermique des canalisations est recommandée.

Par ailleurs, il est nécessaire de prévoir un vase d'expansion pour encaisser les variations de volume de l'eau du circuit avec la température [4].

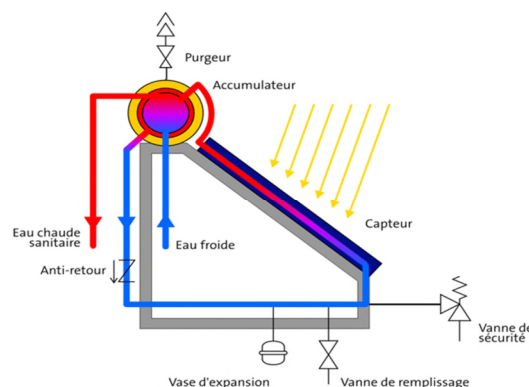


Fig. II.2 : Système à thermosiphon [10].

II.3.1.3.2 Système à circulation forcée

Dans ce système, l'eau qui circule dans le capteur est différente de l'eau chaude sanitaire. On peut donc traiter le fluide caloporteur avec un antigel, un anti corrosif, un antifongique, etc. En contrepartie, un échangeur de chaleur est nécessaire (Fig. II.3). Un avantage de ce système est la possibilité d'obtenir dans le ballon de stockage une stratification des couches d'eau à températures différentes. Si une énergie d'appoint s'avère nécessaire, elle devra être apportée en partie haute du stockage. On peut installer ou utiliser une chaudière déjà existante en la plaçant en aval de l'installation solaire. Elle permettra d'élever la température de l'eau chaude du ballon selon les besoins [4].

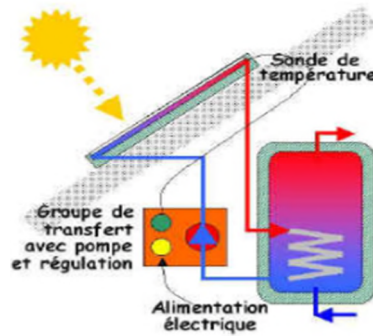


Fig. II.3 : Système à circulation forcée [11].

II.3.1.3.3 Systèmes solaires combinés pour le chauffage d'habitat

Les installations solaires qui fournissent à la fois de l'eau chaude sanitaire et une partie du chauffage sont généralement appelées des 'combi-systèmes' ou SSC (systèmes solaires combinés). Ce type de chauffage est le plus souvent associé au plancher chauffant basse température. L'installation peut fournir l'ensemble des besoins en eau chaude sanitaire en période estivale et permet le préchauffage de l'eau en hiver, ce qui réduit la consommation d'énergie. Le complément de chaleur est apporté par un système d'appoint, suivant les saisons [12].

II.3.1.3.4 Système solaire combiné (SSC) avec stockage de l'eau de chauffage en ballon

Ce système est basé sur le stockage de l'eau chaude solaire dans un réservoir afin de restituer la chaleur tout au long de la journée. Le fluide caloporteur chauffe l'eau du réservoir et repart vers les capteurs. L'eau du réservoir sert pour alimenter le système de chauffage. L'eau chaude sanitaire est produite dans un ballon immergé ou par un échangeur de chaleur (Fig. II.4) [12].

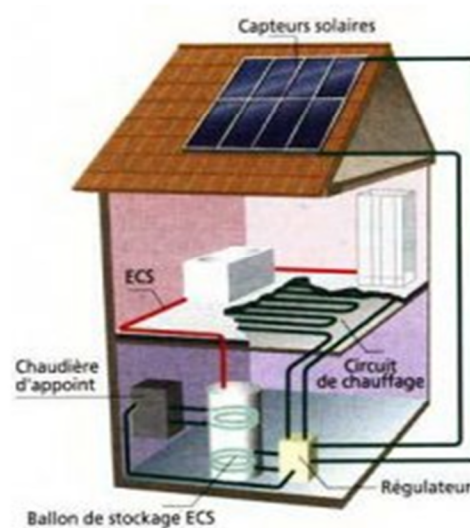


Fig. II.4 : Schéma de fonctionnement d'un SSC [13].

II.3.1.3.5 Plancher solaire direct

Le Plancher Solaire Direct (P.S.D), désigne le type de système solaire combiné (SSC) le plus répandu à ce jour. En effet, le fluide caloporteur, (constitué dans la plupart du temps, d'un mélange d'eau et antigel), chauffé par les capteurs solaires circule directement dans un plancher sans passer par un réservoir de stockage. La masse de béton du sol assure les fonctions de stockage de l'énergie et de déphasage de sa restitution dans le volume chauffé. Un circuit de dérivation permet de produire l'eau chaude sanitaire (Fig. II.5) [8, 12, 14].

Le PSD, dans son principe, offre des atouts décisifs que nous rappelons brièvement [8] :

- Stockage thermique de l'énergie solaire dans le plancher en béton, intérieur au volume habitable.
- Inertie thermique importante, Régulation simplifiée, généralement réduite à un thermostat différentiel contrôlant un circulateur unique.
- Confort basse température, uniformité de température et de l'air ambiant (avantages des planchers chauffants).
- Gain d'espace et suppression possible des radiateurs muraux.
- Economie d'investissement importante.

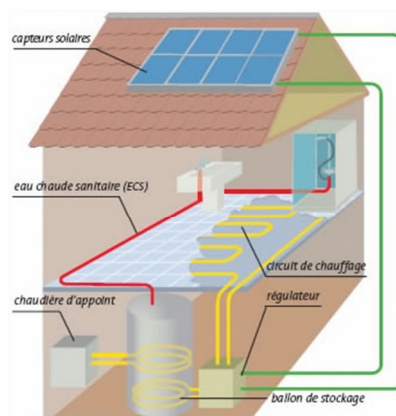


Fig. II.5 : Schéma descriptif de fonctionnement de système PSD [15].

II.4 Comportement thermique d'un habitat dans un milieu désertique

Aujourd'hui, la science fondée sur les faits expérimentaux et non plus sur des principes abstraits allait se substituer à la déduction cartésienne. Que devient alors la notion d'expérience une fois ce grand retournement opéré [16]. La notion de modèle comme norme abstraite se développe alors en physique. Le modèle est ici un intermédiaire à qui les physiciens délèguent la fonction de connaissance, de réduction de l'encore énigmatique à du déjà connu, notamment en présence d'un champ d'études dont l'accès est difficilement praticable.

Si modéliser, c'est déléguer la fonction de connaissance afin de représenter la réalité de façon à la fois économique et fiable, encore faut-il s'assurer que le modèle conserve un lien avec l'expérience.

La modélisation, la simulation semble une approche plus coûteuse, puisqu'elle invite à conserver tous les paramètres du problème initial. Cette approche permet en outre l'expérimentation, le modèle numérique devenant un laboratoire virtuel dans lequel on peut tester des hypothèses. Par exemple, on y fait varier certains paramètres (quantité d'énergie solaire reçue, vitesse de rotation de la terre...) pour en étudier les conséquences sur le confort thermique. Ces modèles numériques permettent en outre d'affiner la prévision à court terme en injectant périodiquement dans le modèle de nouvelles valeurs de mesure. D'ailleurs souvent en physique, il faut d'abord fonctionner le modèle pour tester sa cohérence interne avant de le valider [17].

Les travaux effectués donnent une nouvelle approche pour la description et la modélisation des bâtiments mono zones et multizones pour un climat saharien sec. Pour ce faire, la méthode nodale a été utilisée pour prévoir le comportement thermique de l'air soumis à des sollicitations diverses [18, 19, 20].

L'étude a été réalisée pour l'air et les murs d'une maison individuelle à Adrar (Algérie) en collaboration avec l'unité de recherche des énergies renouvelables aux milieux sahariens. Le comportement thermique transitoire, en particulier la température de l'air et des parois, a été analysé pour le mois de juillet en 2014.

II.4.1 Cadre conceptuel de la problématique

Notre but dans ce travail est porté sur l'étude d'un système de chauffage solaire par plancher chauffant destiné pour un usage individuel. Le plancher chauffant est composé d'une canalisation de section rectangulaire disposée dans la dalle en béton de l'enveloppe habitable. Nous allons modéliser les transferts de l'écoulement de l'eau chaude dans la canalisation. Pour cela, nous allons résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes et de la chaleur qui régissent cet écoulement. Ces équations vont être discrétisées par une méthode implicite aux différences finies. Les systèmes d'équations algébriques ainsi obtenus seront résolus par les algorithmes de Gauss et Thomas.

Nous allons ensuite résoudre l'équation de la conduction thermique dans la dalle à l'aide de la même méthodologie numérique que pour celle de l'écoulement de fluide dans la canalisation. De plus, nous allons modéliser les transferts de chaleur qui se déroulent dans un modèle d'habitat assimilé à une cavité parallélépipédique (Fig. II.6).

Les équations de transfert sont déduites à partir des bilans thermiques établis en chaque matériau de l'habitat, et résolues par une méthode implicite aux différences finies et l'algorithme de Gauss en couplage avec une procédure itérative, parce que les coefficients de transferts de chaleur par convection et par rayonnement sont exprimés en fonction des températures des milieux considérés.

Pour le faire, nous allons modéliser le couplage thermique entre la canalisation de fluide caloporteur et la dalle en béton, en se basant sur la théorie de la continuité de la chaleur entre le fluide et la dalle, et puis le couplage entre ce dernier et l'enveloppe de l'habitat.

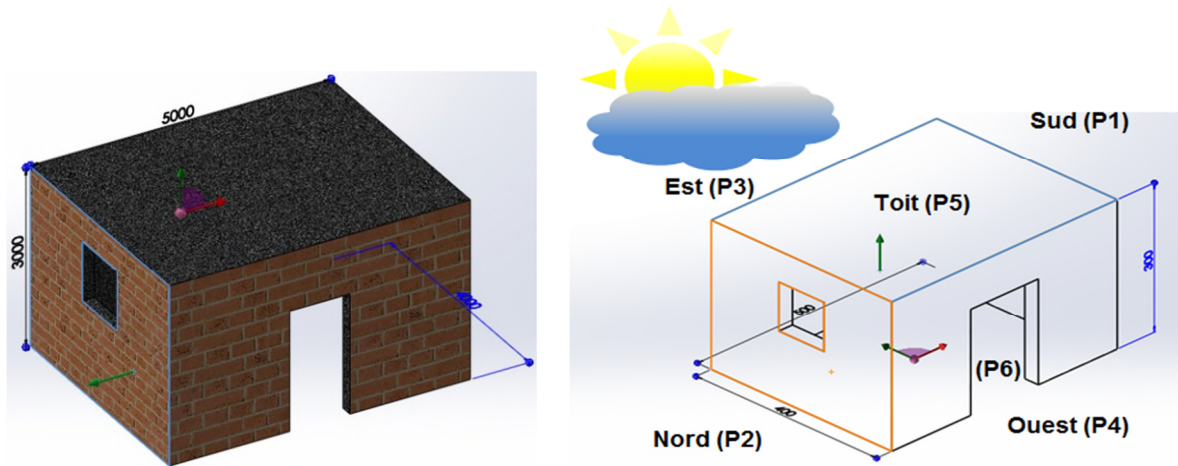


Fig. II. 6 : Description du modèle de l'enveloppe habitable étudiée.

II.5 L'art de la modélisation du système du chauffage d'habitat

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

Quelle que soit la forme canonique du modèle thermique, il est important de réduire le modèle en temps et en espace pour correspondre au plus juste au problème posé. La réduction de modèle constitue une thématique très étudiée, la littérature est vaste concernant ce sujet : quelle que soit la méthode, l'objectif est d'enlever un maximum de termes ou fonctions tout en préservant une précision acceptable du modèle, c'est-à-dire en conservant la représentation des modes impliqués dans l'analyse. La figure II.7, présente un descriptif détaillé du modèle physique retenu dans cette étude du chauffage habitable.

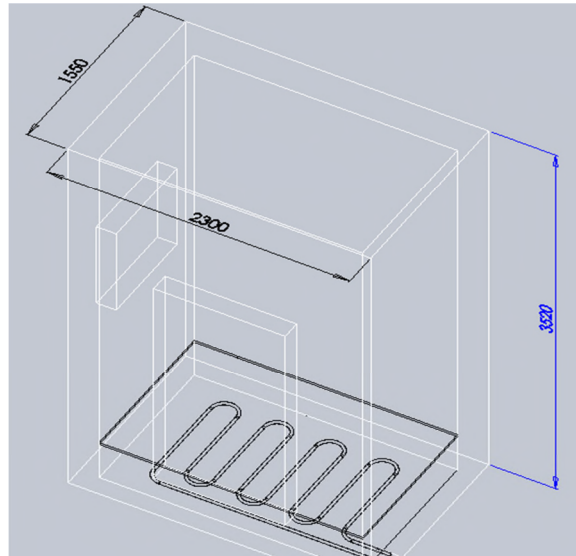


Fig. II.7 : Description physique d'une enveloppe habitable avec une dalle chauffante.

II.5.1 Etude du confort thermique dans l'habitat

Le confort peut être défini comme le degré de désagrément ou de bien-être produit par les caractéristiques de l'environnement intérieur d'un bâtiment. Une telle définition considère une interaction entre l'individu et l'espace qui l'entoure, c'est-à-dire, entre des conditions ambiantes physiquement mesurables et certaines conditions individuelles qui affectent notre perception.

La qualité de vie à l'intérieur de l'espace a été souvent rapprochée à une appréciation thermique en premier lieu [21].

Assurer une sensation de chaleur en hiver et se préserver des fortes chaleurs en été est depuis longtemps un souci majeur pour les concepteurs. D'ailleurs, un des objectifs de l'architecture réside dans la satisfaction des occupants par le bien être thermique.

II.5.1.1 Notion de confort thermique

La notion de confort thermique, désigne l'ensemble des multiples interactions entre l'occupant et son environnement où l'individu est considéré comme un élément du système thermique [22], pour le définir on lui associe plusieurs paramètres, notamment [23] :

- Le paramètre physique : L'homme est représenté comme une machine thermique et on considère ses interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur.
- Le paramètre psychologique : Il concerne les sensations de confort éprouvées par l'homme et la qualification des ambiances intérieures.

Une définition satisfaisante du confort thermique doit pouvoir intégrer tous ces paramètres, mais de nombreuses définitions avancées jusqu'à maintenant ne caractérisent le problème que sous la lumière d'un seul de ces paramètres, par exemple :

- Aspect physiologique : « Les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont un niveau d'activité minimum » [24].
- Aspect sensoriel : « État d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement. L'individu ne peut pas dire s'il veut avoir plus froid ou plus chaud » [25].
- Aspects psychologique et sensoriel : « Sensation de bien-être physique et mental total » [26].

En conséquence, le caractère subjectif de la notion du confort thermique est mis en avant par l'ensemble de ces définitions. Selon Hoffmann [27]. Pour approfondir cette notion de confort thermique, nous évoquerons dans ce qui suit, les paramètres affectant le confort thermique, l'approche statique du confort à travers les phénomènes de thermorégulation (base physiologique) et d'échanges thermiques (base physique) du corps humain avec son environnement extérieur. En dernier lieu, nous traiterons l'approche adaptative de l'homme avec son environnement.

II.5.1.2 Paramètres affectant le confort thermique

La sensation du confort thermique est fonction de plusieurs paramètres (Tableau II.1) :

- Les paramètres physiques d'ambiance, au nombre de quatre, sont la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse de l'air, et l'humidité relative de l'air ;
- Les paramètres liés à l'individu, ils sont multiples, on recense notamment deux paramètres principaux qui sont l'activité et la vêtue de l'individu ;
- Les paramètres liés aux gains thermiques internes, gains générés dans l'espace par des sources internes autres que le système de chauffage. (Éclairages, appareils électriques, ...).

Paramètres liés à l'individu	L'activité physique et l'habillement
Paramètres liés à l'environnement	La température de l'air, les sources de rayonnement (Radiateurs, soleil), la température des surfaces environnantes, la vitesse relative de l'air par rapport au sujet et l'humidité relative de l'air.
Autres influences	Gains thermiques internes, Degré d'occupation des locaux, Couleur, Ambiance, ...etc.

Tableau II.1 : Paramètres influents sur la sensation de confort thermique.

II.5.1.3 Paramètres liés à l'ambiance extérieure

• Température de l'air ambiant

La température de l'air, ou température ambiante "Ta", est un paramètre essentiel du confort thermique. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires. Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe [28].

Ainsi par exemple la réglementation générale Française pour la protection du travail (RGPT) [29], impose des valeurs de référence pour les températures de l'air, données par le tableau II.2 ci-dessous [30].

Type de local	Température de l'air
Locaux ou des gens habillés normalement sont au repos ou exercent une activité physique très légère. Par exemple : bureaux, salles de cours, salles d'attente, salles de réunion ou de conférence.	21°C
Locaux ou des gens peu ou pas habillés sont au repos ou exercent une activité physique très légère. Par exemple salles d'examens ou soins médicaux, vestiaires.	23 à 25°C
Locaux ou des gens habillés normalement exercent une activité physique très légère. Par exemple ateliers, laboratoires, cuisines.	17°C
Locaux ou des gens peu habillés exercent une grande activité physique Par exemple salles de gymnastique, salle de sport.	17°C
Locaux qui ne servent que de passage pour les gens habillés normalement. Par exemple corridors, cages d'escalier, vestiaires, sanitaire.	17°C
Locaux uniquement gardés à l'abri du gel. Par exemple garages, archives.	5°C

Tableau II.2 : Valeurs de référence de température de l'air.

Ces températures sont calculées pour une valeur moyenne de surface des parois inférieure de 2°C à la température de l'air, elles sont acceptées dans certains cas comme température de confort dans le cadre d'une politique d'utilisation rationnelle de l'énergie.

- **Vitesse de l'air**

La vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires, elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s [31]. Toutefois, à l'intérieur des bâtiments, ces vitesses demeurent limitées, ne dépassant pas généralement cette vitesse, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Elle peut, en revanche, être tenue pour responsable de l'apparition d'inconforts locaux, liés à la présence de courants d'air froids ou chauds localisés.

- **Humidité relative de l'air**

L'humidité relative de l'air influence les échanges évaporatoires cutanés, elle détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur. Selon Liébard [32], entre 30% et 70%, l'humidité relative influence peu la sensation du confort thermique [32].

Une humidité trop forte dérègle la thermorégulation de l'organisme car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration [33], le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort.

II.5.1.4 Paramètres liés à l'individu

- **Vêtue**

Les vêtements permettent de créer un microclimat sous-vestimental, à travers leurs résistances thermiques, en modifiant les échanges de chaleur, entre la peau et l'environnement. Leur rôle essentiel est de maintenir le corps dans des conditions thermiques acceptables, été comme hiver.

La vêtue a un rôle primordial d'isolant thermique, notamment en période hivernale et dans toutes les ambiances froides, ce rôle est pris en compte à travers la définition d'un indice de vêtue, exprimé en "Clo", caractérisant la résistance thermique d'un vêtement (Fig. II.8).

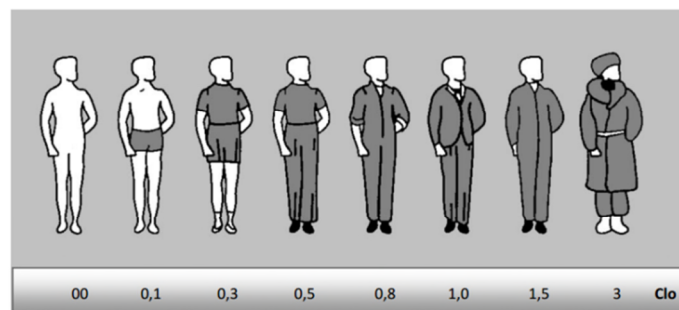


Fig. II.8: Valeurs exprimées en "Clo" des tenues vestimentaires [34].

La nature du tissu, la coupe des vêtements et l'activité du sujet influencent aussi ces échanges thermiques avec l'environnement [34].

- **Activité**

L'activité est un paramètre essentiel pour la sensation thermique de l'individu, définissant directement le métabolisme de l'individu, c'est à dire la quantité de chaleur produite par le corps humain. Dans le cas d'une très forte activité, elle peut être responsable de sensations d'inconfort chaud, même en présence de conditions météorologiques très favorables. Il est à noter toutefois que, dans le cas d'une activité classique de bureau, les plages de variation du métabolisme demeurent limitées.

II.5.1.5 Paramètres liés aux gains thermiques internes

Avec l'essor de la technologie et des besoins électriques (éclairage, électroménager), les apports de chaleur internes ont fortement augmenté. Les appareils électriques transforment en effet quasiment toute l'énergie qu'ils consomment en chaleur. Les postes informatiques sont également de vraies sources de chaleur et les occupants constituent eux aussi une autre source d'apports internes par leur métabolisme. Les apports internes comprennent donc, toute quantité de chaleur générée dans l'espace par des sources internes autres que le système de chauffage.

Ces gains de chaleur dépendent du type du bâtiment, du nombre des utilisateurs et de son usage. D'après Hugues Boivin [35], le confort de l'espace est directement influencé par le taux de ces gains internes (Fig. II.9). On peut dire que ces apports sont inévitables dès lors que les locaux sont habités. Il faut noter cependant que ces apports sont variables selon le comportement des occupants, et qu'ils constituent donc un facteur d'aggravation de l'inconfort chaud, sur lequel les moyens d'action architecturaux sont limités. Seuls, une bonne ventilation et un comportement adéquat de l'occupant peuvent réduire ces apports ou leur influence sur la température intérieure [36].

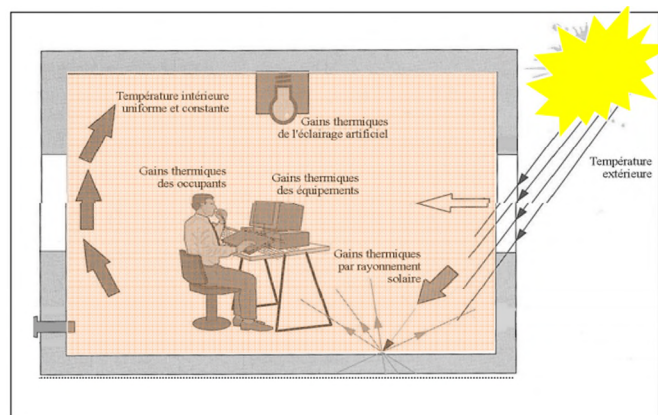


Fig. II.9 : Gains thermiques internes d'un espace [36].

II.6 Approche adaptative du confort thermique

L'approche adaptative considère que les personnes ne sont pas passives vis-à-vis de leur environnement intérieur, mais jouent un rôle actif dans le maintien de leur confort thermique, c'est-à-dire que l'homme peut agir sur son environnement en fonction de ses besoins et de sa perception du climat [37].

Humphreys considère le principe suivant : « *si une modification des conditions climatiques se produit et provoque de l'inconfort, les personnes entreprendront des actions visant à rétablir leur confort* » L'ensemble de ces actions constituent la base de l'adaptation, plus le bâtiment est équipé de moyens d'adaptation et plus l'occupant est susceptible d'y éprouver du confort.

D'après Nicol et Humphreys [38], si nous étions libres d'utiliser tous ces leviers d'action, le confort thermique ne serait pas un problème, le problème naît du fait qu'il existe de nombreuses contraintes limitant notre capacité à entreprendre l'une ou l'autre de ces actions [39].

II.6.1 Facteurs d'inconfort thermique

Malgré la réalisation d'un confort thermique global, des zones d'inconforts sont susceptibles d'être observées dans les bâtiments. Un environnement thermique inégal peut être la source d'inconfort pour certaines parties du corps. L'insatisfaction thermique peut être causée par un inconfort, causée par un refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une partie du corps (tête, pieds, ou mains), par exemple, un courant d'air [40].

Un inconfort local peut également être dû à des différences de températures anormalement élevées entre la tête et la cheville, avec un sol trop chaud ou trop froid, ou à une asymétrie de rayonnement thermique.

Ainsi, le confort thermique peut être affecté par plusieurs facteurs, citons [41] : le courant d'air local, l'asymétrie de la température de rayonnement, la différence verticale de la température de l'air et la température des planchers.

- **Effet des courants d'air**

La perception d'un courant d'air localisé notamment au niveau de la nuque ou du visage est un élément d'inconfort. Cette perception du courant d'air dépend de la vitesse de l'air, de la température de l'air, de la zone du corps concernée. Les courants d'air provoquent aussi une sensation de froid due à une convection assez importante entre la peau et l'air ambiant.

Des courants d'air excessifs en hiver conduisent souvent les occupants à augmenter la température intérieure pour contrecarrer la sensation de froid. La norme recommande une vitesse d'air moyenne inférieure à 0.15 m/s en hiver et à 0.25 m/s en été lors d'un travail sédentaire [42].

- **Effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique**

Les asymétries du rayonnement sont dues, à la présence d'une paroi chaude ou froide telle qu'un plafond ou un plancher chauffant, un vitrage chaud ou froid. En outre, le gradient vertical de température est aussi une source d'inconfort. S'il est suffisamment élevé, il peut apparaître une sensation de chaud au niveau de la tête ou de froid au niveau des pieds, même si le corps est en état d'équilibre thermique. Moujalled [43] conclut que l'asymétrie de température radiante doit être inférieure à 10°C pour une paroi verticale froide (baie vitrée en hiver), et 5°C pour un plafond chaud (plafond chauffant).

- **Effet de la température du sol**

Hoffman [44] précise qu'une température de plancher trop élevée ou trop basse entraîne un inconfort au niveau des pieds. Plusieurs auteurs ont effectué des recherches sur ce sujet et selon Olsen [45], les températures optimales du sol pour les personnes chaussées et à la neutralité thermique sont de 23 °C pour les personnes debout et de 25°C pour les personnes assises, avec un minimum de 6% d'insatisfaits.

D'autres éléments influençant le confort thermique ont été étudiés : l'âge, le sexe, la nourriture, la localisation géographique, la couleur des murs, le bruit, la lumière. Toutefois, il ne peut exister de règles de confort universelles du fait de grandes variations géographiques et intra individuelles [46], sauf que les médecins de l'habitat sain proposent les valeurs suivantes pour chaque facteur du confort [47].

- Température des murs : $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- Humidité relative entre 30 et 70% ;
- Température du sol : 19 à 24°C ;
- Vitesse de l'air : inférieure à 0,20 m/s ;
- Différence de température entre deux murs d'une même pièce doit être inférieure à 10°C ;
- Différence de température entre le sol et le plafond doit être inférieure à 5°C.

II.7 Évaluation du confort thermique

L'évaluation du confort thermique dans les espaces est un paramètre capital dans toute conception architecturale [48]. Les premières recherches se sont basées sur les enquêtes de terrain avec des questionnaires en classifiant la sensation thermique (très chaud, neutre et très froid) ainsi que sur les essais de laboratoires sous des conditions climatiques artificielles [49]. Cette évaluation a conduit plusieurs chercheurs à développer et à élaborer des indices de prédiction des niveaux de confort à l'intérieur des bâtiments.

En plus des indices thermiques, des tentatives ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de prédire des zones de confort, connus sous le nom de diagrammes bioclimatiques. Ils sont l'aboutissement direct de la connaissance du climat, ces outils sont également développés pour permettre d'obtenir des bâtiments confortables, adaptés aux variables climatiques.

II.7.1 Température de l'air ambiant (T_a)

Elle représente l'indice le plus utilisé pour le contrôle des ambiances en intérieur du fait de la simplicité de sa mesure. Ce paramètre ne présente pas de grosses difficultés de mesure et d'évaluation, mais revêt un caractère toutefois limité pour la caractérisation complète du confort. Indice connu de tous, la température de l'air sera donc largement utilisée comme indice de confort dans le cas d'un contrôle peu strict du confort thermique [50]. Il est utilisé pour définir les consignes de température références pour les installations de chauffage en période hivernale et climatisation en période estivale.

II.7.2 Température opérative (T_{op})

La température opérative " T_{op} ", est un indice de confort thermique intégrant deux paramètres physiques, la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante. Il s'agit donc d'un indice d'appréciation des effets convectifs et radiatifs sur le confort de l'individu [51]. La norme ISO 7730 fournit le calcul simple de cet indice par la formule la suivante [52] :

$$T_{op} = \alpha T_a + (1 - \alpha) T_{mrt} \quad (II-1)$$

Le tableau II.3 nous donne quelques valeurs de " α " en fonction de la vitesse de l'air [53] :

Vitesse (m/s)	0 - 0.2	0.2 - 0.6	0.6 - 0.7
α : coefficient	0.5	0.6	0.7

Le tableau II.3 : Valeurs de α en fonction de la vitesse d'air.

Avec des vitesses de l'air inférieures à 0.2 m/s, la température opérative est égale avec une bonne approximation, à la moyenne arithmétique des températures citées [54], et pouvant être écrite de la façon suivante.

$$T_{OP} = (T_{air} + T_{mrt}) / 2 \quad (II-2)$$

Pour des activités sédentaires ou légères exercées par des personnes portant une tenue vestimentaire estivale normale, la température opérative limite de confort est de 27°C pour un environnement avec 55% d'humidité relative, elle peut être augmentée jusqu'à 29°C, si la vitesse de l'air est au-dessus de 0.2 m/s [55].

La température du confort thermique est donnée par l'expression suivante [56] ;

$$T_c = \frac{T_{air} + \sum T_{i,j}}{2} \quad (II-3)$$

$$\sum T_{i,j} = TPSI + TPEI + TPOI + TPFPI + TPNI + TPPI \quad (II.4)$$

II.7.3 Outils graphiques d'évaluation du confort thermique

En plus des indices thermiques, diverses recherches ont été entamées pour connaître les limites du confort thermique sous forme diagrammes bioclimatiques. En 1953 le premier « diagramme bioclimatique » a été proposé par Olgay [57]. Il était le premier à mettre au point une procédure qui est basée sur un diagramme bioclimatique ou il détermine une zone de confort avec des plages d'été et d'hiver et les mesures de correction dans le cas où la combinaison entre l'humidité et la température se situe hors la zone de confort. Aussi les tables de Mahoney qui sont une série de tableaux de référence d'architecture, sont utilisées comme guide pour obtenir des bâtiments confortables, adaptés aux conditions climatiques.

II.7.3.1 Diagramme bioclimatique

Le diagramme bioclimatique est un outil d'aide à la décision globale du projet permettant d'établir le degré de nécessité de mise en œuvre de grandes options telles que l'inertie thermique, la ventilation généralisée, le refroidissement évaporatif, puis le chauffage ou la climatisation. Il est construit sur un diagramme psychrométrique (appelé aussi diagramme de l'air humide) (Fig. II.10) [57].

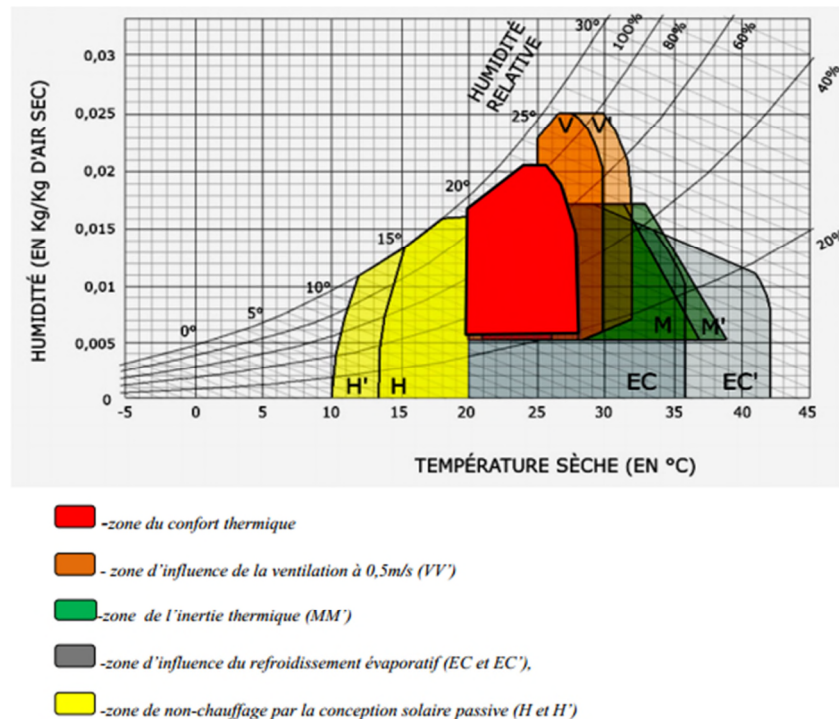


Fig. II.10 : Diagramme bioclimatique [57].

Sur ce diagramme sont représentées :

- La zone de confort hygrothermique tracée pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (en général 0.1 m/s) et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été [58] ;
- L'extension de la zone du confort hygrothermique due à la ventilation par augmentation de la vitesse d'air de 0.1 à 1.5m/s ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation ;
- La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment.

Le diagramme bioclimatique trouve son utilité dès que les conditions climatiques s'écartent du polygone de confort, la distance qui sépare ces conditions des limites du polygone suggère dans le diagramme bioclimatique les solutions constructives et fonctionnelles qu'il faut adopter pour concevoir un bâtiment adapté : ventilation, inertie thermique, protection solaire, utilisation des systèmes passifs. Cette méthode graphique permet de bien se rendre compte de quelques techniques que l'on peut utiliser pour améliorer le confort dans le bâtiment.

II.7.3.2 Diagramme de Givoni

En basant sur les études antérieures d'Olgay, Givoni a élaboré une méthode expérimentale où il représente les limites des ambiances confortables sur un diagramme psychométrique courant. Il présente une méthode plus performante que celle d'Olgay, dans l'évaluation des exigences physiologiques du confort.

Givoni définit le confort en considérant la personne en état d'activité, par l'intermédiaire de son diagramme bioclimatique, il a prouvé qu'avec l'application des concepts de l'architecture, l'effet de variation climatique de l'environnement extérieur peut être réduit au minimum [58]. Il a alors mis au point un outil synthétisant les zones thermo-hygrométriques et les moyens d'intervention par des dispositifs architecturaux ou techniques qui peuvent être utilisés pour remédier aux sollicitations du climat [48]. Ceci est exprimé sur un diagramme psychométrique ou bioclimatique (Fig. II.11), présenté dans son ouvrage « L'homme, l'architecture, le climat » [48].

La zone de confort est positionnée au centre, l'air extérieure à cette zone est subdivisé en zones secondaires, où l'auteur propose différentes procédures permettant de réintégrer les conditions de confort.

Givoni a procédé dans l'élaboration de ses zones climatiques à des exigences de confort universelles. Sa zone de confort se situe entre les températures 20 et 27°C [59]. C'est à dire qu'il considère que toutes les personnes, quel que soit la latitude à laquelle ils se trouvent, réagissent de la même manière au confort.

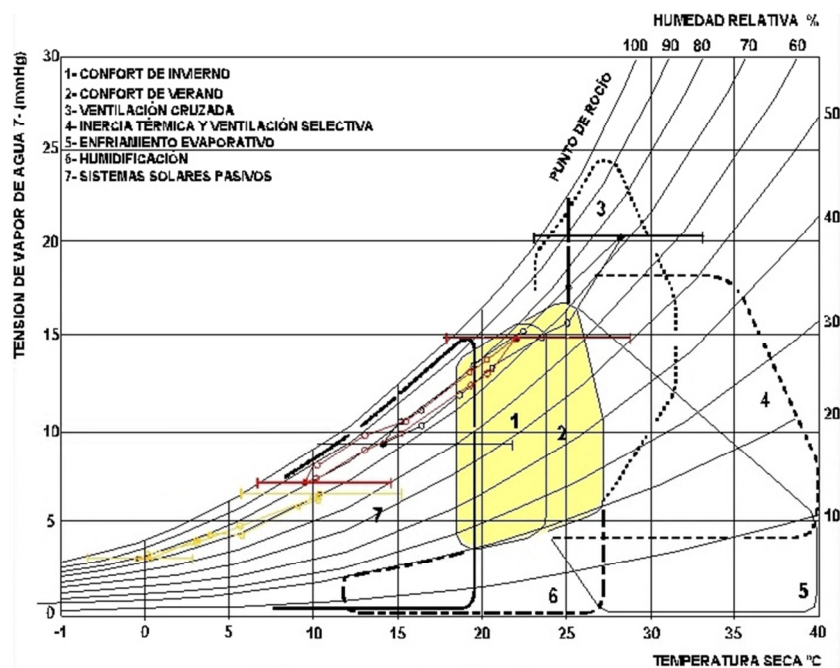


Fig. II.11 : Zones de confort selon le diagramme bioclimatique de Givoni.

II.8 Conclusion

L'étude systémique présentée dans ce chapitre a mis en exergue les systèmes en présence et leurs interactions au sein d'une enveloppe habitable. La maison individuelle a été défini comme un système vivant complexe ayant une vocation et nécessitant un soutien logistique intégré. Nous nous pencherons particulièrement dans la suite de nos travaux sur les formules gouvernant le fonctionnement d'un tel système destiné au chauffage d'habitat, et comme une phase, et nous allons rapprocher les méthodes numériques les reconnais dans ce type de modélisation numérique.

Références bibliographiques

- [1] J. R. Vaillant, Utilisation et promesses de l'énergie solaire, Edition Eyrolle, 1976.
- [2] J. Bonal, P. Rossetti, Les énergies alternatives, Omniscience, 2007.
- [3] Ch. Ngo, L'énergie ressources technologies et environnement, 3^{ème} édition, Dunod, Paris, 2008.
- [4] J. Bernard, Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing, 2004.
- [5] A. Sfeir, G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris, 1981.
- [6] A. Chaker, Promesses et Perspectives du Photothermique, Revue des Energies Renouvelables : ICPWE, 2003.
- [7] R. Kharchi, A. Hamid et M. Belhamel, Contribution de l'Energie Solaire dans le Chauffage de l'Habitat par le Plancher, Rap. Int., Centre de Développement des Energies Renouvelables, 1999.
- [8] R. Kharchi, A. Hamid, Contribution de l'Energie Solaire dans le chauffage de l'habitat par le plancher, Revue des Energies Renouvelables, Journées Nationales sur la valorisation des Energies Renouvelables, pp.23-24, 1999.
- [9] www.picbleu.fr/page/chauffage-solaire-et-habitat-bio-climatique-rt 2012 (14/10/2017).
- [10] www.alterenergies.fr/cesi_thermosiphon.html (14/10/2017).
- [11] www.outilssolaires.com/installation/chauffe-eau-solaire/quel-systeme+a61.html (14/10/2017).
- [12] R. Kharchi, B. Ben Youcef, Système solaire combiné, estimation des besoins énergétiques, Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, 2007.
- [13] www.accompagnement-projets.hespul.org/particuliers/utiliser-les-energiesrenouvelables/solaire-thermique/techniques/le-systeme-solaire-combine-ssc. (14/0/2017).
- [14] F. A. Peuser, K. Remmers, Installation solaires thermiques, conception et mise en œuvre, Edité par Systèmes Solaires, Solar Praxis et le Moniteur, 2005.
- [15] Solaire thermique, www.energiesolairedanslhabitat/l-energie-solaire-thermique (14/10/2017).
- [16] Y. Jannot, transferts thermiques, école des mines, Nancy, 2012.
- [17] 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, Laboratoire d'Etude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment, UFR Sciences Fondamentales et Sciences pour l'Ingénieur, université de la rochelle, 2003.
- [18] J. P. Nadeau, J.R. Puiggali, Séchage : Des processus physiques aux procédés industriels, Tec & Doc Lavoisier, (ISBN 2-7430-0018-X), 1995.
- [19] S. Hongois, Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle, thèse de doctorat, école doctorale mécanique, énergétique, génie civil, Acoustique Mega, Laboratoire d'accueil : centre de thermique de Lyon Cethil à l'institut national des sciences appliquées de Lyon, avril 2011.
- [20] M. R. Yaïche, S. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°4, pp.683 – 695.2010.
- [21] E. E. Montenegro Iturra, Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique, Thèse de doctorat Faculté des études supérieures de l'Université Laval. Canada, pp.164, 2011.
- [22] R. Cantin, Complexité du confort thermique dans les bâtiments, in actes du 6^{ème} congrès européen de science des systèmes, tenu à Paris, 2005.
- [23] K. Parson, Human thermal environments, London : 2nd édition, 2003 cite in Thellier, Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat, une approche de l'étude du confort, étude réalisée à l'université Paul Sabatier de Toulouse, France, pp.163, 1989.
- [24] B. Givoni, L'homme, l'architecture et le climat, Editions du Moniteur, France, pp.39, 1978.
- [25] ISO 7730, Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort, AFNOR, Paris. 1994.
- [26] European Passive Solar Handbook. Cite in.
- [27] J. B. Hoffmann, Ambiances climatisées et confort thermique, les actes du C.O.S.T.I.C. P110.

