



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: Physique Energétique

Par :

Mr Hamdani Maamar

Sur le thème

Choix de l'Orientation et des Matériaux de Construction en Vue d'Améliorer les Performances Thermiques des Bâtiments

Soutenue publiquement le **31/05/2016** devant le jury composé de :

Mr Megounounif Abdellatif	Professeur à l'Université de Tlemcen	Président
Mr Benouaz Tayeb	Professeur à l'Université de Tlemcen	Directeur de Thèse
Mr Bekkouche S. M. A	M .R. « A », à l'URAER – Ghardaïa	Co- Directeur de Thèse
Mr Belarbi Rafik	Professeur à Université de La Rochelle	Examineur
Mr Belghachi A/Rahmane	Professeur à l'Université de Béchar	Examineur
Mr Merad Abdelkrim	Professeur à l'Université de Tlemcen	Examineur

*Laboratoire Automatique Tlemcen(LAT)
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

À la mémoire de mon oncle KORJBI qui est décédé au moment de mon séjour en France, Allah Y Rahmou.

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

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

À mes frères, ma sœur, Ainsi qu'à Tous Ceux qui me sont Chers.

À tous mes amis chercheurs et personnels de soutien de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable de Ghardaïa et du Centre de Développement des Énergies Renouvelables d'Alger.

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

À tous les membres du laboratoire des Sciences de L'Ingénieur Pour L'environnement LaSIE, Université de La Rochelle, France,

Pour finir, au risque de me répéter, je souhaite remercier plus particulièrement Trois personnes sans qui je ne serais pas arrivée jusqu'au bout de cette aventure : S.M.A. bekkouche, M.K. Cherier, et Monsieur Tayeb. BENOUAZ, je le dis merci à vous.

Hamdani Maamar

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable de **Ghardaïa** avec la collaboration du Laboratoire de Physique Electronique et Modélisation du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université Abou-Bakr Belkaid de **Tlemcen**, ainsi une collaboration du Laboratoire des Sciences de L'Ingénieur Pour L'environnement LaSIE, Université de **La Rochelle**, France.

Mes remerciements, avant tout, à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade.

Mes remerciements les plus élogieux vont à Monsieur **T. BENOVAZ**, Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, pour son soutien et son encadrement scientifique qui m'ont été bénéfiques pour mener à bien ce travail, qui a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux tout en y gardant un œil critique et avisé. Je le remercie pour les échanges que nous avons eus et les perspectives que ce travail a apportées. Ses qualités humaines et son écoute ont été très appréciables.

Je remercie particulièrement mon co-directeur de thèse Monsieur **S.M.A. Bekkrouche**, Maître de recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa, qui est à l'origine de ce projet, Il m'a apporté une grande aide par son savoir et son esprit rigoureux en m'orientant vers les bonnes pistes quand il le fallait pour me faire avancer. Il a toujours trouvé les moyens de me motiver dans mes périodes critiques.

Je tiens à remercier vivement **R. Belarbi**, mon co-directeur de thèse à l'étranger et directeur du Département Génie Civil, et qui m'a accueilli au sein du Laboratoire des Sciences de L'Ingénieur Pour L'environnement LaSIE, Université de La Rochelle, France, qu'il dirigeait quand j'ai réalisé mes travaux de recherche, et son appui sur le côté administratif m'a facilité les formalités à faire durant mon séjour en France dans le cadre du formation PNE, pour avoir initié l'idée de rassembler plusieurs compétences du laboratoire dans ce sujet et de m'avoir accordé sa confiance, pour m'avoir accueilli dans les locaux du LaSIE.

Je remercie vivement Monsieur **A. Megounounif** Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à Messieurs :

Belarbi Rafik Professeur LaSIE, Université de La Rochelle

Belghachi Abderrahmane Professeur à l'Université de Béchar

Merad Abdelkrim Professeur à l'Université de Tlemcen

pour l'honneur qu'il me font d'examiner ces travaux,

Je tiens à remercier plus généralement l'ensemble du personnel du **LaSIE**, avec qui j'ai beaucoup échangé et appris notamment durant mes période au labo de monitorat et surtout Les doctorants, post-doc et stagiaires qui font la vie du laboratoire, en particuliers :

*J'aimerais remercier également **Remon Lapisa** pour son initiation à l'outil TRNSYS, et pour son aide. Sa bonne humeur et sa gentillesse ont été exemplaires au sein du laboratoire, sans oublier **chahra, warda, remi, zaid** et les personnel administratif et technique.*

*Je n'oublie pas mes collègues les plus proches et non moins amis, ceux avec qui j'ai partagé et vécu le même quotidien, **amine, kamel, fateh, soufiane, toufik, Rida, D. Bachir, rezki, zaini, omar, ghrici, Farouk, B. bachir, B. Kamel** ainsi que mes amis à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa. Tous les autres qui ont marqué ma vie doctorante tous à leur manière et ont contribué à la réussite de cette belle expérience.*

Enfin, nos remerciements au gouvernement Algérien pour son soutien financier dans le cadre du programme P.N.E.

Table des Matières

Table des matières.....	01
Nomenclature.....	05
Table des figures.....	13
Liste des tableaux.....	17
Introduction Générale	18
1. Eléments de Performances Energétiques	23
1.1. Introduction.....	24
1.2. Critère climatique et son intégration.....	25
1.3. Eléments de conception architecturale	26
1.4. Confort thermique.....	27
1.5. Confort hygrothermique.....	28
1.6. Matériaux de construction.....	29
1.6.1. Propriétés hydriques.....	29
1.6.2. Propriétés thermiques.....	31
1.6.2.1. Conduction: équation de la chaleur.....	31
1.6.2.2. Transfert de chaleur par convection.....	32
1.6.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement.....	34
1.7. L'inertie thermique des matériaux: stockage et restitution de la chaleur.....	38
1.7.1. Capacité thermique.....	39
1.7.2. Effusivité.....	40
1.7.3. Diffusivité.....	40
1.8. Isolation thermique.....	41
1.9. La forme du bâtiment.....	42
Références.....	44
2. Sélection des Modèles d'Estimation du Rayonnement Solaire	46
2.1. Nature du rayonnement solaire et bilan radiatif.....	47
2.2. Objectifs et contexte du travail.....	48
2.3. Mouvement de la terre autour du soleil.....	49
2.4. Rayonnement solaire hors atmosphère	50
2.5. Position du soleil.....	51
2.5.1. Coordonnées équatoriales.....	51
2.5.1.1. Déclinaison du soleil.....	51
2.5.1.2. Angle horaire du soleil.....	51
2.5.1.3. Temps solaire vrai.....	52

2.5.2.	Coordonnées horizontales.....	52
2.5.2.1.	Hauteur du soleil.....	52
2.5.2.2.	Azimut du soleil.....	53
2.6.	Orientation d'un plan.....	53
2.7.	Angle d'incidence sur un plan.....	54
2.8.	Masse atmosphérique.....	54
2.9.	Epaisseur optique de l'atmosphère.....	55
2.10.	Modèle de R.sun.....	55
2.10.1.	Facteur de trouble de Linke.....	55
2.10.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair.....	56
2.10.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair.....	56
2.10.4.	Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair.....	57
2.10.5.	Eclairement diffus incident sur un plan incliné par ciel clair.....	59
2.11.	Modèle de Perez.....	59
2.11.1.	Estimation du rayonnement solaire sur des surfaces inclinées.....	59
2.11.1.1.	Irradiation diffuse.....	60
2.12.	Outils de simulation.....	62
2.13.	Chronologie et architecture des simulations du rayonnement sur TRNSYS.....	62
2.13.1.	Modélisation du rayonnement sur TRNSYS.....	62
2.13.2.	Utilisation et traitement des données climatiques pour la simulation du rayonnement solaire par TRNSYS Type 99 Format user.....	63
2.13.3.	Vue d'ensemble de TRNSYS.....	64
2.13.3.1.	Simulation studio TRNSYS.....	64
2.13.3.2.	TRNEdit.....	65
2.14.	Génération de données climatiques sous METEONORM.....	65
2.15.	Confrontation des résultats obtenus par des valeurs mesurées.....	68
2.15.1.	Description des sites : URAER Ghardaïa & CDER Bouzaréah Alger...	68
2.15.2.	Résultats de simulation numérique.....	69
2.16.	Conclusion.....	74
	Références.....	76
3.	Modélisation d'une structure bâtie & Principales stratégies de contrôle passif	79
3.1.	Introduction.....	80
3.2.	Etat de l'art sur la modélisation thermique du bâtiment.....	80
3.3.	Modèles globaux à l'échelle du bâtiment.....	82
3.3.1.	Modèle des degrés-jours unifiés.....	82

3.3.2.	Modèles globaux par analogie électrique.....	83
3.4.	Modèles à l'échelle des parois.....	83
3.5.	Structure nodale et description de l'habitat.....	88
3.6.	Cas d'applications : simulation des températures intérieures.....	92
3.7.	Typologie urbaine des bâtiments et influence de la compacité.....	95
3.8.	Isolation thermique intérieure : exemples indicatifs.....	97
3.8.1.	Période très chaude.....	98
3.8.2.	Période froide.....	99
3.9.	L'influence de l'orientation du bâtiment	100
3.9.1.	Sur la température intérieure.....	100
3.9.2.	Sur les apports solaires directs à travers les ouvertures.....	105
3.10.	Conclusion.....	108
	Références.....	110
4.	Etude thermo-aéraulique avancée par le couplage TRNSYS / CONTAM	113
4.1.	Introduction.....	114
4.2.	Choix de l'outil de simulation.....	114
4.3.	Modélisation du Bâtiment Multizone sous TRNSYS.....	115
4.3.1.	Fonctionnement.....	115
4.3.2.	Google SketchUp	117
4.3.3.	TRNBuild	118
4.3.4.	Conditions climatiques & Format TMY2.....	119
4.3.5.	Modélisation sous TRNSYS & Type 49 & Températures du sol.....	120
4.3.6.	Récupération et visualisation des données (Output - Type 65c).....	122
4.4.	Modélisation mathématique & TRNSYS Type 56.....	122
4.5.	Modélisation Multizone des échanges aérauliques	125
4.5.1.	Coefficient de pression.....	126
4.5.2.	CONTAM & Type 97.....	127
4.5.3.	Couplage TRNSYS-CONTAM	128
4.6.	Validation et confrontation des températures	129
4.7.	Études paramétriques.....	134
4.7.1.	Influence des matériaux de construction	134
4.7.2.	Disposition des zones selon l'étage	136
4.7.3.	Orientation	137
4.8.	Protections solaires et fermetures.....	141
4.9.	Consommation énergétique : mise en valeur de l'orientation/matériaux.....	143

4.10. Conclusion.....	146
Références.....	147
5. Conclusion Générale	149

NOMENCLATURE

Chapitre 1

Caractères latins

Hr	: Humidité relative	%
p_v	: Pression partielle de vapeur	Pa
p_{sat}	: Pression de vapeur saturante	Pa
T	: Température	K
g_v	: Densité de flux massique de vapeur	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
D_a	: Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
P	: Pression totale	Pa
R	: Constante des gaz parfaits	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
S	: Aire de la section de passage du flux de chaleur	m^2
x	: Variable d'espace dans la direction du flux	m
c	: Chaleur massique du matériau	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
\dot{q}	: Densité volumique d'énergie générée	W m^{-3}
h_s	: Coefficient d'échange de chaleur par convection	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
S	: Aire de la surface en contact (surface d'échange)	m^2
T_a	: Température du fluide loin de la paroi	K
T_s	: Température de surface	K
g	: Accélération de la pesanteur	m s^{-2}
T_{am}	: Température de l'air ambiant (K)	K
F_{12}	: Facteur de forme de la surface 1 par rapport à 2.	