- [28] NEUF : Climat intérieur/ confort, Santé, confort visuel, Revue européenne d'architecture N°77, P.12 ,1978.
- [29] M. Bodart, Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique, Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Faculté des sciences appliquées, Unité d'Architecture – Belgique, pp.110, 2002.
- [30] RGPT, La réglementation générale française pour la protection du travail, cite in. Bodart M., Op,cite, pp.110, 2002.
- [31] A. Liébard, et De Herde, A., Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, Ed. Le Moniteur. Paris, pp. 30a, 2005.
- [32] A. Liébard et De Herde, A. Op.cit. pp. 29a, 2005.
- [33] T. Salomon, et S. Bedel, La maison des [méga] watts, Le guide malin de l'énergie chez soi, Ed. Terre vivante. Mens, pp.25, 2004.
- [34] Thellier, Françoise, L'homme et son environnement thermique – Modélisation, Université de Paul Sabatier de Toulouse, pp.65, 1999.
- [35] H. Boivin, la ventilation naturelle Développement d'un outil d'évaluation du potentiel de la climatisation passive et d'aide à la conception architecturale, Mémoire de maitrise, université Laval Québec, pp.115, 2007.
- [36] L. Izard, Architectures d'été construire : pour le confort d'été, Edition Edisud, pp.141, 1994.
- [37] Hugues, Boivin., la ventilation naturelle développement d'un outil d'évaluation du potentiel de la climatisation passive et d'aide à la conception architecturale, pp.103, 2007.
- [38] F. Nicol, M. Humphreys, Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard cite, cite in Grignon-Masse, L, op cit. 57, 2010.
- [39] B. Moujalled, Modélisation dynamique du confort thermique, thèse de doctorat, présentée à l'institut des sciences appliquées de Lyon, France. p.50, 2007.
- [40] Richieri, Fabrice, Développement et paramétrage de contrôleurs d'ambiance multicritères'', thèse soutenue à L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, pp.302, 2008.
- [41] J. Maalej, 'Emetteurs de chaleur dans les bâtiments : comportement thermique et étude des performances'', Thèse de Doctorat soutenue le 19 septembre 1994, l'Université de Valenciennes, pp.151, 1994.
- [42] M. Corinne, Travail à la chaleur et confort thermique, Les notes scientifiques et techniques de l'INRS, NST 184, 1999.
- [43] B. Moujalled, Modélisation dynamique du confort thermique, thèse de doctorat, présentée à l'institut des sciences appliquées de Lyon, France. 2007.
- [44] J.B. Hoffman, Ambiances climatisées et confort thermique, les actes du COSTIC, pp.110.
- [45] B.W. Olsen, thermal confort requirement fir floors occuppied by people with bare feet, cite in: Mansouri Y. op cit, pp.273, 2003.
- [46] J.J. Vogt, confort physiologique, Techniques de l'ingénieur, document N° B 2180, pp.10, 1995.
- [47] S. Deoux, Le guide de l'habitat sain, Andorra: édition medieco, pp.211, 2002.
- [48] B. Givoni, L'Homme, L'Architecture et le Climat, Edition, Le Moniteur, paris, pp39, 1978.
- [49] N. Tixier, De la notion de confort à la notion d'ambiance, in revue du laboratoire cresson de l'école d'architecture de Grenoble et CNRS Ambiances architecturales et urbaines, France. 2007.
- [50] N. Cordier, développement et évaluation de stratégies de contrôle de ventilation appliquées aux locaux de grandes dimensions, thèse de doctorat soutenue à L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, pp.61, 2007.
- [51] N. Cordier, op cit, pp62, 2007.

- [52] F. Richieri, Développement et paramétrage de contrôleurs d'ambiance multicritères, thèse de doctorat soutenue à L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, pp.302, 2008.
- [53] N. Cordier, op cit, pp.62, 2007.
- [54] M. Bruant, Développement et paramétrages de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance, in Conception en bâtiment et techniques urbaines, I.N.S.A (Institut National des Sciences Appliquées) de Lyon, France, 1997.
- [55] H. Boivin, La ventilation naturelle Développement d'un outil d'évaluation du potentiel de la climatisation passive et d'aide à la conception architecturale, mémoire de maitrise, université Laval, Québec, pp.115, 2007.
- [56] F. Sam, Réhabilitation thermique d'un local dans une zone aride -Cas de Ghardaïa, thèse de magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou,2012.
- [57] J.L. Iazard, O. Kaçala, Le diagramme bioclimatique, Envirobat-Méditerranée, laboratoire abc, Esna-Marseille, 2008 téléchargé le 20 septembre 2017 à partir du site : (<http://www.marseille.archi.fr/~izard/2008>).
- [58] The demonstration component of the Joule-Thermie programme. European commission thermie. (<http://erg.ucd.ie/ttp.html>) 18/11/2017.
- [59] A. Ould-Hennia, Choix climatiques et construction, zones arides et semi-arides : la maison à cour de Boussaâda, Thèse de doctorat, école polytechnique Fédérale de Lausanne, suisse, pp.180, 2003.

Chapitre 03

Formulation de la Problématique

Les relations reliant les grandeurs
accessibles à la grandeur
recherchée n'admettent pas
toujours une formulation
mathématique simple et font
fréquemment intervenir des
équations intégrales ou aux
dérivées partielles EDP

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la formulation mathématique générale du problème étudié. Les équations de transport de la quantité de mouvement et de la chaleur sont les équations classiques de la convection forcée. Pour décrire le transfert de la quantité de mouvement dans la canalisation de la dalle chauffante, nous avons retenu le modèle simplifié de PRANDTL qui garde que les termes les plus importants pour un écoulement laminaire dans la canalisation.

Dans la dalle chauffante, nous présentons, l'équation classique de conduction de la chaleur au sein du béton afin de calculer le champ de température complète dans tout le domaine. De plus, nous nous décrivons les transferts de chaleur qui se déroulent dans un modèle d'habitat assimilé à une cavité parallélépipédique. Les équations de transfert ont été déduites de bilans thermiques établis en chaque façade de l'enveloppe habitable. Les évolutions journalières du rayonnement solaire global et de la température de l'air ambiant sont approchées par deux modèles mathématiques sinusoïdales.

III.2 Modélisation d'écoulement du fluide dans la canalisation de la dalle

Nous avons opté pour l'étude de l'écoulement de fluide dans une conduite de section rectangulaire (un écoulement de Poiseuille).

III.2.1 Description du problème physique

Dans ce contexte, on se focalise sur la mise en équations du problème physique en utilisant les équations de conservation de la masse et de la quantité du mouvement, en plus de la conservation d'énergie dans le fluide. On commencera par l'écriture des équations générales de Navier-Stokes, puis on passera aux différents traitements de ces équations pour les adapter aux conditions de cas ordonné. Pour cela, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices nécessaires, ainsi que les conditions aux limites associées au modèle physique.

Le profil de la vitesse à l'entrée du canal est de type parabolique et l'eau est à une température T_0 , une vitesse U_0 et une pression constante P_0 . Les transferts dans le canal sont régis par les équations classiques de la convection forcée. Un repère cartésien est associé à ce modèle physique. O qui représente l'origine de ce repère est placée à l'extrémité inférieure de la canalisation. L'abscisse x est comptée positivement dans la direction normale à la paroi latérale et l'ordonnée y est comptée positivement dans la direction perpendiculaire à la paroi inférieure (Figure III.1).

Nous considérons une conduite horizontale de section rectangulaire de longueur "L" avec une hauteur "b".

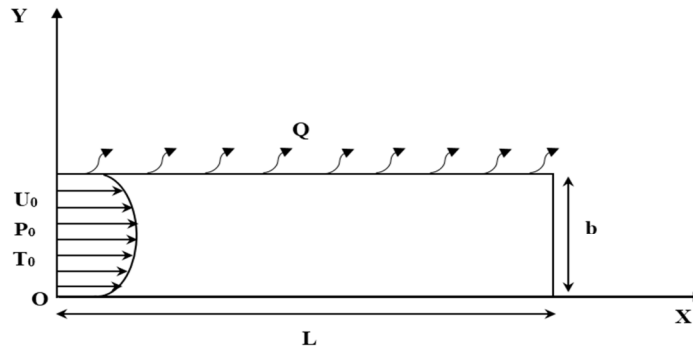


Fig. III.1 : Représentation schématique du modèle.

Dans cette partie, nous allons exposer les différentes étapes de la formulation mathématique nécessaire pour aboutir aux équations finales régissant le phénomène d'écoulement du fluide dans la canalisation de la dalle chauffante.

III.2.2 Hypothèses simplificatrices

Un ensemble d'hypothèses est retenu dans cette étude, afin de simplifier la modélisation mathématique du phénomène. Ces hypothèses sont issues des propriétés physiques de l'écoulement du fluide dans une conduite horizontale à section rectangulaire.

Les principales hypothèses prises en compte dans cette étude peuvent se résumer comme suit :

- 1) Le fluide est Newtonien, visqueux, incompressible ;
- 2) L'écoulement est transitoire ($\partial/\partial t \neq 0$), avec un régime laminaire ;
- 3) L'écoulement 2D (l'écoulement n'a donc que deux composantes de la vitesse, une le long de la paroi et une dans la direction normale) ;
- 4) Pas de sources internes de chaleur $\phi_s = 0$: la puissance thermique associée à la dissipation visqueuse est négligée ;
- 5) Propriétés physiques ($\mu, \alpha, \rho, \lambda$) sont constantes.

III.2.3 Equations régissant le champ hydrodynamique, thermique et massique

On exprimera les équations dans un système de coordonnées cartésiennes :

- Les coordonnées (x, y, z) ;
- Les vitesses (u, v, w) .

Les équations de conservation qui régissent l'écoulement d'un fluide Newtonien dans la canalisation de la dalle chauffante en béton, s'écrivent comme suit :

➤ **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (\text{III-1})$$

➤ **Equations de quantité du mouvement :**

Les équations de quantité de mouvement écrites suivants les trois axes (u, v, w) sont :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III-2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III-3})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\rho \partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (\text{III-4})$$

En appliquant le bilan de la quantité de mouvement pour un domaine fixe et en se plaçant dans le cadre des hypothèses simplificatrices. L'équation vectorielle de la conservation de la quantité de mouvement à travers un milieu fluide s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\rho \partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III-5})$$

Un traitement rigoureux de la couche limite nécessiterait la résolution complète des équations de Navier-Stokes. Leur complexité a donné à PRANDTL l'idée de les simplifier pour ne retenir que les termes les plus importants [1].

L'idée principale consiste à négliger les gradients axiaux $\partial/\partial x$ devant les gradients transverses $\partial/\partial y$. On obtient ainsi les équations de PRANDTL de la couche limite qui gouverne l'écoulement laminaire dans la canalisation de la dalle chauffante comme suit [1] :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \text{et} \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (\text{III-6})$$

Ces équations ont été établies en supposant que $\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial y}$ et que la pression ne varie pas suivant la direction "Oy". Un raisonnement analogue fournit une équation simplifiée de la température comme suit :

$$\frac{\partial T}{\partial y} \gg \frac{\partial T}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{III-7})$$

➤ Equation de la conservation de la masse

En se plaçant dans le cadre d'un fluide incompressible, l'équation de continuité obtenue en appliquant le principe de conservation de la masse, s'écrit en coordonnées cartésiennes et pour un écoulement bidimensionnel, sous la forme :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III-8})$$

➤ Equation de conservation de l'énergie

Le principe de la conservation de l'énergie mène à l'équation d'énergie suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (\text{III-9})$$

III.2.4 Conditions initiales et les conditions aux limites

➤ Conditions initiales

Le fluide est supposé initialement au repos, puis on exerce sur lui un gradient de pression constant. Ce dernier provoquera l'écoulement du fluide dans la conduite. Ce qui signifie que la vitesse $u(x, y, t)$ du fluide au temps ($t = 0$ s) est nulle :

$$u(x, y, 0) = 0.0 \quad \forall x \text{ et } \forall y \quad (\text{III-10})$$

➤ Conditions aux limites

Du fait de l'effet des couches limites hydrodynamique de PRANDTL, les particules du fluide qui se trouvent au contact avec les parois s'adhèrent à ces dernières et restent immobiles :

$$u(x, 0, t) = u(L, 0, t) \quad \forall x \text{ et } \forall t \quad (\text{III-11})$$

$$u(0, y, t) = u(0, b, t) \quad \forall y \text{ et } \forall t \quad (\text{III-12})$$

III.2.5 Variables adimensionnelle des équations locales

Pour rendre nos équations plus simples, et les résultats obtenus pourront être généralisés à tous les phénomènes similaires, on doit introduire un ensemble des variables réduites (tableau III.1) pour aboutir une forme adimensionnelle exploitable.

Grandeur	Temps	Longueur	Vitesse	Pression	Température
Echelle	t	L	u	P	T
Grandeur adimensionnelle associée	$t^* = \frac{u_0}{b} \times t$	$x^* = \frac{x}{b}$ et $y^* = \frac{y}{b}$	$u^* = \frac{u}{u_0}$	$P^* = \frac{P - P_0}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho u_0^2}$	$T^* = \frac{T}{T_0}$

Tableau III.1 : Variables adimensionnelle des équations locales.

III.2.6 Nombres sans dimension caractérisant le phénomène

Fréquemment, les principales caractéristiques d'un écoulement peuvent être déterminées à l'aide de nombre sans dimension. Dans cette section, nous présentons les nombres sans dimensions que nous avons utilisés dans ce document. La majorité de ces nombres apparaît naturellement lors de l'adimensionnalisation. Ces nombres sont les suivants :

- **Nombre de Reynolds :** Ce nombre définit le rapport entre les forces d'inertie (termes convectifs) et les forces de viscosité. De plus, le passage du régime laminaire au régime turbulent est souvent caractérisé par ce nombre.

$$Re = \frac{\rho \cdot D_h \cdot U_0}{\mu} \quad (\text{III-13})$$

avec D_h le diamètre hydraulique et U_0 une vitesse caractéristique.

- **Nombre de Prandtl :** Il quantifie le rapport entre les transferts de la quantité de mouvement par les forces visqueuses et le transfert de chaleur par conductivité thermique.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad (\text{III-14})$$

Nous avons, considéré le fluide caloporteur dans la canalisation de la dalle chauffante comme une eau chaude dans les propriétés thermiques sont les suivantes :

C_p	Chaleur spécifique	$4182 J / (kg.K)$
ρ	Masse volumique	$1000 Kg / m^3$
μ	Vitesse moyenne du fluide en m/s	$10^{-3} kg / (m.s)$
λ	Conductivité thermique	$0.597 W / (m.K)$

Tableau III.2 : Propriétés thermiques de l'eau à 20°C sous pression constante [2].

III.3 Physique de la diffusion thermique au sien de la dalle chauffante

La dalle de plancher est considérée comme un solide homogène dans laquelle on peut appliquer l'équation classique de la conduction de la chaleur. Son épaisseur sur terre-plein, contient des tubes formant une chaîne tubulaire variant sur un intervalle bien défini. Ces derniers reposent sur une couche de 4cm d'isolant thermique (polystyrène).

III.3.1 Diffusion thermique d'un solide

La diffusion de chaleur est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur dans un solide provoqué par une différence de température entre deux régions de ce milieu solide.

III.3.2 Bilan thermique de la diffusion

➤ Equation de la chaleur

Soit "v" un élément de volume du domaine "V" limité par la surface "s" (Fig. III.2) [3].

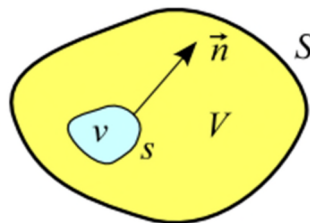


Fig. III.2 : Illustration d'un élément de volume du domaine solide considéré [3].

La quantité de chaleur stockée dans "v" est égale à la somme de la quantité de chaleur générée par les sources volumiques contenues dans "v" et de la quantité de chaleur reçue sous forme de flux à travers la surface "s" [3] :

$$\int_v \rho \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} \times dv = \int_v Q_v \times dv + \int -\vec{n} \times \left(-\lambda \times \overrightarrow{gradT} \right) \times ds \quad (III-15)$$

Transformons la dernière intégrale de la relation (III-15) en intégrale de volume à l'aide du théorème d'Ostrogradski [3] il vient :

$$\int_v \left(\rho \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \times \overrightarrow{gradT}) - Q_v \right) dv = 0 \quad (III-16)$$

Le domaine "v" étant arbitraire, on aura en tout point du solide :

$$\rho \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \times \overrightarrow{gradT}) - Q_v = 0 \quad (III-17)$$

Cette équation est appelée équation fondamentale de la chaleur.

En effet, pour un matériau homogène et isotrope de la conduction thermique, l'équation (III-17) s'écrit en coordonnées cartésiennes (x, y, z) [3] :

$$\rho \times C_p \times \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \times \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_v \quad (III-18)$$

III.3.3 Diffusion de chaleur dans la dalle chauffante de l'habitat

La modélisation numérique est basée sur l'étude bidimensionnelle de la conduction de la chaleur au sein de la dalle chauffante, sans source de chaleur ($Q_v = 0$). L'équation de la conduction thermique vaut :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_b}{\rho_b \times C_{p_b}} \times \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (III-19)$$

III.3.3.1 Conditions initiales et aux limites

La figure III.3, présente le modèle physique de l'élément de la modélisation numérique pour la diffusion de la chaleur.

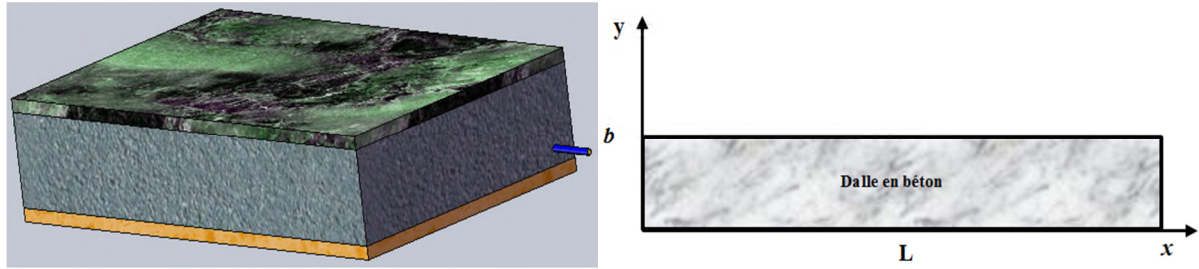


Fig. III.3 : Schématisation du modèle physique de l'élément de la dalle en béton.

II.3.3.2 Conditions initiales

Le solide est supposé initialement dans la température de l'ambiance à 25°C, puis on applique un gradient de température constant. Ce dernier provoque une différence de température entre l'ambiance et le milieu solide. Ce qui signifie que la température $T(x, y, t)$ au temps $(t = 0 \text{ s})$ est nulle :

$$T(x, y, 0) = 0.0 \quad \forall x \text{ et } \forall y \quad (\text{III-20})$$

II.3.3.3 Conditions aux limites

Du fait de l'effet que la dalle en béton se trouve en contact avec l'ambiance extérieur, les conditions aux limites sont les suivantes :

$$T(x, y, t) = T(0, b, 0) = 0.0 \quad \forall y \quad (\text{III-21})$$

$$T(x, y, t) = T(L, b, 0) = 0.0 \quad \forall y \quad (\text{III-22})$$

$$T(x, y, t) = T(L, b, 0) = T_{\text{amb}} \quad \forall x \quad (\text{III-23})$$

$$T(x, y, t) = T(L, 0, 0) = 0.0 \quad \forall x \quad (\text{III-24})$$

La dalle en béton est considérée comme un solide homogène dans les propriétés thermiques sont présentées dans le tableau III.4 ci-après.

λ	Conductivité thermique en (W/m ² . K)	1.75
C_p	Chaleur spécifique en (J/Kg. K)	1000
ρ	Masse volumique en (Kg/m ³)	2400

Tableau III.3 : Propriétés thermiques du béton [4].

III.4 Modélisation numérique des transferts thermiques dans l'habitat

III.4.1 Modèle physique de l'enveloppe habitable étudié

Dans la région d'Adrar, le béton armé est le matériau de construction le plus utilisé dernièrement en raison de éviter les inondations et à cause de sa rigidité et de sa durabilité. Le modèle physique retenu dans cette étude est un local résidentiel de type maison individuelle composée d'une seule chambre à 4 façades. La construction est implantée sur une surface de 20m².

Dans le tableau III.4, on donne les paramètres thermiques et géométriques de l'enveloppe habitable, qui ont été retenus dans la simulation numérique.

Murs	Matière de construction	Longueur "L" (m)	Hauteur "h" (m)	Epaisseur "e" (m)	Conductivité thermique "λ" (W/m. k)	Masse volumique "ρ" (kg/m³)	Chaleur spécifique "Cp" (J/kg. k)	Emissivité "ε"	Coefficient d'absorption "α"
Mur Sud	Brique plein en béton	4	3	25	1.75	2200	1000	0.54	0.60
Mur Nord									
Mur Est									
Mur Ouest									
Toiture	Brique plein + Béton armé	5	-						
Plancher	Béton armé		-						

Tableau III.4 : Paramètres thermiques et géométriques de l'enveloppe habitable.

La figure III.4 est une illustration de cet habitat, qui a été construite par les éléments suivants :

- Les parois extérieures de l'enveloppe sont constituées d'une structure légère généralement de 15 cm de bloc plein en béton lourd, en deux couches de 2.5 cm de ciment.
- Les parois de l'enveloppe dont les faces intérieures sont en contact avec l'air interne et les faces extérieurs sont en contact avec l'air externe.
- La dalle du plancher est imposée sur une terre pleine et plate. Elle est coulée directement sur une couche de 4cm d'isolant thermique, et il n'occasionne aucune déperdition thermique.
- Le toit est composé d'hourdis du ciment, d'une dalle de béton armé, du sable et du ciment mortier de telle façon que les fondations tiennent le coup et supportent la charge.

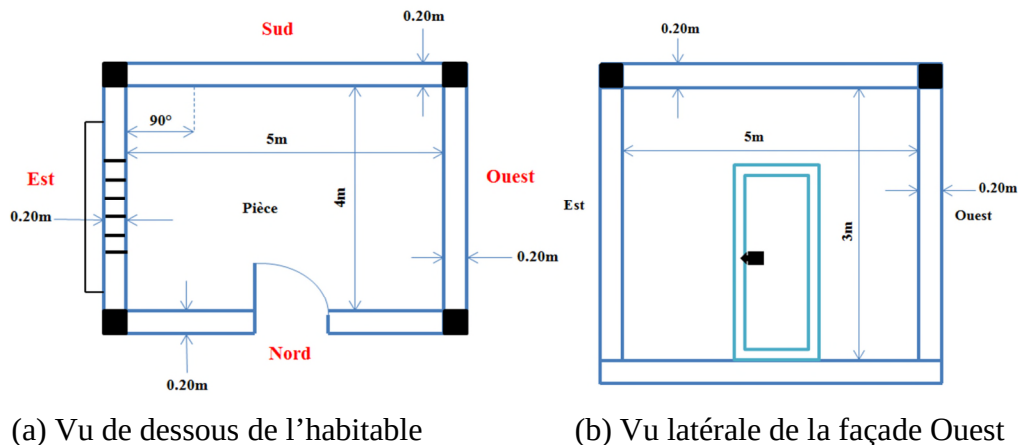


Fig. III.4 : Descriptif du modèle physique de l'enveloppe habitable étudié.

III.4.2 Stratégie de la modélisation des échanges thermiques de l'enveloppe habitable

Dans le domaine de l'énergétique des bâtiments, le modèle numérique prédictif est devenu en quelques années un outil très utilisé. Ainsi, des modèles de simulation ont été développés essentiellement pour répondre à des besoins de dimensionnement des locaux habitables. Ces modèles ne concernent que les échanges thermiques entre l'ambient et les façades externes, et l'ambient interne avec les façades internes des parois du bâtiment.

De plus, on ne peut pas étudier la stratification de l'air d'une zone, l'influence du vent sur les infiltrations d'air, la diffusion d'eau dans les parois, etc. [5].

Les changements d'état ne sont pas non plus pris en compte, donc le stockage par chaleur latente n'est pas traité, ni l'effet des variations d'humidité. C'est donc exclusivement l'enveloppe qui est étudiée. La méthode suivie vise à assurer la maîtrise des hypothèses et équations de base et à développer les aspects de modélisation associés (rayonnement, convection et conduction).

On utilise la discrétisation par la méthode nodale monodimensionnelle pour les équations des bilans énergétiques qui régissent ces échanges thermiques dans l'habitat.

Les systèmes d'équations algébriques ainsi obtenus ont été résolus par les algorithmes de Gauss. Le modèle mathématique proposé est basé sur certaines hypothèses qui peuvent se résumer comme suit :

- Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels et perpendiculaires à ces parois.
- La distribution de la température sur les surfaces extérieures et intérieures des murs est uniforme.
- La convection est naturelle (libre) et l'écoulement est laminaire.
- La porte et la fenêtre sont supposées parfaitement fermées.
- L'humidité est négligée (air sec), selon le site d'étude.
- La densité du flux solaire incidente sur les différentes façades du local sont calculées à l'aide du modèle semi-empirique (voir chapitre I).
- La température du plancher chauffant est variée selon une fonction sinusoïdale.
- Nous avons choisi le dix-septième jour du mois de juillet comme une journée type pour l'année 2014 (notion de la journée type).

- Nous avons choisi d'autres journées typiques au milieu de quatre saison de l'année 2014 pour la comparaison entre les différents types échanges thermiques déroulent dans l'enveloppe habitable.
- On suppose que la température ambiante extérieure est égale à la température du sol $T_{amb} = T_{sol}$.
- On suppose que la brique est pleine et en béton lourd.

III.4.3 Physique des transferts thermiques dans l'habitat

La problématique posée dans ce travail est le confort dans les maisons individuelles existantes, en souhaitant de créer un climat intérieur agréable et bien adapté à nos besoins pour un climat désertique. Dans les pays de climat tempéré souvent industrialisés, la nécessité de réduire la consommation énergétique et de diminuer les gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment motive régulièrement le renforcement des exigences au niveau de la performance énergétique des locaux habitables. Ceci se traduit par une modification de la réglementation thermique et en particulier par une volonté de réduction des coefficients de transmission thermique pour les différents composants de l'enveloppe habitable [5].

Dans les régions chaudes et désertiques, et c'est le cas dans la région d'Adrar au Sud de l'Algérie, la climatisation des bâtiments est un besoin essentiel et pour accomplir cette tâche, les climatiseurs sont utilisés. Cet équipement est utilisé pour refroidir l'espace d'habitation dans l'édifice dont l'échauffement est dû à l'effet combiné de l'air chaud de l'extérieur et de la chaleur produite par les habitants, et créant ainsi un environnement confortable. Mais aussi, l'inverse dans la saison d'hiver, il faudra des équipements pour un chauffage confortable.

Dès que cet équipement fonctionne continuellement, la consommation d'énergie et le coût induit par cet équipement peuvent être très élevés. De plus, les systèmes des chauffages peuvent ne pas être très efficaces si jamais n'il y a une mauvaise conception architecturale, des périodes d'inconfort pouvant subsister. Cependant les systèmes passifs de chauffage sont employés depuis très longtemps. Ils ont influencé l'architecture par des protections solaires, les petites fenêtres, les peintures blanches, etc.

Les recherches au niveau de la thermique du bâtiment, montrent que l'isolation thermique de l'enveloppe joue un rôle important dans la maîtrise de la consommation d'énergie. En effet, une grande part des échanges thermiques est liée aux flux de chaleur à travers les murs, la toiture et le plancher.

Donc, en isolant une maison, en hiver on réduit les fuites de chaleur et, en été, on réduit les gains de chaleur pour maintenir l'ambiance intérieure à une température proche de celle considérée comme confortable par les occupants. Par conséquent, l'utilisation d'un système d'isolation thermique dans l'enveloppe d'un bâtiment sous tous les cieux est une réponse à l'amélioration du confort thermique [5].

D'un autre côté, le bâtiment est un système complexe où de nombreux phénomènes physiques interviennent. Ils sont généralement traduits par des équations résolues à l'aide des méthodes numériques. Cette démarche consiste à élaborer des modèles qui contribuent étroitement au développement de la connaissance et de la quantification des phénomènes.

III.4.4 Paramètres mise en jeu dans le transfert thermique au sien de l'habitat

Il est nécessaire de déterminer les coefficients de transfert de chaleur qui sont généralement fonction des températures des différents milieux de notre modèle [6]. La densité de flux de chaleur est exprimée par la relation :

$$\varphi_{x-i,j} = q_{x-i,j} / S = h_{x-i,j} \times (T_j - T_i) \quad (\text{III-25})$$

III.4.4.1 Transfert de chaleur par conduction

Considérons un solide de conductivité thermique " λ ", d'épaisseur " e " dans les faces sont maintenue aux températures " T_1 " et " T_2 ". La densité du flux de chaleur entre les isothermes " T_1 " et " T_2 " vérifie la loi de Fourier et s'écrit [6] :

$$\varphi_{cond-1,2} = \frac{\lambda}{e} \times (T_1 - T_2) = h_{cond-1,2} \times (T_1 - T_2) \quad (\text{III-26})$$

III.4.4.2 Transfert de chaleur par convection naturelle

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle entre une paroi et le fluide qui circule en son voisinage est, en règle générale, déduite du nombre de Nusselt [6] :

$$Nu = \frac{h_{conv-i,j} \times L}{\lambda} \quad (\text{III-27})$$

où :

$$Nu = a \times (Gr \times Pr)^n \quad (\text{III-28})$$

et :

$$Gr = \frac{g \times \beta \times L^3 \times \Delta T}{\nu^2} \quad (\text{III-29})$$

avec :

$$Pr = \frac{\rho \times \nu \times Cp}{\lambda} \quad (\text{III-30})$$

III.4.4.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Afin de tenir compte des propriétés optiques et géométriques des surfaces considérées, il est possible d'utiliser le facteur de forme " $F'_{1 \rightarrow 2}$ " défini par l'expression [6] :

$$F'_{1 \rightarrow 2} = \left[\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1 \rightarrow 2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times \frac{S_1}{S_2} \right]^{-1} \quad (\text{III-31})$$

Le flux radiatif net " $q_{r,1 \rightarrow 2}$ ", entre les surfaces "1" et "2" de températures respectives " T_1 " et " T_2 ", est donné par :

$$q_{r,1 \rightarrow 2} = S_1 \times F'_{1 \rightarrow 2} \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{III-32})$$

La densité surfacique du flux radiatif au niveau de la surface d'indice 1 s'écrit :

$$\varphi_{r,1 \rightarrow 2} = \frac{q_{r,1 \rightarrow 2}}{S_1} = F'_{1 \rightarrow 2} \times \sigma \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{III-33})$$

Sous forme linéarisée, $q_{r,1 \rightarrow 2}$ s'écrit :

$$\varphi_{r,1 \rightarrow 2} = hr_{1 \rightarrow 2} \times (T_1 - T_2) \quad (\text{III-34})$$

En égalisant les trois relations précédentes (III-32), (III-33) et (III-34), l'expression générale du coefficient de transfert radiatif entre les surfaces "1" et "2" vérifie l'expression suivante [6] :

$$hr_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sigma \times (T_1^2 - T_2^2) \times (T_1 + T_2)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1 \rightarrow 2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times \frac{S_1}{S_2}} \quad (\text{III-35})$$

III.4.4.4 Coefficients de transfert de chaleur par conduction

Les matériaux utilisés dans la construction de l'habitat sont supposés homogènes. Soient $e_{p_i}(e_{p_{ex}}, e_{p_{in}})$, les épaisseurs des parois externes et internes, du béton, du gypse, de conductivité thermique $\lambda_i(\lambda_{ex}, \lambda_{in})$, le coefficient de transfert de chaleur par conduction à travers l'épaisseur de ces matériaux vérifie [6] :

$$h_{cond,i} = \frac{\lambda_i}{e_{p_i}} \quad (III-36)$$

➤ Au niveau de la toiture

• Paroi externe de la toiture

L'échange de chaleur entre la face externe de la toiture et l'air ambiant se fait essentiellement sous l'action du vent. Il est caractérisé par le coefficient de transfert de chaleur h_{cl} en $(W.m^{-2}.K^{-1})$ [7].

$$h_{cl} = 5.7 + 3.8 \times V_{vent} \quad (III-37)$$

➤ Au niveau de l'habitat

Les coefficients de transfert de chaleur hc_{ps} , hc_{pn} , hc_{po} , hc_{pe} entre les parois verticales et l'air avoisinant sont calculés à l'aide de la relation proposée par Churchill et Chu [6, 8] :

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 \times Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (III-38)$$

38)

avec :

$$Ra_L \leq 10^9 \quad (III-39)$$

$$T_{fNu} = \frac{T_a + T_{int}}{2} \quad (III-40)$$

$$Gr_L = \frac{g \times \beta \times L^3 \times \Delta T}{\nu^2} \quad (III-41)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par conduction naturelle entre la face supérieure d'un plan horizontal et un fluide dans la température inférieure à celle du plan est déduit de la relation proposée par Mc Adams [8] :

$$Nu = 0.54 \times (Gr \times Pr)^{0.25} \quad (III-42)$$

avec :

L_C = Surface/Périmètre du plan

En régime laminaire : $10^4 < Gr < 10^9$

Le coefficient de transfert de chaleur pour une face inférieure d'un plan horizontal chaud dans un environnement froid, ou bien face supérieure d'un plan horizontal froid dans un environnement chaud est aussi déduit par la relation de Mc Adams [8] :

$$Nu = 0.25 \times (Gr \times Pr)^{0.25} \quad \text{avec } L_C = \text{Surface/Périmètre du plan} \quad (III-43)$$

III.4.4.5 Coefficients de transferts de chaleur par rayonnement

➤ Au niveau de la toiture face externe

La paroi externe de la toiture est le siège d'un échange radiatif avec une par la voute céleste et d'autre part le milieu ambiant notamment le sol. Le coefficient qui permet de déterminer ce transfert est déduit de la relation suivante [5] :

$$hr_{VC} = \frac{\sigma \times (T_C^2 - T_{VC}^2) \times (T_C - T_{VC})}{\frac{1}{\varepsilon_C} + \frac{1}{F_{VC}} - 1} \quad (III-44)$$

$$hr_{SOL} = \frac{\sigma \times (T_C^2 - T_{SOL}^2) \times (T_C - T_{SOL})}{\frac{1}{\varepsilon_C} + \frac{1}{F_{SOL}} - 1} \quad (III-45)$$

La littérature reporte plusieurs relations pour déterminer la température de la voute céleste " T_{VC} ". Parmi lesquelles, nous avons retenu celle proposée par Swinbank [7] :

$$T_{VC} = 0.0552 \times T_{amb}^{1.5} \quad (III-46)$$

➤ Facteur de forme géométrique entre deux plans parallèles de longueurs infinies

Soient " i " un indice concernant le béton armé de la paroi " p ". Le facteur de forme géométrique $F_{p_1 \rightarrow p_i}$ entre la paroi interne " p_1 " et les trois parois internes " i " est donné par [5, 9] :

- Si la paroi " p_1 " est perpendiculaire avec la paroi " p_i " (Fig. III.5), l'expression vaut :

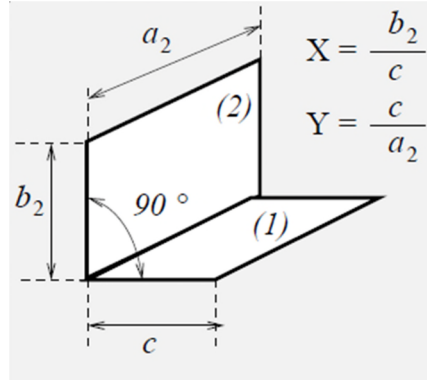


Fig. III.5 : Descriptions de deux plans perpendiculaires [9].

$$F_{p_1 \rightarrow p_i} = \frac{1}{Y\pi} \left(Y \tan^{-1} \frac{1}{Y} + X \tan^{-1} \frac{1}{X} - \sqrt{X^2 + Y^2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{1}{X^2 + Y^2}} \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1+Y^2)(1+X^2)}{1+Y^2+X^2} \left[\frac{Y^2(1+Y^2+X^2)}{(1+Y^2)(Y^2+X^2)} \right]^{Y^2} \left[\frac{X^2(1+X^2+Y^2)}{(1+X^2)(X^2+Y^2)} \right]^{X^2} \right\} \right) \quad (\text{III-47})$$

avec :

$$X = \frac{b_i}{a_i} \quad \text{et} \quad Y = \frac{c}{a_i} \quad (\text{III-48})$$

- Si la paroi " p_1 " est parallèle avec la paroi " p_i " (Fig. III.6), l'expression vaut [5, 9]:

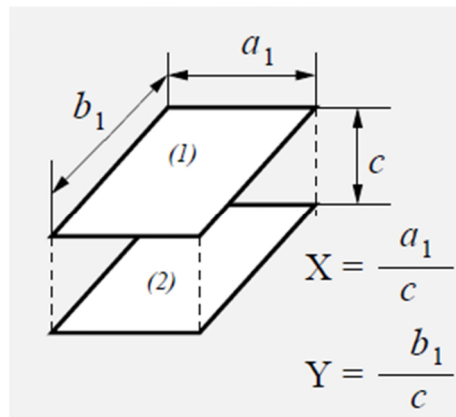


Fig. III.6 : Descriptions de deux plans parallèles [9].

$$F_{p_1 \rightarrow p_i} = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + X^2)(1 + Y^2)}{1 + X^2 + Y^2} \right]^{1/2} + X \sqrt{1 + Y^2} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1 + Y^2}} \right. \\ \left. + Y \sqrt{1 + X^2} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1 + X^2}} - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right\} \quad (\text{III-49})$$

avec :

$$X = \frac{a_1}{c} \text{ et } Y = \frac{b_1}{c} \quad (\text{III-50})$$

Finalement, le coefficient d'échange par rayonnement entre ces deux parois est [5] :

$$hr_{p_i \rightarrow p_i} = \varepsilon_p \times \sigma \times F_{p_1 \rightarrow p_i} \times (T_{p_1}^2 - T_{p_i}^2) \times (T_{p_1} - T_{p_i}) \quad (\text{III-51})$$

III.5 Modélisation de l'évolutions journalières de la température ambiante et du rayonnement solaire global

Les évolutions journalières du rayonnement solaire global et de la température de l'air ambiant sont approchées par deux fonctions sinusoïdales, à savoir [10] :

$$q(h) = q_{\max} \times \sin \left[\frac{\pi}{\Lambda} \times (h - h_s) \right] \quad (\text{III-52})$$

$$T_0(h) = \frac{T_{0\max} + T_{0\min}}{2} - \frac{T_{0\max} - T_{0\min}}{2} \times \sin \left(\frac{2\pi \cdot h}{\Lambda} - \delta \right) \quad (\text{III-53})$$

Où $q_{\max}$ est l'intensité maximale du rayonnement solaire global, h_s l'heure du lever du soleil et h est le temps, en heures.

$T_{0\max}$ et $T_{0\min}$ sont, respectivement, les températures maximale et minimale enregistrées durant la journée.

Λ est la durée de l'ensoleillement et δ est le déphasage entre le maximum de la température ambiante et celui du rayonnement solaire global.

Dans nos calculs, nous considérons une durée d'ensoleillement de 14 heures avec un déphasage entre le rayonnement solaire global et la température de l'air ambiant d'une heure.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la formulation mathématique générale du problème étudié. Les équations de transport de la quantité de mouvement, de la chaleur et de la masse dans le canal (milieu fluide) sont les équations classiques de la convection forcée. Pour décrire le transfert de la quantité de mouvement la canalisation de la dalle en béton, nous avons également, présenté les formules régissant la conduction thermique dans la dalle chauffant de systèmes PSD (milieu solide). Par ailleurs, les facteurs mis en jeu de différents types de transfert thermique au sein de l'enveloppe habitable ont été exposés avec le modèle physique de la modélisation de l'évolution journalière de la température ambiante et du rayonnement solaire global.

Références bibliographiques

- [1] Ph. Marty, “ Transferts thermiques convectifs”, Génie des Procédés Master 2, Université Joseph Fourier, Grenoble, version modifiée le 9 Juillet 2012.
- [2] L. Chahwane, “ Valorisation de l’inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments”, thèse de doctorat de l’université de Grenoble, Août 2006.
- [3] Y. Debard, Méthode des éléments finis : thermique, Master Modélisation Numérique et Réalité Virtuelle, Université du Mans, 2011.
- [4] N. Morel, E. Gnansounou, Énergétique du bâtiment, école polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008.
- [5] A. Oudrane, B. Aour, B. Zeghamati, X. Chesneau, M. Hamouda, Analyse numérique de transfert thermique unidimensionnel d’une enceinte habitable désertique, Recueil de mécanique vol.2 n°2 001, pp.089–102, 2 017.
- [6] K. Mansatiansin, Modélisation et simulation des transferts et de l’éclairement dans un habitat bioclimatique, thèse de doctorat en sciences de l’ingénieur, spécialité mécanique énergétique, université de Perpignan, 2005.
- [7] S. Oudjedi, A. Boubghal, Etude paramétrique d’un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie : 2)”, Revue des Energies Renouvelables SMSTS’08 Alger, pp.255–266, 2008.
- [8] <http://processs.free.fr/Pages/VersionMobile0.php?page=4556> (20/10/2017).
- [9] O. Perrot, cours de rayonnement, I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque Département Génie Thermique et énergie, 2011.
- [10] Groupe de la mécanique énergétique laboratoire de mathématique et physique “LAMPS”, Perpignan 2015-2016.

Chapitre 04

Méthodologie et Traitement Numérique

Dans ce chapitre, on propose des méthodes pour la modélisation numérique des équations aux dérivées partielles à l'aide de la méthode des différences finies où la méthode nodale. On expose son application aux domaines de chauffage habitable.

IV.1 Introduction

La modélisation d'un problème physico-thermique, consiste en la formulation mathématique des différents phénomènes intervenant dans le processus, sous forme d'équations aux dérivées partielles couplées. Ces équations sont le plus souvent à plusieurs variables, et non homogènes, ce qui rend leur résolution analytique très délicate. Les méthodes numériques souvent utilisées ne fournissent que des solutions approximatives, et le besoin en solutions analytiques (dites solutions exactes) ne cesse de se développer.

Ce chapitre sera consacré à la méthodologie théorique des méthodes numériques exploitées dans la modélisation numérique des systèmes de chauffage solaire à usage individuel d'une manière particulière. Dans ce contexte, nous allons aborder la résolution numérique d'équations fondamentales du chauffage habitable en prenant en compte les conditions initiales et aux limites.

L'examen des solutions exactes des équations régissant les échanges thermiques à travers l'enveloppe d'un local habitable est très important pour de nombreuses raisons. Elles constituent une norme pour vérifier la véracité de nombreuses méthodes approximatives, numériques ou empiriques. Bien que les techniques informatiques permettent l'intégration numérique complète des équations des transferts thermiques possible, l'exactitude des résultats peut être établie par une comparaison avec une solution exacte.

A titre d'exemple, il est bien connu que la plupart des solutions pour des écoulements non stationnaires des fluides caloporteurs visqueux sont sous forme de séries. Ces séries peuvent être rapidement convergentes pour les grandes valeurs du temps, mais lentement convergentes pour les petites valeurs du temps, ou vice versa. Parfois, il peut être difficile d'obtenir la solution pour les petites valeurs du temps, mais il peut être facile de l'obtenir pour les grandes valeurs des temps et l'inverse peut aussi être vrai [1].

IV.2 Concept de la résolution numérique

Les méthodes basées sur l'approximation numérique sont devenues un outil largement utilisé dans la résolution des problèmes de la physique. Cela est dû au développement important que connaît le domaine informatique ces dernières décennies. Un tel développement qui a rendu le calcul numérique plus rapide, plus précis et moins coûteux.

En mécanique énergétique, les méthodes numériques les plus connues sont :

- Méthodes des différences finies ;
- Méthodes des éléments finis ;
- Méthodes des volumes finis ;

- Méthodes nodales.

Une petite comparaison entre ces quatre méthodes a fait que notre choix soit tombé sur la méthode des différences finies pour la résolution des équations de Navier-Stokes, qui régissent l'écoulement de fluide caloporteur dans les canalisations de la dalle chauffante, et l'équation de la chaleur qui régit la diffusion au sein de la dalle plancher d'un côté. D'un autre côté, nous avons choisi la méthode nodale pour la modélisation des transferts thermiques qui se déroulent dans l'enveloppe habitable. Cela est dû au fait de leurs mises en œuvre relativement faciles et à leurs préservations du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle.

IV.2.1 Méthode des différences finies

Cette méthode est basée sur la technique du développement en séries de Taylor qui permet d'approximer la valeur d'une fonction en un point donné, ainsi que toutes ses dérivées en un point voisin en espace ou en temps. Cette technique permet de développer des schémas pour remplacer les dérivées premières et secondes des "EDP", pour pouvoir envisager une solution numérique par ordinateur. Pour obtenir une solution numérique, il faut tout d'abord définir un domaine numérique constitué par un ensemble de points discrets appelé grille de calcul. Les valeurs instantanées et locales des variables dépendantes du problème sont définies sur l'ensemble des points de la grille de calcul. La différence entre cette vue numérique à travers un certain nombre de points et la distribution continue exacte, représente l'erreur commise par la méthode numérique. Il est tout à fait logique de penser que plus le nombre de points est important, plus la visualisation est claire, un peu comme les pixels d'une photo numérique [2].

L'étape suivante, consiste à approximer ou remplacer toutes les dérivées partielles par des schémas discrets (différences finies). L'EDP sera transformée en équation algébrique. Cette équation algébrique est ensuite appliquée sur l'ensemble des nœuds de la grille de calcul. Le résultat sera un système d'équation comportant autant d'équations que d'inconnues (nœuds). Ce système sera ensuite résolu par une méthode appropriée. Le résultat sera une distribution discrète de la solution sur l'ensemble des points du domaine de calcul [2].

Ses principaux avantages sont la grande simplicité d'écriture et le faible coût de calcul. D'un autre côté, elles ont des inconvénients tels que : limitation à des géométries simples, difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann [3]. C'est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. Son algorithme numérique comporte les étapes suivantes :

1. La génération du maillage : Le domaine d'analyse (de calcul) est divisé en petits espaces élémentaires finis ;
2. L'intégration formelle des équations sur tous espaces (finis) de contrôle ;
3. La discrétisation des différentes équations régissant le phénomène considéré ;
4. La résolution du système d'équations algébriques par l'utilisation d'une méthode itérative.

IV.2.2 Maillage du domaine de calcul

Dans la méthode des différences finies, la zone d'intégration est divisée en un certain nombre de sous-domaines élémentaires. La figure IV.1 représente des exemples de grilles de calcul.

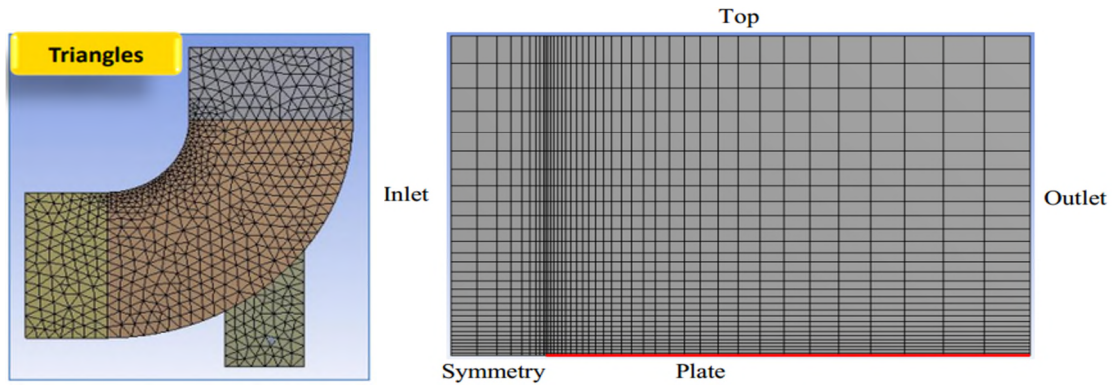


Fig.IV.1 : Grilles de calcul par la méthode des différences finies.

Avant de commencer, il faut trouver un moyen qui nous permettra de localiser spatialement et temporellement tous les points de la solution numérique. C'est ce qu'on va appeler création de la grille de calcul. Dans la suite, on va résonner sur un espace plan (2D) et l'extension pour le 3D sera faite de manière intuitive. La figure IV.2 représente la manière la plus directe pour repérer les points suivant la procédure structurée.

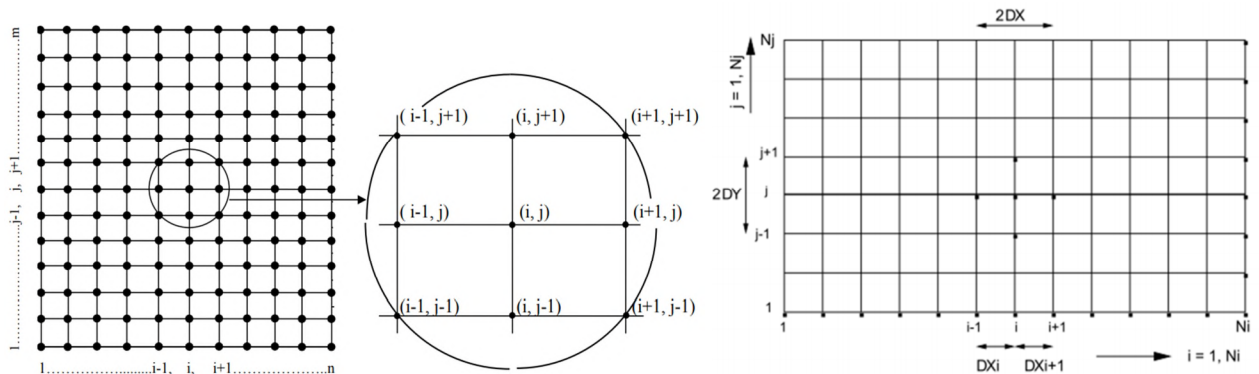


Fig.IV.2 : Eléments de maillage du domaine de calcul en (i, j) de 2D.

IV.2.3 Maillage non-structuré

Une autre façon de mailler un domaine de calcul est de définir un nuage de points, pas nécessairement structuré. Dans ce cas-ci, il faudra numéroté les points de calcul un par un. Chaque point aura ces coordonnées de "x" et "y". En plus il faudra relier ces points entre eux de façon à créer des éléments (voir Fig. IV.1) [2]. Le fichier de la grille de calcul sera complété par une liste des éléments (eux-mêmes numérotés) et les points composants chaque élément [2].

IV.3 Méthode nodale

L'approche nodale, dite aussi multizone, considère que chaque zone d'un bâtiment est parfaitement et instantanément mélangée. Ainsi chaque zone peut être caractérisée par une pression, une température et une concentration par espèce présente. Cette méthode est largement utilisée, tant dans le domaine des transferts thermiques qu'aérauliques. Cette hypothèse de mélange parfait présente l'intérêt de pouvoir se limiter à un seul nœud pour la caractérisation de l'ambiance au sein d'une zone du bâtiment. Les équations régissant les transferts de masse et de chaleur sont alors considérablement simplifiées et les outils utilisant cette méthode permettent ainsi de prédire rapidement le comportement d'un bâtiment sur de longues périodes de temps telles qu'une saison ou une année entière [3].

A l'origine, les méthodes basées sur les bilans énergétiques ont été introduites pour permettre une représentation des charges énergétiques sur les bâtiments (ex. Kusuda [3]) plus rigoureuses que celles apportées par les méthodes analytiques basées sur les fonctions de transfert. Au lieu d'utiliser des fonctions de transfert pour évaluer la réponse de la température ambiante aux sollicitations liées au rayonnement solaire, aux charges internes ou aux types de matériaux composant l'enveloppe, cette approche consiste à résoudre les équations de bilan d'énergie au sein des zones et à la surface des parois du bâtiment. Ces bilans d'énergie tiennent compte des principaux modes de transfert de chaleur qui sont : la conduction dans les matériaux, les échanges par rayonnement de grande longueur d'onde entre les surfaces internes, le rayonnement solaire, la convection entre l'air et les parois solides (parois opaques, vitrages, etc.).

La résolution du système d'équations couplées formé par l'ensemble des bilans d'énergie permet de déterminer à chaque instant la température de l'air et des surfaces de l'enveloppe du bâtiment. La modélisation des performances énergétiques des bâtiments, a été complétée par la modélisation des

composants des systèmes de chauffage, de ventilation et de traitement d'air, tels que ventilateurs, gaines de distribution, batteries de traitement d'air, chaudières, groupes de production de froid, etc.

Le but de l'étude qui suit, est de rationaliser le recours à des énergies coûteuses et de concevoir des locaux habitables plus confortables a amené les différents acteurs du processus de conception et de gestion des habitats à chercher de mieux connaître, et de bien maîtriser le comportement en se basant sur l'optimisation énergétique des paramètres géométriques et thermiques de l'enveloppe habitable. Ceci représente l'objectif principale de ce modeste travail.

Pour atteindre cet objectif, nous nous attacherons ici aux méthodes de calcul qui permettent de modéliser les maisons individuelles, afin d'analyser l'évolution de son comportement thermique et de prévoir les conséquences qui en découlent en réponse aux excitations appliquées par son environnement climatique naturel et les exigences thermiques que nous devons tenir en considération.

IV.4 Traitement numérique d'écoulement du fluide dans la canalisation rectangulaire

Nous avons opté pour l'étude de l'écoulement de fluide dans une conduite de section rectangulaire. Un écoulement visqueux incompressible entre deux plaques de grande étendue, parallèles et séparées par une petite distance entre deux parois indéformables. Les deux plaques sont fixes et le fluide est mis en mouvement par un gradient de pression.

Alors, après la substitution par les variables adimensionnelles des équations locales (tableau III.1, chap. III), l'équations (III-6), (III-7) et (III-8) de (chapitre. III) devineront :

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \quad (\text{IV-1})$$

Suivant la discrétisation par la méthode implicite des différences finies, on trouve :

- Pour la vitesse par rapport au terme du temps ;

$$\left. \frac{\partial u^*}{\partial t^*} \right)_{t^*=0} = \frac{u_{i,j}^{*t+\Delta t} - u_{i,j}^{*t}}{\Delta t^*} \quad (\text{IV-2})$$

- Pour la vitesse par rapport au direction (Ox), nous avons opté le schéma arrière ;

$$\left. \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)_{x^*=0} = \frac{u_{i,j}^{*t+\Delta t} - u_{i-1,j}^{*t+\Delta t}}{\Delta x^*} \quad (\text{IV-3})$$

➤ Pour la vitesse par rapport au direction (Oy), nous avons opté le schéma centré ;

$$\left. \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right)_{y^*=0} = \frac{u_{i,j+1}^{*t+\Delta t} - u_{i,j-1}^{*t+\Delta t}}{2\Delta y^*} \quad (\text{IV-4})$$

➤ Pour la vitesse d'ordre 2 par rapport au direction (Oy), nous avons opté le schéma centré ;

$$\left. \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right)_{y^*=0} = \frac{u_{i,j-1}^{*t+\Delta t} - 2u_{i,j}^{*t+\Delta t} + u_{i,j+1}^{*t+\Delta t}}{\Delta y^{*2}} \quad (\text{IV-5})$$

Si on déduit les coefficients de la matrice de Gauss, on trouve les relations suivantes :

$$A = u_{i,j-1}^{*t+\Delta t}, \quad B = u_{i,j}^{*t+\Delta t}, \quad C = u_{i,j+1}^{*t+\Delta t} \quad (\text{IV-6})$$

$$A = u_{i,j-1}^{*t+\Delta t} = \left(-\frac{v_{i,j}^{*t}}{2\Delta y^*} - \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{\Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-7})$$

$$B = u_{i,j}^{*t+\Delta t} = \left(-\frac{1}{\Delta t^*} + \frac{u_{i,j}^{*t}}{\Delta x^*} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{2}{\Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-8})$$

$$C = u_{i,j+1}^{*t+\Delta t} = \left(\frac{v_{i,j}^{*t}}{2\Delta y^*} - \frac{1}{\text{Re} \cdot \Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-9})$$

$$D = \left(\frac{u_{i,j}^{*t}}{\Delta t^*} + \frac{u_{i,j}^{*t} \times u_{i-1,j}^{*t+\Delta t}}{\Delta x^*} \right) \quad (\text{IV-10})$$

L'équation de la conservation de l'énergie dans le fluide caloporteur devient comme suite :

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \cdot \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \quad (\text{IV-11})$$

De même, pour les coefficients de la matrice de Thomas, on trouve :

$$A = T_{i,j-1}^{*t+\Delta t}, \quad B = T_{i,j}^{*t+\Delta t}, \quad C = T_{i,j+1}^{*t+\Delta t} \quad (\text{IV-12})$$

$$A = T_{i,j-1}^{*t+\Delta t} = \left(-\frac{v_{i,j}^{*t}}{2\Delta y^*} - \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re} \cdot \Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-13})$$

$$B = T_{i,j}^{*t+\Delta t} = \left(\frac{1}{\Delta t^*} + \frac{u_{i,j}^{*t}}{\Delta x^*} + \frac{2}{\text{Pr} \cdot \text{Re} \cdot \Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-14})$$

$$C = T_{i,j+1}^{*t+\Delta t} = \left(\frac{v_{i,j}^{*t}}{2\Delta y^*} - \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re} \cdot \Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-15})$$

$$D = \left(\frac{T_{i,j}^{*t}}{\Delta t^*} + \frac{u_{i,j}^{*t} \times T_{i-1,j}^{*t+\Delta t}}{\Delta x^*} \right) \quad (\text{IV-16})$$

Dans l'équation de la conservation de la masse, on trouve :

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (\text{IV-17})$$

avec :

$$v_{i,j}^{*t+\Delta t} = v_{i,j-1}^{*t+\Delta t} - \frac{\Delta y}{\Delta x} (u_{i,j}^{*t+\Delta t} - u_{i-1,j}^{*t+\Delta t}) \quad (\text{IV-18})$$

IV.4.1 Organigramme de traitement numérique de l'écoulement du fluide

Le traitement de l'écoulement du fluide caloporteur dans la canalisation de la dalle en béton est basé sur les étapes suivantes :

- Dimensionnement de la canalisation du fluide.
- Introduction des propriétés thermiques du fluide.
- Initialisation de toutes les variables du système.
- Résolution des équations de Navier-Stokes régissant ce type d'écoulement de fluide.
- Test de convergence sur la vitesse et la température du fluide.
- Test sur le domaine du fluide.
- Test sur le temps global du calcul.

Dans la figure IV.3 ci-après nous nous présentons les démarches essentielles de différents types de calcul déroulé dans le code de la modélisation numérique de l'écoulement du fluide dans les tubes de la dalle en béton.

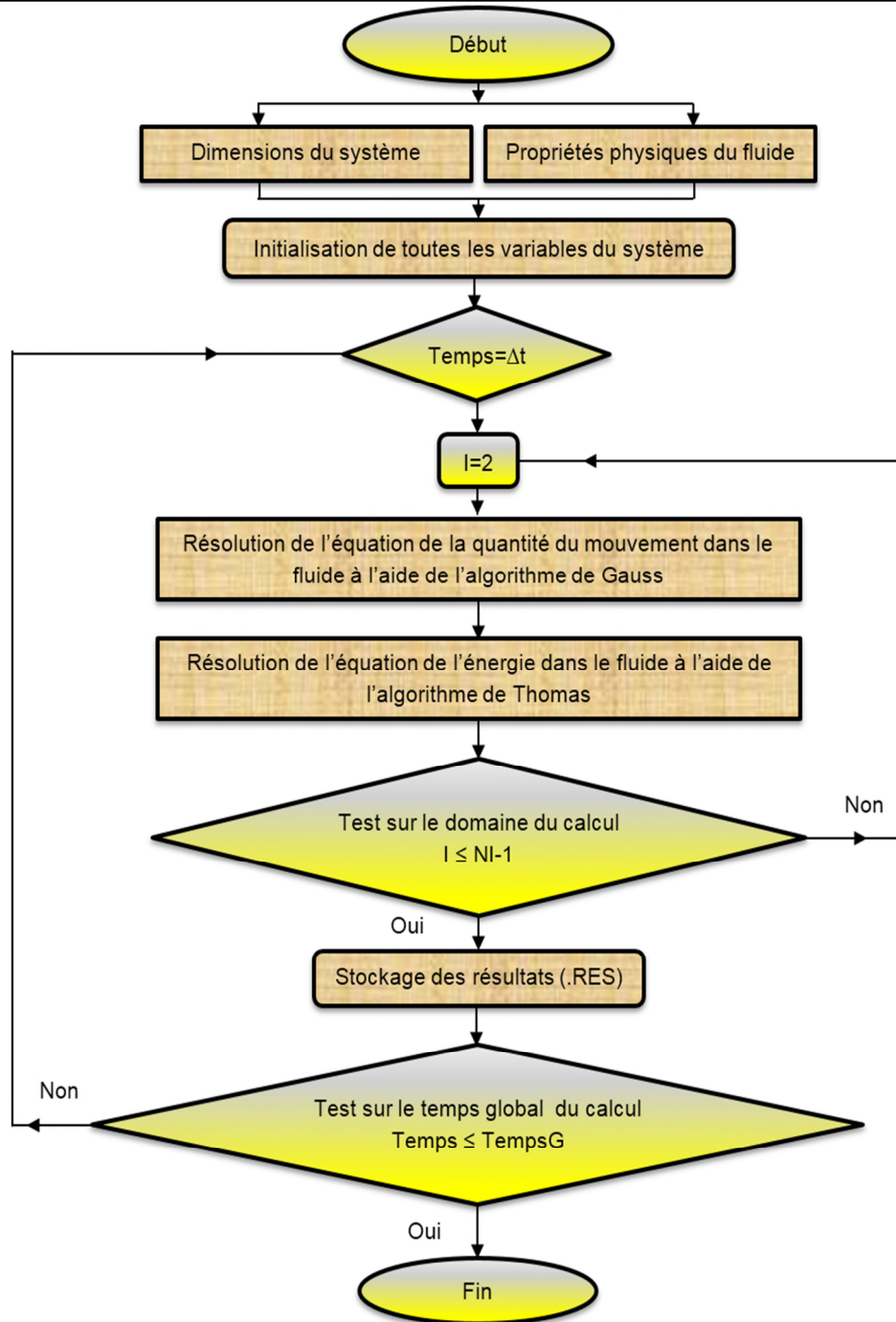


Fig. IV.3 : Organigramme de la modélisation numérique de l'écoulement du fluide dans les tubes de la dalle de l'enveloppe habitable.

IV.5 Traitement numérique de la diffusion thermique dans la dalle chauffante

IV.5.1 Equations adimensionnelles de la conduction thermique dans la dalle en béton

En se basant sur les variables adimensionnelles des équations locales (tableau III.1), on trouve l'équation adimensionnelle de la conduction thermique au sein de la dalle chauffante comme suit :

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\lambda_b}{\mu_f \times Cp_b} \times \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-19})$$

Donc, les coefficients de la matrice de Thomas sont :

$$A = T_{i,j-1}^{*t+\Delta t} = \left(\frac{-\lambda_b}{\text{Re} \times Cp_b \times \mu_f} \times \frac{1}{\Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-20})$$

$$B = T_{i,j}^{*t+\Delta t} = \left(\frac{1}{\Delta t^*} + \frac{2\lambda_b}{Cp_b \times \mu_f \times \text{Re}} \times \left(\frac{1}{\Delta x^{*2}} + \frac{1}{\Delta y^{*2}} \right) \right) \quad (\text{IV-21})$$

$$C = T_{i,j+1}^{*t+\Delta t} = \left(\frac{-\lambda_b}{\text{Re} \times \mu_f \times Cp_b \times \Delta y^{*2}} \right) \quad (\text{IV-22})$$

$$D = \frac{T_{i,j}^{*t}}{\Delta t^*} + \frac{\lambda_b}{Cp_b \times \mu_f \times \text{Re}} \times \left(\frac{T_{i-1,j}^{*t+\Delta t} + T_{i+1,j}^{*t+\Delta t}}{\Delta x^{*2}} \right) \quad (\text{IV-23})$$

IV.5.2 Organigramme de traitement numérique de conduction thermique dans la dalle en béton

Le traitement numérique de la conduction thermique au sein de la dalle en béton est basé sur les étapes suivantes :

- Dimensionnement de la dalle en béton.
- Admission des propriétés thermiques du béton.
- Initialisation de toutes les variables du système algébrique de la dalle en béton.
- Résolution de l'équation de la conservation d'énergie dans la dalle.
- Test de convergence sur la température de différents points dans la dalle chauffante.
- Test sur le domaine solide (béton).
- Test sur le temps global du calcul.

Dans la figure IV.4 ci-après nous nous montrons le cheminement essentiel de différents types de calcul déroulé dans le code de la modélisation numérique de la diffusion thermique dans la dalle en béton.

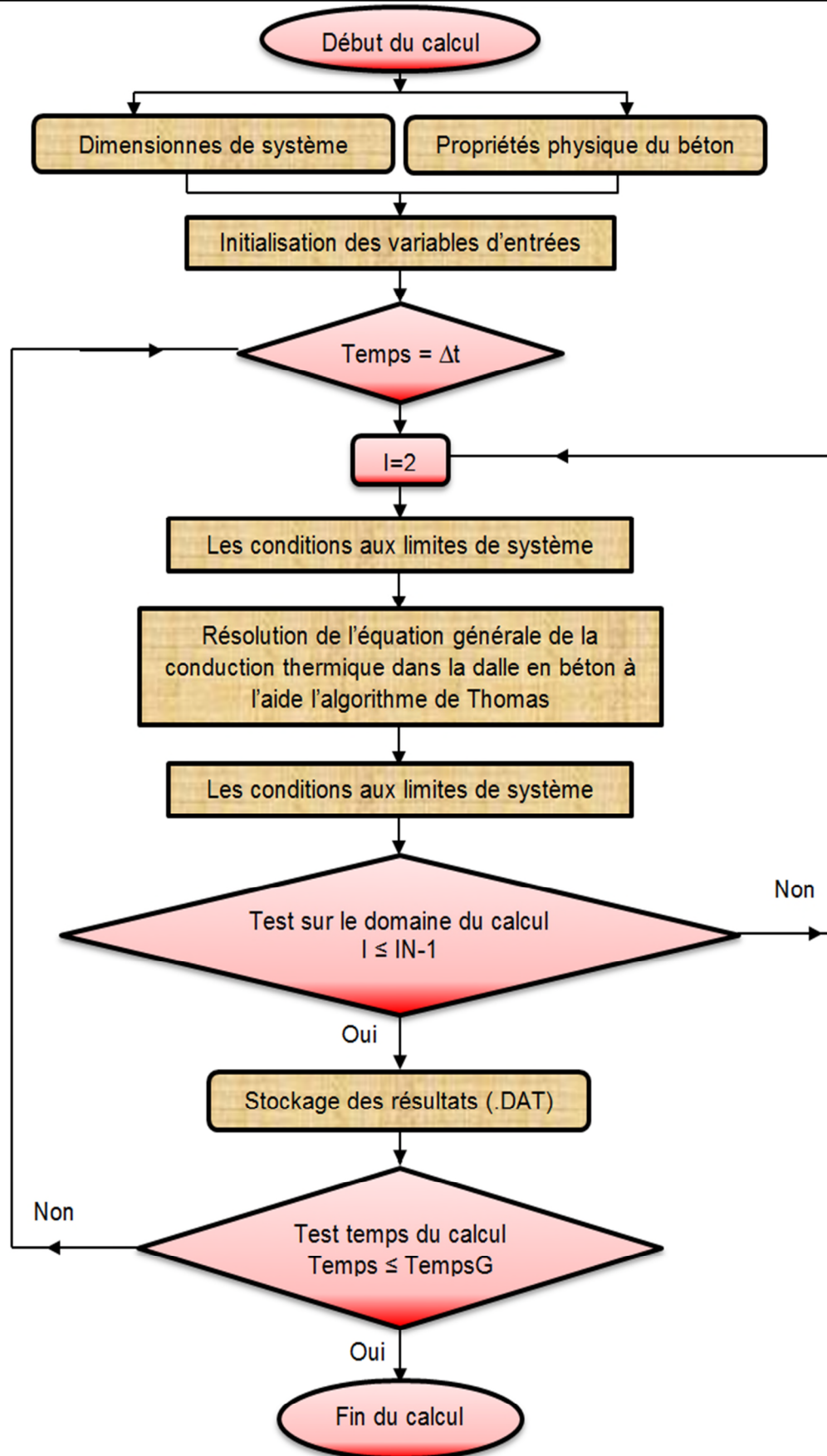


Fig. IV.4 : Organigramme de la modélisation numérique de la diffusion thermique au sien de la dalle en béton de système PSD.

IV.6 Traitement numérique des transferts thermiques dans l'enveloppe habitable

IV.6.1 Analyse nodale et échange par conduction et couplage avec les échanges superficiels

Nous supposons que nous avons deux températures qui sont des conditions aux limites de surface. Le cadre de l'étude est ensuite divisé en un nombre déterminé d'éléments supposés à chaque instant à température uniforme. La transposition du problème thermique de conduction dans un problème électrique est appelée analogie thermoélectrique. En effectuant cette analogie, la méthode nodale conduit à la mise en place d'un réseau électrique comme indiqué dans la fig. IV.5. Les nœuds qui se trouvent dans les sens électriques équipotentiels symbolisent des lignes isothermes. Ces derniers sont reliés les uns aux autres par la résistance analogique de la couche physique de la paroi qui les sépare. Par conséquent, chacun de ces nœuds permet d'obtenir un condensateur électrique traduisant le stockage thermique de la partie de la paroi correspondante et permettant la traduction des effets d'inertie thermique [4].

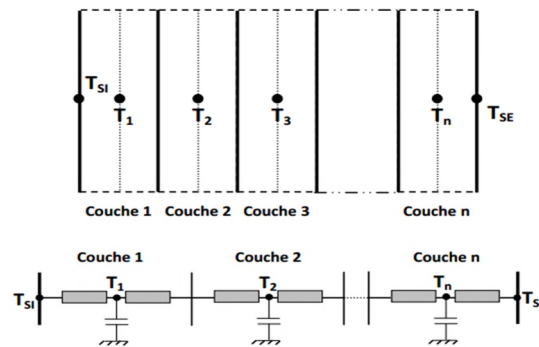


Fig.IV.5 : Discretisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé [4].

Le nombre '0' est attaché au nœud de la surface intérieure et 'n + 1' à la surface extérieure, le système peut s'écrire sous forme matricielle, cette matrice d'équations différentielles forme l'équation d'état de l'évolution du système en tenant compte de sa discrétisation [4].

$$C_w \cdot \frac{dT_w}{dt} = A_w \cdot T_w + B_w \quad (IV-24)$$

L'indice 'n' est utilisé pour les murs et les fenêtres. On se base sur une autre approche simplifiée qui permet de représenter le système multicouche par un modèle proposé par Rumianowski et al [5] en 1989 et repris par Con et al en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud à l'intérieur d'un mur. La fig. IV.6 est une illustration du principe de décomposition.

Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes [5]:

$$n = n_A + n_B \quad (\text{IV-25})$$

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k \cdot S_k} \quad (\text{IV-26})$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k \cdot S_k} \quad (\text{IV-27})$$

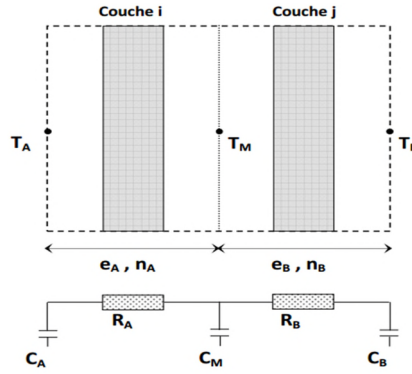


Fig.II.6 : Discretisation spatiale d'un mur et modèle de conduction [5].

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit [5] :

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i \cdot Cp_i \cdot e_i \cdot S_i \cdot (1 - B_i) \quad (\text{IV-28})$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j \cdot Cp_j \cdot e_j \cdot S_j \cdot \delta_j \quad (\text{IV-29})$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i \cdot Cp_i \cdot e_i \cdot S_i \cdot B_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j \cdot Cp_j \cdot e_j \cdot S_j \cdot (1 - \delta_j) \quad (\text{IV-30})$$

$$B_i = \frac{\frac{e_i}{2 \cdot \lambda_i \cdot S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k \cdot S_k}}{R_A} \quad (\text{IV-31})$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \cdot \lambda_j \cdot S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k \cdot S_k}}{R_B} \quad (\text{IV-32})$$

Le bilan énergétique du bâtiment pour les surfaces est représenté par les équations [5] :

$$C_A \cdot \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S \cdot F_{suf-i} \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_A^4) + S \cdot h_{conv} \cdot (T_{air} - T_A) \quad (IV-33)$$

$$C_B \cdot \frac{dT_B}{dt} = \alpha \cdot S \cdot G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon \cdot S \cdot \frac{1 - \cos B}{2} \cdot (T_{sol-ext}^4 - T_B^4) + \varepsilon \cdot S \cdot \frac{1 + \cos B}{2} \cdot (T_{ciel}^4 - T_B^4) + S \cdot h_{conv-amb} \cdot (T_{amb} - T_B) \quad (IV-34)$$

$$C_M \cdot \frac{dT_M}{dt} = -\frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (IV-35)$$

Le bilan énergétique d'une zone de l'habitat représenté par un nœud est un modèle de bilan de l'air de la zone, ce qui représente la capacité thermique du volume d'air de la zone. Le bilan de puissance de la construction d'une zone est représenté par l'équation ci-dessous qui constitue la variation de l'énergie de l'air de la zone dans l'intervalle de temps “ dt ” [5] :

$$\rho_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot V_{air} \cdot \frac{dT_{air}}{dt} = Q_{Gain} + Q_{Surf} + Q_{Chauf} + Q_{Froid} + Q_{Inf} + Q_{Vent} \quad (IV-36)$$

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

Les taux de transfert d'énergie thermique de l'infiltration et de l'écoulement de l'air de ventilation sont respectivement calculés par les équations suivantes [5] :

$$\dot{Q}_{inf} = \dot{m}_{inf} \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{air} - T_{ext}) \quad (IV-37)$$

$$\dot{Q}_{vent} = \dot{m}_{vent} \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{vent,ext} - T_{vent,int}) \quad (IV-38)$$

L'énergie thermique due à l'échange entre l'air et les surfaces intérieures des murs est calculées par l'équation suivante [5, 4] :

$$Q_{Surf} = \sum S \cdot h_{conv} \cdot (T_{Surf} - T_{air}) \quad (IV-39)$$

La convection naturelle se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide (l'air). De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Le transfert thermique dans une couche de fluide s'effectue par la conduction thermique et le mouvement du fluide. Quand on commence à imposer un gradient thermique entre les surfaces de la couche, un gradient de la masse volumique s'installe.

Expérimentalement, on observe qu'au bout d'un certain temps, le fluide se met en mouvement spontanément : c'est le démarrage de la convection. Celui-ci est déterminé par un nombre sans dimension appelé nombre de Rayleigh Rasans dimension.

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

Tableau IV.1: Expression des coefficients de transfert convectifs [4].

En considérant chaque paroi comme une entité indépendante des autres, il est possible de décrire l'évolution au cours du temps des transferts thermiques dans chaque paroi. D'une façon générale, la variation instantanée de l'énergie au sein d'une paroi (i) de notre modèle est égale à la somme algébrique des densités de flux échangés au sien de cette paroi.

Le bilan énergétique des parois de l'enceinte habitable est déterminé par l'équation gouvernementale suivante [5] :

$$\frac{m_i \times Cp_i}{S} \times \frac{\partial T_i}{\partial t} = DFSA_i + \sum_{i=1}^n \times \sum_x \varphi_{x,ij} \quad (IV-40)$$

avec :

$$DFSA_i = \alpha_i \times \varphi_i \quad (IV-41)$$

En introduisant un coefficient d'échange " $h_{x_{ij}}$ " et en linéarisant les transferts, nous pouvons écrire :

$$\phi_{x_{ij}} = h_{x_{ij}} \times (T_j - T_i) \quad (IV-42)$$

Ainsi, l'équation (III-104) s'écrit :

$$\frac{m_i \times Cp_i}{S} \times \frac{\partial T_i}{\partial t} = DFSA_i + \sum_{i=1}^n \sum_x h_{x_{ij}} \times (T_j - T_i) \quad (IV-43)$$

Donc, on peut écrire :

$$m \times C_p \times \frac{dT}{dt} = \sum Q_{absor} - \sum Q_{émi} \quad (IV-44)$$

La figure IV.7 montre les différents modes de transfert de chaleur au niveau de chaque paroi de l'enceinte habitable assimilée à une cavité parallélépipédique.