Lettres grecques

∇	: Opérateur gradient	
$\Phi_{c,x}$: Flux thermique conductif entrant en x	W
$\Phi_{c,x+dx}$: Flux thermique conductif sortant en x+dx	W
Φ_g	: Flux d'énergie thermique générée (source)	W
ρ	: Masse volumique du matériau	Kg m^{-3}
λ	: Conductivité thermique du milieu	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Φ_{cv}	: Flux de chaleur par convection	W
λ_f	: Conductivité thermique du fluide	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
κ	: Epaisseur de la couche	m
λ_a	: Conductivité thermique de l'air ($0,0257 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ à 20°C)	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
β	: $\beta = T^{-1}$ est le coefficient de dilatation thermique ($3,41 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$)	K^{-1}
ΔT	: Différence de température entre l'air et la surface	K

ν	:	Viscosité cinématique du fluide	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
φ_r	:	Flux de chaleur émis par rayonnement	W
ε	:	Emissivité du corps (= 1 pour un corps noir, < 1 pour un corps gris)	
σ	:	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$

NOMENCLATURE

Chapitre 2

Caractères latins

I_0	: la constante solaire	W/m ²
I	: la constante solaire corrigée	W/m ²
N	: le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier	
C_{ts}	: la correction terre soleil	
TSV	: temps solaire vrai qui est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence	heure
H	: l'angle horaire, vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai	degrés
TL	: temps légal (donné par une montre)	heure
DE	: décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 pour l'Algérie)	heure
E_t	: la correction de l'équation des temps	mn
h	: la hauteur du soleil	degrés
α	: l'azimut du soleil	degrés
m_A	: la masse d'air	Kg
Z	: l'altitude	m
p/p_0	: la correction de l'altitude Z	
h_0^{ref}	: l'altitude du soleil corrigée par la composante de la réfraction atmosphérique	degrés
h_0	: l'altitude du soleil	degrés
δ_R	: l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages	m
T_L	: le facteur de trouble atmosphérique de Linke	
I_N	: le rayonnement direct normal	W/m ²
B_{0c}	: le rayonnement direct normal	W/m ²
$-0.8662 T_{LK}$: le deuxième facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair corrigé par Kasten	
B_{hc}	: le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair	W/m ²
D_{hc}	: éclaircissement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair	W/m ²
T_n	: le facteur de transmission	
F_d	: une fonction du diffus de l'altitude solaire	
h_0	: l'altitude solaire	degrés
B_{ic}	: le rayonnement direct normal sur un plan incliné	W/m ²
A_0	: Azimut angle : horizontal entre le soleil et le méridien mesuré à partir de l'Est	degrés

Lettres grecques

λ	: longitude de lieu	degrés
δ	: déclinaison du soleil	degrés
φ	: latitude de lieu	degrés
γ	: la hauteur du plan	degrés
β	: l'inclinaison du plan	degrés
α	: l'azimut du plan	degrés
δ_{ext}	: l'angle d'incidence solaire mesuré entre le soleil et une surface inclinée	degrés

NOMENCLATURE

Chapitre 3

Caractères latins

T	: Température	K
t	: Temps	s
C	: Matrice diagonale pour une capacité thermique	J K ⁻¹
A	: Matrice carrée pour la conductivité thermique	W m ⁻¹ K ⁻¹
B	: Vecteur	
e	: Epaisseur	m
n	: Nombre de couches dans un mur & Nombre de noeuds	
S	: Surface	m ²
λ	: Conductivité thermique	W m ⁻¹ K ⁻¹
R	: Résistance thermique	m ² K W ⁻¹
Cp	: Chaleur spécifique	J kg ⁻¹ K ⁻¹
F _{surf-i}	: Facteur de forme entre les surfaces d'échange	
h _{cov}	: Coefficient de chaleur échangé par convection	W m ⁻² K ⁻¹
V _{vent}	: Vitesse du vent	m s ⁻¹
G	: Eclairement solaire global incident sur les parois	W m ⁻²
Q	: Flux de chaleur échangé	W
Vent	: Ventilation	
\dot{m}_{inf}	: Débit massique du à l'infiltration d'air	kg/s
\dot{m}_{Vent}	: Débit massique d'air du à la ventilation	kg/s
int	: Entré d'air	
out	: Sortie d'air	
Sol_ext	: Sol extérieur	
conv	: Convection	
amb	: Ambient	
Chauf	: Chauffage	
Refr	: Refroidissement	
Surf	: Surfaccique	
Inf	: Infiltration	
Qs	: Gain d'énergie solaire	Wh
I _{Sj}	: Rayonnement solaire pour l'orientation j	W m ⁻²
S _{sj}	: Surface réceptrice	m ²
A	: Surface de l'ouverture	m ²
Fs	: Facteur de correction pour l'ombrage	
S	: Facteur solaire	

Lettres grecques

α : Coefficient d'absorption

ε : Emissivité thermique

ρ : Densité volumique

Kg m^{-3}

σ : Constante de Stefane Boltzmann

$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$

NOMENCLATURE

Chapitre 4

Caractères latins

$Q_{surf,i}$: Gains provenant des surfaces internes	W
$U_{mur,i}$: Coefficient de transmission thermique du mur	W m ⁻² K ⁻¹
$A_{mur,i}$: Surface du mur	m ²
T	: Température	K
$Q_{inf,i}$: Gains provenant des infiltrations	W
$Q_{vent,i}$: Gains provenant de la ventilation	W
V	: Volume	m ³
Cp	: La chaleur spécifique	J kg ⁻¹ K ⁻¹
$Q_{g,c,i}$: Gains convectifs intérieurs	W
$Q_{gplg,i}$: Gains convectifs dus aux écoulements d'air provenant des zones adjacentes	W
CLO	: Courtes longueurs d'onde	
GLO	: Grandes longueurs d'onde	
$Q_{rd,i}$: Gains radiatifs du nœud de température de surface du mur	W
$Q_{g,r,i}$: Gains radiatifs internes de la zone reçue par le mur	W
$Q_{sol,i}$: Gains solaires à travers les fenêtres reçus par le mur	W
$Q_{long,i}$: Flux de grande longueur d'onde échangé entre le mur et les autres murs, les fenêtres et les gains internes	W
$Q_{gains\ internes,i}$: Si l'utilisateur spécifie un flux de chaleur à la surface du mur ou de la fenêtre	W
$S_{s,o}$: Rayonnement solaire absorbé par la surface	W m ⁻²
$Q_{r,wi}$: Gains radiatifs reçus par le nœud de température de la surface murale interne	W
$Q_{g,r,i,wi}$: Gains solaires traversant les fenêtres de la zone	W
$Q_{sol,i,wi}$: Les échanges radiatifs grandes longueurs d'ondes entre le mur et tous les autres murs et fenêtres	W
$Q_{mur-gain}$: Le flux de chaleur reçu par les murs ou les surfaces vitrées, spécifié par l'utilisateur.	W
q_{so}	: Les flux de chaleurs conduits de la surface extérieure vers le mur	W
q_{si}	: Les flux de chaleurs conduits du mur vers la surface intérieure	W
$q'_{c,s,i}$: Flux convectif entre une surface et le nœud d'air	W
$q'_{r,s,i}$: Flux radiatif d'une surface vers les autres surfaces	W
$A_{s,i}$: Surface intérieure de la zone	m ²
N	: Nombre de mesures	
Er_{ABS}	: Erreur absolue	°C
Er_R	: Erreur algébrique relative	%

E_{QM} : Erreur quadratique moyenne

°C

f_{ciel} : Facteur de vue du ciel

Lettres grecques

ρ : La masse volumique

Kg m⁻³

Table des figures

Chapitre 1

- Figure 1.1 : Bilan d'énergie pour un mur plan
- Figure 1.2 : Transfert de chaleur par rayonnement au sein d'une paroi verticale
- Figure 1.3 : Surfaces rectangulaires planes et parallèles
- Figure 1.4 : Surfaces rectangulaires planes et parallèles formant un dièdre droit
- Figure 1.5 : Capacité thermique et diffusivité de divers matériaux écologique
- Figure 1.6 : Comportement thermique d'une enveloppe selon sa constitution

Chapitre 2

- Figure 2.1 : Bilan énergétique des échanges radiatifs entre le sol et l'atmosphère
- Figure 2.2 : Mouvement de la terre autour du soleil
- Figure 2.3 : Repère équatorial
- Figure 2.4 : Repère équatorial
- Figure 2.5 : Projet de validation météo
- Figure 2.6 : Résultats de Simulation sur TRNSYS (éclairage solaire Wm^{-2})
- Figure 2.7 : Interface graphique METEONORM
- Figure 2.8 : Type 99-user format à partir des fichiers climatiques expérimentaux
- Figure 2.9 : Station radiométrique du CDER de Bouzareah
- Figure 2.10 : Station radiométrique de l'URAER
- Figure 2.11 : Calcul de l'éclairement global horizontal et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 15/01/2013 - URAER Ghardaïa
- Figure 2.12 : Calcul de l'éclairement global incliné (32°) et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 15/01/2013 - URAER Ghardaïa
- Figure 2.13 : Calcul de l'éclairement global incliné (32°) et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 01/08/2013 - URAER Ghardaïa
- Figure 2.14 : Calcul de l'éclairement global horizontal et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 01/08/2013 - CDER Bouzareah Alger
- Figure 2.15 : Calcul de l'éclairement global incliné (36°) et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 15/10/2013 - CDER Bouzareah Alger
- Figure 2.16 : Eclairement global incident horizontal et incliné (32°) en utilisant les 4 modèles du TRNSYS, URAER Ghardaïa le 15/07/2013
- Figure 2.17 : Eclairement global incident sur des surfaces horizontales et inclinées pour différents modèles, URAER Ghardaïa le 15/07/2013

Chapitre 3

- Figure 3.1 : Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants
- Figure 3.2 : Différents modèles nodaux
- Figure 3.3 : Plans descriptifs en 3D, vue en plusieurs coupes
- Figure 3.4 : Discrétisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé
- Figure 3.5 : Discrétisation spatiale d'un mur et modèle de conduction
- Figure 3.6 : Plans descriptifs de la maison
- Figure 3.7 : Modélisation du bâtiment en 3D
- Figure 3.8 : Types de nœuds et structure zonale
- Figure 3.9 : Température ambiante, Ghardaïa, les 29-30 Août 2013
- Figure 3.10 : Vitesse du vent, Ghardaïa les 29-30 Août 2013
- Figure 3.11 : Température de l'air dans différentes zones, Ghardaïa les 25-30 Août 2013
- Figure 3.12 : Température de l'air dans différentes zones, l'année 2013
- Figure 3.13 : Température de l'air intérieur de la pièce 2, les 25-30 Août 2013
- Figure 3.14 : Température de l'air intérieur durant une période estivale très chaude
- Figure 3.15 : Température de l'air intérieur durant une période hivernale
- Figure 3.16 : Température de l'air intérieur, orientation Sud, première semaine du mois d'Août 2013
- Figure 3.17 : Température de l'air intérieur, orientation Ouest, première semaine du mois d'Août 2013
- Figure 3.18 : Température de l'air intérieur, orientation Nord, première semaine du mois d'Août 2013
- Figure 3.19 : Température de l'air intérieur, orientation Est, première semaine du mois d'Août 2013
- Figure 3.20 : Température de l'air intérieur de la Pièce avec différentes orientations, 01 Août 2013
- Figure 3.21 : Température du mur Sud extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2013
- Figure 3.22 : Température du mur Est extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2013
- Figure 3.23 : Température du mur Ouest extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2013
- Figure 3.24 : Température de l'air intérieur de la Pièce pour différentes orientations, 01 Janvier 2013