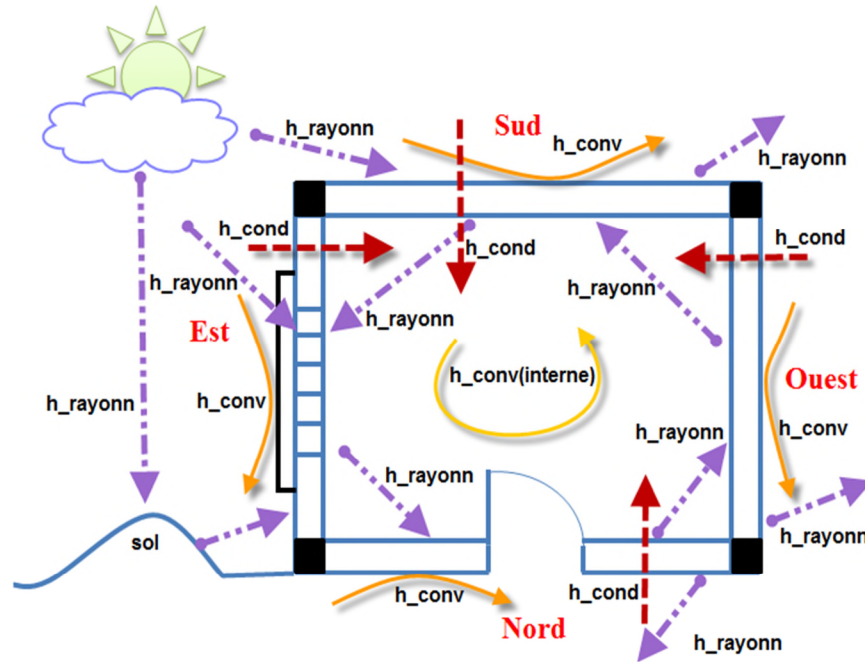


Fig. IV.7: Schéma descriptif des différents modes d'échanges thermiques dans l'enveloppe habitable.

Nous allons par la suite, appliquer l'équation (IV-44) aux divers milieux de notre système. En effet, l'établissement d'un bilan thermique en chaque paroi associée au modèle de l'enveloppe habitable conduit aux équations de transfert suivantes selon le schéma partiel ci-après [6] :

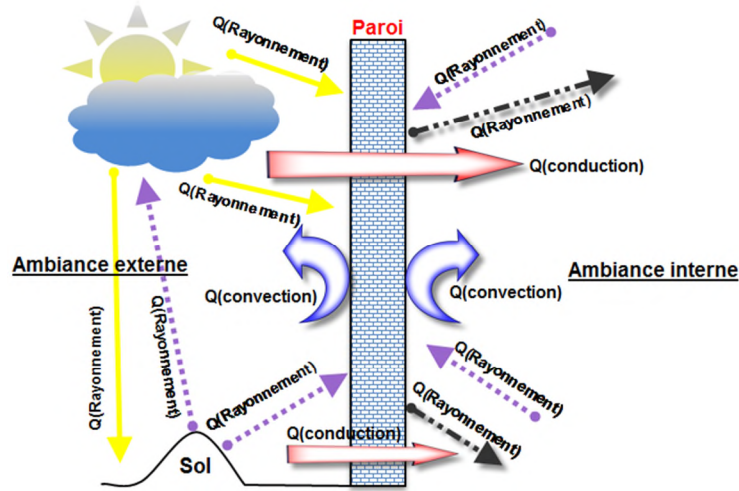


Fig. IV.8 : Schématisation des différents types d'échanges thermiques d'une paroi de l'habitat.

- **Paroi Sud – Face externe**

$$\frac{M_{PS} \cdot C_{p_b}}{S_{PS}} \cdot \frac{T_{PSE}^{t+\Delta t} - T_{PSE}^t}{\Delta t} = h_{C_{ext}} \times (T_{Al}^t - T_{PSE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} \times (T_{PSI}^{t+\Delta t} - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + hr_{VC-PSE} \times (T_{VC}^t - T_{PSE}^{t+\Delta t}) + hr_{SOL-PSE} \times (T_{SOL}^t - T_{PSE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \times RGIS) \quad (IV-45)$$

- **Paroi Nord – Face externe**

$$\frac{M_{PS} \cdot C_{p_b}}{S_{PN}} \times \frac{T_{PNE}^{t+\Delta t} - T_{PNE}^t}{\Delta t} = h_{C_{ext}} \times (T_{Al}^t - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} \times (T_{PNI}^{t+\Delta t} - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + hr_{VC-PNE} \times (T_{VC}^t - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + hr_{SOL-PNE} \times (T_{SOL}^t - T_{PNE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \times RGIN) \quad (IV-46)$$

- **Paroi Ouest – Face externe**

$$\frac{M_{PO} \cdot C_{p_b}}{S_{PO}} \times \frac{T_{POE}^{t+\Delta t} - T_{POE}^t}{\Delta t} = h_{C_{ext}} \times (T_{Al}^t - T_{POE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} \times (T_{POI}^{t+\Delta t} - T_{POE}^{t+\Delta t}) + hr_{VC-POE} \times (T_{VC}^t - T_{POE}^{t+\Delta t}) + hr_{SOL-POE} \times (T_{SOL}^t - T_{POE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \times RGIO) \quad (IV-47)$$

donc :

$$T_{POE}^{t+\Delta t} \left(\frac{M_{PO} \cdot C_{p_b}}{S_{PO}} \times \frac{1}{\Delta t} + h_{C_{ext}} + \frac{\lambda_b}{e} + hr_{VC-POE} + hr_{SOL-POE} \right) + T_{POI}^{t+\Delta t} \left(-\frac{\lambda_b}{e} \right) = \frac{M_{PO} \cdot C_{POE}}{S_{PO}} \times \frac{T_{POE}^t}{\Delta t} + h_{C_{ext}} \times T_{Al}^t + hr_{VC-POE} \times T_{VC}^t + hr_{SOL-POE} \times T_{SOL}^t + (\alpha_b \times RGIO) \quad (IV-48)$$

- **Paroi de toiture – Face externe**

$$\frac{M_{PFP} \cdot C_{Pb}}{S_{PFP}} \times \frac{T_{PFPE}^{t+\Delta t} - T_{PFPE}^t}{\Delta t} = h_{C_{ext}} \times (T_{A1}^t - T_{PFPE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} \times (T_{PFPI}^{t+\Delta t} - T_{PFPE}^{t+\Delta t}) +$$

$$hr_{VC-PFPE} \times (T_{VC}^t - T_{PFPE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \times FSGH)$$
(IV-49)

- **Paroi Est – Face externe**

$$\frac{M_{PE} \cdot C_{Pb}}{S_{PE}} \times \frac{T_{PEE}^{t+\Delta t} - T_{PEE}^t}{\Delta t} = hr_{ext} \times (T_{A1}^t - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + \frac{\lambda_b}{e} \times (T_{PEI}^{t+\Delta t} - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + hr_{VC-PEE} \times$$

$$(T_{VC}^t - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + hr_{SOL-PEE} \times (T_{SOL}^t - T_{PEE}^{t+\Delta t}) + (\alpha_b \times RGIE)$$
(IV-50)

- **L'air comble dans l'enveloppe habitable**

$$\frac{M_a \cdot C_{Pa}}{S_a} \times \frac{T_{A2}^{t+\Delta t} - T_{A2}^t}{\Delta t} = h_{C1} \times \frac{S_{PS}}{S_a} \times (T_{PSI}^{t+\Delta t} - T_{A2}^{t+\Delta t}) + h_{C2} \times \frac{S_{PN}}{S_a} \times (T_{PNI}^{t+\Delta t} - T_{A2}^{t+\Delta t}) +$$

$$h_{C3} \times \frac{S_{PO}}{S_a} \times (T_{POI}^{t+\Delta t} - T_{A2}^{t+\Delta t}) + h_{C4} \times \frac{S_{PE}}{S_a} \times (T_{PEI}^{t+\Delta t} - T_{A2}^{t+\Delta t}) + h_{C5} \times \frac{S_{PFP}}{S_a} \times (T_{PFPI}^{t+\Delta t} - T_{A2}^{t+\Delta t}) +$$

$$h_{C6} \times \frac{S_{PIP}}{S_a} \times (T_B^t - T_{A2}^{t+\Delta t})$$
(IV-51)

Ce système d'équations algébriques, il nous a permis une écriture sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} & 0 & A_{28} & 0 & A_{210} & A_{211} \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{42} & A_{43} & A_{44} & 0 & A_{46} & 0 & A_{48} & 0 & A_{410} & A_{411} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{55} & A_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & A_{65} & A_{66} & 0 & A_{68} & 0 & A_{610} & A_{611} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{77} & A_{78} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{82} & 0 & A_{84} & 0 & A_{86} & A_{87} & A_{88} & 0 & A_{810} & A_{811} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{99} & A_{910} & 0 \\ 0 & A_{102} & 0 & A_{104} & 0 & A_{106} & 0 & A_{108} & A_{109} & A_{1010} & A_{1011} \\ 0 & A_{112} & 0 & A_{114} & 0 & A_{116} & 0 & A_{118} & 0 & A_{1110} & A_{1111} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{PSE}^{t+\Delta t} \\ T_{PSI}^{t+\Delta t} \\ T_{PNE}^{t+\Delta t} \\ T_{PNI}^{t+\Delta t} \\ T_{POE}^{t+\Delta t} \\ T_{POI}^{t+\Delta t} \\ T_{PFPE}^{t+\Delta t} \\ T_{PFPI}^{t+\Delta t} \\ T_{PEE}^{t+\Delta t} \\ T_{PEI}^{t+\Delta t} \\ T_{A2}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \\ B_9 \\ B_{10} \\ B_{11} \end{bmatrix}$$
(IV-52)

où :

$$A(1,1) = \left(\frac{M_{PS} \cdot C_{Pb}}{S_{PS}} \times \frac{1}{\Delta t} + h_{C_{ext}} + \frac{\lambda_b}{e} + hr_{VC-PSE} + hr_{SOL-PSE} \right)$$
(IV-53)

$$A(1,2) = \left(-\lambda_b / e \right) \quad (IV-54)$$

$$B(1) = \left(\frac{M_{PS} \cdot C_{pb}}{S_{PS}} \times \frac{T_{PSE}^t}{\Delta t} + h_{C_{ext}} \times T_{A1}^t + h_{VC-PSE} \times T_{VC}^t + h_{r_{SOL-PSE}} \times T_{SOL}^t + (\alpha_b \times RGIS) \right) \quad (IV-56)$$

$$A(2,2) = \left(\frac{M_{PS} \cdot C_{pb}}{S_{PS}} \cdot \frac{1}{\Delta t} + h_{C_{int}} + \frac{\lambda_b}{e} + h_{r_{PSI-PNI}} + h_{r_{PSI-POI}} + h_{r_{PSI-PEI}} + h_{r_{PSI-PFPI}} + h_{r_{PSI-PIP}} \right) \quad (IV-57)$$

$$A(2,1) = \left(-\lambda_b / e \right) \quad (IV-58)$$

$$A(2,4) = (-h_{r_{PSI-PNI}}) \quad (IV-59)$$

En tenant compte que l'air est un fluide caloporteur de la transmission de la chaleur entre les façades internes et externes des parois de l'enveloppe habitable, le tableau IV.2 montre les propriétés thermiques de l'air pris dans le calcul des transferts thermiques à 25°C.

λ	Conductivité thermique en (W/m.K)	0,0262
C_p	Chaleur spécifique en (J/Kg.K)	1006
ρ	Masse volumique en (Kg/m ³)	1,177
μ	Viscosité dynamique en (Kg/m.s)	1,85.10 ⁻⁵
ν	Viscosité cinématique en (m ² /s)	1,75.10 ⁻⁵
Pr	Nombre de Prandtl	0,708

Tableau IV.2 : Propriétés thermiques de l'air atmosphérique à 25°C [7].

IV.6.2 Organigramme de traitement numérique de la densité du flux solaire incident sur les différentes façades de l'enveloppe habitable

Le calcul de la densité du flux solaire incident sur chaque façade des parois de la maison localisée dans le Sud de l'Algérie se base sur les étapes suivantes :

- Réquisition des données climatiques de la région considérée et choix de la journée type pour les quatre saisons de l'année 2014.
- Calcul des paramètres géométriques et astronomiques du soleil pour chaque journée typique considérée.

- Introduction des données climatiques telles que : la quantité moyenne du flux solaire d'ambiance et la température d'ambiance dans la journée considérée pour un plan horizontal.
- Calcul des angles d'incidence des rayonnements solaires pour chaque façade de l'habitat ne fonction de l'angle horaire et la position du soleil au ciel.
- Calcul de la quantité de la densité du flux solaire pour toutes les façades de la maison (les plans inclinés).

Les essais que nous avons procédé, lors de la mise au point du code de calcul, ont conduit à retenir un pas de temps de 300 s. Dans la figure IV.9 nous nous montrons le cheminement du calcul déroulé dans le code de la simulation numérique de la densité du flux solaire.

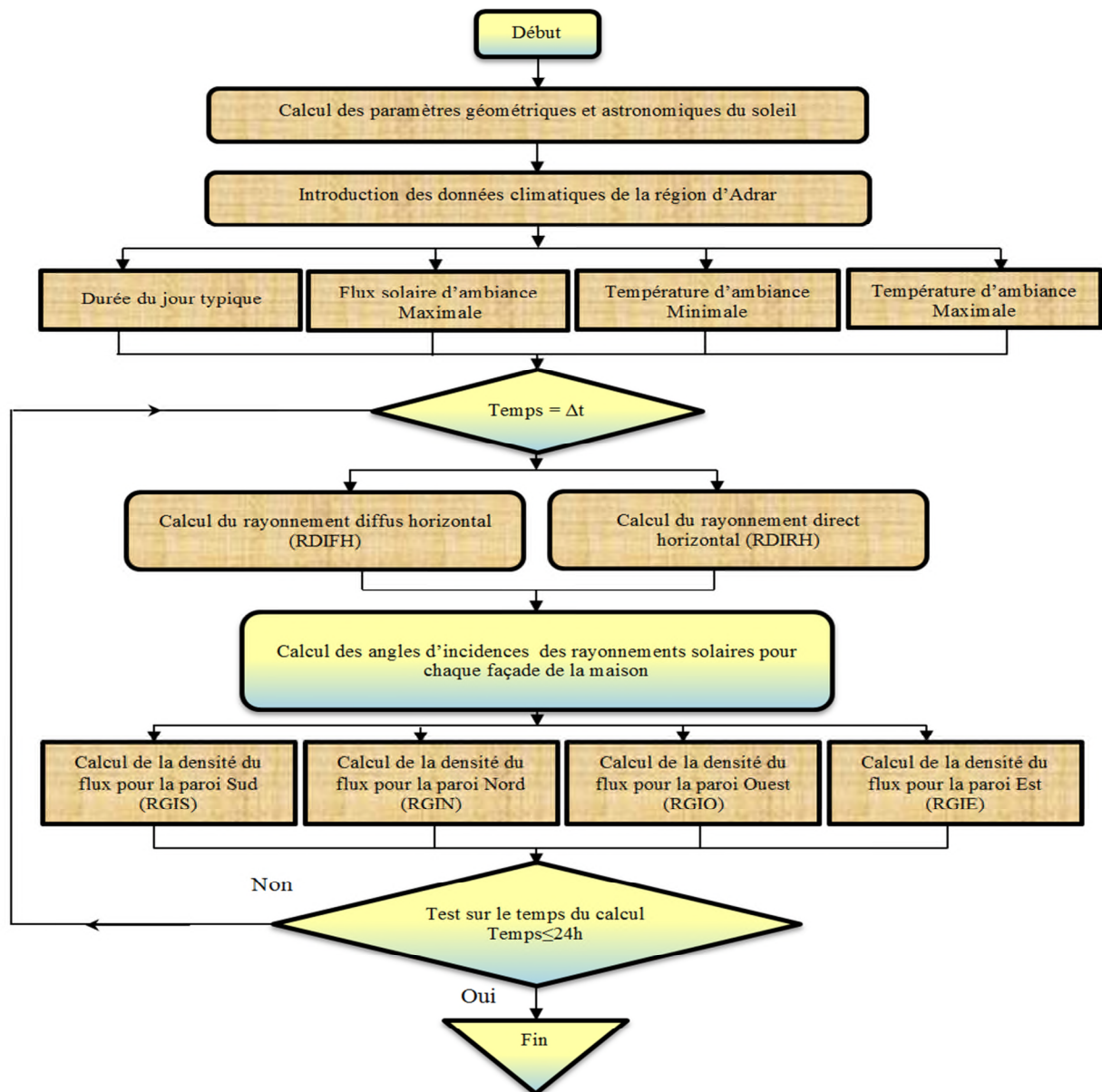


Fig. IV.8 : Organigramme de la modélisation de la densité du flux solaire des parois de l'enveloppe habitable.

IV.7 Traitement numérique du couplage thermique Fluide/Dalle

• Conditions initiales et aux limites du couplage

pour : $x = L$ et $0 < y < b$, on aura :

$$\lambda_{\text{Béton}} \times \frac{\partial T_b}{\partial y_b} \bigg|_{y_b=b} = \lambda_{\text{Fluide}} \times \frac{\partial T_f}{\partial y_f} \bigg|_{y_f=0} \quad (\text{IV-60})$$

$$x = 0 ; x = L \text{ et } b < y < b + ep \quad (\text{IV-61})$$

alors :

$$\frac{\partial T_b}{\partial y_b} \bigg|_{y_b=b+ep} = 0 \text{ et } 0 < x < L ; y_b = b + ep \quad (\text{IV-62})$$

Dans la surface supérieure de la dalle en béton, nous aurons :

$$-\lambda_{\text{Béton}} \times \frac{\partial T_b}{\partial y_b} \bigg|_{y_b=b+ep} = (h_c + h_r) \times (T_{bs} - T_{amb}) \quad (\text{IV-63})$$

• Conditions aux limites dans la sortie de la canalisation

Pour l'entrée de la canalisation, nous avons comme conditions :

$$x = 0, 0 < y < b \rightarrow T_f(1, j) = T_E \quad (\text{IV-64})$$

et pour la sortie de la canalisation, nous avons ;

$$x = L, 0 < y < b \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial u_f}{\partial x} \bigg|_{x=L} = 0 \text{ d'où } u_f(N, j) = u_f(N-1, j) \\ \frac{\partial T_f}{\partial x} \bigg|_{x=L} = 0 \text{ d'où } T_f(N, j) = T_f(N-1, j) \end{cases} \quad (\text{IV-65})$$

• Interface entre le fluide et la dalle en béton

La figure IV.9 montre une interface qui sépare deux milieux de conductivités thermiques différentes. La distance entre le nœud (j) et les nœuds voisins (j-1 et k+1) est égale à (Δy) .

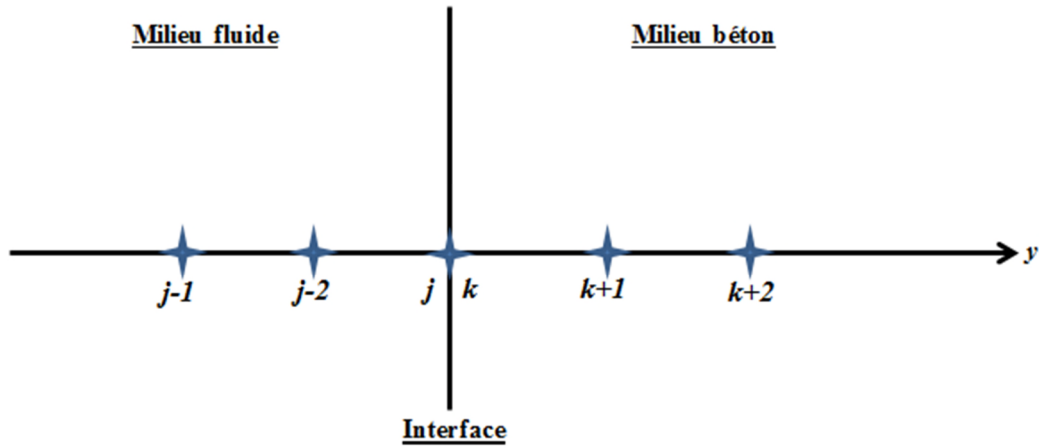


Fig.IV.9 : Maillage à l'interface Fluide-Dalle.

La discrétisation des conditions aux limites à l'interface fluide-béton par une méthode implicite aux différences finies conduit à l'expression suivante :

$$\lambda_b \cdot \frac{-3.T_b(i,1) + 4.T_b(i,2) - T_b(i,3)}{2.\Delta y_b} = \lambda_f \cdot \frac{3.T_f(i, M_f) - 4.T_f(i, M_f - 1) - T_f(i, M_f - 2)}{2.\Delta y_f} \quad (\text{IV-67})$$

Si, l'on suppose que ;

$$T_b(i,1) = T_f(i, M_f) = T_{\text{int}}(i, M_f) \quad (\text{IV-68})$$

En procédant comme pour la condition aux limites en ($y = b$), il vient :

$$T_b(i, M_b) = \frac{\lambda_b}{2.\Delta y_b} \cdot [4.T_b(i, M_b - 1) + T_b(i, M_b - 2) + (h_c + h_r).T_{\text{amb}}] / \left(3 \cdot \frac{\lambda_b}{2.\Delta y_b} + h_c + h_r \right) \quad (\text{IV-69})$$

IV.7.1 Organigramme du couplage thermique (Fluide/Dalle)

L'organigramme de la figure IV.10, permet de calculer la température de chaque nœud dans les domaines du calcul et la température au milieu de l'interface du couplage, en suivant la discrétisation préalable du modèle mathématique par la méthode implicite de différences finies.

Le calcul de la température dans l'interface canalisation-dalle et la surface supérieure de la dalle suit le cheminement des étapes suivantes :

- Dimensionnement de système PSD : détermination des paramètres géométriques du système.
- Réquisitions des propriétés thermiques de chaque élément constituant le système PSD.
- Initialisation de tous les variables de systèmes à la température d'ambiance 25°C.
- Résolution numérique des équations de Navier-Stokes qui régissent l'écoulement dans la canalisation de la dalle.
- Résolution numérique de l'équation de la conservation de l'énergie qui régissent la conduction thermique dans la dalle en béton.
- Test convergence sur la température du couplage.
- Test de convergence sur le domaine du calcul (domaine solide seulement).
- Test de convergence sur le temps global du calcul.
- Sauvegarde des résultats.

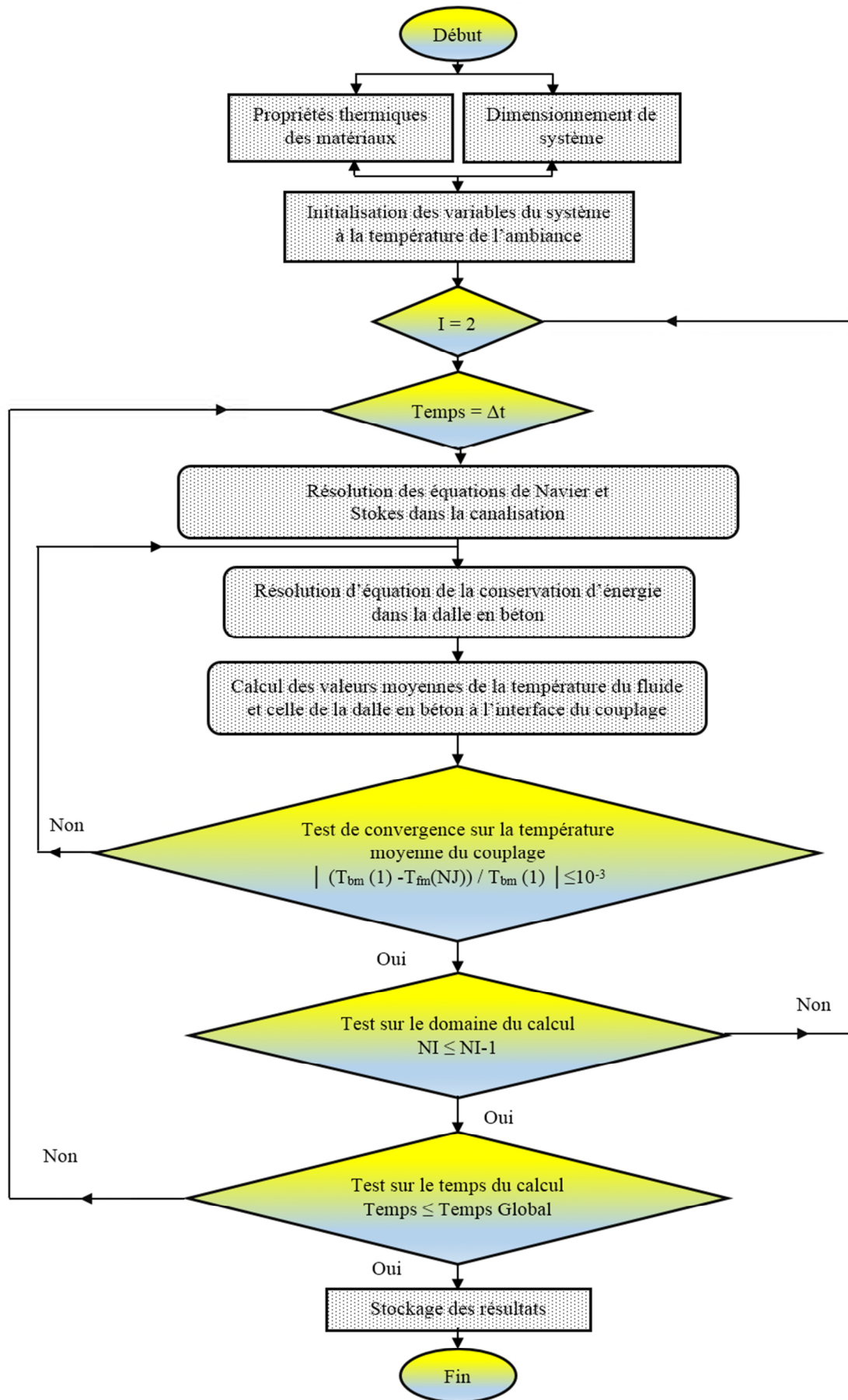


Fig. IV.10 : Organigramme du couplage thermique (Fluide/Dalle).

IV.8 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons introduit les variables adimensionnelles des équations locales dans les systèmes d'équations aux dérivées partielles assorties des conditions aux limites, pour décrire les transferts de la chaleur dans les trois compartiments de l'enveloppe habitable considérée.

Nous avons abordé l'analyse nodale monodimensionnelle des équations de transfert de la chaleur sain de chaque mur monocouche de l'enveloppe habitable. En effet, nous avons exposé la méthodologie numérique du couplage thermique entre la canalisation du fluide et la dalle chauffante en se basant sur la théorie de la continuité de la densité de la chaleur entre deux milieux en contact parfait. Un traitement des modèles numériques utilisés pour le couplage thermique entre les canalisations du fluide caloporteur et la dalle en béton a été présenté à la fin de ce chapitre.

Références bibliographies

- [1] M. E. Erdoğan, ‘‘On the flows produced by sudden application of a constant pressure gradient or by impulsive motion of a boundary’’, Int. J. Non-Linear Mech., Vol. 38, pp. 781 - 797, 2003.
- [2] A. Azzi, ‘‘ Méthodes numériques appliquées aux calculs des écoulements et du transfert de chaleur ’’, Faculté de Génie-Mécanique USTO-MB, Version 1, Juin 2011.
- [3] 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 de la Rochelle, 19 Septembre 2003.
- [4] M. R. Yaïche, S. M. A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°4, pp.683 – 695.2010.
- [5] J. P. Nadeau, J.R. Puiggali, Séchage: ‘‘Des processus physiques aux procédés industriels’’, Tec & Doc Lavoisier, (ISBN 2-7430-0018-X), 1995.
- [6] M. Dagenet, Les Séchoirs Solaires, Théorie et Pratique, Editions Unesco, Paris, pp. 81-106, 1985.
- [7] <https://www.newsvine.com/2009/01/08/thermal-conductivity-of-air-vs-temperature-correlation/> (20/10/2017).

Chapitre 05

Résultats et Discussions

Une fois les résultats d'une investigation recueillis, on doit les mettre en évidence en les reliant au problème étudié et à l'hypothèse formulée au départ : c'est l'étape de l'analyse des résultats

V.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation des modèles numériques utilisés pour le calcul des différentes composantes de la densité du flux solaire incidente sur chaque façade de l'enveloppe habitable et à l'interprétation des résultats obtenus par la simulation numérique telle que : l'évolution de la vitesse du fluide caloporteur dans la canalisation de la dalle chauffante, l'évolution de la température du fluide, l'évolution de la diffusion de la chaleur dans la dalle en béton, la variation de la température des ambiances à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat en fonction des conditions climatiques de la région considérée et l'évolution de la température des différentes parois de l'enveloppe habitable.

De plus, dans le côté des apports énergétiques, nous allons exposer également quelques résultats concernant l'évolution de la densité du flux solaire incident sur les différentes parois du bâtiment, la température restituée par chaque façade du bâtiment et enfin la température du confort thermique au sien de l'habitat.

En effet, nous avons constaté qu'il y avait plusieurs paramètres qui peuvent influencer le confort thermique dans l'habitat. Dans cette étude, nous allons axer sur la variation des paramètres géométriques et thermiques telles que : le diamètre de la canalisation, la longueur des tubes, l'épaisseur du béton et les conditions climatiques qui peuvent affecter le confort thermique de l'enveloppe habitable.

Validation des Modèles **de** **Rayonnement Solaire**

V.2 Validation de la théorie et confrontation avec l'expérience

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

Après avoir décrit ces modèles, une validation du fonctionnement des modèles de calcul de la densité du flux solaire a été faite en se basant sur les données expérimentales présentées dans le chapitre I et sur quelques résultats complémentaires. Une campagne de mesure a été effectuée durant toute l'année, nous avons choisi pour cette validation une journée typique dans l'année. Une journée chaude (17 Juillet 2014). Le but primordial est de tester la fiabilité de l'approche sous l'influence des conditions climatiques distinctes.

V.2.1 Densités moyennes du flux solaire horaire

L'objectif consiste à simuler la densité du flux solaire incident sur les différentes façades d'une maison individuelle dans une région désertique (Adrar - Algérie) en se basant sur le modèle semi-empirique de Liu & Jordan. En effet, le calcul de la densité du flux solaire nécessite de connaître la position précise du soleil à chaque instant, et l'atmosphère doit être considérée comme une source isotrope de rayonnement diffus. Il est à noter également que les effets de masque, les réflexions multiples sur les objets ou les transparences sont négligés.

La simulation numérique de l'évolution de la température externe et du flux solaire, en utilisant des données climatiques de l'année de 2014, a permis d'estimer la quantité de la densité du flux solaire pour chaque façade de l'enveloppe habitable (Sud, Est, Nord et Ouest) pour une journée typique. Ce modèle basé sur des paramètres physiques a permis d'obtenir des résultats très satisfaisants dans le domaine radiatif.

➤ Evolution de la densité du flux solaire direct et diffus horizontal au cours du mois de Juillet

La figure V.1 montre la présentation des composantes directe et diffuse de la densité du flux solaire global (RGH) en temps solaire vrai afin de déduire l'énergie maximale reçue en tout point dans le jour type du 17 juillet 2014. En effet, pour une journée parfaitement ensoleillée en l'absence de toute surface réfléchissante, on constate que les valeurs illustrées dans la figure V.1 n'ont donc de sens qu'en puissance instantanée de la densité du flux solaire horaire.

On conclut aussi que pour n'importe quelle densité du flux solaire global reçu par un plan horizontal pour un mois donné soit Juin, Juillet ou Aout, il doit y avoir d'une part une composante de la densité du flux solaire direct (RDIRH) qui a des valeurs horaires un peu plus petites que celles des globaux et d'une autre part, une composante de densité du flux solaire diffus (RDIFH) avec des valeurs aussi plus petites que celles de densité du flux solaire directs d'après la figure V.1.

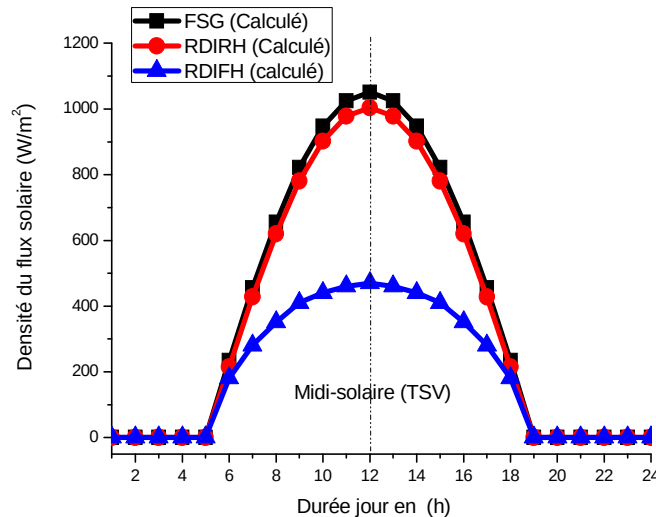


Fig. V.1 : Evolution horaire des densités des flux solaires global, direct et diffus sur le plan horizontal de la journée typique

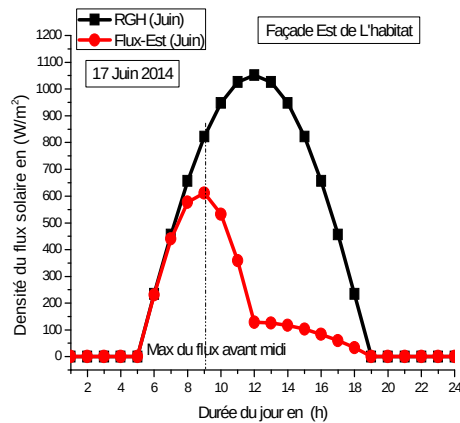
V.2.2 Evolution de la densité du flux solaire des parois inclinées

➤ Cas de la paroi Est de l'enveloppe habitable

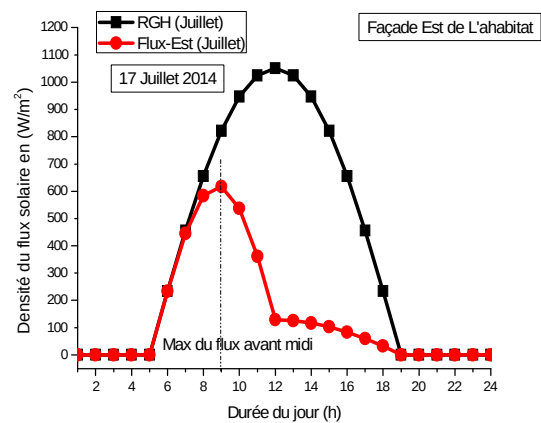
La figure V.2 présente l'évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade Est de l'enveloppe habitable pour les trois mois de la saison d'été (Juin-Juillet-Aout de l'année 2014) dans la région d'Adrar. On constate que pour cette façade, pendant la période nocturne, la densité du flux solaire incident est nulle. Pendant la période diurne, elle évolue dans le sens croissant, puisqu'elle passe par un maximum vers 09h00 en temps local pour les deux mois de juin et juillet (Figures V.2.a et V.2.b), cependant le maximum pour le mois d'Aout (Fig. V.2.c) et enregistré à 10h00 en temps local.

De plus, il décroît jusqu'à devenir nul à midi en temps local pour les trois mois. Mais ce qui diffère d'une façade à une autre, c'est la valeur maximale et l'instant correspondant, qui varient selon le mois et le jour type.

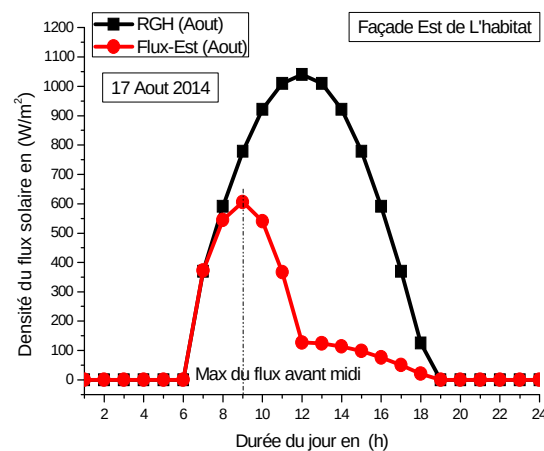
Les valeurs maximales de la densité reçue sur la façade Est avec une inclinaison de 90° par rapport au plan horizontal pour les mois de juin, juillet et Aout sont respectivement 630 W/m^2 (Fig. V.2.a), 604 W/m^2 (Fig. V.2.b) et 600 W/m^2 (Fig. V.2.c).



(a) Façade Est (mois de Juin)



(b) Façade Est (mois de Juillet)



(c) Façade Est (mois d'Aout)

Fig. V.2 : Évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade inclinée Est (90°) en fonction du temps solaire pour les trois mois sélectionnés de l'année 2014.

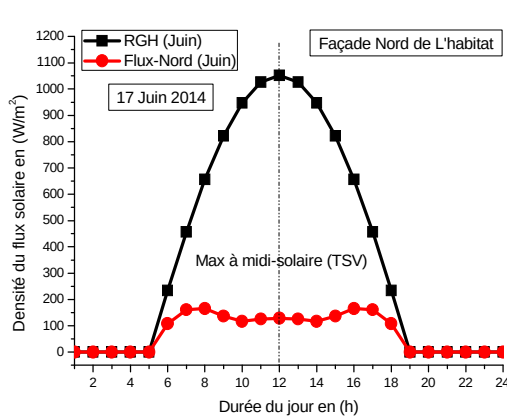
➤ Cas de la paroi Nord de l'enveloppe habitable

La figure V.3 présente l'évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade Nord de l'enveloppe habitable. Pour les trois mois de la saison d'été dans la région d'Adrar, et pendant la période nocturne, cette densité du flux est nulle.

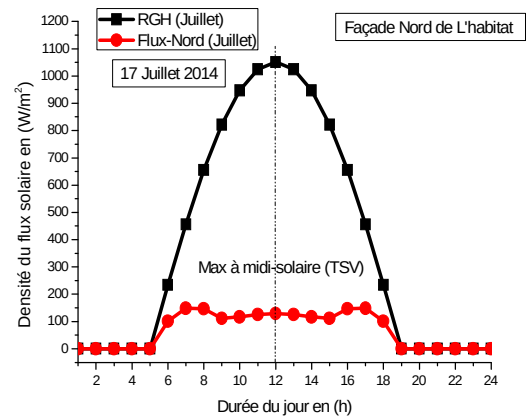
Pendant la période diurne, elle évolue dans le sens croissant, puisqu'elle passe par un maximum vers 07h00 avant midi et 17h00 après midi en temps solaire (12TSV) (Fig. V.3), enfin elle décroît jusqu'à devenir nul.

Mais ce qui diffère d'une paroi à une autre, c'est la valeur maximale et l'instant correspondant, qui varient selon le mois et le jour type. En effet, la densité du flux solaire atteint une valeur maximale de $161,11\text{W/m}^2$ avant midi et après-midi pour le mois de juin. On remarque la même évolution pour la densité du flux au mois de juillet, sauf que la valeur maximale est de $148,14\text{W/m}^2$.

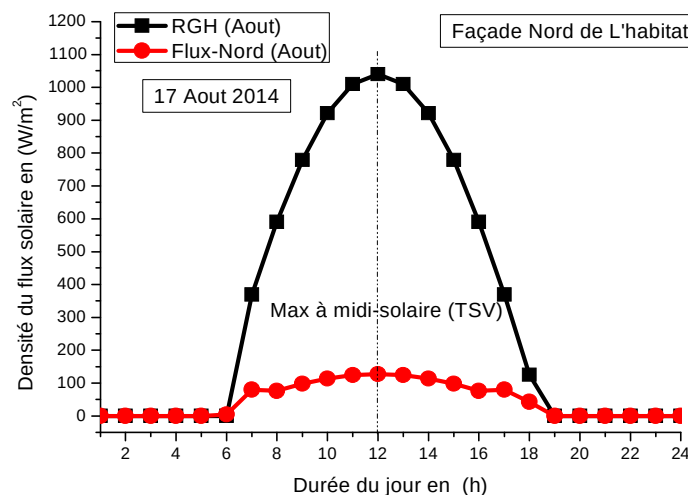
En revanche au mois d'Aout, l'évolution est totalement différente par rapport aux mois de juin et juillet. Dans ce mois, la valeur maximale atteinte est de $127,44\text{W/m}^2$ à midi en temps local (TLG).



(a) Façade Nord (mois de Juin)



(b) Façade Nord (mois de juillet)



(c) Façade Nord (mois d'Aout)

Fig. V.3 : Évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade incliné Nord (90°) en fonction du temps solaire pour les trois mois sélectionnés de l'année 2014.

➤ Cas de de paroi Sud du l'enveloppe habitable

La figure V.4 représente l'évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade Sud de la maison bioclimatique en fonction du temps solaire pour les trois mois donnés de la région d'Adrar.

On constate que la densité du flux solaire au milieu de la journée est visiblement plus grande que celle des périodes avant midi et après midi et atteint des valeurs maximales aux environs de 211.63W/m^2 pour le mois de juin (Fig. V.4.a), 245.28W/m^2 pour le mois de juillet (Fig. V.4.b) et 374.84W/m^2 pour le mois d'Aout à midi en solaire (12TSV).

De plus, on remarque que la densité du flux solaire pour le mois d'Aout (Fig. V.4.c) est plus optimale par rapport aux autres mois de la saison. Pendant la période nocturne le flux solaire est nul à cause de la disparition totale du soleil. En effet, la différence de la densité du flux d'un mois à l'autre est due à l'effet du soleil durant une journée dans la saison d'été qui permet l'augmentation des rayonnements solaires et la température d'ambiance externe de la maison.

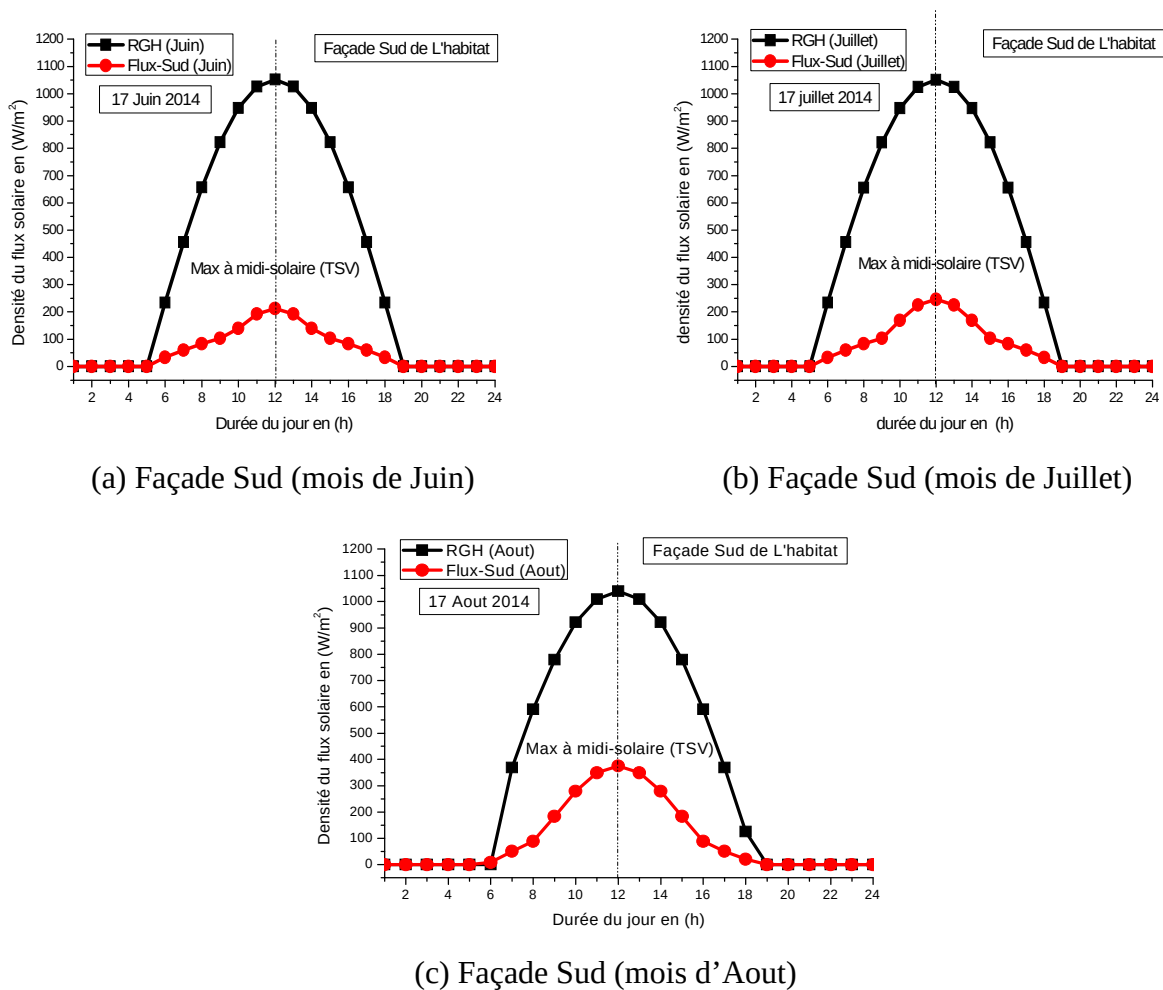


Fig. V.4 : Évolution de la densité du flux solaire incident sur la façade inclinée Sud (90°) en fonction du temps solaire pour les trois mois sélectionnés de l'année 2014.

La figure V.5 représente une comparaison de l'évolution horaire des densités du flux solaire incident sur la façade horizontale (le toit externe) et les façades verticales (Sud, Est, Ouest et Nord) de l'enveloppe de la maison individuelle durant la journée du 17 juillet 2014.

D'après cette représentation comparative entre les différentes densités du flux solaire, on peut conclure que l'ensemble des flux des façades Est, Ouest, Nord et Sud est acceptable, puisque physiquement, la façade horizontale avec un angle d'inclinaison de 0° reçoit le plus grand rayonnement solaire par rapport aux façades verticales avec un angle d'inclinaison de 90° .

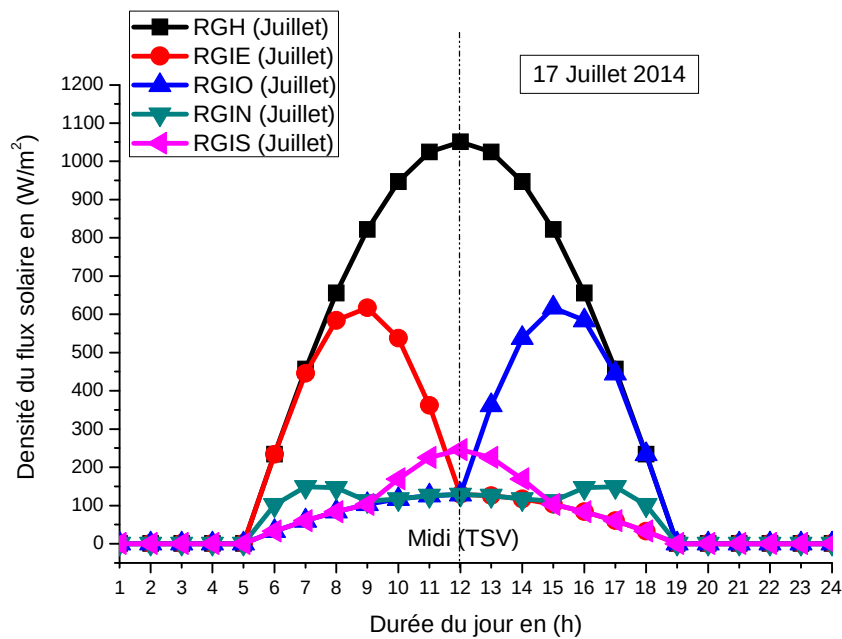


Fig.V.5 : Evolution des densités des flux solaires incidents pour différentes orientations de l'enveloppe habitable localisée à Adrar au cours de la journée typique.

Les tableaux V.1, V.2 et V.3 montrent respectivement les valeurs des densités calculées des flux solaires : global (Tableau V.1), direct (Tableau V.2) et diffus (Tableau V.3) incidents sur un plan horizontal par rapport à ceux mesurés par la station radiométrique d'Adrar de l'unité de recherche en énergies renouvelables au milieu saharien (URER'MS). On notera qu'il existe une différence acceptable entre les résultats calculés et mesurés expérimentalement. En effet, la différence relative moyenne est de 38.89% pour le cas du flux solaire global 7.75% pour le cas du flux solaire direct et de 14.58% pour le cas du flux solaire diffus.

Heure (h)	(FSGH) Densité du flux calculée en (W/m^2)	(FSGH) Densité du flux mesurée en (W/m^2)	Erreur relative	Erreur relative moyenne
1	0	0	0	<u>0,388914269</u>
2	0	0	0	
3	0	0	0	
4	0	0	0	
5	0	0	0	
6	0	0	0	
7	233,8695	118	0,981944915	
8	456,01181	354	0,288168955	
9	655,28778	562	0,165992491	
10	821,70489	759	0,082615138	
11	946,91828	893	0,060378813	
12	1024,64924	999	0,025674915	
13	1051	1038	0,012524085	
14	1024,64924	996	0,028764297	
15	946,91828	904	0,047475973	
16	821,70489	710	0,157330831	
17	655,28778	500	0,31057556	
18	456,01181	277	0,646252022	
19	233,8695	72	2,2481875	
20	0	0	0	
21	0	0	0	
22	0	0	0	
23	0	0	0	
24	0	0	0	

Tableau V.1: Comparaison des résultats obtenus numériquement avec les données mesurées expérimentalement : Cas de densité du flux solaire global incident sur un plan horizontal au cours de la journée du 17 juillet 2014.

Heure (h)	(RDIRH) Densité du flux calculée en (W/m^2)	(RDIRH) Densité du flux mesurée en (W/m^2)	Erreur relative	Erreur relative moyenne
1	0	0	0	<u>0,077532801</u>
2	0	0	0	
3	0	0	0	
4	0	0	0	
5	0	0	0	
6	0	0	0	
7	215,04376	200	0,0752188	
8	427,56561	400	0,068914025	
9	619,4466	470	0,317971489	
10	780,58133	700	0,115116186	
11	902,29676	812	0,111202906	
12	978,03974	970	0,008288392	
13	1003,74612	990	0,01388497	
14	978,03974	975	0,003117682	
15	902,29676	900	0,002551956	
16	780,58133	700	0,115116186	
17	619,4466	600	0,032411	
18	427,56561	400	0,068914025	
19	215,04376	200	0,0752188	
20	0	0	0	
21	0	0	0	
22	0	0	0	
23	0	0	0	
24	0	0	0	

Tableau V.2: Comparaison des résultats obtenus numériquement avec les données mesurées expérimentalement : Cas de densité du flux solaire direct de plan horizontal au cours de la journée du 17 juillet 2014.

Heure (h)	(RDIFH) Densité du flux calculée en (W/m^2)	(RDIFH) Densité du flux mesurée en (W/m^2)	Erreur relative	Erreur relative moyenne
1	0	0	0	<u>0,145873152</u>
2	0	0	0	
3	0	0	0	
4	0	0	0	
5	0	0	0	
6	0	0	0	
7	180,82574	140	0,291612429	
8	280,4462	250	0,1217848	
9	350,84118	300	0,1694706	
10	410,12356	341	0,202708387	
11	440,62152	416	0,059186346	
12	460,60949	430	0,07118486	
13	470,25388	450	0,045008622	
14	460,60949	455	0,012328549	
15	440,62152	400	0,1015538	
16	410,12356	350	0,1717816	
17	350,84118	300	0,1694706	
18	280,4462	220	0,274755455	
19	180,82574	150	0,205504933	
20	0	0	0	
21	0	0	0	
22	0	0	0	
23	0	0	0	
24	0	0	0	

Tableau V.3: Comparaison des résultats obtenus numériquement avec les données mesurées expérimentalement : Cas de densité du flux solaire diffus de plan horizontal au cours de la journée du 17 juillet 2014.

Écoulement du Fluide

Caloporteur

Analyse et Interprétation

V.3 Investigation de l'écoulement du fluide dans la canalisation de la dalle

La première tâche dans cette étude consistait à réaliser un maillage en deux dimensions (2D) à l'aide de code FORTRAN. En effet, trois type de maillages non uniformes ont été réalisés, afin de pouvoir de tester la fiabilité et la sensibilité du maillage sur les résultats obtenus. Utilisant les équations de Navier-Stokes, décrivant les phénomènes d'écoulements de fluides, pour réaliser la modélisation, il était obligatoire de les résoudre sur les surfaces les plus simples possibles.

Les données des conditions aux limites pour la canalisation de la dalle en béton sont :

1. Une température d'entrée du fluide égale à 60°C ;
2. Les conditions aux limites imposées aux frontières sont de type Dirichlet (une température sur les parois inférieure et supérieure égale à 60°C) ;
3. La valeur de référence du nombre de Reynolds est de 500, donc le régime est laminaire ;
4. Un gradient de la température dans la sortie du canal.

Les caractéristiques de la grille du maillage sont présentées dans le tableau V.4

Canal	Longueur L sur (Ox)	Hauteur H sur (Oy)	NI	NJ	Δx	Δy
	1m	$20 \cdot 10^{-3}$ m	101	41	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-4}$

Tableau V.4 : Données du calcul pour la grille de la canalisation de la dalle en béton.

Il bien noté que, nous avons effectué de nombreux calculs pour observer l'évolution des profils de la vitesse et la température de l'écoulement de fluide caloporteur dans la canalisation rectangulaire en fonction du nombre de Reynolds, sur un maillage en deux dimensions.

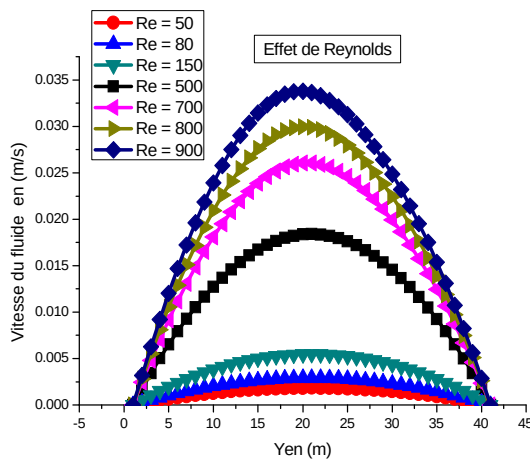
V.3.1 Evolution de profil de la vitesse du fluide caloporteur dans la canalisation de la dalle

D'après la figure (V.6.a), on peut remarquer que l'allure du profil de la vitesse du fluide dans la canalisation de la dalle chauffante est parabolique. En plus, elle a la même forme pour toutes les valeurs de Reynolds ($Re = 50, 80, 150, 700, 800$ et 900), mais il y avait une légère différence dans la vitesse maximale au centre du canal, qui est égale 0.0025 m/s pour $Re = 50$ et 0.0325 m/s pour $Re = 900$. Cette différence dans les profils de la vitesse d'écoulement est due au fait que l'influence de la variation du nombre de Reynolds sur l'écoulement du fluide est importante.

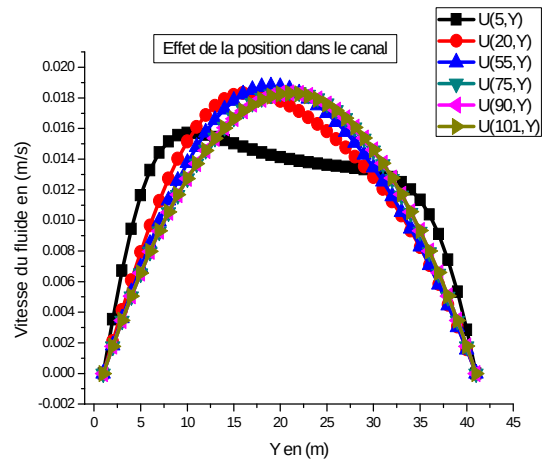
En effet, quand on augmente la valeur de Reynolds, la vitesse augmente et vice-versa, ce qui explique que dans le cas des conduites en charge où l'écoulement est laminaire, seules les forces de viscosité qui interviennent.

D'autre part, les parois de la canalisation exercent des forces de frottement sur le fluide. Ainsi, au bout d'une longueur d'établissement d'écoulement non négligeable, la vitesse prend un autre profil par rapport à l'entrée. D'après la figure (V.6.b), on constate que pour une section déterminée, la vitesse du fluide n'est pas la même en fonction de la position du fluide dans la canalisation de la dalle.

En effet, pour un point situé au voisinage de l'entrée du canal $U_f(5, Y)$, son profil de vitesse est totalement différent par rapport à un autre point situé par exemple au centre du canal $U_f(55, Y)$. Ce qui explique le changement des profils de vitesses jusqu'à une vitesse nulle au niveau des parois (condition de non glissement) et une vitesse maximale au milieu du canal.



(a) Evolution de la vitesse en fonction de Re



(b) Evolution de la vitesse en fonction de la position dans le canal

Fig. V.6 : Évolution des profils des vitesses du fluide caloporteur dans le canal en fonction du pas d'espace.

Diffusion Thermique au **Sien de la Dalle Chauffante** **Analyse et Interprétation**

V.4 Investigation de la diffusion thermique au sien de la dalle chauffante

L'évacuation de la chaleur dissipée par les systèmes de chauffage dans l'habitat nécessite la maîtrise de transfert et de transport de la chaleur. S'agissant d'habitat, la notion de confort des usagers est primordiale autant que celle de consommation d'énergie. Ainsi, l'objectif de cette étude est de déterminer le champ de température au niveau d'un plancher chauffant en régime instationnaire, basée sur la résolution de l'équation de la diffusion de la chaleur en deux dimensions.

Dans la totalité de notre problème, nous prendrons en compte les échanges de chaleur sous forme de conduction thermique et de convection. Notre problème ayant une géométrie plutôt complexe avec les tubes, nous avons considéré une coupe carrée du tube et non circulaire. Il est admis que la température à la surface des tubes chauffants est uniforme, de même qu'à l'intérieur de celui-ci.

Les conditions aux limites de la dalle chauffante sont :

1. Un gradient de la température dans l'entrée et la sortie, selon la direction (Ox) ;
2. Les conditions aux limites imposées aux frontières sont de type Dirichlet (température de la surface inférieure de la dalle du béton est égale à 60°C) ;
3. Un gradient de la température sur la surface supérieure de la dalle.
4. Initialisation des variables du système à la température d'ambiance (20°C).

Les données de la grille du calcul sont présentées dans le tableau V.5 :

Dalle de béton	Longueur L sur (Ox)	Epaisseur e sur (Oy)	NI	NK	Δx	Δk
	1m	0.1m	101	121	10^{-2}	1.25×10^{-3}

Tableau V.5 : Données de la grille du calcul dans la dalle chauffante.

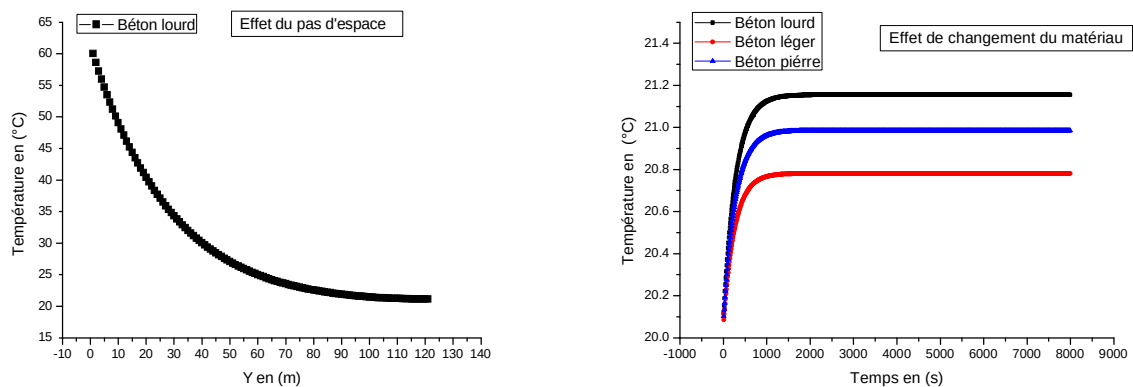
V.4.1 Evolution de profil de la température de la dalle en béton

L'activation thermique de la dalle en béton représente une variante agréable et écologique en matière de gestion de la température des bâtiments modernes, notamment des bureaux et des bâtiments administratifs. Son avantage économique en fait un thème d'actualité dans le domaine des techniques de construction [1]. La figure (V.7.a) présente l'évolution de la température au sein de la dalle d'une enveloppe habitable.

Il est bien noté dans cette figure la variation spatiale de la température en fonction du pas d'espace. En plus, les résultats illustrés dans la figure (V.7.b) nous montrent l'évolution des champs de la température au sein de la dalle chauffante en fonction du temps pour différentes valeurs de conductivité thermique.

Il est évident que l'effet d'échange de la chaleur avec l'ambiance externe est bien observé au cours de l'évolution du temps.

En effet, pour $0 < t < 1000s$, on peut remarquer que la température augmente rapidement avec le temps. Pour $t \geq 1000s$ la température reste constante et égale à la température de l'ambiance avec l'augmentation du temps. En effet, on peut remarquer qu'il y a une diminution importante de la température du béton de 60°C comme une température à la surface inférieure de la dalle jusqu'à une température de 20°C de l'ambiance extérieure.



(a) Variation de la température en fonction de Y

(b) Variation de la température pour différents matériaux

Fig. V.7 : Evolution de la température de la dalle chauffante pour différentes catégories du béton.

V.4.2 Effet de la conductivité thermique sur l'évolution de la température au sien du béton

La conductivité thermique est la quantité de chaleur qui passe en une seconde à travers une section de 1 m^2 d'une couche de matériau homogène de 1 mètre d'épaisseur, soumis à une différence de température de 1 degré [2]. Dans la figure V.8, on peut remarquer que la conductivité thermique du béton joue un rôle notable dans la conduction thermique. En effet, plus la conductivité (λ) diminue, plus la température diminue, et cette diminution est beaucoup plus prononcée pour un pas d'espace $1 \leq Y \leq 20$.

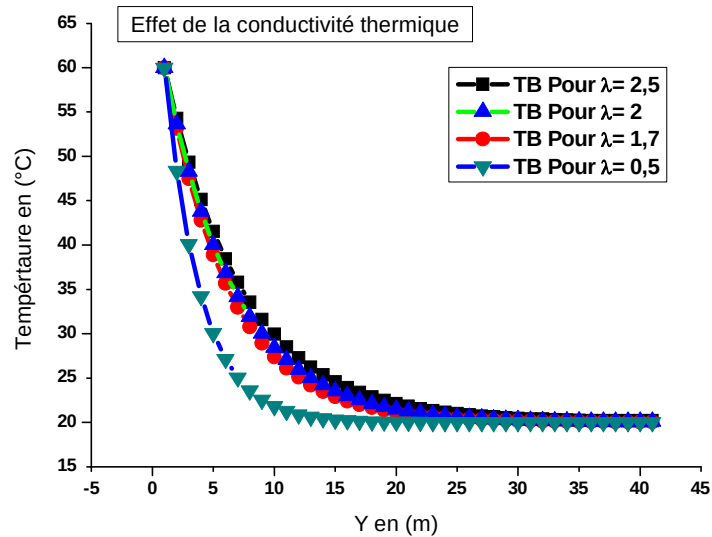


Fig. V.8: Evolution de la température de la dalle en fonction du pas d'espace de l'épaisseur de la dalle pour différentes valeurs de conductivité thermique du béton.

Cependant il est important de noter que ces mêmes résultats ne reflètent pas l'exacte réalité à cause des choix de simplification que nous avons dû faire au cours de la résolution. Ainsi, plusieurs optimisations pourraient être proposées telles que la prise en compte d'un cylindre pour la conduite au lieu d'un simple carré, l'importance d'un éventuel revêtement sur le plancher qui modifierait le champ de températures, considérer la pièce dans son intégralité pour ne pas négliger le rayonnement des murs et du plafond, étudier le fonctionnement du plancher en été où celui-ci peut servir à rafraîchir l'environnement de quelques degrés ou enfin étudier le mécanisme hydraulique de la conduite permettant des températures de chauffe différentes.

Gisement Solaire de **la Région d'Adrar** **Étude et Analyse**

V.5 Gisement solaire des journées typiques choisies dans la région d'Adrar

V.5.1 Données astronomiques et météorologiques de la journée typique considérée

Dans les tableaux ci-après, on donne les données astronomiques pour la journée typique (tableau V.6.a) et la journée typique des quatre saisons de l'année ((tableau V.6.b), (tableau V.6.c), (tableau V.6.d) et (tableau V.6.e)) qui seront utilisées pour le calcul des différentes densités du flux solaire influencent les échanges thermiques dans l'enveloppe habitable.

Journée typique (17 Juillet 2014)	
Température d'ambiance maximale en (°C)	47.70
Température d'ambiance minimale en (°C)	32.50
Température d'ambiance moyenne en (°C)	40.70
Flux maximal en (W/m ²)	1051.00
Flux moyen en (W/m ²)	323.00
Vitesse moyenne du vent en (m/s)	5.80
Durée du jour en (h)	14.00
Heure du lever du soleil en (h)	5.00
Heure du coucher du soleil en (h)	19.00
Déclinaison du soleil en (°)	-13°12'
Correction d'équation du temps en (minute)	17'.97''

(a) Données astronomiques de la journée type (17 Juillet 2014).

Journée typique de la saison de l'hiver (03 Février 2014)	
Température d'ambiance maximale en (°C)	25.9
Température d'ambiance minimale en (°C)	11.7
Température d'ambiance moyenne en (°C)	18.2
Flux maximal en (W/m ²)	784.00
Flux moyen en (W/m ²)	211.00
Vitesse moyenne du vent en (m/s)	2.8
Durée du jour en (h)	11.00
Heure du lever du soleil en (h)	6h38
Heure du coucher du soleil en (h)	17h14
Déclinaison du soleil en (°)	-16°.96'
Correction d'équation du temps en (minute)	13'.97''

(b) Journée typique de la saison de l'hiver.

Journée typique de la saison du printemps (05 Mars 2014)	
Température d'ambiance maximale en (°C)	29.7
Température d'ambiance minimale en (°C)	11.8
Température d'ambiance moyenne en (°C)	21.0
Flux maximal en (W/m ²)	930.00
Flux moyen en (W/m ²)	274.00
Vitesse moyenne du vent en (m/s)	2.1
Durée du jour en (h)	12.00
Heure du lever du soleil en (h)	6h03
Heure du coucher du soleil en (h)	17h55
Déclinaison du soleil en (°)	-6°.76'
Correction d'équation du temps en (minute)	-12'.22''

(c) Journée typique de la saison du printemps.

Journée typique de la saison de l'été (03 Aout 2014)	
Température d'ambiance maximale en (°C)	44.7
Température d'ambiance minimale en (°C)	33.7
Température d'ambiance moyenne en (°C)	39.7
Flux maximal en (W/m ²)	614.00
Flux moyen en (W/m ²)	141.00
Vitesse moyenne du vent en (m/s)	3.1
Durée du jour en (h)	13.00
Heure du lever du soleil en (h)	5h26
Heure du coucher du soleil en (h)	18h53
Déclinaison du soleil en (°)	17°,38'
Correction d'équation du temps en (minute)	-5',87"

Journée typique de la saison de l'automne (05 Novembre 2014)	
Température d'ambiance maximale en (°C)	24.3
Température d'ambiance minimale en (°C)	12.5
Température d'ambiance moyenne en (°C)	18.4
Flux maximal en (W/m ²)	771.00
Flux moyen en (W/m ²)	71.00
Vitesse moyenne du vent en (m/s)	4.2
Durée du jour en (h)	11.00
Heure du lever du soleil en (h)	7h27
Heure du coucher du soleil en (h)	18h06
Déclinaison du soleil en (°)	-19°.54'
Correction d'équation du temps en (minute)	16',26"

(d) Journée typique de la saison de l'été.

(e) Journée typique de la saison de l'automne.

Tableaux V.6 : Données astronomiques pour la journée typique des quatre saisons de l'année.

V.5.2 Hauteur angulaire et l'azimut soleil dans la journée typique

La position précise du soleil dans le ciel à un moment donné se détermine à l'aide de deux coordonnées essentielle telles que : L'azimut et la hauteur angulaire. Sachant que, cette hauteur varie entre 0° dans la période nocturne et 90° à midi solaire comme l'indique la figure V.9. En plus l'azimut du soleil qui est négatif avant midi solaire, positif après-midi et nul à midi solaire comme le montre la figure V.10.

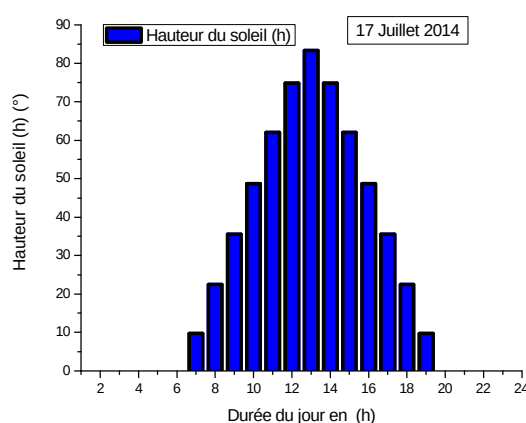


Fig. V.9 : Evolution de la hauteur du soleil en fonction du temps.

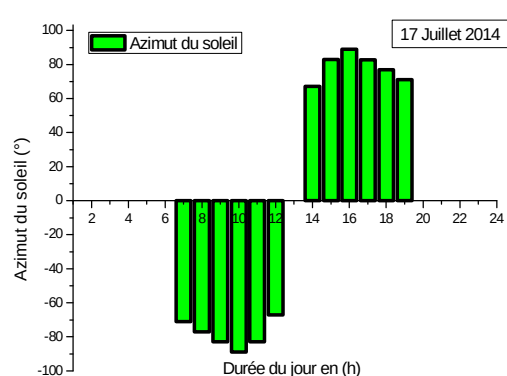


Fig. V.10 : Variation de l'azimut du soleil en fonction du temps.

V.5.3 Evolution de l'angle horaire du soleil dans la journée typique

L'angle horaire du soleil est le paramètre repérant la position du soleil sur sa trajectoire diurne. Il est directement relié à la date, l'heure et le méridien du lieu de l'observation. On détermine l'angle horaire en posant comme référence (0° pour le midi solaire (12h), -90° pour 6h solaire et $+90^\circ$ pour 18h solaire) (voir Fig. V.11).

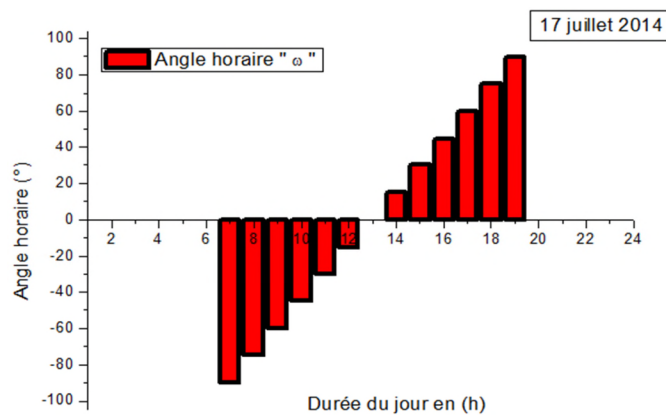


Fig. V.11 : Evolution de l'angle horaire du soleil en fonction du temps.

V.5.4 Analyse de la densité du flux solaire pour une façade horizontale (toiture de l'habitat)

La figure V.12 présente l'évolution de la densité du flux solaire global (FSGH) incident sur le plan horizontal dans la journée type du mois de juillet 2014. On constate que cette densité du flux atteint son maximal dans la période diurne de 1051 W/m^2 à midi solaire (13 TLG) et nul dans la période nocturne.

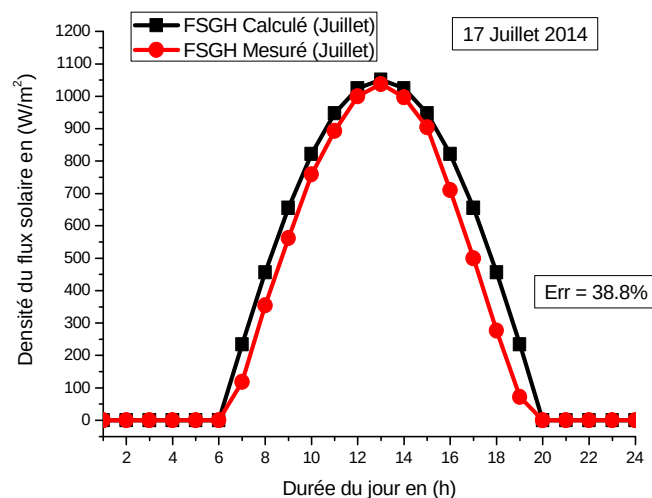


Fig.V.12 : Evolution de la densité du flux solaire global horizontal au cours de la journée solaire typique.

La figure V.13 montre l'évolution des deux composantes essentielles de la densité du flux (direct et diffus) mesurées pour un plan horizontal en fonction du temps local de la région considérée. En effet, l'évolution de ces densités a pour objectif de déduire l'énergie maximale reçue en tout point dans un intervalle de temps donné, en négligeant le phénomène du couvert des nuages, qui peut modifier le rapport entre les composantes directes et diffuses de l'ensoleillement, et le phénomène de la réflexion. Les valeurs examinées ici n'ont donc de sens qu'en puissance instantanée, ou en énergie intégrée sur une journée parfaitement ensoleillée en l'absence de toute surface réfléchissante.

Cependant, on constate que pour n'importe quelle densité du flux solaire global reçu par un plan horizontal, il doit y avoir deux composantes nécessaires telles que la composante du flux direct (RDIRH) qui a dès valeur horaire un peu plus petites que celles de la composante du flux global et une autre qui est la composante du flux diffus avec (RDIFH) a des valeurs aussi plus petites que celles de la composante du flux direct.

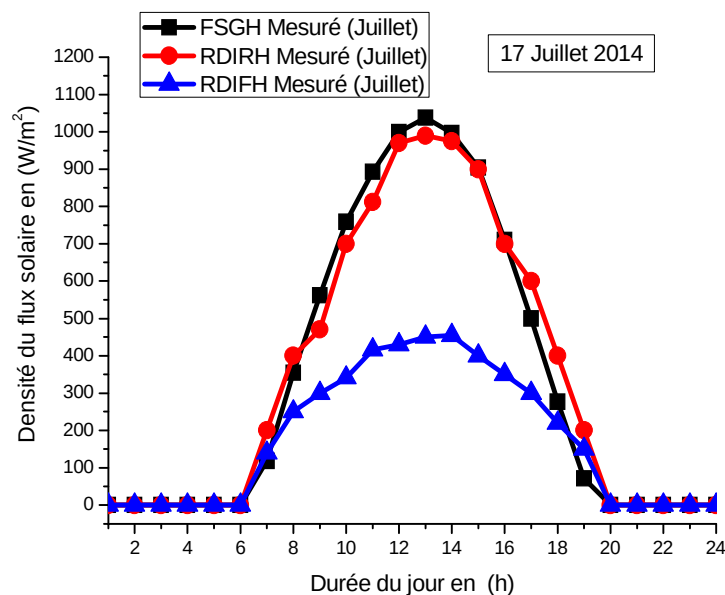


Fig.V.13 : Evolution des trois composantes de la densité du flux solaire horizontal dans une journée typique.

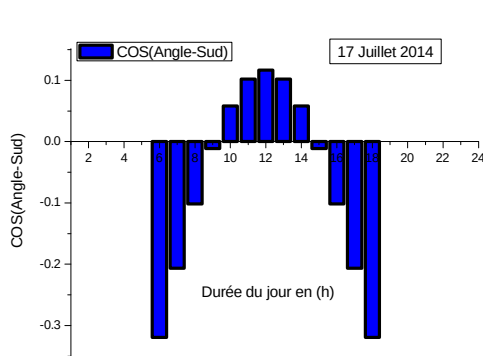
V.5.5 Évolution des angles d'incidences des rayonnements solaires pour une façade inclinée

L'évolution des cosinus des angles d'incidence permettait d'établir la densité du flux solaire instantané incidente sur les parois inclinées (Sud, Nord, Est et Ouest) de l'enveloppe habitable. Sur la base des résultats de ces tests du calcul des cosinus, on peut estimer aisément les évolutions d'intensité des rayonnements absorbés par chaque paroi.

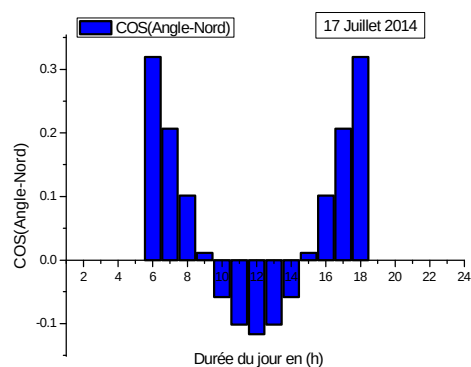
Pour cela, la figure V.14 présente l'évolution horaire des angles d'incidence des rayonnements solaires pour les quatre parois de l'enveloppe habitable. La variation du rayonnement solaire est directement liée à l'angle d'incidence par rapport à l'horizontale. En effet, on constate qu'il y avait une symétrie dans l'évolution des cosinus d'angle d'incidence pour les parois Sud et Nord (la figure (V.14.a) et (V.14.b)), et que cette évolution est symétrique par rapport à midi-solaire (TSV) soit pour la paroi sud ou pour la paroi Nord.