Chapitre 4

- Figure 4.1 : Zones thermiques
- Figure 4.2 : Les outils de simulation - programmes auxiliaires dans l'interaction avec TRNSYS
- Figure 4.3 : Maquette numérique du bâtiment : (a) Plan opaque, (b) plan transparent
- Figure 4.4 : Panneau d'entrée, propriétés des zones et paramètres de calcul
- Figure 4.5 : Données météorologiques (type 15); bleu: humidité relative, rouge: température ambiante
- Figure 4.6 : Données radiométriques (type 15)
- Figure 4.7 : Multizone Slab dans TRNSYS (type 49)
- Figure 4.8 : Bilan convectif d'un nœud d'air
- Figure 4.9 : Coefficients de pression du vent sur le bâtiment pour quatre directions, Sud, Ouest, Est et Nord
- Figure 4.10 : Débit d'air et distribution de pression dans les six zones, calculés par CONTAM
- Figure 4.11 : Schéma du couplage entre les types 56 et 97
- Figure 4.12 : Interface TRNSYS Simulation Studio
- Figure 4.13 : Température ambiante de l'air extérieur
- Figure 4.14 : Humidité relative de l'air ambiant
- Figure 4.15 : Vitesse du vent
- Figure 4.16 : Température de l'air du séjour
- Figure 4.17 : Température ambiante de l'air extérieur
- Figure 4.18 : Humidité relative de l'air ambiant
- Figure 4.19 : Vitesse du vent
- Figure 4.20 : Température de l'air du séjour
- Figure 4.21 : Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud et en fonction des matériaux de construction, Ghardaïa les 20-22 Juillet 2013
- Figure 4.22 : Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud et en fonction des matériaux de construction, Bouzaréah les 20-22 Juillet 2013
- Figure 4.23 : Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud, Ghardaïa: (a) du 20 au 26 Juillet 2013, (b) du 22 au 27 Décembre 2013
- Figure 4.24 : Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud, Bouzaréah: (a) les 22-29 Juin 2013, (b) les 23-30 Décembre 2013
- Figure 4.25 : Température de l'air intérieur de la pièce 2 durant une période de surchauffe en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en brique situé à Ghardaïa
- Figure 4.26 : Température de l'air intérieur du séjour durant une période hivernale en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en parpaing situé à Ghardaïa
- Figure 4.27 : Température de l'air intérieur du séjour durant une période estivale en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en parpaing situé à Bouzaréah

- Figure 4.28 : Température de l'air intérieur du séjour durant une période hivernale en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en pierre situé à Bouzaréah
- Figure 4.29 : Température de l'air intérieur du séjour en fonction des scénarios d'ouverture des fenêtres
- Figure 4.30 : Besoins énergétiques mensuels en chauffage, URAER Ghardaïa 2013
- Figure 4.31 : Besoins énergétiques mensuels en climatisation, URAER Ghardaïa 2013
- Figure 4.32 : Besoins énergétiques mensuels en chauffage, CDER Bouzaréah Alger 2013
- Figure 4.33 : Besoins énergétiques mensuels en climatisation, CDER Bouzaréah Alger 2013

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Valeurs des coefficients A et n en fonction du régime d'écoulement.

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Coefficients de luminosité, modèle de ciel de Perez

Tableau 2.2 : Composition des fichiers météo de TRNSYS

Tableau 2.3 : Emplacements des villes Algériennes données par METEONORM

Tableau 2.4 : Emplacements de l'URAER et du CDER selon les coordonnées géographiques

Tableau 2.5 : Etats récapitulatifs des erreurs commises par les différentes approches

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Expression des coefficients de transfert convectif

Tableau 3.2 : Couleurs et type de nœuds

Tableau 3.3 : Propriétés thermiques, épaisseurs des murs et caractéristiques de l'enveloppe

Tableau 3.4 : Propriétés thermiques, épaisseurs et caractéristiques du verre pour fenêtres

Tableau 3.5 : Irradiations solaires journalières moyennes pour les sites de Ghardaïa, El Bayadh et Biskra.

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Irradiations solaires journalières globales incidentes sur toutes les parois de chaque zone, conformément aux exemples précédents, pour un ciel clair et en fonction de l'orientation et de la disposition de la zone

Tableau 4.2 : Les différents scénarios des volets pour la journée et la nuit

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur du bâtiment est très énergivore ; il présente 30 % à 40 % de la consommation énergétique totale. Cette énergie est principalement utilisée pour le chauffage et le refroidissement, qui représentent les solutions offertes pour régler les problèmes d'inconfort [01]. Face à ces enjeux environnementaux et énergétiques auxquels le monde en général est confronté, le secteur du bâtiment se positionne comme un secteur clé pour répondre à nos engagements nationaux sur ces thématiques. Pour ces raisons, de nombreux efforts de recherche se portent sur l'efficacité énergétique des bâtiments. L'amélioration des températures intérieures est un enjeu économique et écologique majeur pour le secteur du bâtiment.

Dans la littérature, plusieurs travaux de recherche ont traité ce sujet. Les résultats prouvent chaque fois que la conception de l'habitation dépend avant tout de sa localisation et de son climat [02]. Elle repose généralement sur l'apport de chaleur, la ventilation la compacité et l'isolation [02]. Il a été prouvé qu'une meilleure position et une bonne implantation des bâtiments qui prend en compte les apports énergétiques peuvent aboutir à des exigences d'orientation qui peuvent minimiser les dépenses d'énergie. Dans d'autres travaux [03], les quatre orientations correspondant aux points cardinaux: Nord, Ouest, Sud et Est ont été considérés pour étudier le potentiel de réduction des besoins de refroidissement de la ventilation naturelle mono-façade. D'autre part, T Catalina et al ont indiqué que le coefficient de forme pour différentes morphologies de bâtiments pourrait être critiqué et ne sera pas considéré comme indicateur sur les besoins en chauffage d'une habitation s'il ne prend pas en compte l'orientation du bâtiment. Par ailleurs, M Olfa [04] a montré qu'une solarisation trop importante ou mal gérée peut s'avérer inconfortable, l'orientation peut avoir des conséquences sur la consommation de chauffage, de refroidissement et d'éclairage. Les matériaux de construction utilisés doivent être efficaces pour lutter contre les surchauffes. En effet, une construction doit être faite en respectant les "règles de l'art". Dans cette construction, les normes de produits décrivent en priorité les matériaux de construction. L'isolation doit être donc la plus soignée et la plus complète possible afin d'éviter au maximum les pertes de chaleur [05]. L'étude de M N Assimakopoulou [06] a exploré les avantages potentiels du changement d'orientation du bâtiment, de la taille et de la géométrie de la fenêtre. Les résultats présentés auront un intérêt pratique plus grand s'il traite d'autres cas d'enveloppes et de conditions climatiques.

L'orientation du bâtiment donc est un facteur très important qui est directement relié aux normes de confort thermique dans le bâtiment. Elle est guidée par les éléments naturels comme le soleil et son intensité, la direction du vent, les saisons de l'année et les variations de température. L'orientation du bâtiment joue un rôle important dans les niveaux d'ombrage et d'éclairage naturel. D'autre part, les enquêtes réalisées par les chercheurs au monde montrent la tendance générale des matériaux utilisés pour l'enveloppe du bâtiment. Le choix des matériaux de construction est essentiellement déterminé par leur disponibilité locale, leur économie, la durabilité et la pertinence pour le climat particulier. Les matériaux de gros œuvre peuvent conférer aux murs de bonnes qualités d'isolation et d'accumulation de la chaleur pour atténuer les variations de température extérieure au cours de la journée.

La principale discipline à laquelle fait appel cette thèse est la thermique de l'habitat. Nous essayerons d'anticiper et appréhender sereinement certaines contraintes de confort rencontrées qui doivent à la fois tenir en compte du régime climatique de la région et intégrer les caractéristiques spécifiques de la construction avec le comportement et les besoins prévisionnels des occupants. Les principaux objectifs sont les suivants :

- Proposer une démarche méthodologique permettant de quantifier les performances thermiques et la consommation énergétiques d'un bâtiment multizone : le modèle dans ces situations est un intermédiaire à qui les physiciens délèguent la fonction de connaissance, notamment en présence d'un champ d'études dont l'accès est difficilement praticable.
- Tester la validité des outils utilisés pour le calcul des températures multizones.
- Appliquer ces modèles à l'étude de l'orientation en fonction de la compacité et à la comparaison entre trois matériaux de construction locaux. Deux sites appartiennent à des régimes radiatifs très différents vont être choisis, Alger et Ghardaïa.

Les travaux réalisés s'inscrivent dans le cadre d'un projet de recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Division Application des Energies Renouvelables dans les Milieux Arides et Semi-arides, Equipe Architecture Solaire et Bioclimatique. Les efforts menés permettent de maîtriser les impacts environnementaux du bâtiment tout en assurant une qualité des ambiances intérieures satisfaisantes. Le bilan global de la production scientifique, fait état de 05 publications internationales [07-11], plusieurs communications nationales et internationales (comme auteur principal) auxquelles s'ajoutent un stage PNE au Laboratoire des Sciences de L'ingénieur pour l'environnement Lasie, Université de La Rochelle, France.

Notre thèse s'organise en quatre chapitres.

- Le premier chapitre fournit des informations de base sur les concepts et les éléments de performances énergétiques

- Le second chapitre est consacré à une étude comparative, nous effectuons une sélection de modèles d'estimation du rayonnement solaire qui permet la détermination en fonction du temps des composantes horizontales et verticales du rayonnement solaire. Le traitement des données est effectué sur des mesures choisies couvrant l'année 2013, collectées toutes les cinq minutes pour les deux sites Ghardaïa et Bouzaréah. Toutes ces étapes permettent de choisir des modèles fiables et adéquats qui peuvent être exploités durant ces études.
- Dans le troisième chapitre, nous avons proposé un modèle mathématique de calcul en régime transitoire basé sur la méthode nodale. Ce modèle consiste à traduire les phénomènes de transfert de chaleur par une série d'équations différentielles appliquées à toutes les couches d'une structure multizone. La résolution mathématique par la méthode de Runge-Kutta permettra de déterminer l'évolution de la température intérieure. Pour la simulation numérique, nous avons mis en place un programme de calcul MATLAB.
- L'objectif du dernier chapitre est la simulation annuelle paramétrique par le couplage Trnsys/Contam tenant compte de l'orientation, des matériaux de construction et de la ventilation naturelle.
- Finalement, une conclusion générale clôtura notre thèse.

Références

- [01] : S Labreche, *Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs, cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides*, Magistère en architecture Option: Architecture, formes, ambiances et développement durable, Université Mohamed Khider – Biskra 2014.
- [02] : S Bellara, *Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective, cas de la nouvelle ville Ali Mendjeli Constantine*, Mémoire de Magistère, option : Architecture Bioclimatique, Université Mentouri Constantine, 2015.
- [03] : T Catalina, J Virgone, J J Roux, E Blanco, *Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation*, Conférence IBPSA France Lyon, 06 - 07 Novembre 2008.
- [04] : O Mejri, *Développement de méthodes de diagnostic énergétique des bâtiments*, Thèse de Doctorat, Spécialités: Génie Industriel (ENIT-Tunis El Manar) et Mécanique & Énergétique (Bordeaux 1), Avril 2011.
- [05] : T Salem, *Intégration des composants solaires thermiques actifs dans la structure bâtie*, Thèse de Doctorat, Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [06] : M N Assimakopoulou, *Développement et évaluation des systèmes et stratégies de contrôle de régulation d'un vitrage électrochromique pour des applications de bâtiment*, Doctorat en Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 2004.
- [07] : M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, *A new modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate*, Thermal Science, Article in press, doi: 10.2298/TSCI131217026H.
- [08] : M Hamdani, S M A Bekkouche, M K Cherier, N Benamrane, T Benouaz, *Orientation of buildings: predictive control based on the calculation of temperature and solar direct contribution*, International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy Vol. 55 (2015) pp 96-103, © (2015) SciPress Ltd., Switzerland doi:10.18052/www.scipress.com/ILCPA.55.96.
- [09] : M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, R Belarbi, M. K. Cherier, *Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate*, Engineering Structures And Technologies, Taylor & Francis: ISSN 2029-882X / eISSN 2029-8838 2014 6(3): 131–149, doi:10.3846/2029882X.2012.988756.
- [10] : M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, N Benamrane, O Halloufi, *Effect of orientation of buildings with different materials in distribution of temperatures in walls thickness*, 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2013, June 16-22, 2013, 91 - 98 pp, Albena, Bulgaria. SGEM Scientific Papers DataBase -Renewable Energy Sources and Clean Technologies, DOI:10.5593/SGEM2013/BD4/S17.012.
- [11] : M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, *Study and effect of orientation two rooms of buildings located in Ghardaïa, Algeria*, Energy Procedia Vol 18, pp 636–642, 2012, doi: 10.1016/ S1876-6102 (12) 00986-1.

Chapitre 1

Eléments de performances énergétiques

CHAPITRE 1

ELEMENTS DE PERFORMANCES ENERGETIQUES

1.1. Introduction

Depuis une dizaine d'années, l'étude du confort thermique dans le bâtiment mobilise la communauté scientifique. De nos jours, environ un tiers de la consommation énergétique mondiale est dédiée à la mise en place et au respect de conditions thermiques "confortables" dans les espaces intérieurs grâce à l'utilisation de systèmes de chauffage, de climatisation et de ventilation [01]. En 1973, au moment de la première crise pétrolière, la plupart des pays ont mis en place des codes de construction des normes d'isolation tout en résultant une économie massive de l'énergie. Le développement technologique et les méthodes d'étanchéité ont permis une baisse de la consommation d'énergie opérationnelle de bâtiments à des très faibles niveaux [02]. Aujourd'hui, les bâtiments doivent respecter de plus en plus les normes relatives à leurs performances énergétiques et plus largement à leurs impacts environnementaux. L'ensemble de ces textes réglementaires impose un certain nombre de règles et de garde-fous en matière de maîtrise de la consommation énergétique dans les bâtiments. En France, avec la RT 2012, l'objectif de consommation énergétique des bâtiments a baissé à 50 kWh /m² An [03].

En Algérie, les perspectives de développement du parc de logements conduiront à un accroissement exponentiel de la consommation énergétique. Dans ce contexte, la conception et la réalisation de logements énergétiquement efficaces s'imposent comme une nécessité à la maîtrise des consommations énergétiques de ce secteur. Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment "CNERIB" lance deux décrets exécutifs portant sur les règles de calcul des déperditions et des apports calorifiques [04]. Le développement des bâtiments passifs conduit à la mise en œuvre d'enveloppes de plus en plus étanches à l'air et très performantes en terme d'isolation thermique. Ceci permet, certes, de limiter les besoins énergétiques en période de chauffage mais conduit également dans certains cas à l'inconfort en mi-saison et en été "effet enveloppes : thermos " [03].

De nombreuses études et retours d'expériences [05] sur les bâtiments les plus performants montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des

apports solaires passifs, une sur-isolation de l'enveloppe (mur et vitrages) et, dans la plupart des cas, la mise en place d'une ventilation double-flux avec récupération de chaleur. La mise en œuvre des potentialités d'économie d'énergie existantes ne peut avoir que des effets bénéfiques, d'abord sur le plan financier et ensuite sur la situation environnementale globale. En effet, l'économie d'énergie est l'une des manières de contribuer à la diminution des risques de changements climatiques auxquels notre planète est exposée. La plupart des bâtiments, qu'ils soient à usage d'habitation ou industriels, constituent des systèmes dont la consommation d'énergie est importante si l'on désire assurer un confort thermique acceptable par ses occupants [06].

Ce premier chapitre nous permet de disposer d'éléments structurés et cohérents pour aider à comprendre les principaux critères et à choisir des pistes porteuses d'innovation en matière de matériaux, produits et systèmes d'enveloppe et servir de base à une mobilisation des acteurs autour des préoccupations d'économies d'énergie.

1.2. Critère climatique et son intégration

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques (températures, pression atmosphérique, vents, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné [07]. Le climat est le résultat de plusieurs années de tous les phénomènes atmosphériques observés dans un endroit particulier. Le climat d'un lieu dépend :

- De sa position en latitude
- De sa circulation atmosphérique générale
- Des caractéristiques de l'environnement et du site (relief, végétation, eau, ville etc.)

On peut distinguer un ensemble d'éléments et de facteurs climatiques rapportés en catégorie selon [08].

- Les facteurs énergétiques : rayonnement, lumière, et température
- Les facteurs hydrologiques : précipitations et hygrométrie
- Les facteurs mécaniques : vents et enneigements

En relation avec les concepts de l'urbanisme et l'architecture, le climat est une des principales données de la morphologie des systèmes architecturaux et urbains [08].

Le climat a toujours été considéré comme un des éléments majeurs de la dynamique et de l'ambiance d'une ville. Le problème est de contrôler l'environnement et de créer un microclimat confortable pour les activités humaines. La conception d'un microclimat de qualité est un des éléments clés de tout projet d'aménagement de notre cadre bâti [07]. L'intégration du facteur climatique dans la conception urbaine et architecturale n'est pas nouvelle, il a été aussi démontré que parfois le facteur climatique a été toujours considéré comme majeur et

déterminant de toute œuvre architecturale. Par ailleurs, l'accent est mis sur l'idée principale de l'architecture bioclimatique, à savoir, "construire avec le climat", c'est-à-dire, nous prenons en compte la dimension climatique dès les premières étapes de conception de l'échelle urbaine jusqu'à l'échelle de l'architecture de l'habitat, dont le seul but est d'obtenir une construction en harmonie avec l'environnement et dont le fonctionnement réduit au minimum l'utilisation énergétique [09]. La diversité des climats à travers le monde a dicté une richesse et une variété de solutions ; stratégies et concepts qui représentent un champ étendu du domaine de la recherche et de l'investigation, les plus remarquables sont les recherches dans la conception bioclimatique. De ce fait, une approche scientifique se présente pour analyser chaque fait climatique dans sa complexité et pour aboutir à des solutions de plus en plus adéquates [09].

1.3. Éléments de conception architecturale

Avec le durcissement des exigences sur la consommation d'énergie dans le bâtiment et sur le confort d'été des occupants, la conception architecturale devient un facteur prépondérant dans le bilan énergétique global d'une construction. Une bonne conception architecturale est exigée par la RT2012 au travers d'une limitation des besoins d'énergie liés au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage. Cette limitation se fera par le biais d'un coefficient appelé Bbio qui se calcule en fonction des besoins de chauffage (isolation + renouvellement d'air + apports gratuits internes et externes), de refroidissement (isolation + renouvellement d'air + apports internes et externes) et d'éclairage (niveau d'éclairement requis par local + orientation et transmission lumineuse des baies). La RT2012 valorise à travers ce coefficient Bbio :

- La compacité du bâtiment afin de réduire, à volume constant, les surfaces de contact entre l'ambiance climatisée (chauffée ou refroidie) et l'ambiance extérieure. Ça va se traduire sur le terrain par plus de bâtiments collectifs de forme géométrique simple et compacte et par plus de maisons individuelles jumelées ou en bandes.
- Une meilleure isolation thermique du bâti.
- L'orientation, la surface et le type des baies vitrées afin de capter le maximum d'apports solaires gratuits en saison de chauffage, et de faire entrer le maximum de lumière naturelle en toute saison.
- L'inertie thermique du bâtiment qui pourrait servir au stockage-déstockage de l'énergie en périodes chaude et froide.
- L'étanchéité à l'air de l'enveloppe qui va dans le même sens que celui de l'isolement acoustique aux bruits aériens extérieurs [10].

1.4. Confort thermique

Le confort thermique peut se définir comme la satisfaction exprimée par un individu à l'égard de l'ambiance thermique du milieu dans lequel il évolue. Ainsi, pour être en situation de confort thermique une personne ne doit avoir ni trop chaud, ni trop froid et ne ressentir aucun courant d'air gênant. Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique et hydrique entre le corps humain et son environnement. Il dépend de l'activité physique du métabolisme, de l'habillement et de la sensibilité (aspect psycho-sociologue) de chaque individu, de la température de l'environnement (air, parois) et des mouvements d'air et de l'humidité. Il existe en littérature un certain nombre de méthodes dites d'évaluation du confort thermique, basées sur des expérimentations menées par différents chercheurs et mettant en œuvre différents paramètres de détermination du confort thermique. Des chercheurs commencent à défier l'hypothèse d'universalité, et à discuter que le fait de ne pas prendre en compte les dimensions culturelles, sociales, économiques et climatiques dans l'évaluation du confort, conduit à une exagération dans la définition des besoins pour le chauffage et la climatisation. C'est grâce à l'application universelle des outils d'évaluation du confort thermique qu'un inconfort thermique important est perçu par les sujets considérés. De ce fait, il n'existe pas de combinaison parfaite de conditions de confort du moment que celles-ci ne sont pas forcément reliées au contexte. Toutefois, les définitions théoriques de la notion de confort s'accordent toutes sur l'importance du confort thermique [10].

Mais souvent il est défini par la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique. ASHRAE "American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers" en 1992 définit le confort thermique comme étant l'état d'esprit qui exprime la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Ce dernier est conditionné par plusieurs paramètres: la température de l'air, l'humidité de l'air, les précipitations, la pression atmosphérique et la nébulosité. La combinaison de ces paramètres climatiques influe sur le confort thermique de l'individu et donc sur l'usage de l'espace [11].

Plusieurs méthodes de combinaison ont été développées par les chercheurs pour la manipulation simultanée des variables du confort. Parmi ces méthodes, on peut citer quelques-unes [10]:

- PMV: "Predicted Mean Vote"
- PPD: " Predicted Percentage of Dissatisfied "
- Température effective
- Température résultante
- Indice de confort équatorial
- Indice de contrainte thermique

- Température opérative
- Méthode du B R S Systèmes de réponse bio
- Diagrammes bioclimatiques (Givoni, Olgyay, Mahoney... Etc.)