D'un côté, la paroi Sud (figure V.14.a), le cosinus de son angle d'incidence est atteint un maximum de 0.1 à midi solaire et puis négatif avant et après midi-solaire jusqu'à une valeur minimale de -0.3. D'un autre côté, on remarque sur la figure V.14.b de la façade Nord est une évolution inverse par rapport au Sud avec une valeur maximale avant et après midi-solaire de 0.3 et valeur minimale de -0.1 à midi-solaire. Par ailleurs, l'évolution des cosinus des angles d'incidence pour les deux parois Est et Ouest (la figure (V.14.c) et (V.14.e)), nous avons enregistré une symétrie l'une par rapport à l'autre et une symétrie pour chaque évolution de cosinus par rapport à midi-solaire.

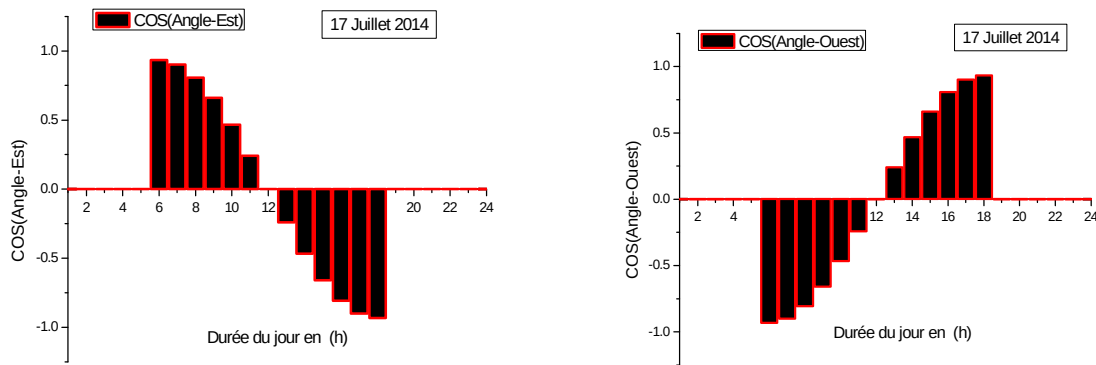
L'évolution du cosinus d'angle d'incidence de la paroi Est faite avec croissance avant midi jusqu'à une valeur maximale de 0.1, puis une décroissance jusqu'à elle devient nulle à midi-solaire puis elle continue la décroissance jusqu'à la valeur minimale de -0.1 à près midi (TSV). Évidemment, la figure (V.14.e) pour l'évolution de cosinus de la paroi Ouest, montre le cas inverse par rapport à la paroi Est car sont symétriques.



(a) Cosinus Angle d'incidence paroi Sud



(b) Cosinus Angle d'incidence paroi Nord



(c) Cousins Angle d'incidence paroi Est

(e) Cousins Angle d'incidence paroi Ouest

Fig. V.14 : Evolution horaire des cosinus des angles d'incidences des rayonnements solaires pour les parois Sud, Nord, Est et Ouest de l'enveloppe habitable dans la journée solaire typique.

V.5.6 Analyse de la température de l'environnement externe de l'habitat

Les figures V.15 et V.16 présentent une comparaison entre la température calculée par le modèle numérique développé est la température mesurée par la station radiométrique de l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharien d'Adrar pour la journée type (Fig. V.15) et pour les quatre journées choisies au milieu de chaque saison (Fig. V.16). Notant que les illustrations de la figure V.16, ont été ajoutées pour élargir l'éventail de comparaison sur d'autres journées des quatre saisons de l'année 2014. On peut constater que les résultats obtenus par le modèle développé sont en accord pour la période comprise entre 6h et 15h. Alors qu'avant 6h où après 15h une différence remarquable a été constatée. Celle-ci peut être attribuée aux hypothèses simplificatrices et à la négligence d'autres paramètres qui ne sont pas prises en considérations par les modèles empiriques actuels.

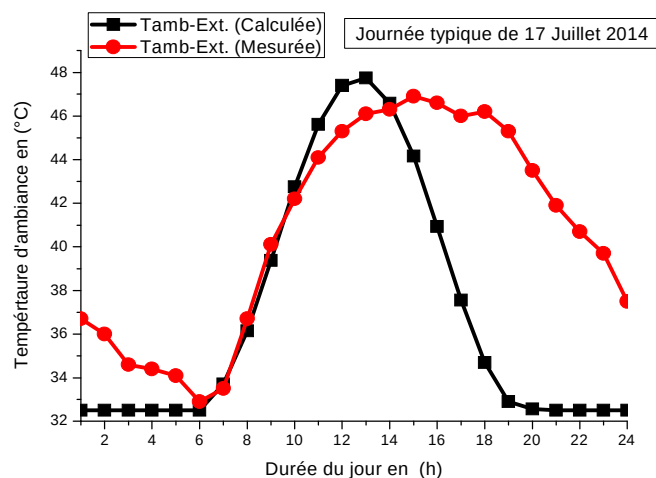


Fig.V.15 : Evolution de la température ambiante externe pour une journée solaire typique.

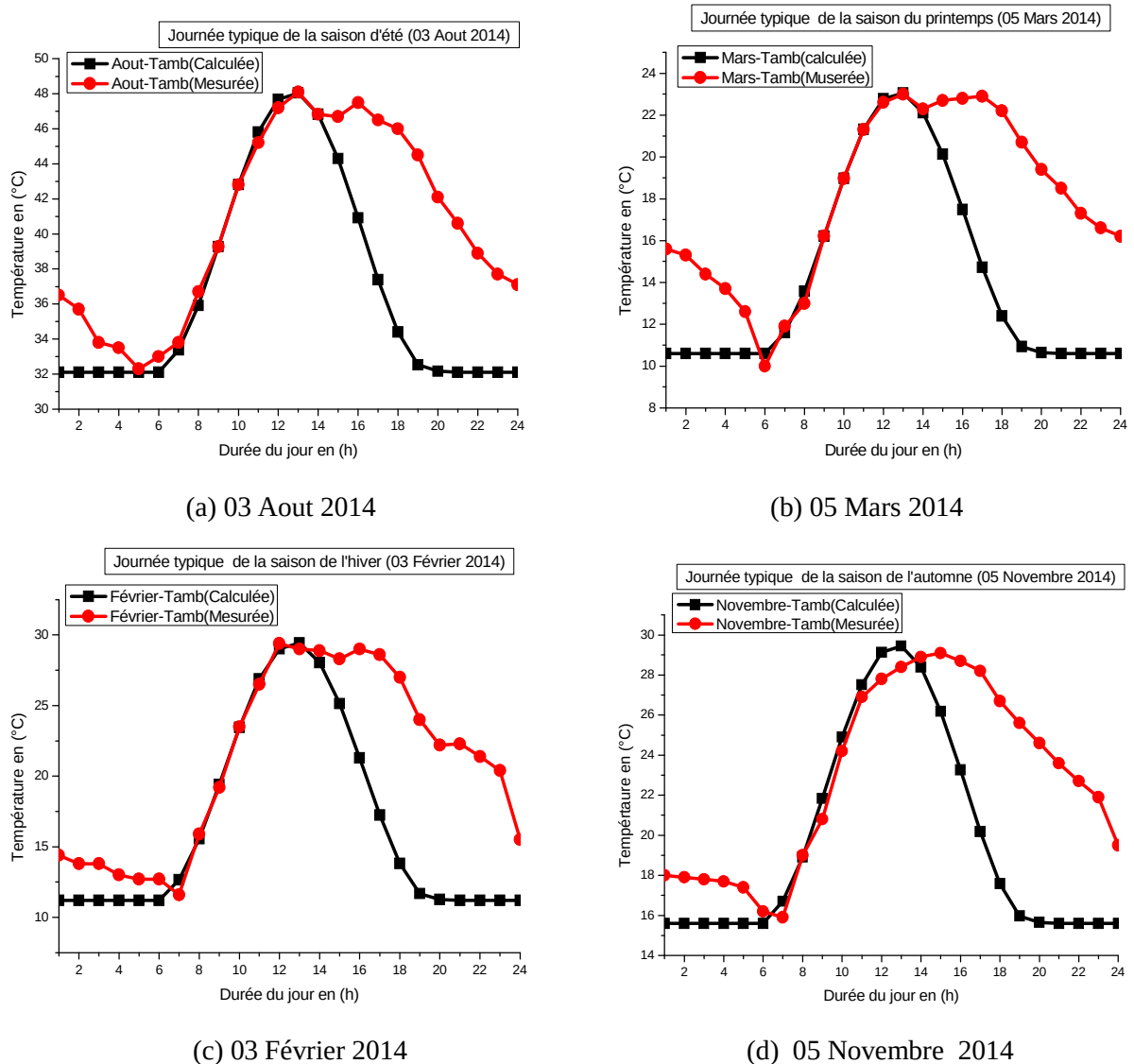


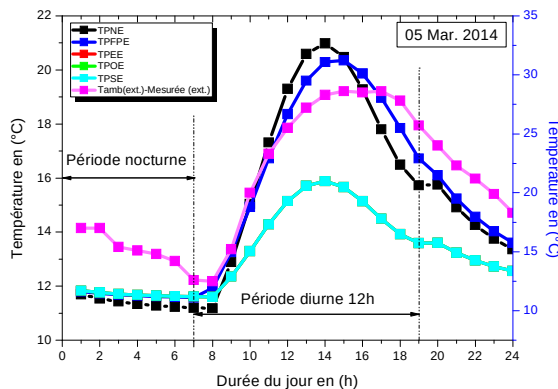
Fig.V.16 : Evolution de la température ambiante externe au cours des quatre jours types choisis au milieu de chaque saison de l'année considérée.

V.5.7 Analyse comparative entre la température externe de différentes façades de l'habitat avec celle de la station radiométrique

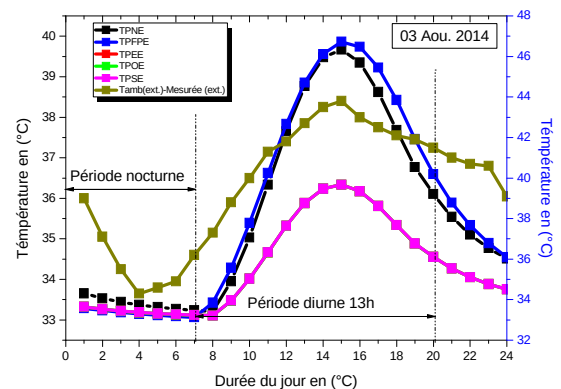
Les figures V.17 présentent une comparaison entre les températures calculées des façades externes de l'habitat par le modèle numérique développé et la température mesurée par la station radiométrique de l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharien d'Adrar pour les quatre journées choisies au milieu de chaque saison. D'après cette figure, on constate que, dans les trois journées typiques des saisons choisies (Fig. V.17.a.b.d) la température qui décrit les échanges thermiques entre la façade externe de la toiture de l'enveloppe habitable (TPFPE) et la température de la face Nord externe (TPNE) est plus grandes par rapport aux autres températures et plus grande que celle de la température de l'air externe mesurée.

Par ailleurs, l'évolution de la température mesurée pour la journée typique 03 février dans la saison d'hiver (Fig. V.17.c) est plus grande par rapport aux autres températures des façades externes de l'habitat avec un pic de 17.5°C à 15h00 du soir. En effet, les températures des façades externes pour les saisons de printemps et l'été atteignent leurs maximums dans la période diurne comprise entre 11h00 et 15h00, sauf les saisons d'hiver et l'automne, le maximum est compris dans la période diurne midi-solaire et 15h00.

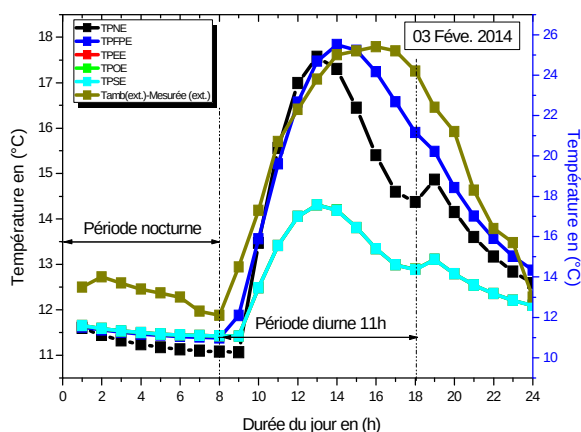
Ce déphasage dans le temps de l'évolution des températures des façades externes entre saison et une autre est parfaitement lié avec la durée astronomique du jour typique, ce qui est fait la différence entre journée par rapport à l'autre et saison à l'autre. En plus, peut signaler que la durée astronomique de la journée à une influence importante sur l'évolution de toutes les températures des parois de l'enveloppe habitable décrivant les échanges thermiques externes et internes.



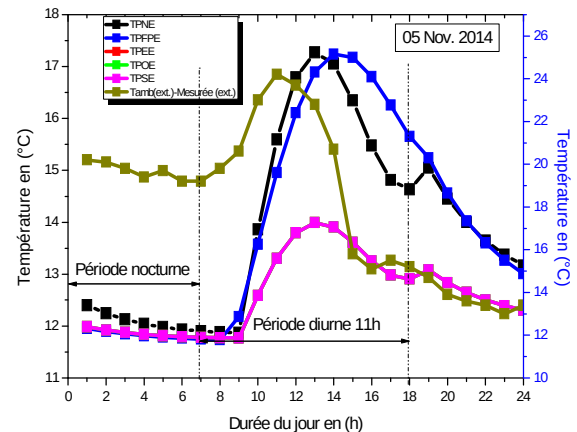
(a) 05 Mar. Saisons de printemps



(b) 03 Aou. Saison d'été



(c) 03 Fève. Saison d'hiver



(d) 05 Nov. Saison d'automne

Fig. 17 : Evolution horaire de la température mesurée de l'air externe par rapport la température de différentes façades externes de l'habitat.

V.5.8 Analyse de la densité du flux solaire moyenne de la journée typique

Les tableaux V.7 (a, b, c, e et d) donnent les valeurs moyenne journalières de la densité du flux solaire mesurées par la station radiométrique de l'unité de recherche d'Adrar pour un plan horizontal dans les quatre journées typiques aux saisons choisies de l'années 2014.

Journée typique (17 Juillet 2014)																								
Heure (h)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Flux moyen (W/m²)	00	00	00	00	00	00	10	118	354	562	759	893	999	1032	932	904	556	291	277	72	00	00	00	00

(a) Données de la densité moyenne du flux solaire horaire mesurées pour la journée type 17 juillet 2014.

Journée typique de la saison de l'automne (05 Novembre 2014)																								
Heure (h)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Flux moyen (W/m²)	00	00	00	00	00	00	00	18	67	450	600	730	770	730	600	480	229	80	4	00	00	00	00	00

(b) Données de la densité moyenne du flux solaire horaire mesurées de la journée type 05 Novembre 2014.

Journée typique de la saison de printemps (05 Mars 2014)																								
Heure (h)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Flux moyen (W/m²)	00	00	00	00	00	00	00	12	176	418	631	795	893	925	879	761	587	363	123	2	00	00	00	00

(c) Données de la densité moyenne du flux solaire horaire mesurées de la journée type 05 Mars 2014.

Journée typique de la saison de l'été (03 Aout 2014)																								
Heure (h)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Flux moyen (W/m²)	00	00	00	00	00	00	3	89	211	414	540	547	600	560	520	460	350	222	90	5	00	00	00	00

(d) Données de la densité moyenne du flux solaire horaire mesurées de la journée type 03 Aout 2014.

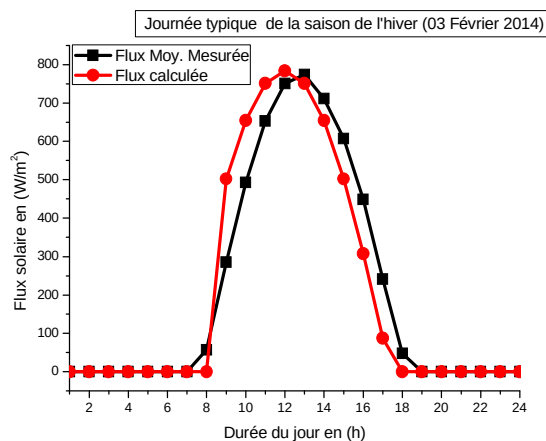
Journée typique de la saison de l'hiver (03 Février 2014)																								
Heure (h)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Flux moyen (W/m²)	00	00	00	00	00	00	00	00	57	285	493	653	751	774	711	607	449	241	48	00	00	00	00	00

(e) Données de la densité moyenne du flux solaire horaire mesurées de la journée type 03 Février 2014.

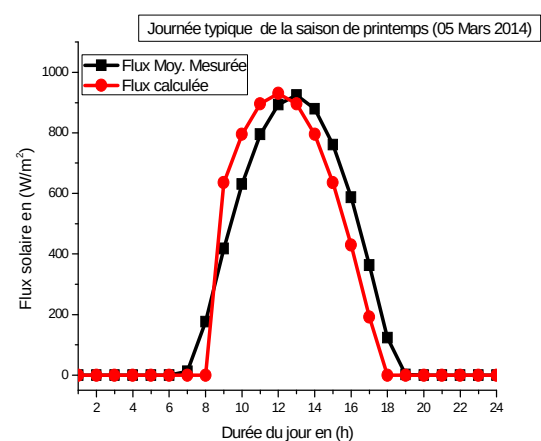
Tableaux V.7 : Données de la densité du flux solaire horaire mesurées des quatre journées typiques des saisons de l'année considérée.

Les figures (V.18.a.b.c.d) présentent une comparaison entre la densité du flux solaire calculée par le modèle numérique développé et la densité du flux solaire mesurée par la station radiométrique de l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharien d'Adrar pour les quatre journées typiques choisies au milieu de chaque saison de l'année 2014 (Printemps, Été, Automne et l'Hiver). Notant que les illustrations de la figure V.18, ont été ajoutées pour valoriser et concrétiser la comparaison sur d'autres journées dans l'année 2014.

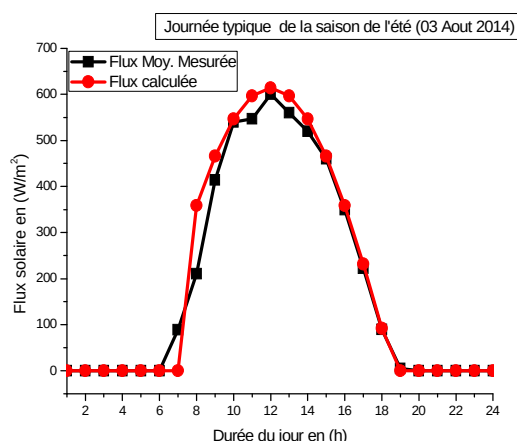
On peut constater que les résultats obtenus par le modèle développé ont un accord acceptable pour la période diurne comprise entre 6h00 et 18h00 avec une légère différence, Celle-ci peut être attribuée aux hypothèses simplificatrices et à la négligence d'autres paramètres qui ne sont pas prises en considérations par les modèles semi-empiriques utilisés dans la modélisation numérique. Alors qu'avant 6h ou après 18h la période nocturne, il n'y a pas de différence entre les deux courbes à cause d'une absence totale du soleil.



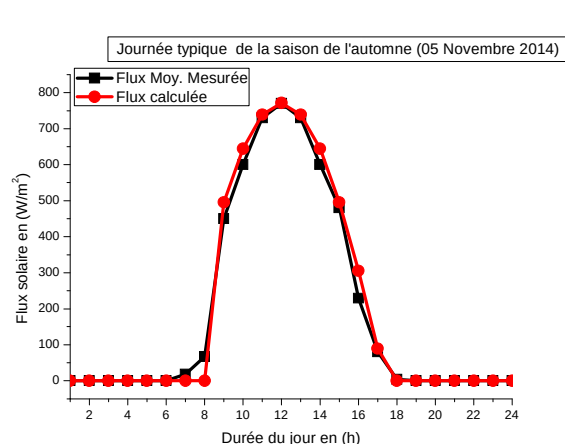
(a) 03 Février 2014



(b) 05 Mars 2014



(c) 03 Aout 2014



(d) 05 Novembre 2014

Fig. V.18 : Evolution horaire de la densité du flux solaire pour les quatre journées typiques des saisons dans l'année considérée.

Échanges Thermiques **de l'Environnement** **Habitable** **Analyse et Interprétation**

V.6 Analyse des différents échanges thermiques d'une enveloppe habitable

Cette analyse des échanges thermiques dans l'habitat, va nous permettre d'évaluer une solution technique et/ou architecturale. On injecte dans les modèles développés les valeurs mesurées dans la station radiométrique que prennent au cours du temps des variables décrivant le climat de la région d'Adrar au Sud de l'Algérie ; on indique les paramètres de fonctionnement de l'enveloppe habitable (occupé continuellement, chauffé, climatisé, etc.) et classiquement, on obtient les valeurs prises par un certain nombre de variables d'observation (températures d'air, températures de surface des parois, etc.) à des journées typiques de la période considérée.

Nous allons, ainsi analyser directement comment les courbes d'évolution des températures intérieures et extérieures sont influencées par les caractéristiques géométriques et physiques l'enveloppe habitable.

Cette analyse numérique va nous permettre de prévoir le dimensionnement de l'enveloppe habitable chauffé et le respect de critères de confort thermique.

V.6.1 Evolution de la température de l'environnement interne de l'habitat

La figure V.19 présente la variation horaire de la température des différentes faces internes de l'enveloppe habitable durant la journée type. On peut constater que l'inertie thermique du béton joue un rôle très important dans le transfert thermique au niveau des parois. En effet, la température du fond plafond (TPTI) est plus grande par rapport aux températures des autres faces internes Sud (TPSI), Ouest (TPOI), Nord (TPNI) et Est (TPEI).

Ceci est dû à deux facteurs essentiels qui sont réunis pour engendrer cette augmentation de la température : en premier lieu, l'épaisseur des parois de l'habitat qui implique l'élévation de l'inertie thermique et en deuxième lieu, l'angle d'incidence des rayons solaires de cette façade de la toiture qui est égale à 0°.

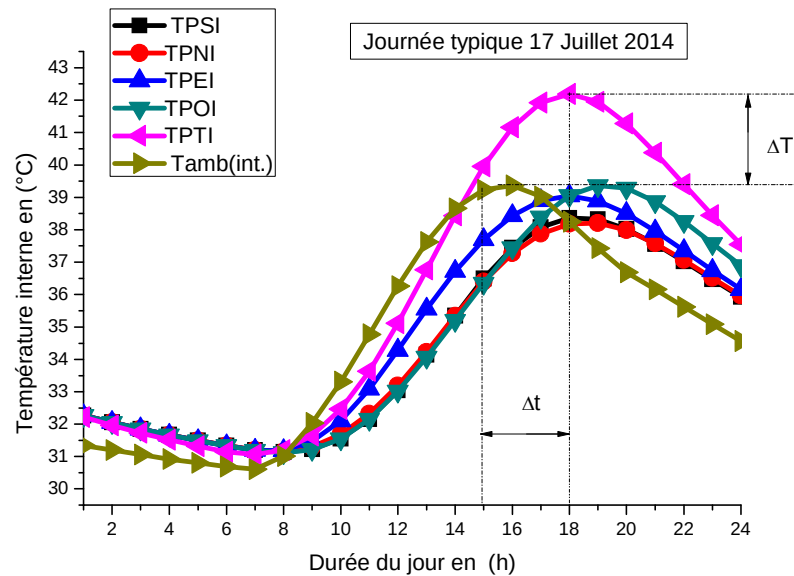


Fig.V.19 : Evolution de la température de l'air interne de l'enveloppe habitable en fonction du temps local (TLG).

Dans la figure V.20, nous nous présentons la variation horaire de la température des différentes façades internes de l'enveloppe habitable durant la journée type 03 Août de la saison de l'été dans l'année 2014. D'après cette figure, on constate qu'il y avait un écart remarquable de la température qui égale à 2°C entre la façade interne de la toiture et les autres façades des parois de l'enveloppe habitable (Sud, Nord, Est et Ouest).

En effet, cet écart est dû au fait de l'inclinaison des parois par rapport à l'horizontale car, l'angle d'incidence des rayonnements solaire est égal à 0° pour les parois horizontales et égale 90° pour les parois verticales. Par ailleurs, il est bien illustré dans cette figure que la température de l'espace interne chauffé est plus grande par rapport aux autres températures des façades internes de l'habitat dans cette journée typique de la saison d'été. D'un autre côté, nous avons observé un déphasage du temps de 5 heures entre le maximum de la température interne de l'espace chauffé et le maximum des températures des façades internes de l'habitat.

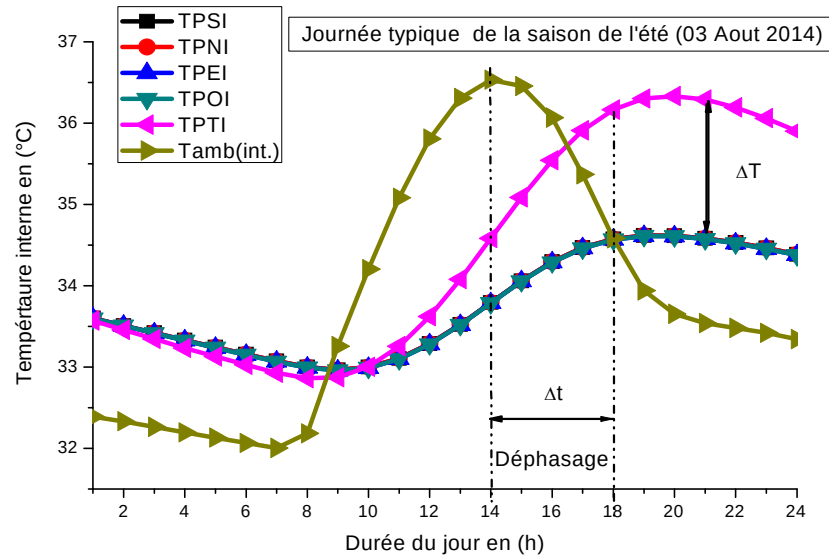


Fig. V.20 : Evolution des températures des façades internes des parois de l'enveloppe habitable en fonction du temps (saisons d'été).

La figure V.21 présente une évolution horaire des températures des façades internes de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans une journée typique de mois de février de la saison d'hiver pour l'année 2014. On constate que l'évolution de la température d'espace chauffé à commencer dans la période diurne à partir de 08h00 de matin et atteint un maximum de la température vers 13h00 l'après-midi égale à 18.3°C et puis, elle commence à décroître jusqu'à une valeur de 16.7°C vers 20 h00 en fin de la journée.

Par ailleurs, les autres évolutions des températures des façades internes de l'enveloppe habitable sont faites dans la période diurne qui comprise entre 10h00 de matin et 00h00 avec un pic de température de 16.5°C vers 20h00 de soir.

En effet, il est bien noté qu'y avait un déphasage notable de 07 heures entre le maximum de la température de l'ambiance interne et le maximum des températures des façades internes.

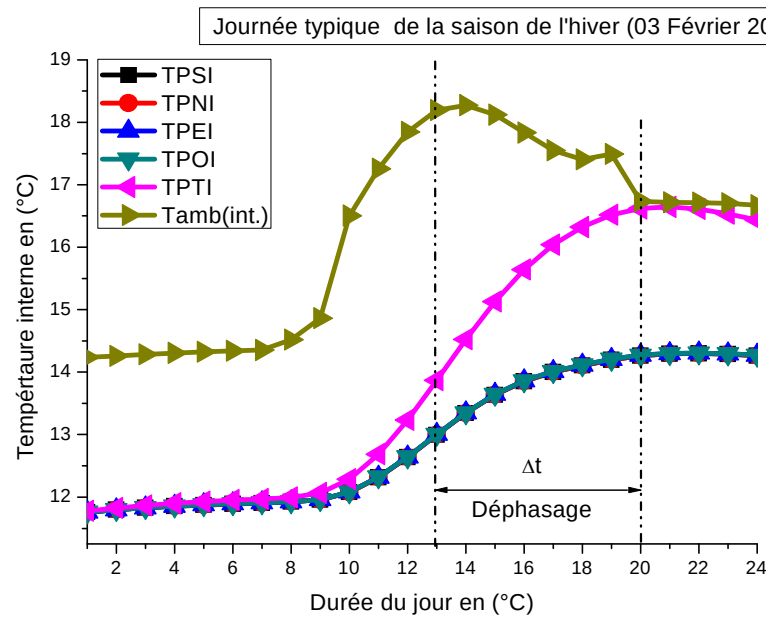


Fig. V.21 : Evolution des températures des façades internes des parois de l'enveloppe habitable en fonction du temps (saisons d'hiver).

La figure V.22, présente une comparaison entre l'évolution horaire de la température de l'ambiance interne de l'habitat et les températures des façades internes pour différentes parois constituant l'enveloppe habitable dans une journée typique au mois de Mars dans la saison de printemps pour l'année 2014. On peut dire en premier lieu, qu'y avait une évolution remarquable dans la période diurne entre 08h00 et 20h00 pour toutes les températures décrivant l'échange thermique interne dans l'habitat.

En deuxième lieu, on observe un écart de température notable de 3°C à 20h00 en fin de la journée entre l'évolution de la température de la face interne du fond plafond de l'habitat et les autres températures des façades internes des parois Sud, Nord, Est et Ouest.

D'un autre côté, il est bien enregistré dans cette figure un déphasage du temps égal à 6 heures entre le maximum de la température de l'espace chauffé et le maximum des autres températures des faces internes de parois de l'enveloppe habitable. Cet écart du temps dans la restitution de la chaleur est dû au fait de l'inertie thermique et l'épaisseur du béton utilisé comme un matériau de construction dans l'habitat.

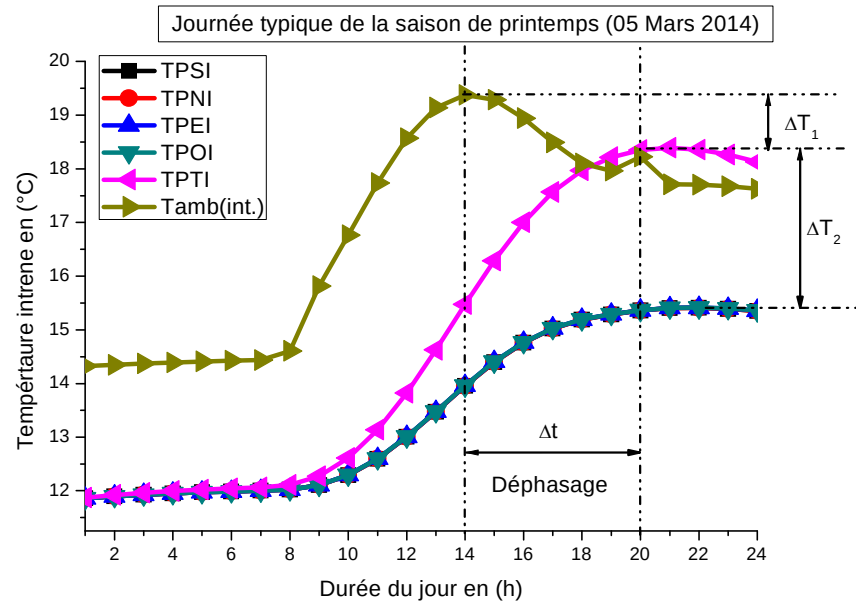


Fig. V.22 : Evolution des températures des façades internes des parois de l'enveloppe habitable en fonction du temps (saisons de printemps).

D'après la figure V.23 qui représente l'évolution horaire de la température de l'ambiance interne de l'habitat et l'évolution de différentes températures des façades internes constituant l'enveloppe l'habitat dans une journée typique de mois de Novembre pour la saison d'automne dans l'année 2014. On constate que l'évolution de la température de la face interne de la toiture de l'enveloppe et les températures des parois Sud, Nord, Est et Ouest se fait avec un écart de température de 3.5°C à la fin de la journée vers 20h00 de soir.

En plus, on remarque qu'il y avait un déphasage du temps de 7 heures entre le maximum de la température de l'espace chauffé et le maximum des autres températures décrivant les échanges thermiques internes de l'habitat. Cet écart du temps est dû au fait de l'inertie thermique des parois de l'enveloppe habitable. Par ailleurs, on peut dire que les conditions climatiques dans la saison d'automne au mois de Novembre, elles n'ont pas une grande influence sur la température du chauffage interne, car dans toutes les instantes de la journée typique, l'évolution de la température du chauffage est supérieure à l'évolution de la température des façades internes de l'habitat.

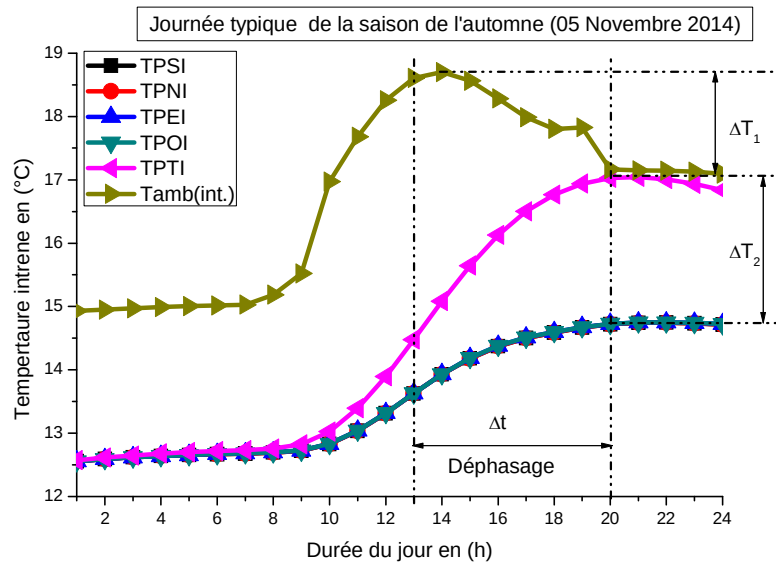


Fig. V.23 : Evolution des températures des façades internes des parois de l'enveloppe habitable en fonction du temps (saisons de l'automne).

La figure V.24 présente l'évolution horaire de la température du chauffage interne dans l'enveloppe habitable pour les quatre saisons choisies dans l'année 2014 en fonction du temps local. En effet, il est bien noté dans cette figure que l'évolution de la température du chauffage interne dans la saison d'automne est plus grande que les autres températures des saisons de l'été, l'hiver et le printemps.

D'un autre côté, on remarque que l'évolution de la température du chauffage dans les saisons d'été, l'hiver et le printemps a été fait avec croissance jusqu'à un maximum de 19°C vers 13 h00 après-midi, et une décroissance jusqu'à une valeur minimale de 15.5°C vers 20 h00 de soir, et puis devient constante dans le reste de la journée.

Par ailleurs, l'évolution de la température du chauffage au mois de Novembre de la saison d'automne est se fait d'une manière différente par rapport aux autres saisons de l'année 2014 car, la température dans cette saison est évoluée dans le sens positif jusqu'à une valeur maximum de 35.5°C à 14h00, puis elle évoluait dans le sens négatif jusqu'à une valeur minimale vers 20h00 et puis constante pour le reste de la journée.

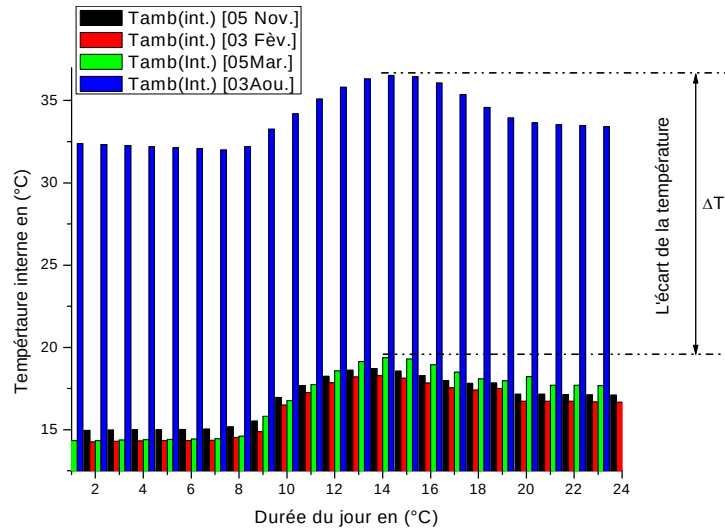


Fig. V.24 : Evolution de la température de l'ambiance interne de l'espace chauffé en fonction du temps local pour différente saison de l'année 2014.

V.6.2 Effet de l'épaisseur des parois du béton sur l'évolution de la température interne

Dans la figure V.25, nous avons présenté l'évolution quotidienne de la température ambiante interne en fonction du temps local (TLG) pour différentes épaisseurs des parois de l'enveloppe habitable. On constate que si on augmente l'épaisseur du béton, la température interne de l'enceinte diminue, ce qui est noté pour l'épaisseur $E_p = 40\text{cm}$, et au contraire, quand on réduit l'épaisseur, la température augmente, ce qui est noté pour l'épaisseur $E_p = 20\text{cm}$.

Cette variation de la température interne est due au fait que l'inertie thermique du béton joue un rôle très important dans les échanges thermiques qui se déroulent au sein de l'enceinte habitable.

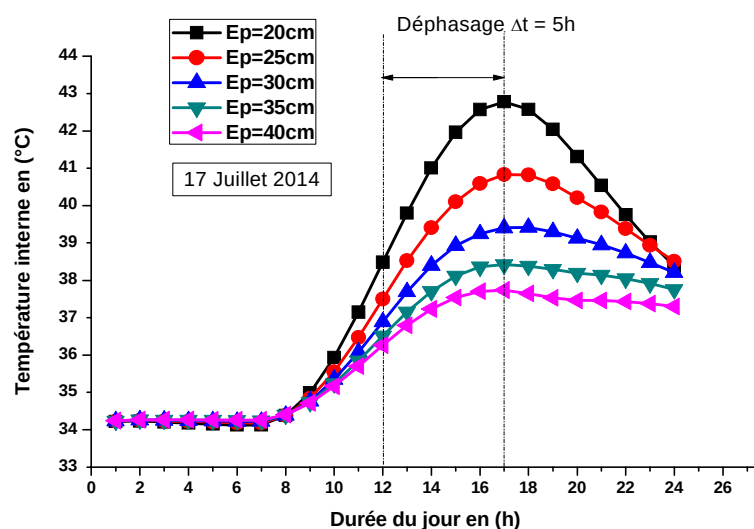


Fig.V.25 : Evolution de la température de l'air de l'ambiance interne durant la journée typique en fonction de l'épaisseur des parois de l'habitat.

V.6.3 Effet de l'émissivité du béton sur la température de l'environnement chauffé

D'après la figure V.26, qui présente les variations de température de l'ambiance interne chauffée en fonction de l'émissivité du béton au cours de la journée, on constate que la variation de l'émissivité a une influence notable sur la production du chauffage au sien de l'habitat. En effet, quand on augmente l'émissivité du béton à $\varepsilon = 0.94$, la température diminue jusqu'à 40.5°C et la température des façades interne est comprise entre 36°C à 38.5°C (Fig. V.26.b). En revanche, si on diminue l'émissivité on va contribuer à l'augmentation de la température jusqu'à 42.5°C de l'espace chauffé et c'est le cas pour $\varepsilon = 0.63$ (Fig. V.26.a).