1.5. Confort hygrothermique

Le confort ne dépend pas seulement du paramètre température mais aussi de l'hygrométrie de l'air ambiant. Reconnu comme une cible de la haute qualité environnementale, le confort hygrothermique est défini comme étant la sensation que ressent une personne par rapport à la température et à l'humidité ambiante du local où elle se trouve. Les tentatives d'objectivation du confort hygrothermique se sont appuyées sur des approches statistiques. Il en ressort des critères physiques supposés satisfaire une majorité d'individus. Ces critères sont principalement les températures de l'air et des parois, les variations spatiales de ces températures, l'hygrométrie de l'air, les vitesses de l'air. Certains spécialistes dans le domaine donnent des valeurs précises pour chaque facteur:

- Température des murs: 22 ± 2 °C,
- Humidité relative entre 40 et 60%,
- Température du sol: 19 à 24 °C,
- Vitesse de l'air: inférieure à 0.15 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. [11]

L'hygrométrie est donc le degré d'humidité présent dans l'air intérieur d'une habitation, est capitale pour le bon équilibre du bâtiment et le respect de la santé de ses occupants. N'oublions pas qu'en respirant, chacun d'entre nous produit 40 grammes de vapeur d'eau par heure lorsque nous dormons et jusqu'à 150 grammes par heure lorsque nous sommes en activité. Mesuré par un hygromètre, ce taux est idéalement compris entre 30 et 70 %, fourchette dans laquelle l'hygrométrie n'influence que très peu la sensation de confort thermique. Les risques de dégradation du bâti et d'inconfort pour l'occupant liés à un taux d'hygrométrie excessif dans un bâtiment sont de deux natures:

- La condensation qui se forme sur la paroi en contact avec l'air extérieur lorsque l'air intérieur est chaud et l'air extérieur froid.
- La vapeur d'eau dégagée par toute activité humaine qui a tendance à se condenser sur les parois froides.

Autrefois réglée par une aération naturelle, cause d'importantes déperditions, la gestion de la vapeur d'eau dans un bâtiment isolé demande désormais une grande attention.

1.6. Matériaux de construction

Les enquêtes réalisées par les chercheurs au monde montrent la tendance générale des matériaux utilisés pour l'enveloppe du bâtiment. Le choix des matériaux de construction est essentiellement déterminé par leur disponibilité locale, leur économie, la durabilité et la pertinence pour le climat particulier. Les moyens de transport des matériaux à partir d'un endroit éloigné de la production doivent être pris en considération. L'utilisation des matériaux traditionnels disponibles dans chaque zone climatique comme le bois, la brique de terre, la pierre et les matériaux modernes, tels que le parpaing de ciment doit être judicieuse. Les résultats démontrent qu'en fonction des climats, le bois et la brique de terre sont meilleurs par rapport au parpaing de ciment, car l'habitat traditionnel représente parfois une réponse directe aux contraintes climatiques et est spécifique à chaque région [12]. La nature des matériaux qui couvrent l'enveloppe extérieure des bâtiments et leur propriété de réflectivité doivent être considérées surtout en climat chaud, car elles ont une influence directe sur l'augmentation de la température moyenne radiante et donc sur le confort extérieur [13]. Les matériaux de façade et spécialement leurs couleurs jouent un rôle très important dans la formulation de l'environnement thermique à l'intérieur du canyon urbain.

Les matériaux de construction sont des matériaux poreux, et donc très sensible à l'eau. Du fait de conditions thermique et hygrométrique ambiantes variables, ils sont le siège de plusieurs phénomènes : migrations de vapeur d'eau, changement de phase, humidification et séchage [14].

1.6.1. Propriétés hydriques

Les matériaux poreux ont la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air environnant. Une augmentation de l'humidité de l'air au voisinage du matériau entraîne une augmentation de la masse apparente de celui-ci. Cette augmentation de masse apparente est due à la fixation des molécules d'eau en surface du matériau: c'est le phénomène d'adsorption. Inversement une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une diminution de la masse apparente: c'est le phénomène de désorption. Cette caractéristique physique est représentée par des courbes d'équilibre dans des conditions isothermes: les isothermes d'adsorption désorption. Ces courbes caractérisent l'aptitude au stockage de chaque matériau. Ces courbes sont essentielles pour évaluer la sensibilité des matériaux à l'eau, d'autant plus que cela provoque des modifications importantes de leurs propriétés thermiques. En effet, l'eau liquide présente une conductivité thermique ($\lambda_{\text{eau}} = 0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) vingt trois fois supérieure à celle de l'air sec ($\lambda_{\text{air}} = 0,026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Sa présence au sein du milieu poreux va modifier la conductivité thermique globale des matériaux [14].

L'hygrométrie Hr (%) permet de caractériser le degré d'humidité d'une ambiance. Elle se définit comme le rapport de la pression partielle de vapeur p_v existant dans le gaz avec la pression de vapeur saturante p_{sat} dans les mêmes conditions de température. Elle permet donc de connaître la fraction de vapeur réellement présente dans l'air sous cette température. [15]

$$Hr = 100 \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (1.1)$$

La dépendance en température de la pression de vapeur saturante est donnée par la relation empirique suivante, valide pour une température comprise entre 0 et 80°C avec une précision de $\pm 0,15\%$, d'après [15]:

$$p_{sat} = \exp \left(23.5771 - \frac{4042.9}{T-37.58} \right) \quad (1.2)$$

Où T est exprimé en Kelvin.

Pour aborder les processus fondamentaux de transferts d'humidité sous leur forme microscopique, on doit présenter les lois physiques responsables de la diffusion de vapeur et de l'écoulement liquide, à l'échelle d'un pore simple.

L'air peut être considéré comme un mélange de deux gaz parfaits: l'air sec et la vapeur d'eau. Si l'on considère que la phase gazeuse à l'intérieur du milieu se trouve à pression uniforme et égale à celle de l'atmosphère, deux mécanismes se révèlent comme les principaux moteurs de transport d'humidité en phase vapeur: la diffusion et l'effusion. Nous verrons par la suite ce qui distingue ces deux mécanismes. La théorie sur le transport de vapeur d'eau repose sur la loi de Fick [16]. Ainsi, le transfert par diffusion moléculaire de la vapeur dans l'air est donné en fonction du gradient de concentration de vapeur :

$$g_v = -D_a \nabla \rho_v \quad (1.3)$$

g_v : densité de flux massique de vapeur ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$),

D_a : coefficient de diffusion de vapeur dans l'air ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$),

En assimilant la vapeur d'eau à un gaz parfait, la loi de Fick s'écrit, en fonction du gradient de pression de vapeur:

$$g_v = -\frac{D_a}{R T} \nabla P_v \quad (1.4)$$

Le coefficient de diffusion de vapeur dans l'air est donné par la relation suivante [15] :

$$D_a(T, P) = \frac{2.306 \cdot 10^{-5} P_0}{P} \frac{T^a}{T_0^a} \quad (1.5)$$

T_0 et P_0 désignent un état de référence: on prendra $T_0= 273,15$ K, $P_0= 101325$ Pa. La valeur de a est variable selon les auteurs. De Vries [17] considère $a=1,88$.

1.6.2. Propriétés thermiques

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux humides se fait par :

- Conduction dans la phase solide, dans la phase liquide et dans la phase gazeuse,
- Convection,
- Rayonnement,
- Evaporation-condensation de l'eau,
- Diffusion de vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de pression partielle,

Selon le matériau étudié (opaque ou semi transparent) et son état (sec ou humide), certains modes de transfert peuvent être négligés par rapport à d'autres. Par exemple, lorsque la masse volumique d'un matériau augmente, le transfert par conduction augmente, au contraire lorsqu'elle diminue, le transfert par rayonnement et convection augmente.

1.6.2.1. Conduction: équation de la chaleur [14]

On s'attachera à présenter l'équation de la chaleur, dans sa forme unidirectionnelle, c'est-à-dire décrivant le transfert de chaleur au travers d'un mur plan. Considérons alors un système d'épaisseur dx dans la direction x et de section d'aire S normalement à la direction (Ox). Le bilan d'énergie sur ce système (Premier principe de thermodynamique) s'écrit :

$$\varphi_{c,x} + \varphi_g = \varphi_{st} + \varphi_{c,x+dx} \quad (1.6)$$

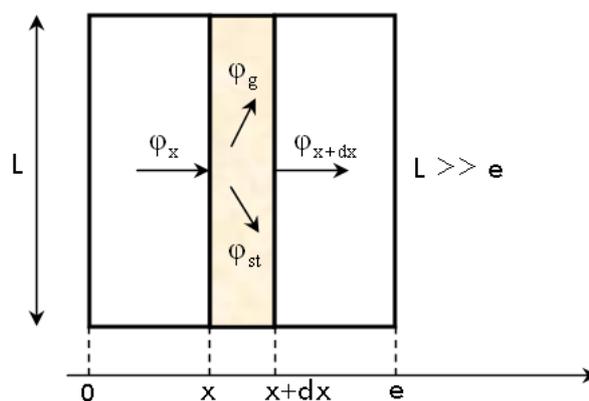


Figure 1.1. Bilan d'énergie pour un mur plan

$\varphi_{c,x}$ désigne le flux thermique conductif entrant en x , selon la loi de Fourier $\varphi_{c,x} = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x$

φ_{st} est le flux de chaleur stocké par le corps (augmentation de son énergie interne au cours du temps) $\varphi_{st} = \rho c S dx \frac{\partial T}{\partial t}$

$\varphi_{c,x+dx}$ est le flux thermique conductif sortant en $x+dx$ (W), $\varphi_{c,x+dx} = -\lambda S \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x+dx}$

φ_g : représente le flux d'énergie thermique générée (W), $\varphi_g = \dot{q} S dx$ (terme source)

ρ : masse volumique du matériau (Kg m^{-3})

c : chaleur massique du matériau ($\text{J Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

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

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

λ : conductivité thermique du milieu ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

\dot{q} : densité volumique d'énergie générée (Wm^{-3})

En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie et en divisant par dx , nous obtenons l'équation de la chaleur en 1D :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.7)$$

1.6.2.2. Transfert de chaleur par convection [14]

La convection thermique est le mode de transmission associé au déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. Dans un fluide, il est pratiquement impossible d'assister à de la conduction pure car le moindre gradient de température entraîne des courants de convection, c'est-à-dire un transport de masse. Dans le domaine du bâtiment en particulier, on distingue deux types de convection: la convection naturelle (ou encore convection libre) et la convection forcée (ventilation). La convection naturelle apparaît spontanément, elle se produit dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température. C'est le cas dans une pièce où l'air chaud produit au niveau du sol va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'une force d'Archimède. La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure, par exemple une pompe ou un ventilateur. La convection est un phénomène très complexe où la thermique et la mécanique des fluides sont couplées. Si l'on aborde le problème d'un point de vue pratique, la convection est traitée grâce à des formules semi-empiriques.

$$\varphi_{cv} = -\lambda_f S \frac{T_a - T_s}{\kappa} = h_s (T_s - T_a) \quad (1.8)$$

- φ_{cv} : flux de chaleur par convection (W)
 h_s : coefficient d'échange de chaleur par convection ($W m^{-2} K^{-1}$)
 S : aire de la surface en contact (m^2)
 λ_f : conductivité thermique du fluide ($W m^{-1} K^{-1}$)
 T_a : température du fluide loin de la paroi (K)
 T_s : température de surface (K)
 κ : l'épaisseur de la couche (m)

Cette équation est appelée loi de Newton où h_s représente le coefficient de transfert convectif. En pratique, ce coefficient dépend des températures du fluide et du solide, de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent), des propriétés du fluide (viscosité, coefficient de dilatation thermique, densité) et de la géométrie locale (aspect granuleux ou lisse du matériau) et globale (évacuation de l'air facilitée). L'épaisseur de couche κ dépend du type d'écoulement du fluide au voisinage de la paroi.

Dans le cas d'un écoulement laminaire, les "filets" fluides contigus glissent les uns contre les autres sans se mélanger dans la direction normale aux filets. Autrement dit, il n'y a pas de brassage du fluide. Ce type d'écoulement est obtenu pour des vitesses de fluide faibles. Quand la vitesse d'écoulement du fluide augmente, on passe du régime laminaire au régime turbulent. Les filets fluides sont alors animés de mouvements tourbillonnaires de caractère aléatoire. Le mouvement fluide se fait alors à trois dimensions avec un brassage important qui favorise les échanges thermiques. L'épaisseur de la couche limite κ diminue quand on passe d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent. L'estimation du coefficient d'échange convectif de chaleur s'obtient, dans le cas de la convection libre, par la relation suivante :

$$Nu_u = \frac{h_s L}{\lambda_a} = A (Pr Gr)^n \quad (1.9)$$

- Nu : nombre de Nusselt
 L : longueur caractéristique dans la direction du flux (m)
 λ_a : conductivité thermique de l'air ($0,0257 Wm^{-1}K^{-1}$ à $20^\circ C$)
 Pr : nombre de Prandtl, égal à 0,71 pour l'air

Gr est le nombre de Grashof dont l'expression est donnée par

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (1.10)$$

Ce nombre caractérise la facilité que possède un fluide à se mettre en mouvement.

- g : l'accélération de la pesanteur (9,81 m s⁻²)
 β : β = T⁻¹ est le coefficient de dilatation thermique (3,41.10⁻³ K⁻¹)
 ΔT : désigne la différence de température entre l'air et la surface (K)
 ν : la viscosité cinématique du fluide (pour l'air à 20°C, ν = 1,51 10⁻⁵ m² s⁻¹)

Dans l'équation (1.9), A et n sont des constantes qui dépendent uniquement du régime d'écoulement et de la configuration du problème. Ainsi, pour une surface verticale, le régime est turbulent lorsque Pr Gr dépasse 10⁹, sinon il est laminaire. Cette limite correspond au cas où L³ ΔT dépasse la valeur 9,6 m³ K. Dans le tableau (1.1), on mentionne les valeurs de A et n à considérer pour une surface verticale en fonction du régime d'écoulement. Pour l'intérieur d'une habitation, les valeurs du coefficient d'échange convectif de chaleur h_s sont ainsi comprises entre 5 et 10 Wm⁻²K⁻¹.

Type de régime	Flux laminaire		Transition	Flux turbulent	
	A	n	Pr Gr	A	n
Plaque verticale	0.59	0.25	10 ⁹	0.13	0.33

Tableau 1.1. Valeurs des coefficients A et n en fonction du régime d'écoulement.

1.6.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement thermique est défini comme le processus d'émission d'ondes électromagnétiques par un corps au détriment de son énergie calorifique. Ce mode de transfert entre deux surfaces ne nécessite pas de support matériel solide ou fluide et peut donc se produire dans le vide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu: la convection et la conduction sont également présentes. Cependant aux hautes températures, le rayonnement prend une importance prépondérante. On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Considérons sur la figure 1.2 un mur de surface S dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures T₁ et T_s avec T₁>T_s. Ce mur est donc soumis à un phénomène de conduction, on suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température T. D'après la loi de Stefan-Boltzmann, le flux de chaleur émis par rayonnement depuis la surface S vers le milieu ambiant peut s'écrire [14]:

$$\varphi_r = \varepsilon \sigma S (T_s^4 - T_a^4) \quad (1.11)$$

- φ_r : flux de chaleur émis par rayonnement (W)
 S : surface d'échange (m²)

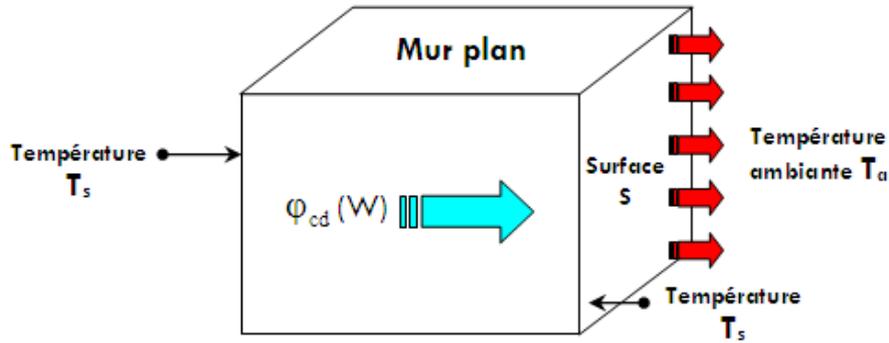


Figure 1.2. Transfert de chaleur par rayonnement au sein d'une paroi verticale

- ε : émissivité du corps (= 1 pour un corps noir, < 1 pour un corps gris),
- σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- T_s : température de surface du corps (K)
- T_{am} : température de l'air ambiant (K)

L'expression du flux de chaleur échangé par rayonnement est non linéaire, elle fait intervenir la température à la puissance quatrième.

Cependant, lorsque la différence de température entre deux surfaces en regard $T_2 - T_1$ est faible, la relation (1.11) peut être linéarisée, on introduit ainsi un coefficient d'échange radiatif h_r tel que [14]:

$$\varphi_r = h_r S (T_2 - T_1) \quad (1.12)$$

On retrouve alors une formulation semblable à celle du flux de chaleur échangé par convection avec un coefficient d'échange par rayonnement h_r exprimé en $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, qui vaut:

$$\varphi_r = \frac{\sigma (T_2^2 - T_1^2) (T_2 + T_1)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \varepsilon_2) S_1}{\varepsilon_2 S_2}} \quad (1.13)$$

F_{12} : facteur de forme de la surface 1 par rapport à 2.

Dans le cas de deux surfaces planes parallèles séparées par une faible distance, le facteur de forme F_{12} est égal à 1 et $S_1 = S_2$.

Pour le cas général, entre deux corps noirs, l'un chaud (température T_1), l'autre froid (température T_2), en vis-à-vis total (c'est à dire que tout le flux émis par l'un des corps est reçu par l'autre), le flux net échangé s'écrit [18]:

$$\varphi_r = \varphi_{r_émis} - \varphi_{r_absorbé} = S \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.14)$$

Si les deux corps ne sont pas en vis-à-vis total, le flux net échangé entre deux corps s'écrit [18]:

$$\varphi_r = S_1 F_{1,2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.15)$$

F_{ij} (facteur de forme) est une quantité purement géométrique, qui ne dépend ni de la nature ni de la température des deux surfaces. On peut aussi interpréter F_{ij} comme étant la probabilité pour qu'un rayon issu de S_i soit intercepté par S_j . Pour plusieurs surfaces, on définit le facteur de forme général entre deux surfaces S_i et S_j [18]:

$$\varphi_{i,j} = S_i F_{i,j} \sigma (T_i^4 - T_j^4) = S_j F_{j,i} \sigma (T_j^4 - T_i^4) \quad (1.16)$$

En premier lieu, on s'intéresse au calcul du facteur de forme entre deux surfaces rectangulaires planes et parallèles, de dimensions quelconques, centrées et/ou non centrées [18-19]. À cet égard, des schémas descriptifs du problème géométrique sont donnés par les figures 3 et 4.

Supposons que :

$$\begin{aligned} MM' = r, \quad OO'' = \rho_0(a_0, b_0, 0), \quad O'M' = \rho'(X', Y', 0), \quad r^2 = (X - X' - a_0)^2 + (Y - Y' - b_0)^2 + d^2, \\ O'O'' = d, \quad \cos \theta = \cos \theta' = d/r \end{aligned}$$

Dimensions des surfaces:

$$-a < X < +a \quad -b < Y < +b \quad -a' < X' < +a' \quad -b' < Y' < +b'$$

Le facteur de forme est calculé par la résolution de l'intégrale suivante :

$$F_{12} = \frac{1}{\pi S'} \iint_{s s'} \frac{\cos(\theta) \cos(\theta')}{r^2} ds ds' = \frac{d^2}{\pi S'} \iint_{s s'} \frac{ds ds'}{r^4} \quad (1.17)$$

Afin de pouvoir généraliser les résultats, on introduira les dimensions réduites des surfaces que l'on notera ainsi :

$$X = a/d \quad Y = b/d \quad X_0 = a_0/d \quad X' = a'/d \quad Y' = b'/d \quad Y_0 = b_0/d$$

L'équation 1.17 devient :

$$F_{12} = \frac{1}{8\pi X' Y'} \left(\begin{aligned} &F(X - X_0 + X', Y - Y_0 + Y') - F(X - X_0 + X', Y - Y_0 - Y') + F(X - X_0 + X', Y + Y_0 - Y') - \\ &F(X - X_0 + X', Y + Y_0 - Y') - F(X - X_0 - X', Y - Y_0 + Y') + F(X - X_0 - X', Y - Y_0 - Y') - \\ &F(X - X_0 - X', Y + Y_0 - Y') + F(X - X_0 - X', Y + Y_0 - Y') + F(X + X_0 + X', Y - Y_0 + Y') - \\ &F(X + X_0 + X', Y - Y_0 - Y') + F(X + X_0 + X', Y + Y_0 - Y') - F(X + X_0 + X', Y + Y_0 - Y') - \\ &F(X + X_0 - X', Y - Y_0 + Y') + F(X + X_0 - X', Y - Y_0 - Y') - F(X + X_0 - X', Y + Y_0 - Y') + \\ &F(X + X_0 - X', Y + Y_0 - Y') \end{aligned} \right) \quad (1.18)$$

Avec

$$F(u, v) = u\sqrt{v^2 + 1} \operatorname{Arctg} \frac{u}{\sqrt{v^2 + 1}} + v\sqrt{u^2 + 1} \operatorname{Arctg} \frac{v}{\sqrt{u^2 + 1}} - \frac{1}{2} \operatorname{Ln}(u^2 + v^2 + 1) \quad (1.19)$$

Cette formule complexe, mais facile à programmer, est d'une grande importance. Elle contient tous les cas de figures pour calculer les facteurs de formes de n'importe quelles surfaces planes et parallèles, rectangulaires ou carrées, centrées ou non.