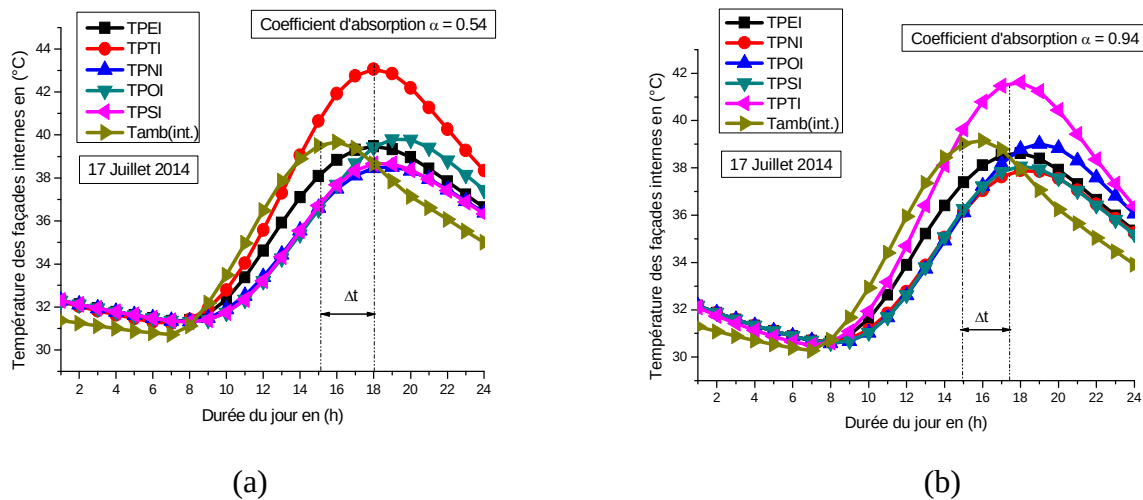


Fig.V.26 : Evolution de la température de l'air de l'ambiance interne durant la journée typique en fonction de l'émissivité du béton.

V.6.4 Influence de coefficient d'absorption du béton sur la température de l'espace chauffé

La figure V.27 représente l'évolution de la température moyenne de l'espace interne chauffé en fonction de la variation du coefficient d'absorption du béton. On remarque que pour une augmentation du coefficient d'absorption du béton à $\alpha = 0.6$, la température de l'espace chauffé augmente jusqu'à 38.5°C et vice-versa, c'est-à-dire, quand on diminue la valeur du coefficient d'absorption du béton à $\alpha = 0.02$, la température de l'ambiance interne diminue jusqu'à 37.1°C .

Finalement, on peut dire que ce facteur physique qui caractérise le béton a un effet assez notable sur l'augmentation de la température de l'ambiance interne de l'enveloppe habitable et surtout dans la période diurne, au milieu de la journée.

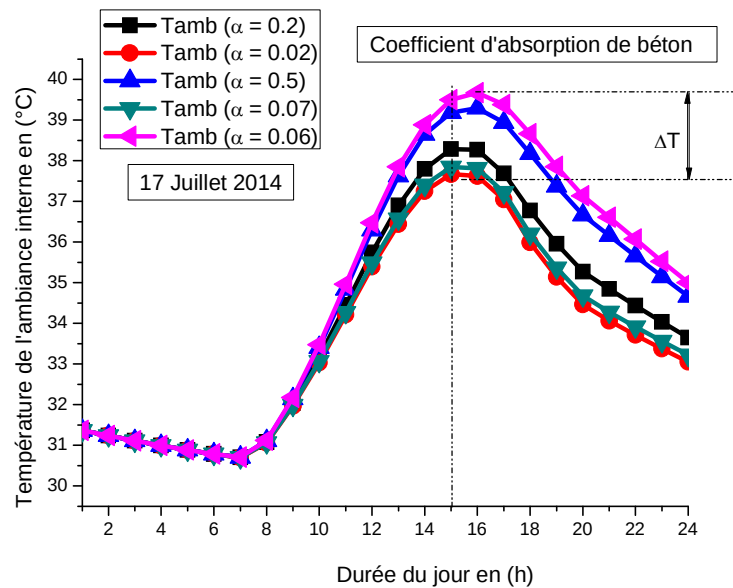


Fig.V.27 : Evolution de la température interne en fonction du coefficient d'absorption du béton.

V.6.5 Evolution de profil de la température moyenne de l'environnement externe de l'habitat

La figure V.28 illustre les évolutions des températures journalières horaires des différentes façades externes de l'enveloppe habitable dans la journée typique pour le mois de juillet 2014. On peut observer qu'il y a un déphasage notable entre la température ambiante externe et les autres températures des façades externes de l'habitat. Le déphasage peut être attribué à un phénomène physique qui est en jeu.

Ce phénomène est l'inertie thermique et ses effets qui sont cruelles sur le comportement thermique des parois de l'enceinte habitable. Ces effets sont plus visibles surtout en période diurne où la température de la face horizontale est plus grande par rapport aux autres températures des façades Sud, Est, Ouest et Nord. De plus, elle fait un déphasage de 01h30min en comparaison à la température ambiante externe.

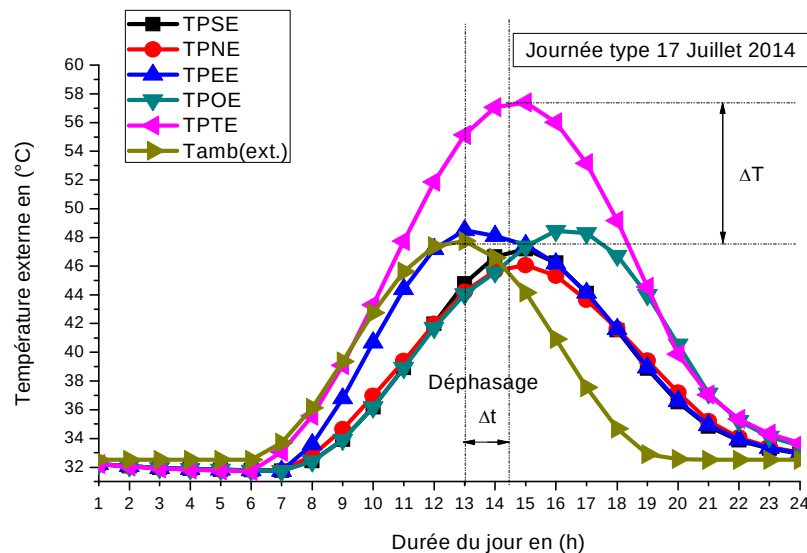


Fig.V.28 : Evolution de la température des façades externes de l'enveloppe habitable en fonction du temps local.

Dans la figure V.29 nous nous présentons l'évolution temporaire de la température de l'ambiance externe de l'habitat et parallèlement l'évolution des températures des façades externes des parois Sud, Nord, Est, Ouest et le toit de l'enveloppe habitable dans une journée typique au milieu de la saison d'été pour l'année 2014. On peut constater que l'évolution de la température à l'extérieur de l'enveloppe habitable est liée avec l'évolution de la densité du flux solaire moyenne dans la journée considérée. Cette évolution est se fait d'une manière progressive de 37°C à 07 h00 de matin jusqu'à une valeur maximale de 44.5°C vers midi solaire, puis elle diminue après-midi à une valeur minimale de 33.8°C vers 18 h00 du soir. En effet, l'évolution de la température externe de l'habitat prend des valeurs constantes pour le reste de la journée.

D'un autre côté, on note qu'y avait un déphasage de 04 heures enter le maximum de la température de l'ambiance externe à midi solaire et le maximum de la température de la face externe de la toiture de l'habitat à 15h00 l'après-midi. Cette dernière, prend des valeurs plus grands que celles de la température de l'air externe dans la période comprise entre midi solaire et 18h00 du soir. Cet écart de la température entre la température de l'ambiance externe et celle de la toiture est dû au fait de l'inertie thermique du béton et l'angle d'incidence des rayonnements solaires sur la face horizontale du toit. Par ailleurs, il est bien observé dans cette illustration un écart remarquable de la température de 5°C entre la température des façades externes Sud, Nord, Est, Ouest et celle de la température de l'air externe dans la période de 07h00 du matin et 15h00 à l'après-midi.

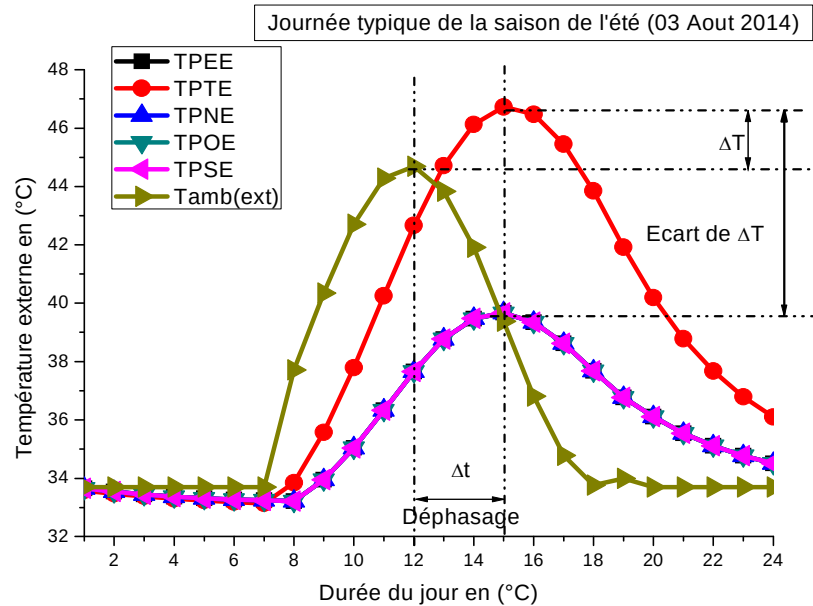


Fig.V.29 : Evolution de la température des façades externes de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison d'été.

La figure V.30 présente une comparaison entre l'évolution horaire de la température de l'ambiance externe de l'enveloppe habitable implémentée dans la région d'Adrar et l'évolution de la température des différentes façades externes de l'enveloppe dans une journée typique pour la saison d'hiver dans l'année 2014 en fonction du temps local (TLG).

D'après cette illustration, on constate que la durée astronomique du jour dans cette saison d'hiver est plus petite par rapport aux autres saisons dans l'année considérée, ce qui explique l'évolution de toutes les températures décrivant les échanges thermiques externes de l'enveloppe habitable ont été fait dans une période de 12 heures. En effet, l'évolution de la température de l'air externe de l'habitat est se fait d'une manière progressive de 8h00 avec une valeur minimale de 11.8°C jusqu'à une valeur maximale de 25.3°C à 10h00 du matin, puis elle prend le sens négatif jusqu'à une valeur minimale de 11.8°C à 15h00 l'après-midi avec des fluctuations dans la période comprise entre 16h00 à 19h00 à la fin de la journée.

Dans ce contexte, on 'a enregistré un déphasage de 04 heures entre le maximum de la température de l'ambiance externe à 10h00 et le maximum des températures des façades externes Sud, Nord, Est et Ouest de l'enveloppe habitable à 13h00. On peut dire que ce déphasage dû au fait de l'orientation des façades de l'enveloppe habitable.

Par ailleurs, il est bien noté dans cette figure l'écart de la température de 8°C entre les températures des façades externes Sud, Nord, Est et Ouest et celle de la façade externe de la toiture. Cet écart est totalement lié au fait de l'angle d'incidence des rayonnements solaires de chaque paroi.

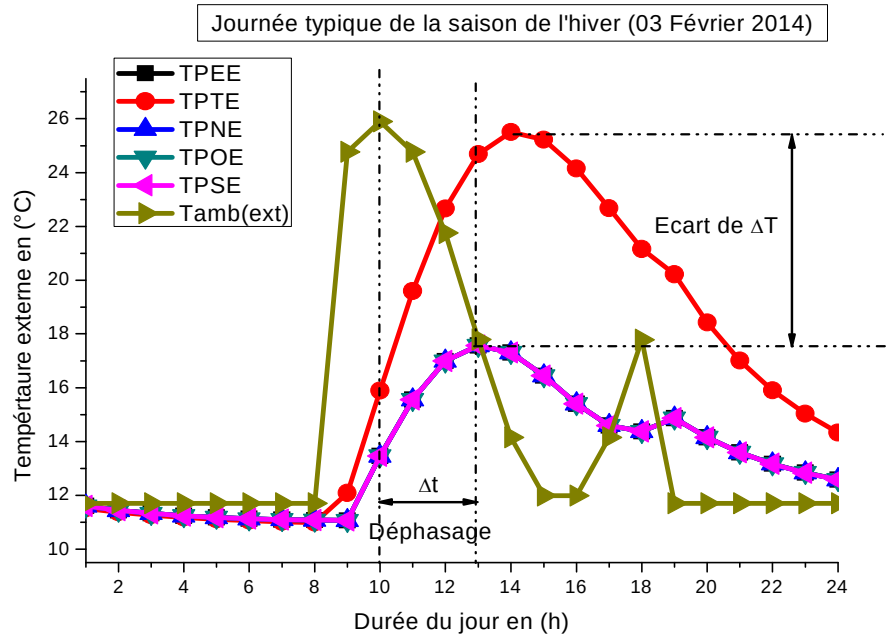


Fig.V.30 : Evolution de la température des façades externes de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison d'hiver.

La figure V.31 présente la comparaison entre l'évolution de la température de l'air extérieure de l'habitat et les évolutions des différentes températures des façades des proies constituant l'enveloppe habitable dans une journée typique de la saison de printemps pour l'année 2014.

En premier lieu, on constate que l'évolution de la température de l'ambiance extérieure est faite progressivement à 07h00 du matin avec une température de 11.2°C jusqu'à une valeur maximale de 28.1°C à 11h00, puis elle a diminué jusqu'à une valeur minimale de 11.2°C à 15h00 l'après-midi avec des fluctuations temporaires entre 15h00 et 20h00 à la fin de la journée. En deuxième lieu, il est bien observé dans cette illustration le déphasage horaire de 03 heures entre la température de l'ambiance extérieure et la température de la face externe du toit de l'habitat.

Ce déphasage est dû au fait de l'inertie thermique de la face externe de la toiture et la durée d'ensoleillement de cette façade. Cette durée d'ensoleillement a fait limiter l'écart de la température entre la température de l'air externe et celle de la face externe de la toiture.

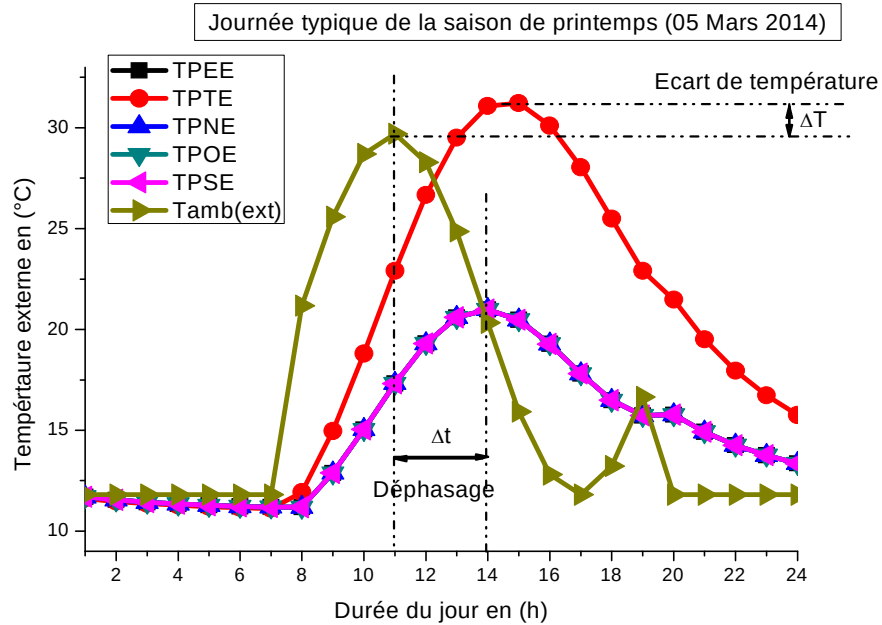


Fig.V.31 : Evolution de la température des façades externes de l’enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison de printemps.

Dans la figure V.32 nous nous présentons une comparaison entre l’évolution de la température de l’air externe de l’enveloppe habitable et l’évolution des différentes températures des façades externes de l’habitat pour une journée typique dans la saison de l’automne dans l’année 2014.

D’après cette figure, on constate que l’évolution de la température de l’ambiance externe est se fait d’une façon croissant à partir de 8h00 de matin jusqu’à une température maximale de 24.2°C à 10h00, puis elle décroître jusqu’à 15h00 avec fluctuations temporaires à la fin de la journée considérée.

D’un autre côté, on observe un écart de 8°C de température entre la température de la face externe du toit de l’enveloppe habitable et la température des façades externe Sud, Nord, E et Ouest de l’habitat. Cet écart explique l’influence de la différence de l’angle d’incidence des rayonnements solaires d’une façade par rapport à l’autre. On remarque aussi un déphasage de 04heures en entre le maximum de la température de l’ambiance et le maximum de la température de la face externe de la toiture.

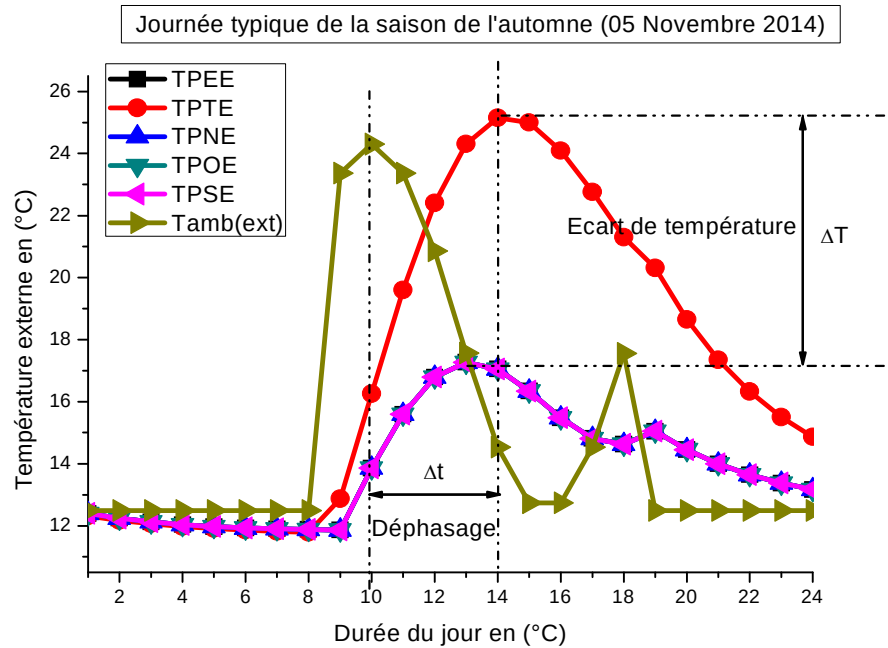


Fig.V.32 : Evolution de la température des façades externes de l'enveloppe habitable en fonction du temps local dans la saison de l'automne.

V.6.6 Effet de coefficient d'absorption du béton sur l'évolution de la température des façades externes

La figure V.33 présente la variation horaire de la température des façades externes (Sud, Est, Ouest, Nord et Toit) de l'enveloppe habitable en fonction du temps pour deux différents coefficients d'absorption du béton. On peut remarquer pour que toutes les parois, la température des façades est de 32°C pendant la période nocturne. Pendant la période diurne, elle évolue dans le sens croissant jusqu'à sa valeur maximale localisée au milieu de la journée entre 12h et 15h en temps local.

De plus, on peut remarquer que les températures des façades externes de l'habitat sont confondues à " $\alpha = 0.02$ " (Fig. V.33.b) avec une température maximale de 42.5°C à 15h en temps local, alors que pour " $\alpha = 0.6$ " les façades ont des températures différentes l'une par rapport à l'autre (Fig. V.33.a) avec une température maximale de 48.2°C enregistrée généralement dans un intervalle de temps compris entre 12h et 15h en temps local.

En conséquence, on peut dire que le coefficient d'absorption du béton a un effet remarquable sur l'évolution de la température des façades externes de l'enveloppe habitable pendant la période diurne.

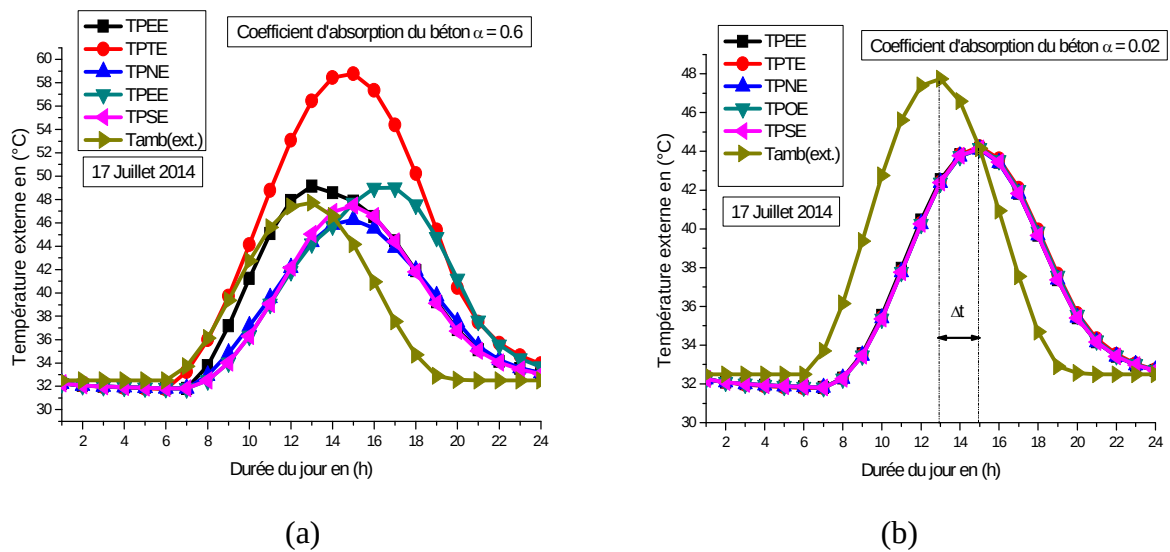


Fig.V.33 : Evolution de la température des façades externes des parois de l'habitat en fonction du temps pour deux différents facteurs d'absorption du béton : (a) $\alpha = 0.6$ et (b) $\alpha = 0.02$.

V.6.7 Evolution de la température de l'environnement chauffé en fonction du matériau de construction de l'enveloppe

Pour pouvoir utiliser judicieusement les matériaux de construction, il est indispensable de connaître leurs propriétés. Plusieurs propriétés thermiques des matériaux de construction doivent être connues pour orienter le choix de leur utilisation. Les propriétés principales des matériaux utilisés dans cette étude sont scindées dans le tableau V.8 ci-dessous.

	Béton lourd	Béton léger	Béton pierre	Bois léger	Bois lourd
Conductivité thermique λ (W/m. k)	1.75	1.00	1.40	0.14	0.20
Masse volumique ρ (Kg/m ³)	2200	1500	1895	540	800
Chaleur spécifique C_p (J/kg. K)	1000	1000	1000	2400	2700
Emissivité ε	0.54	0.54	0.54	0.86	0.86
Coefficient d'absorption α	0.6	0.6	0.6	0.07	0.07

Tableau : V.8 : Propriétés thermo-physiques des matériaux de constructions.

La capacité thermique d'une paroi est surtout utile que si elle est placée du côté intérieur du bâtiment et isolée des conditions climatiques extérieures. Construire en "forte inertie", c'est donc utiliser des matériaux lourds à l'intérieur de l'habitat afin de stocker la chaleur solaire et d'atténuer les variations de température interne [3]. À l'inverse, la température d'une maison à "faible inertie" augmente rapidement au moindre rayon de soleil sans possibilité de stocker la chaleur solaire. Les écarts de température internes seront importants et les risques de surchauffe seront élevés. Une forte inertie est surtout utile en cas d'occupation permanente. Une faible inertie peut être intéressante pour des locaux à usage intermittent [3].

La figure V.34 illustre l'effet de capacité thermique du stockage d'énergie solaire dans les parois de l'enveloppe habitable pour différents matériaux de construction (béton léger, béton lourd, béton pierre, bois léger et bois lourd). On peut constater que pour toutes les enveloppes habitables construites par des matériaux à grande capacité thermique comme le béton lourd (Fig. V.34.b), le béton léger (Fig. 34. a) et le béton pierre (Fig. 34.c), la température de son espace chauffé est optimale dans le mois de juillet à cause de l'inertie thermique de ces matériaux. En effet, il est bien observé dans les figures (V.34.a-b-c) que la température de l'ambiance interne varie entre 37°C et 38.5°C.

Cependant, si la construction des enveloppes habitables est basée sur des matériaux à faible capacité thermique, la température de l'espace chauffé varie aux alentours de 34°C et 35°C à cause de l'inertie thermique de ce type de matériaux de construction (cas du bois lourd (Fig. V.34.d) et bois léger (Fig. V.34.e)).

De plus, on remarque que la température des façades internes pour les constructions par matériaux à grande capacité thermique est très élevée par rapport aux façades internes des constructions par des matériaux à faible capacité thermique. De même, il est bien illustré, pour ces dernières, qu'il n'y a pas de grande différence entre les températures des parois.

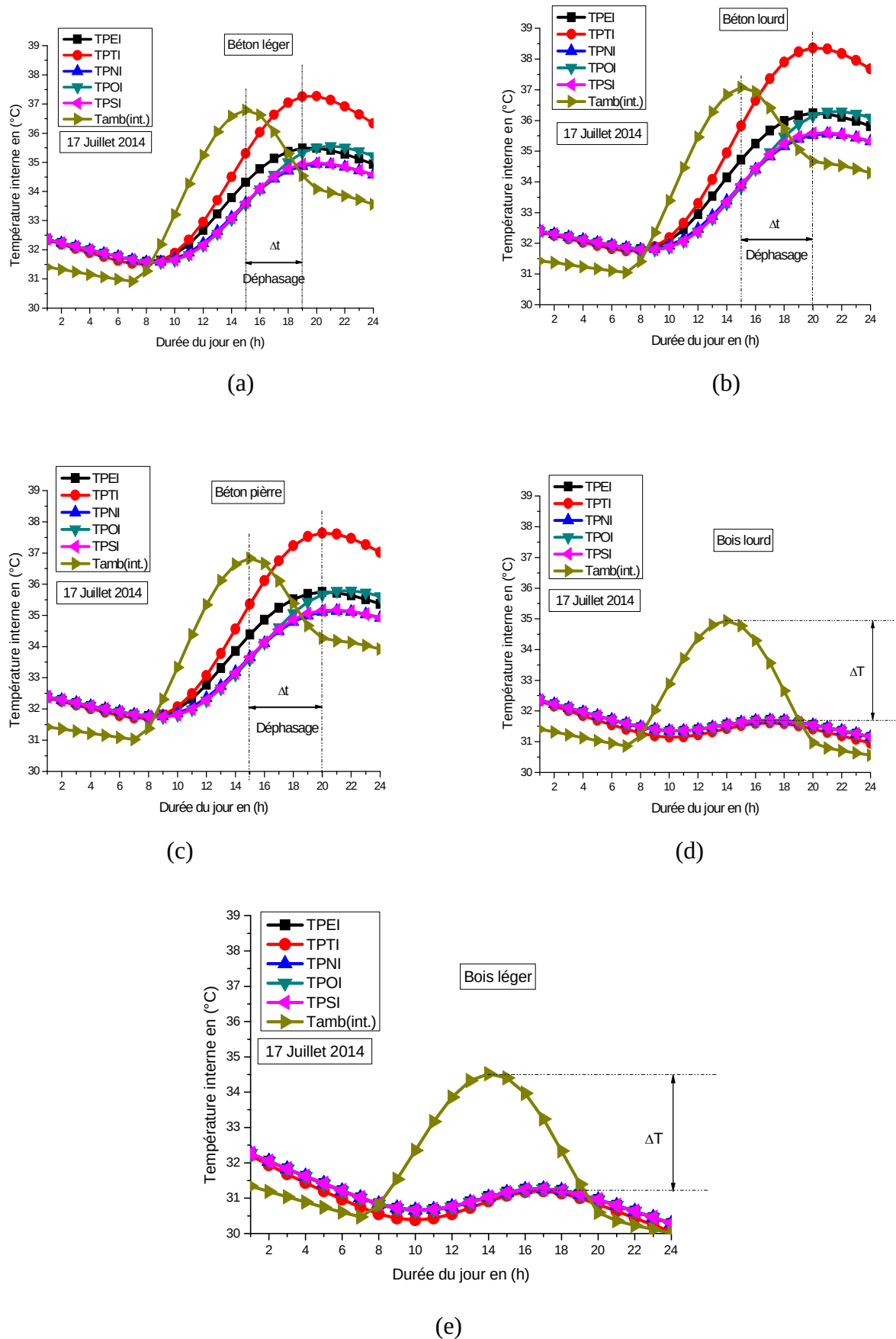


Fig.V.34 : Evolution de la température des façades internes des parois de l'habitat pour différents matériaux de construction.

Le Confort Thermique **d'Habitat** **Étude et Analyse**

V.7 Investigation du confort thermique de l'environnement habitable

V.7.1 Effet des déperditions thermiques par renouvellement d'air

La figure V.35 présente l'évolution de la température d'espace chauffé en fonction du temps pour deux vitesses du vent (renouvellement d'air) au cours de la journée typique. Ceci permet de mettre en évidence l'évolution des déperditions thermiques due au renouvellement d'air. En effet, on peut constater que pour une enveloppe habitable avec des mauvaises isolations thermiques (mauvaise qualité des joints des portes où des fenêtres), sa température d'espace interne chauffé est plus élevée par rapport à la norme de confort.

Cette augmentation de la température, explique l'excès du dédit d'air à travers cette enveloppe (Fig. V.35.a). Par contre, si l'isolation thermique est bien établie, les normes du confort thermique sont vérifiées (Fig. V.35.b).

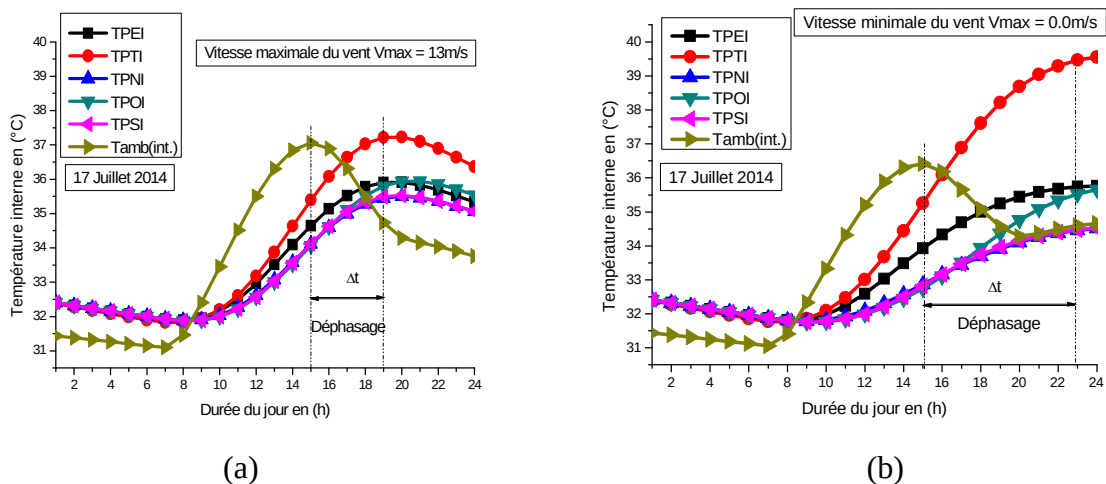


Fig.V.35 : Evolution de la température de l'espace chauffé en fonction du temps pour deux différentes vitesses du vent (renouvellement d'air) au cours de la journée typique.

V.7.2 Analyse de l'effet des déperditions par infiltration d'air sur l'environnement interne de l'enveloppe

Les infiltrations d'air ont toujours existé dans les habitats. Il ne s'agit pas d'un phénomène nouveau mais d'un phénomène qui est devenu incompatible avec les exigences de performance et de confort actuelles. Reconnaissons néanmoins que les infiltrations ont amplement contribué au renouvellement d'air dans les bâtiments anciens. Sans elles, il faut bien admettre que la qualité sanitaire de l'air qui n'est pourtant pas exceptionnelle n'aurait pas été la même [4].

De ce fait, on constate que l'évolution de la température de l'espace chauffé est liée totalement avec le taux d'infiltration d'air, soit dans une maison individuelle (Fig. V.36.a) où dans un bâtiment (Fig. V.36.b). En effet, quand on augmente le taux d'infiltration, la température de l'ambiance interne augmente comme le montre la figure 31.a pour une maison individuelle et la figure V.36.b pour un bâtiment. En conséquence, on peut conclure que la variation de la température de l'espace chauffé est proportionnelle au taux d'infiltration d'air.

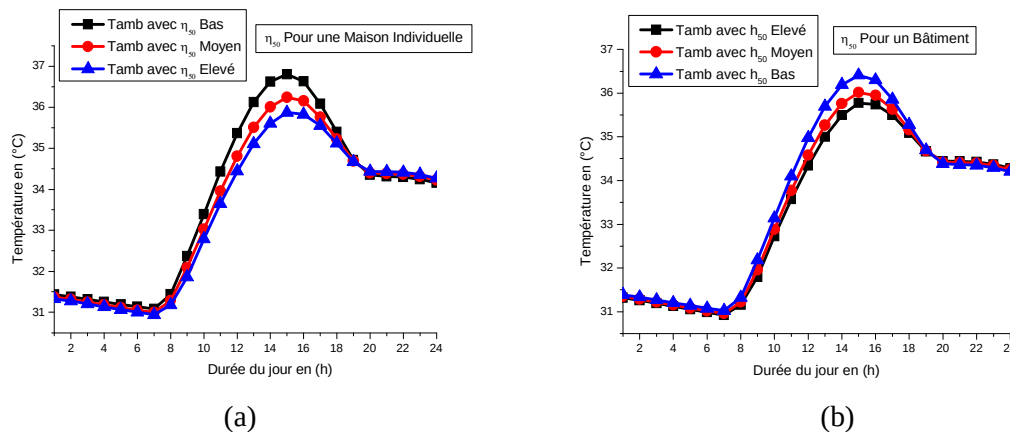


Fig.V.36 : Evolution de la température de l'espace chauffé en fonction du taux d'infiltration d'air dans l'enveloppe habitable au cours de la journée typique.

V.7.3 Effet des déperditions thermiques par le degré d'étanchéités sur le chauffage interne

L'étanchéité et les joints sont importants dans une maison bioclimatique afin de maintenir la température du confort thermique à l'intérieur de l'enceinte habitable. Il est aussi noté, que la qualité des joints a une influence notable sur les échanges thermiques entre les ambiances externes et internes de l'enveloppe.

D'après la figure V.37, on constate que pour une enveloppe qui n'a pas de joints sa température d'ambiance est voisine de la température de l'ambiance externe et en augmentant la qualité des joints ça minimisant la déperdition thermique. Pour l'enveloppe qui n'a pas des joints, la température à l'intérieur est presque égale à celle de l'extérieur puisqu'avant 16h les parois sont en phase d'accumulation de la chaleur et après 15h du soir les parois commencent à restituer la chaleur à l'intérieur de l'enveloppe.

Pour cette raison, l'enveloppe avec des joints de haute qualité, contribue d'une manière significative à la conservation de la température de l'ambiance interne par rapport aux autres enveloppes.

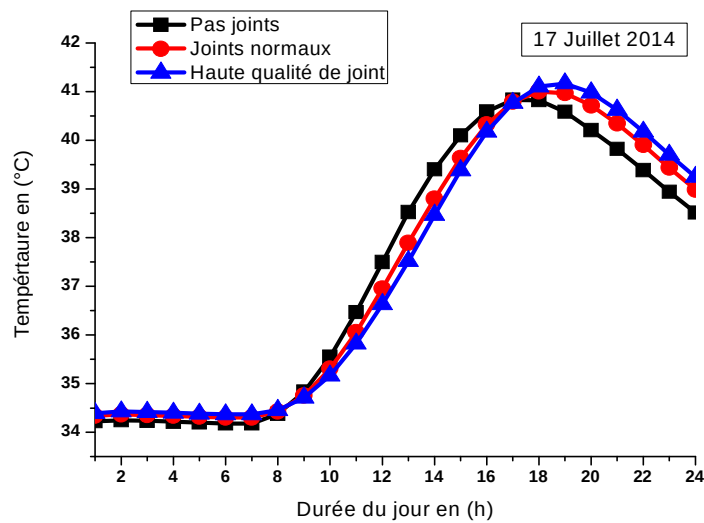


Fig.V.37 : Variation de la température de l'ambiance interne en fonction de degré d'étanchéités de l'habitat pour la journée typique.

V.7.4 Evolution de la température d'espace chauffé en fonction de la variation du facteur d'exposition au vent

Le vent contribue au renouvellement d'air dans l'enceinte habitable par ventilation naturelle qui se traduit par le degré d'étanchéité de l'enveloppe de l'enceinte (qualité des joints des fenêtres et des portes). Il est à noter que la pression exercée par le vent sur le bâtiment constitue la condition aux limites prépondérante dans l'évaluation des débits d'air. Pour étudier son effet sur le confort thermique, il est important d'adapter les données disponibles (vitesse et orientation du vent mesuré au niveau d'une station météorologique) aux caractéristiques du site (présence d'obstacles comme les arbres, les bâtiments voisins, etc.).

La figure V.38 montre l'effet du coefficient du vent sur l'enceinte habitable pour différentes possibilités, telles que, bâtiment dans un site non abrité, bâtiment dans un site modérément abrité et bâtiment dans un site très abrité. D'une autre manière, pour bien conserver le chauffage à l'intérieure de l'espace chauffé au niveau du confort, il faut augmenter le degré d'étanchéités des fenêtres et des portes, par ce que la température de l'ambiante externe est très élevée en ce mois de juillet.

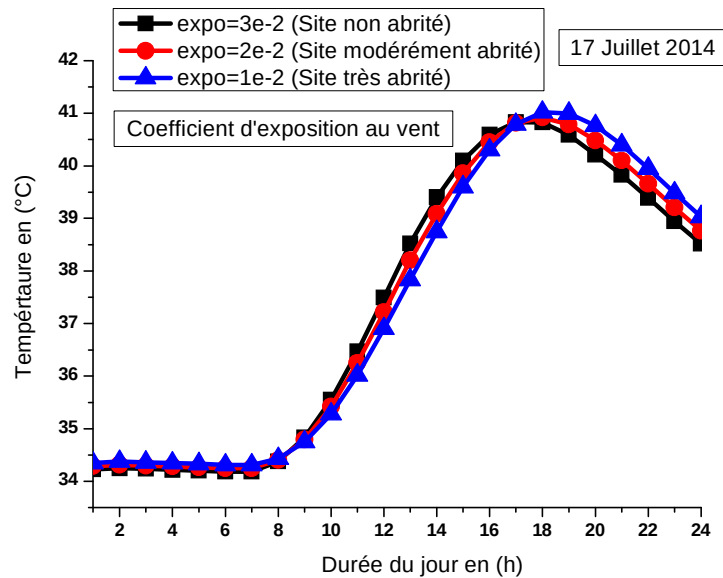


Fig.V.38 : Evolution de la température de l'espace chauffé en fonction du facteur d'exposition au vent.