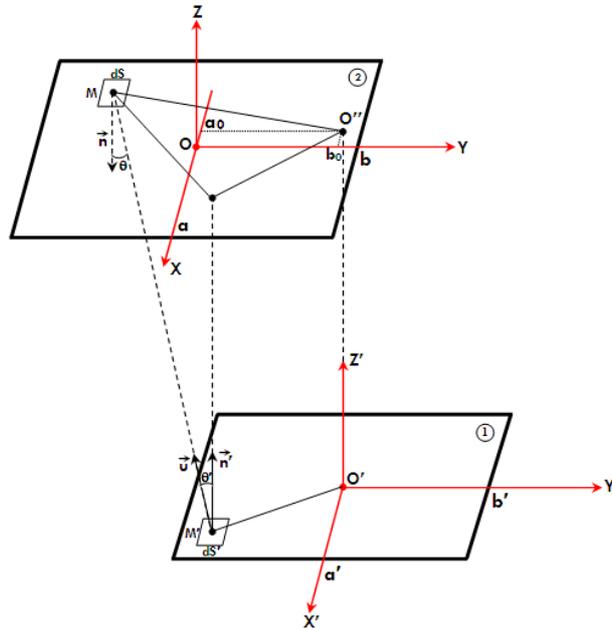


Figure 1.3. Surfaces rectangulaires planes et parallèles

Le deuxième cas correspond à des surfaces planes rectangulaires formant un dièdre droit (figure 1.4). Supposons que :

$$MM' = r, \quad OM' = \rho'(X', Y', 0), \quad OM = \rho(0, Y, Z), \quad \cos \theta' = (Z/r) \cos \theta = X'/r$$

$$r^2 = X'^2 + (Y - Y')^2 + Z^2$$

Le facteur de forme est calculé par la résolution de l'intégrale suivante :

$$F_{12} = \frac{1}{\pi S'} \iint_{S' S} \frac{X' Z ds' ds}{r^4} \quad (1.20)$$

Nous introduisons les coordonnées réduites suivantes :

$$X = a/b \quad Z = c/b$$

Nous obtiendrons l'équation suivante :

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi X} (F(X, Z) - F(X, 0) - F(0, Z)) \quad (1.21)$$

Avec

$$F(u, v) = -4\sqrt{u^2 + v^2} \operatorname{Arctg} \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2}} + (u^2 + v^2 - 1) \ln(u^2 + v^2 + 1) - (u^2 + v^2) \ln(u^2 + v^2) \quad (1.22)$$

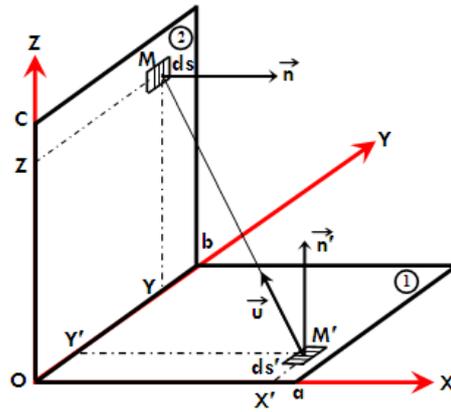


Figure 1.4. Surfaces rectangulaires planes et parallèles formant un dièdre droit

1.7. L'inertie thermique des matériaux: stockage et restitution de la chaleur

Si la capacité résistive d'une paroi est une composante essentielle dans la conception d'un bâtiment économe, d'autres propriétés intrinsèques aux matériaux caractérisent le comportement dynamique d'une enveloppe. Outre qu'ils freinent le flux de chaleur, les matériaux possèdent une capacité thermique leur permettant d'emmagasiner plus ou moins la chaleur. Il est donc intéressant de connaître comment la chaleur est stockée et à quelle vitesse: on parle alors de l'effusivité d'un matériau. Autre propriété physique, la diffusivité indique la vitesse de diffusion de la chaleur à l'intérieur même du matériau. Ces notions, plus communément appelées inertie thermique, confèrent aux bâtiments des propriétés thermiques dynamiques qu'il convient de maîtriser dans la rénovation du parc existant ou pour la conception du bâti de demain. C'est le premier pas vers le bioclimatisme. Capter et maîtriser les apports solaires sont des éléments incontournables de la conception bioclimatique [20-21].

On parle d'inertie intérieure pour la capacité de la face interne d'une paroi à absorber, stocker et restituer les calories, et d'inertie de transmission pour l'épaisseur totale qui amortit et déphase les variations de température entre l'intérieur et l'extérieur. L'amortissement des variations de température correspond à la réduction d'amplitude. Les rayons du soleil qui frappent les parois ou entrent dans le bâtiment atteignent une surface qui les réfléchit. Selon la couleur et la nature des matériaux, la partie non réfléchie des rayons est plus ou moins absorbée sous forme de chaleur. Un matériau très réfléchissant comme l'aluminium poli ne s'échauffe quasiment pas. Les matériaux capables d'absorber une quantité importante des calories reçues sont ceux dont la capacité thermique est grande. La figure 1.5 propose un classement des matériaux usuels du bâtiment en fonction de leur capacité à stocker puis restituer les calories [20-21].

Le classement est le suivant [21]:

- Famille A : matériaux non adaptés à la création de masse inertielle;
- Famille B : matériaux pouvant être utilisés mais qui n'apportent qu'une contribution partielle à l'inertie;
- Famille C : matériaux adaptés à la création d'une inertie quotidienne ou séquentielle.

L'inertie thermique de transmission concerne principalement les parois recevant le plus de calories solaires, suivant les saisons. Sous nos latitudes, il s'agit généralement du mur exposé au sud en hiver et de la toiture en été. L'inertie thermique de transmission est principalement caractérisée par le temps de déphasage, exprimé en heure, entre le moment où les calories arrivent au contact de l'extérieur du bâti et celui où elles pénètrent dans le bâti. En général, un déphasage jour/nuit est recherché, de sorte que les rayons solaires de la journée soient transmis sous forme de chaleur à partir du début de soirée, ce qui correspond à des valeurs de déphasage de 8 à 10 heures. Pour l'été, ce même temps de déphasage permet de laisser entrer la chaleur lorsque la température extérieure a commencé à diminuer, ce qui limite le risque de surchauffe en ventilant.

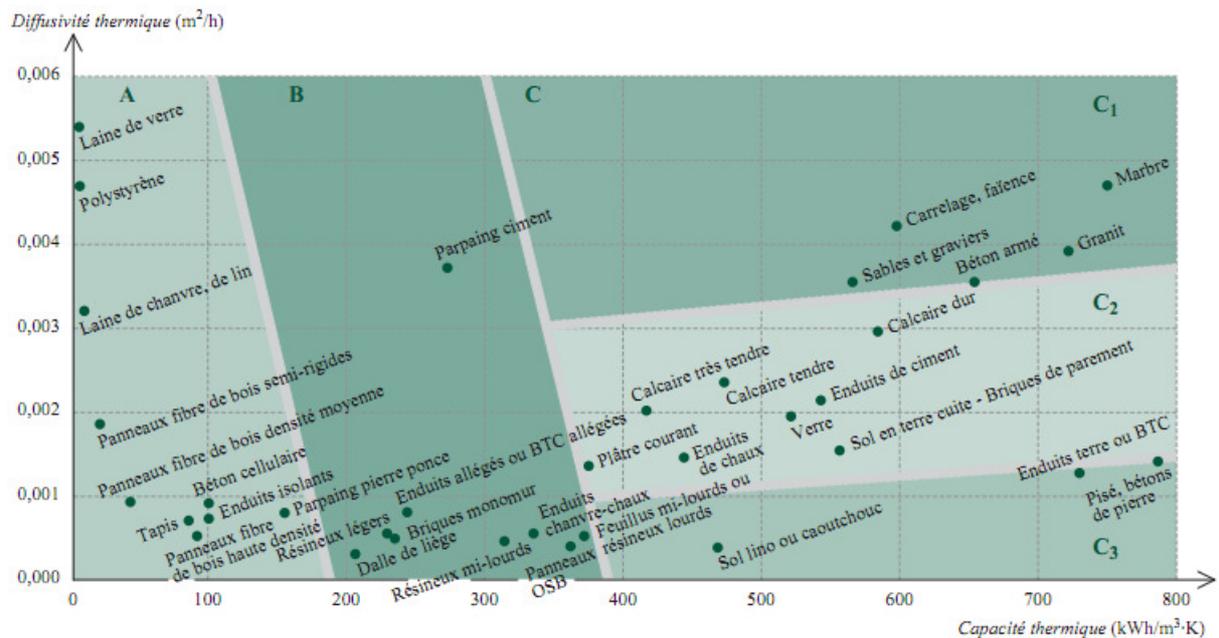


Figure 1.5. Capacité thermique et diffusivité de divers matériaux écologique [21].

1.7.1. Capacité thermique

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

être pénalisante dans certains cas. Dans un bâtiment de grande inertie dont l'utilisation est intermittente, tel qu'une résidence secondaire ou un bâtiment public, de longues périodes de mise en température de confort seront observées puisque les murs devront capter un grand nombre de calories avant d'atteindre une température idéale [20-21].

1.7.2. Effusivité

L'effusivité d'un matériau, appelée couramment chaleur subjective, est la vitesse à laquelle varie la température de surface d'un matériau. Noté E_f , ce paramètre a pour unité le $J/m^2 S ^\circ C$. Si l'effusivité n'est pas prise en compte dans un bilan thermique, elle reste cependant un paramètre non négligeable du confort thermique:

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

C'est l'effusivité qui donne en hiver la sensation de mur froid, synonyme d'inconfort thermique. Si l'on pose la main contre une paroi en faïence ($E_f = 1100 J/m^2 S ^\circ C$), elle semble froide car ce matériau à forte effusivité absorbe rapidement la chaleur de la peau. Dans la conception d'une paroi, ce paramètre permet de choisir la qualité du revêtement en fonction du climat et de l'utilisation future de la pièce. Par exemple, sous un climat froid, un parquet à chaleur subjective élevée sera utilisé dans les chambres; à l'inverse, sous un climat chaud, un carrelage donnera une impression de fraîcheur à la chambre. L'effusivité peut permettre d'atténuer les inconvénients liés à un bâtiment à forte inertie en le rendant plus confortable dès le début de la période de chauffe.

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (1.23)$$

c : capacité thermique massique du matériau (en $J kg^{-1} K^{-1}$)

ρ : la masse volumique du matériau (en $kg m^{-3}$)

λ : conductivité thermique ($W m^{-1} K^{-1}$) [20-22]

1.7.3. Diffusivité

La diffusivité thermique d'un matériau caractérise la vitesse de diffusion de la chaleur en son cœur. Nommée D ou α , elle est exprimée en m^2/s . Plus la diffusivité est élevée, plus le matériau s'échauffe et se refroidit rapidement. La diffusivité est directement liée à la conductivité thermique, à la capacité thermique ainsi qu'à la masse volumique d'un matériau. Elle croît avec la conductivité thermique d'un matériau et décroît avec sa capacité thermique et sa masse volumique. Appliquée à un bâtiment, la diffusivité d'un matériau d'une paroi permet

de gérer le temps de restitution de la chaleur. Par exemple, elle permet de dimensionner l'épaisseur d'un mur accumulateur qui capte des calories la journée et les restitue quelques heures plus tard vers une pièce de vie nocturne. Le déphasage ainsi créé est un paramètre essentiel dans l'optimisation du confort d'été d'une habitation. Un fort déphasage permet de décaler dans le temps un pic de température. Une forte chaleur d'une journée d'été atteint l'intérieur du bâtiment 12 heures après avoir impacté les faces extérieures. Il est donc possible d'évacuer ce surplus de calories en surventilant le bâtiment et ainsi de limiter l'inconfort thermique dans les pièces.