V.7.5 Effet de la variation de nombre d'occupant du l'enveloppe habitable sur l'évolution de la température du chauffage interne

Dans la figure V.39 nous nous présentons l'évolution horaire de la température de l'espace interne chauffé pour différents nombres des occupants en fonction du temps local. Il est bien illustré dans cette figure que l'évolution de la température du chauffage est variée selon le nombre des occupants à l'intérieur de l'habitat.

En effet, quand on augmente le nombre des occupants dans l'espace chauffé la température de l'ambiance interne augment, ce qui est bien claire dans l'écart de la température entre NOC = 2 et NOC = 20. Par ailleurs, on conclut que pour grader une température de confort thermique à l'intérieure de l'enveloppe habitable, il nous faut respecter le nombre des occupants convenables dans le contour habitable selon les normes universelles.

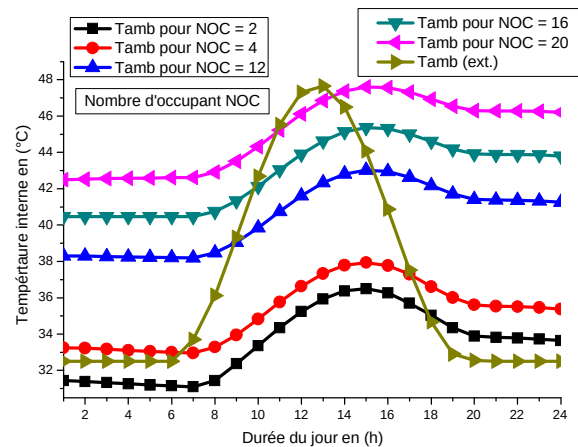


Fig.V.39 : Evolution de la température de l'espace chauffé pour différents nombres d'occupant à l'intérieur de l'enveloppe habitable en fonction du temps local pour la journée typique 17 Juillet 2014.

La figure V.40 présente l'évolution temporaire de la température d'espace chauffé à différentes gains de la chaleur sensible émise par les corps humains pour une journée typique au mois de juillet en fonction du temps local. On constate que la variation horaire de la température du chauffage interne de l'enveloppe habitable est liée à la quantité de la chaleur sensible émise par les corps humains existant à l'intérieur de l'habitat. En effet, quand on augmente le nombre des occupants à l'intérieur de l'enveloppe, la quantité de la chaleur sensible augmente et puis l'augmentation de la chaleur du chauffage interne et vice-versa. Cependant, on conclut que la maîtrise la gaine de la chaleur sensible émise par les corps humains dans l'habitat est un facteur primordial pour le confort thermique des habitants.

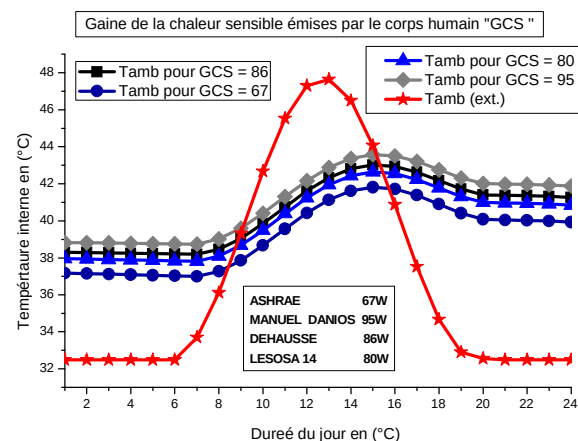


Fig.V.40 : Evolution de la température de l'espace chauffé pour différents gains de la chaleur sensible du corps humain à l'intérieur de l'enveloppe habitable en fonction du temps local pour la journée typique 17 Juillet 2014.

V.8 Investigation de la température opérative et la température du confort thermique dans l'enveloppe habitable

V.8.1 Analyse de la température opérative d'habitat pour les quatre saisons de l'année

Dans la figure V.41 on présente l'évolution horaire de la température opérative de l'environnement chauffé pour différentes journées typiques en fonction du temps local (TLG) dans les saisons choisies pour l'année 2014 (l'été, l'automne, le printemps et l'hiver). On peut dire que cette évolution pour les trois journées typiques (03 Aou. 2014, 05 Nov. 2014, 05 Mar. 2014 et 03 Fév. 2014) est notablement progressive à 8h00 du matin avec des valeurs faibles comprises entre 31°C et 32°C jusqu'à des valeurs maximales entre 34°C et 35°C vers 13h00, puis elle commence à décroître jusqu'à des valeurs minimales comprises entre 33°C et 34°C à 20 h00. On note aussi qu'il y avait un écart de température entre les trois évolutions pour ces trois journées typiques après 20h00 du soir. Cet écart dans l'évolution de la température opérative de l'espace chauffé est dû au fait des conditions climatologiques pour chaque mois choisi dans l'année considérée.

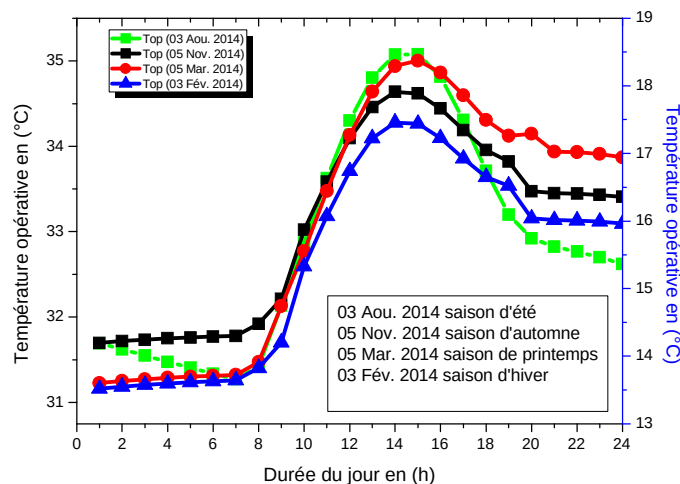


Fig.V.41 : Evolution de la température opérative de l'habitat pour différentes saisons dans l'année 2014 en fonction du temps local.

V.8.2 Evaluation horaire de la température du confort thermique de l'enveloppe habitable

La figure V.42 présente l'évolution de la température du confort thermique d'une enveloppe habitable dans une région désertique (Sud de l'Algérie), chaude pour trois types de matériau de construction tels que le béton lourd (Fig. V.42.a), le béton léger (Fig. V.42.b) et le béton pierre (Fig. V.42.c).

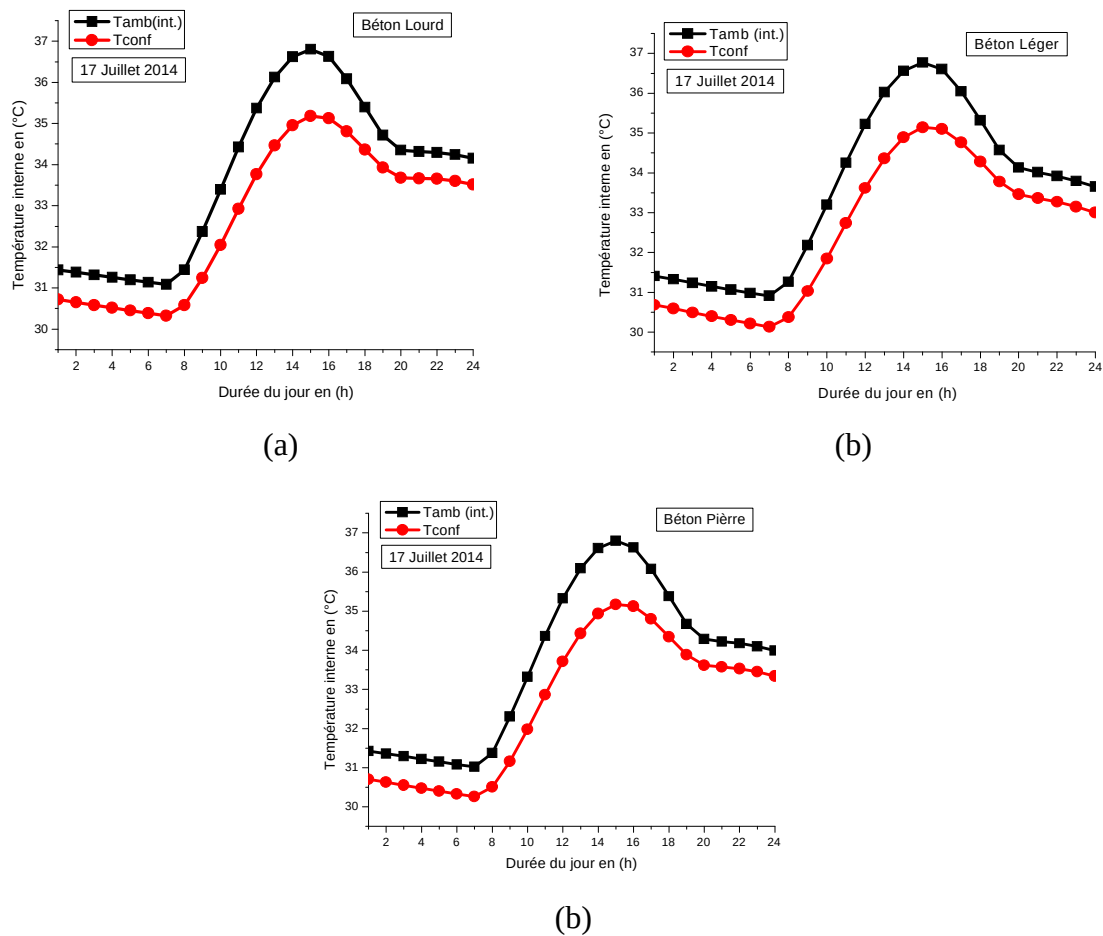


Fig.V.42 : Evolution de la température du confort thermique et de l’ambiance interne au sien de l’enveloppe habitable pour différentes catégories du béton.

La figure V.43 présente l’évolution horaire de la température du confort thermique pour différents matériaux de construction en fonction du temps local. D’après cette évolution, on constate que le choix de matériau de la construction a une influence cruelle sur l’évolution horaire de la température du confort thermique.

En effet, quand on utilise par exemple les catégories du béton sélectionnées dans cette étude comme matériau dans la construction des murs de l’enveloppe habitable avec ces conditions climatologiques secs, et son maîtrise d’isolation thermique des parois, la température du confort va être dépassée les normes conventionnelles. C’est-à-dire une surchauffe un désirable dans l’environnement habitable avec une température de 39°C à 15h00 l’après-midi, ce qui est bien illustré dans cette figure pour les trois catégories du béton (lourd, léger et Pierre).

Par contre, l'exploitation de d'autres matériaux de construction comme les catégories du bois (lourd et léger) dans cette région avec les mêmes conditions climatiques, vont nous permettre de rapprocher un petit peu vers valeurs conventionnelles de la température du confort au sein de l'environnement habitable car, l'utilisation du bois dans la construction pour un climat sec et son isolation thermique de la dalle chauffante où pour la dalle de la toiture, va nous conduire à la température de 37°C à 15h00.

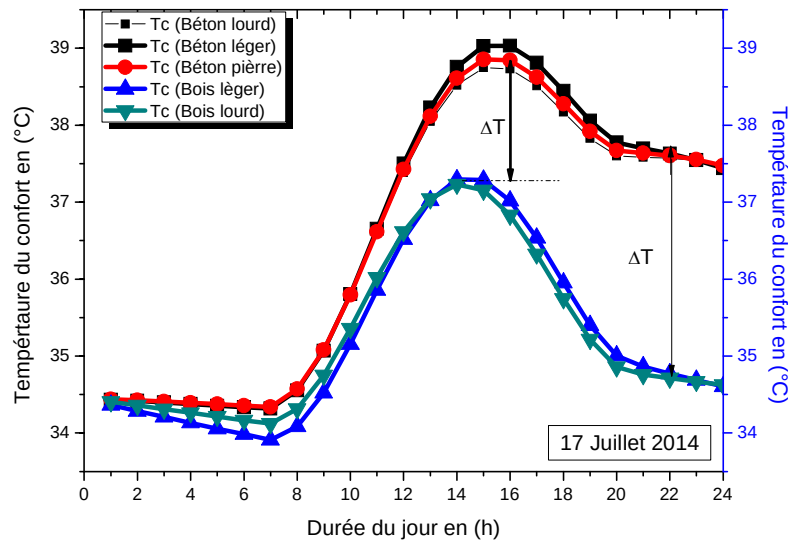


Fig.V.43 : Evolution de la température du confort thermique et de l'espace chauffé au sein de l'enveloppe habitable pour différentes catégories de matériaux de construction dans une journée typique de l'année 2014.

On peut constater que, pour les trois types des matériaux, on ne peut pas obtenir le confort thermique dans l'habitant avec ces conditions climatiques, vu que la température de l'espace chauffé est aux alentours de 35°C et 37°C qui est bien supérieure à celle du confort thermique de 34°C. Pour cette raison, nous étions amenés à tester l'effet d'utilisation du bois sur le confort thermique comme l'illustre la figure V.44. D'après cette figure, il est bien observé que la température de l'espace chauffé est proche des normes du confort thermique. En effet, elle est aux environs de 33.8°C pour les deux types de bois (Figs.V.44. a. b).

En conséquence, pour des raisons de satisfaction thermique, on peut utiliser le bois lourd ou les matériaux composites pour la construction des habitats dans cette région désertique. Une évaluation de multicouches est en cours d'investigation.

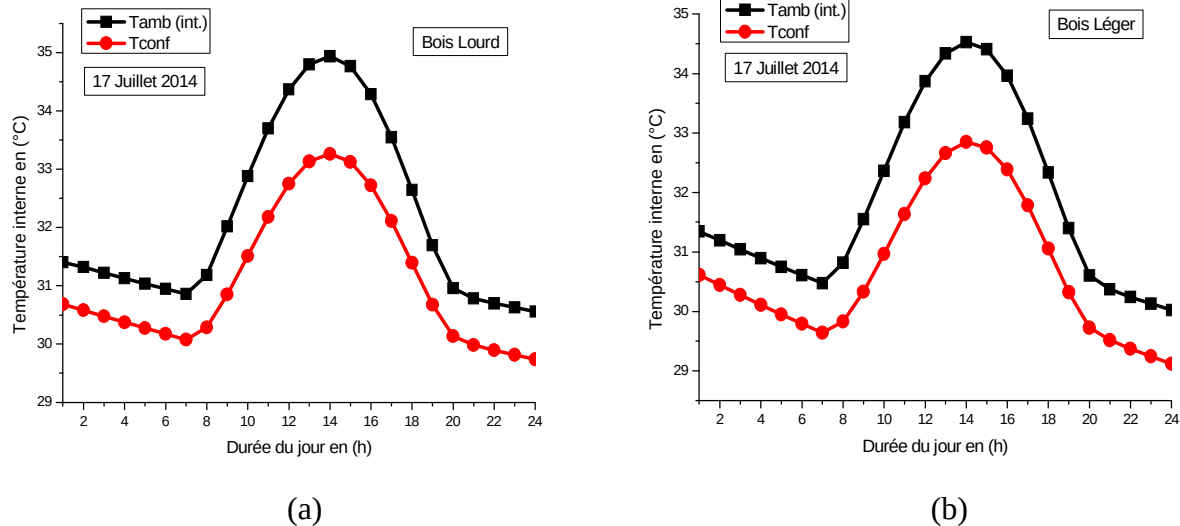


Fig.V.44 : Evolution des températures du confort thermique et de l'ambiance interne au sein de l'enveloppe habitable pour différentes catégories du bois.

V.9 Investigation de la température du confort à l'aide de diagramme de Givoni

V.9.1 Positionnement sur le diagramme bioclimatique (Givoni) de la température du confort d'un habitat en fonction de différents matériaux de construction

La figure V.45 présente le positionnement sur le diagramme bioclimatique pour la température du confort thermique au sein de l'enveloppe habitable pour différentes catégories de matériaux de construction dans la journée typique 17 Juillet 2014.

On conclut que, la température du confort thermique pour une construction d'habitat des catégories du béton lourd, léger et pierre est positionné dans la zone MM' zone d'inertie thermique, et pour l'autre construction habitable par les deux familles du bois lourd et léger est positionné dans la même zone que celle des catégories du béton, sauf que la température du confort pour une construction du béton est alentour de 38°C à 39°C et la température d'une construction du bois et alentour de 34°C à 36°C.

En effet, ces températures du confort thermique ont été calculées pour la journée typique du 17 juillet 2014, c'est-à-dire les journées les plus chaudes dans la saison d'été pour la région d'Adrar.

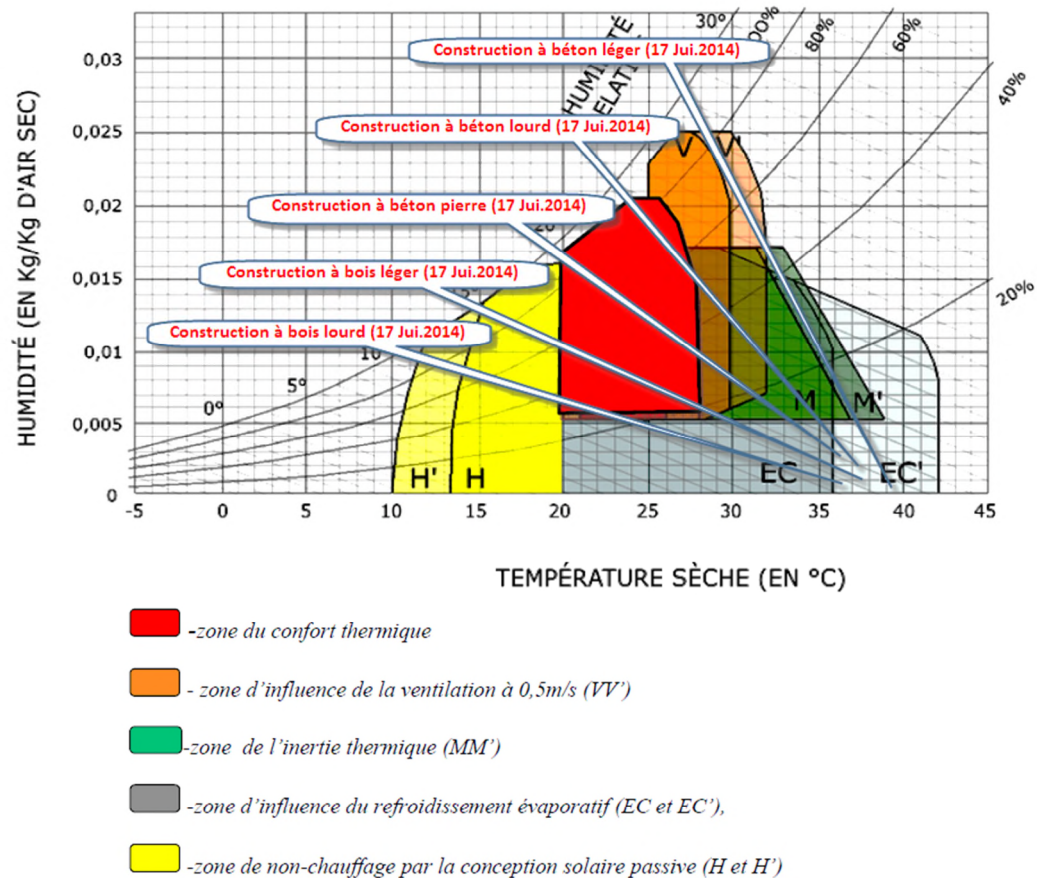


Fig.V.45 : Positionnement des températures du confort thermique au sien de l'enveloppe habitable pour différents matériaux de construction dans la journée typique 17 Juillet 2014.

V.9.2 Positionnement sur le diagramme bioclimatique (Givoni) de température du confort pour les journées typiques des quatre saisons de l'année

D'après la figure V.46 qui représente le positionnement sur le diagramme bioclimatique pour les températures du confort thermique de l'enveloppe habitable dans les journées typiques des quatre saisons choisies de l'année 2014. On constate que, le positionnement de la température du confort pour les quatre journées (05 Nov., 05 Mar., 03 fév. et 03 Aou.) est dans la zone EC, zone de d'influence de refroidissement évaporatif. En effet, ce positionnement est alentour de 30°C à 35°C, c'est-à-dire or de la zone du confort souhaitable.

On peut dire que, l'absence des normes conventionnelles des constructions dans de cette enveloppe habitable à fait augmenter la température en d'or de la zone du confort conventionnel.

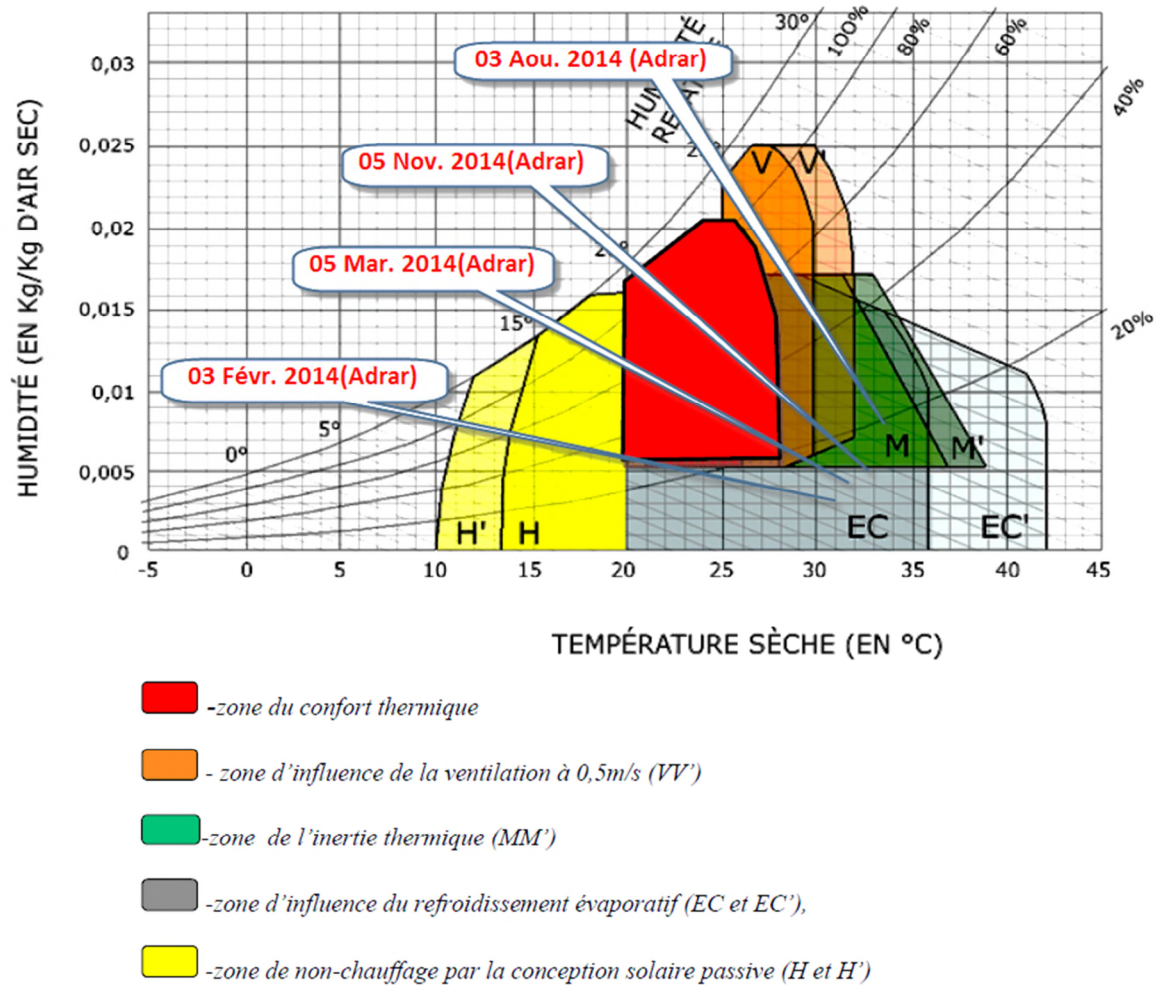


Fig.V.46 : Positionnement des températures du confort thermique de l'enveloppe habitable pour les journées typiques choisies des quatre saisons de l'année 2014.

V.9.3 Solutions apportées pour vérifier le confort thermique au sien d'une enveloppe habitable dans région désertique

En conjuguant avec les propositions du bioclimatiques illustrées dans les figures V.40 et V.41, nous aboutissons aux solutions suivantes pour chaque saison :

- Pour la saison estivale, la ventilation sur les quatre mois (Juin, Juillet et Aout) est plus que nécessaire, principalement la ventilation nocturne. En plus, avec la grande inertie thermique du aux parois épaisses soit du béton ou du bois, on propose une isolation et l'ombrage de la paroi du côté Ouest pour diminuer des rayons du soleil couchant, et étalé sur la toiture une couche de peinture aérienne blanche pour réfléchir le rayonnement solaire. D'un autre côté, on suggérer un refroidissement par évaporation dans ces trois mois de l'année.

Finalement, l'évaluation du confort thermique abordé dans ce chapitre, nous apprend qu'avant de réhabiliter une enveloppe habitable, il est impérativement nécessaire de faire une vision globale sur les normes conventionnelles du confort thermique, notamment, le respect des concepts bioclimatiques, l'isolation de l'enveloppe à l'extérieure et les matériaux de base utilisés dans la structure. Il nous apprend aussi que, l'isolation de l'extérieur présente la solution la plus satisfaisante, principalement dans les régions chaudes moins pluvieuse.

De plus, l'inertie thermique joue un rôle important dans l'habitat et contribue à l'isolation, puisque présente un des facteurs influant par le choix de matériau avant de procéder à l'isolation.

En effet, les différents points clés, retenues dans ce présent chapitre cités principalement pour le cas des régions chaudes (Sud de l'Algérie), peuvent être énumérés de la sorte :

- L'orientation Nord-Sud à privilégier ;
- La compacité pour réduire la surface exposée à l'extérieur ;
- Parois lourdes pour stocker la chaleur (inertie thermique)
- Isolation de l'extérieure ;
- Ventilation nocturne important pour le rafraichissement des surfaces de l'habitat ;
- Diminution des dimensions d'ouvertures de ventilation naturelle, juste pour assurer l'éclairage naturel ;
- L'utilisation de la couleur claire (peinture blanche) pour éviter l'absorption de la chaleur ;
- Utilisation des protections contre les vents dominants amenant sable et poussières (arcades et végétation...etc.) ;

V.10 Conclusion

A partir des résultats présentés dans ce chapitre, on conclut que les modèles numériques développés soit pour l'écoulement du fluide caloporteur dans la canalisation de la dalle chauffante, soit pour la diffusion de la chaleur au sien de la dalle en béton ou soit pour la modélisation des échanges thermiques dans l'enveloppe habitable donnent des valeurs ajoutées dans le domaine de la modélisation des systèmes de chauffage solaire à usage individuelle. Par ailleurs, une concordance acceptable a été trouvée entre les données expérimentales mesurées dans l'unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien d'Adrar et les résultats obtenus par les modèles adoptés. En effet, ces modèles peuvent être utilisés pour la prévision du comportement thermique à l'intérieure d'une enceinte habitable dans une région désertique.

Nous avons analysé les effets de plusieurs paramètres sur le confort thermique, tels que, les conditions météorologiques en flux et en température extérieurs, l'épaisseur des parois, le coefficient d'exposition au vent et la qualité d'étanchéité des portes et des fenêtres. Les conclusions des résultats obtenus seront exposées en détails dans la conclusion générale de ce travail.

Références bibliographies

- [1] Activation thermique de la dalle béton-Systèmes de chauffage et rafraîchissement, REHAU SA : Ambachtenlaan 22 - Ambachtszone Haasrode 3326 - 3001 Heverlee - www.rehau.be.10/2010.
- [2] N. Morel et E. Gnansounou, '' Energétique du bâtiment'', École Polytechnique, Fédérale de Lausanne, Septembre 2007.
- [3] Nicolas, Rôle de l'inertie thermique Édition du 21/10/02.
- [4] Mutuelle des Architectes Français assurances. Entreprise régie par le code des assurances. Société d'assurance mutuelle à cotisations variables – 9, rue de l'Amiral Hamelin – 75783 Paris Cedex 16, 2012.
- [5] F. Sam, Réhabilitation thermique d'un local dans une zone aride -Cas de Ghardaïa, thèse de magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou,2012.
- [6] L. Chahwane, Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments, thèse de docteur de l'université de Grenoble, 2011.

Conclusion Générale **et Perspectives**

➤ Conclusion Générale

La lutte contre le réchauffement climatique est aujourd'hui primordiale. C'est pourquoi l'utilisation d'énergie renouvelable telle que l'énergie solaire semble avoir un avenir prometteur. Les régions désertiques du grand Sahara d'Algérie, recevant jusqu'à 2900 kWh/m²/an de rayonnement direct, fournissent largement la surface nécessaire à une production massive d'énergie renouvelable. Dans ce contexte, ce présent travail a pour objectif d'optimiser les paramètres thermo-physiques afin d'obtenir un confort thermique dans un habitat situé dans une région désertique (Adrar). Il est à noter que cette région a été choisie sur la base de son important potentiel d'énergie par rapport aux autres régions du pays.

Pour atteindre cet objectif, nous avons subdivisé le travail en cinq phases fondamentales :

- La première phase consiste à modéliser l'écoulement du fluide caloporteur dans la canalisation de la dalle chauffante.
- La deuxième phase a été réservée pour la modélisation du transfert thermique par conduction au sein de la dalle en béton.
- La troisième phase concerne la modélisation des échanges thermiques dans une enveloppe habitable assimilée à une cavité parallélépipédique en se basant sur la méthode nodale.
- La quatrième étape de ce travail a été centrée sur la modélisation du rayonnement solaire en évaluant la densité du flux solaire sur différentes positions des plans en utilisant le modèle de Liu et Jordan.
- La dernière phase a été dédiée pour l'évaluation du confort thermique au sein de l'environnement habitable.

Il est important de noter également que pour chaque étape de modélisation des codes informatiques ont été écrits en langage Fortran. Ces codes de calcul sont nommés comme suit :

- CFD : pour le calcul de la dynamique du fluide dans la canalisation de la dalle en béton.
- CDC : pour le calcul de la diffusion de la chaleur dans la dalle chauffante.
- CTH : pour le calcul des échanges thermiques dans l'enveloppe habitable.
- CRS : pour le calcul des rayonnements solaires.
- CCD : pour le calcul simultané des échanges thermiques entre le fluide et la dalle en béton.

Pour la validation des modèles implémentés dans le code de calcul de rayonnement solaire (densité du flux solaire incidente), nous avons confronté les valeurs mesurées par ciel clair, du rayonnement solaire au niveau de la station radiométrique d'Adrar de l'unité de recherche en énergies renouvelables au milieu saharien (URER'MS), avec les valeurs obtenues par simulations numériques.

Nous avons trouvé qu'il existe un accord acceptable entre les résultats calculés et les données mesurées expérimentalement. En effet, la différence relative moyenne est de 38.89% pour le cas du flux solaire global 7.75% pour le cas du flux solaire direct et de 14.58% pour le cas du flux solaire diffus. Il est à noter que cette différence est acceptable dans la littérature pour ce type de problème d'énergie solaire.

A partir des résultats obtenus par la simulation numérique après la validation des modèles, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Pour assurer un bon écoulement dans la canalisation de la dalle chauffante, il faudra que la vitesse ne dépasse pas une valeur admissible selon la section de la canalisation choisie, afin d'éviter les bruits dans le sous-sol de l'enveloppe habitable.
- Pour pouvoir garantir une bonne restitution de la chaleur avec une température uniforme toute au long de la dalle, il faut que cette dernière doit avoir une épaisseur optimale qui lui permet d'augmenter la période de déphasage en augmentant la capacité de stockage.
- Parmi les matériaux de construction examinés numériquement, en l'occurrence, le béton léger, le béton lourd, le bois léger et le bois lourd, nous avons trouvé que, d'un point de vue confort thermique, les meilleurs résultats ont été obtenus par le bois lourd.
- Le confort thermique au sien d'une maison individuelle peut être également amélioré en jouant sur d'autres facteurs thermo-physiques. En effet, sur la base des résultats obtenus, il est recommandé de choisir un site d'implantation à simple exposition au vent et une bonne qualité des joints d'étanchéités des ports et des fenêtres.

➤ Perspectives

Finalement et comme perspectives pour ces travaux de thèse, on envisage de :

- (i) Modéliser les transferts dans le système habitat-stockage en faisant le couplage thermique entre les cinq modèles développés ;

- (ii) Améliorer encore le code de la simulation numérique en prenant en considération simultanément les trois modes d'échanges thermiques dans les différents compartiments de l'habitat ;
- (iii) Etudier le confort thermique de l'habitat avec des murs comportant des isolations thermiques (multi-couches), des ailettes ou même des matériaux composites (biomasse) ;
- (iv) Etudier la faisabilité technico-économique du système de stockage de chaleur ;
- (v) Réaliser un prototype et valider les résultats obtenus.

Publications

Internationals

- [1] **Oudrane A., Aour B.**, Zeghmati B., Chesneau X., Messaoud H., Study and simulation of the density of the incident solar flux on the walls of a building in the ADRAR site, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 7, No. 5, (2017), pp.1940-1945.
<http://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/1337>.
- [2] **Oudrane A. and Aour B.**, Numerical Simulation of Heat Exchanges for a Desert House Type ADRAR, Advanced Engineering Forum, Vol. 24, (2017), pp. 63-75.
<https://www.scientific.net/AEF.24.63>.

Travaux Scientifiques

• Publications internationales

- [1] **Oudrane A.**, Aour B., Benhamou M., "Analyse de l'effet de l'épaisseur de la dalle chauffante sur l'efficacité thermique d'une installation de plancher solaire direct (PSD) implémenté à Adrar", African Review of Science, Technology and Development V 01, N.01, (2016), pp.26-41.
<http://rastd.univ-adrar.dz/index.php/RASTD/article/download/8/9>.
- [2] **Oudrane A., Aour B.**, Zeghmami B., Chesneau X., Messaoud H., "Study and simulation of the density of the incident solar flux on the walls of a building in the ADRAR site", Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 7, No. 5, (2017), pp.1940-1945.
<http://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/1337>.
- [3] **Oudrane A. and Aour B.**, "Numerical Simulation of Heat Exchanges for a Desert House Type ADRAR", Advanced Engineering Forum, Vol. 24, (2017), pp. 63-75.
<https://www.scientific.net/AEF.24.63>.

• Publications nationales

- [1] **Oudrane A., Aour B.** et Benhamou M., "Étude et analyse paramétrique d'une installation solaire : plancher solaire dicte d'implanter dans la région d'Adrar", Revue ElWahat pour les Recherches et les Etudes Vol.9 n°1, (2016), pp.27 – 49.
<https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/2/9/1/684>.
- [2] **Oudrane A.**, Zeghmami B., Chesneau X. et **Aour B.**, "Modeling the radiate and energy balance of a building located in the Adrar region", Recueil de Mécanique Vol.1, n°002, (2016), pp.079-087.
<http://www.cuniv-tissemsilt.dz/telechargements/090220171051.pdf>.
- [3] **Oudrane A., Aour B.**, Hamouda M. et Benhamou M., "Méthodologie pour la détermination de l'écartement optimal de la chaîne tubulaire d'une dalle chauffante", Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°1, (2016), pp.11–19.
<http://www.cder.dz/spip.php?article2891>.
- [4] **Oudrane A., Aour B.**, Zeghmami B., Chesneau X. et Hamouda M., "Etude et calcul de bilan de la densité du flux solaire pour un simple habitat dans la région d'Adrar", Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°1 (2017), pp.51-60.
http://www.cder.dz/download/Art20-1_5.pdf.
- [5] **Oudrane A., Aour B.**, Zeghmami B., Chesneau X. et Hamouda M., "Analysis numerical of one-dimensional heat transfer for desert house", Recueil de Mécanique Vol.2, n°001, (2017), pp.089-102.
http://rdm.000webhostapp.com/Articles/01-17/oudrane_m.pdf.

• Communications internationales

- [1] **Oudrane A.** et al, "Analyse de l'Influence des Paramètres Géométriques sur le Rendement d'une Installation de Plancher Solaire Direct (PSD) Implanté à Adrar", The International Conference on Energy and Sustainable Development, 29-30 November 2011 à Univ. Adrar, "ICESD'11" (Algérie).
- [2] **Oudrane A.** et al, "Optimisation de l'Ecartement des Tubes de la Grille du Chauffage sur le Rendement Thermique d'une Installation Solaire PSD", Séminaire Euro-méditerranéen de l'Innovation (SEMINNOV 2012), 30 et 31 Mai 2012, à L'ENSET/Oran (Algérie).
- [3] **Oudrane A.** et al, "Evaluation des Performances Thermiques de l'Installation Plancher Solaire Direct (PSD)" 2^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables "SIENR12", 15 au 17 Octobre 2012 à l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelables, URAER Ghardaïa (Algérie).
- [4] **Oudrane A.** et al, "Méthodologie pour le dimensionnement de l'écartement optimal de la chaîne tubulaire du PSD" The Second International Conference on Energy and Sustainable Development February 19 - 20, 2013, Adrar, Algeria, "ICESD'13".
- [5] **Oudrane A.** et al, "L'épaisseur optimale de la dalle chauffante dans un de plancher solaire direct disposer à Adrar" The Second International Conference on Energy and Sustainable Development February 19 - 20, 2013, Adrar, Algeria, "ICESD'13".
- [6] Damba N., **Oudrane A.**, **Aour B.**, "Etude de l'influence des paramètres géométriques des tubes de la grille du chauffage sur le rendement thermique de l'installation solaire PSD par la méthode E.S.I.M " Le 9^{ème} Conférence sur le Génie Electrique (CGE'09), 14-15 Avril 2015, à l'Ecole Militaire Polyethnique, Bordj El-Bahri (Algérie).
- [7] **Oudrane A.** et al, "Étude et modélisation de l'irradiation solaire globale sur un plan incliné dans le site d'ADRAR", 1st International Seminar on the Apport of the Simulation in Technological Innovation "SIASIT2017", March 07-08, 2017, Ghardaïa (Algérie).
- [8] N. Damba, **A. Oudrane**, **B. Aour**, M.S. Banona, "L'influence de l'épaisseur de la dalle chauffante sur la température et le rendement thermique de l'installation solaire PSD", Séminaire nationale sur les Systèmes énergétiques Hybrides 29-30 Novembre 2015, Ghardaïa (Algérie).

• Communications Nationales

- [1] Mokhar B., **Oudrane A.**, Benfradj D., Benzaama H., "Exigence de la qualité de la norme ISO 3834 et les moyens à mettre en œuvre pour implanter le système AQ/QC dans les entreprises de construction mécanique". Workshop de « Soudage et Contrôle non Destructifs » Le 15 Décembre 2014 à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Oran (Algérie).