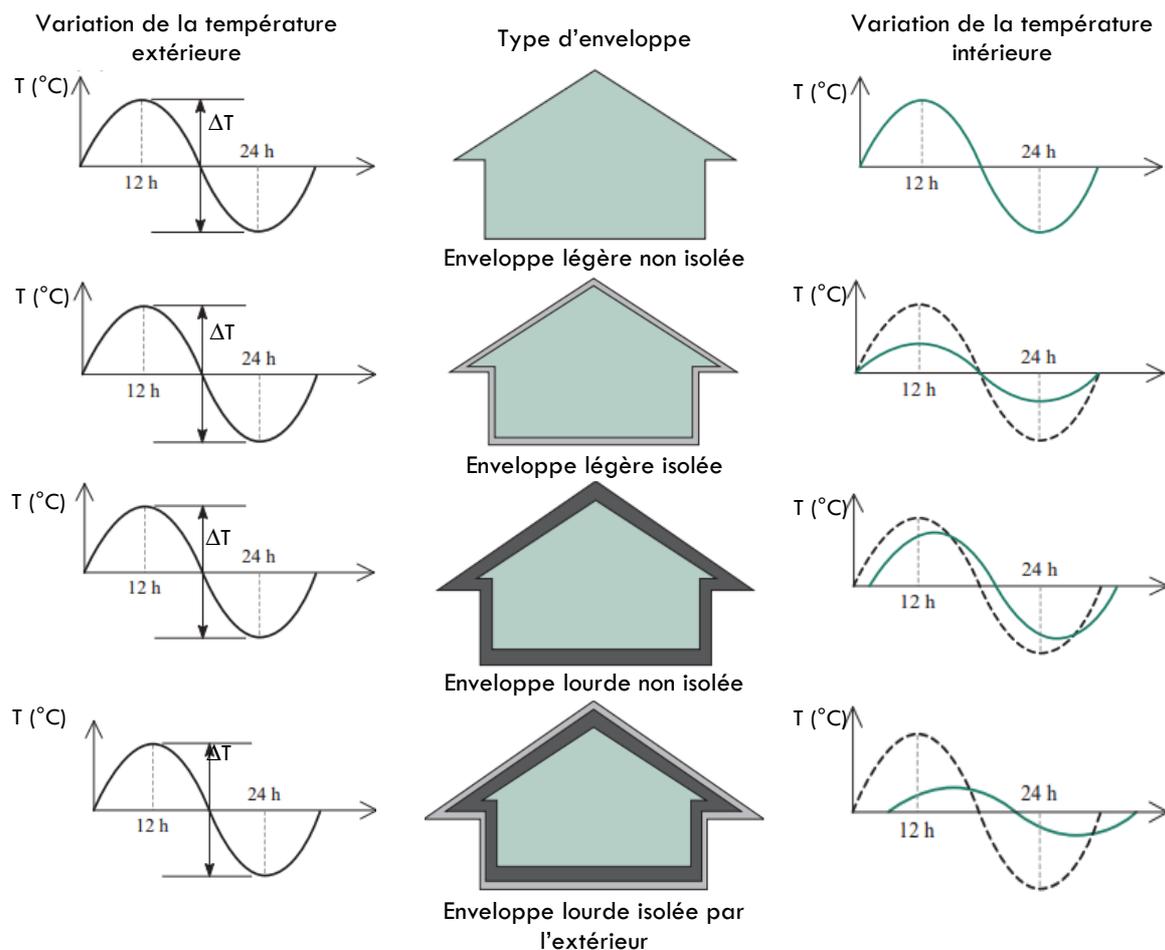


Figure 1.6. Comportement thermique d'une enveloppe selon sa constitution [21-23]

1.8. Isolation thermique

La Palice dirait qu'un matériau isolant thermique est un matériau à basse conductivité thermique apparente. Avec épaisseur relativement faible, il présente une résistance thermique suffisante pour les besoins envisagés. C'est donc un matériau qui transmet mal la chaleur, que ce soit par conduction, convection ou rayonnement.

- Pour éliminer la conduction, il faut éliminer la matière. Le vide ne conduit pas la chaleur.

- Pour éliminer la convection, il faut immobiliser ou supprimer les fluides. Il n'y a de convection possible ni dans le vide, ni dans un fluide immobilisé.
- Pour éliminer le rayonnement, il faut des écrans opaques au rayonnement, ou des surfaces non émissives (donc réfléchissantes) au rayonnement thermique.
- Pour éliminer l'évaporation - condensation, il faut utiliser des matériaux secs.

Ces conditions sont partiellement contradictoires, et ne peuvent être bien réalisées que dans l'espace intersidéral, en traitant les surfaces des corps à isoler pour les rendre réfléchissantes. Dans le bâtiment, l'aspect économique est primordial: c'est l'air immobilisé qui est l'isolant utilisé dans le bâtiment. L'air est immobilisé dans des mousses ou entre des fibres. Les parois des alvéoles des mousses, ainsi que les fibres, font aussi écran au rayonnement. La conductivité thermique n'est pas la seule propriété à prendre en compte dans le choix d'un isolant. Les caractéristiques suivantes sont au moins aussi importantes, et peuvent être primordiales suivant les applications:

- Résistance au feu
- Résistance mécanique (traction et compression)
- Étanchéité à l'air
- Résistance à la diffusion de vapeur d'eau
- Faible absorption d'eau par immersion, par flottaison et par diffusion
- Stabilité dimensionnelle et comportement à la chaleur
- Qualités acoustiques

À l'inverse des métaux qui sont de bons conducteurs de la chaleur, les isolants ne conduisent pas la chaleur. Leurs performances techniques, pour les parois opaques, sont traduites par des coefficients chiffrés qui figurent sur les emballages des produits [23-25].

1.9. La Forme du bâtiment

Il est admis maintenant que le soleil dans les régions à climat chaud et aride est une source d'inconfort qui provoque une surchauffe gênante pendant la période estivale; on pense à la résolution de ce problème par une production architecturale d'édifices ayant une meilleure performance énergétique vis-à-vis des conditions climatiques d'été. Cela ne peut se faire que par une approche bioclimatique qui vise l'intégration très tôt de la composante énergétique dans le processus de la conception architecturale afin de prendre en considération le choix d'une enveloppe (forme) adaptée aux besoins thermiques parce qu'il est difficile de contrôler la thermique si cette précaution n'est pas prévue [26]. L'ensemble des travaux porte sur la modélisation de formes simples (tous les bâtiments sont parallélépipédiques). Cette simplicité permet de limiter les complexités que l'on trouve

habituellement dans les bâtiments et les textures urbaines réels. Elle permettra à terme de donner une appréciation de l'impact de la géométrie des bâtiments sur leurs performances énergétiques totales. Le but n'est pas de réaliser une analyse très fine, comme on peut le faire quand on travaille à l'échelle du détail technique ou architectural, mais plutôt une analyse suffisamment poussée pour tracer les grandes lignes et donner un panel d'orientations pour la conception de bâtiments et morceaux de villes aux performances énergétiques raisonnées [3].

Le processus de conception joue un rôle fondamental dans l'optimisation des performances d'un bâtiment : la plupart du temps, c'est pendant la phase de conception que sont faits les choix déterminant la performance énergétique et environnementale d'une construction. Par exemple, être cohérent dans les choix de la forme, l'orientation ou encore la performance de l'enveloppe peut permettre une réduction de 40 % des consommations d'énergie [27].

Références

- [01]: S Reiter, Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide a la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes, Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées Architecture et Climat, Juin 2007.
- [02]: N K Hannachi-Belkadi, Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments a faible consommation d'énergie, Thèse de Doctorat, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB, 31 Mars 2010.
- [03]: L Arantes, L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale, Thèse de Doctorat Université de Grenoble, Spécialité : IMEP2 / Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Electrochimie, le 23 janvier 2013.
- [04]: H Afra, Réglementation Thermique et Efficacité Energétique du Bâtiment, The First Algerian-British Energy Forum Sustainable Partnership In Renewable energy efficiency, The Appropriate Solution for Climate Change, Algiers - Hilton Hotel, 04 Mars 2013.
- [05]: M Trocmé, Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, le 26 novembre 2009.
- [06]: P Meukam, Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Université de Yaoundé I, 10 décembre 2004, A Yaoundé.
- [07]: I A Henaoui, les Cistacées dans la région de Tlemcen (Nord-Ouest Algérien): aspects inflammabilité, combustibilité et cartographie, Thèse de Doctorat en Sciences (Option: Ecologie Végétale), Université de Tlemcen, 08 Décembre 2013.
- [08]: T Benlatreche, Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics, Thèse de Magister Option: Architecture, Université de Constantine, Année universitaire 2005-2006.
- [09]: R Kharchi, Etude énergétique de chauffage, rafraîchissement et eau chaude sanitaire d'une maison type en Algérie, Thèse de Doctorat en Physique Énergétique et Matériaux, Université de Tlemcen, 1^{er} Juillet 2013.
- [10]: Guide: CSTB le future en construction, concilier efficacité énergétique et acoustique dans le Bâtiment, DGALN Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, Référence Y09 12 0000494.
- [11]: K Benhalilou, Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment cas du climat semi aride, Magistère en Architecture Bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [12]: A Kemajou, I Mba, Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude application au cas des régions climatiques camerounaises, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14 N°2 (2011) 239–248.
- [13]: O Mansouri, L'influence de la réflectivité des matériaux (albédo) sur la modification du microclimat et le confort thermique extérieur dans un canyon urbain: cas du coudait de Constantine, Mémoire de Magister, option: Architecture Bioclimatique, 2008.

- [14]: D Samri, Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique, Thèse de Doctorat en Génie Civil, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [15]: R Peuhkuri, Moisture dynamics in building envelopes, PhD Thesis, Report R-071, Denmark: Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2003.
- [16]: A Fick, Über diffusion, Annalen der Physik und Chemie, Vol 94, p. 59–86, 1985.
- [17]: D A De Vries, The theory of heat and mass transfer in porous media revisited, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 30(7), 1343- 1350, 1987.
- [18]: S M A Bekkouche, T Benouaz, M Hamdani, M K Cherier, M R Yaiche, N Benamrane, Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aerulic comfort in hot climate, Journal of Building Engineering, 01 (2015) 42–52 Elsevier, 2015
- [19]: G Ritoux, Evaluation numérique des facteurs de forme, Revue de Physique Appliquée 17 (1982) 503–515.
- [20]: C M A HADDAM, Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de doctorat en physique électronique et modélisation, Université de Tlemcen, 2015.
- [21]: T Gallauziaux, D Fedullo, Le Grand livre de l'isolation, Ed. Eyrolles, 2009.
- [22]: S Bendara, L'Apport de l'indice de compacité sur les températures intérieures d'une habitation multizone, Mémoire de Magister, Université Ahmed Draïa Adrar, Décembre 2014.
- [23]: S M A Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen, Mai 2009.
- [24]: M K Cherier, Etude théorique et expérimentale de l'isolation thermique intérieure d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa, Thèse de Magistère en Physique Energies renouvelables, Université de Tlemcen, Juin 2010.
- [25]: M Hamdani, Etude et effet de l'orientation de deux pièces d'un habitat en pierre situé à Ghardaïa, Thèse de Magistère en Physique Energies renouvelables, Université de Tlemcen, Janvier 2011.
- [26]: D Zeroual, Impact des gains de chaleur sur la morphologie des bâtiments. Cas des climats chauds et arides, Thèse de Magistère, option Architecture Bioclimatique, Juin 2006.
- [27]: A M Sierra, Intégration des aspects énergétiques dans la conception du projet architectural : une approche méthodologique, Thèse de Doctorat, Spécialité: Mécanique, Sciences et Techniques Architecturales, Université de Bordeaux 1, 21 décembre 2012.

Chapitre 2

Sélection de modèles d'estimation du rayonnement solaire

CHAPITRE 2

SELECTION DES MODELES D'ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

2.1. Nature du rayonnement solaire et bilan radiatif

Le soleil est l'origine principale de l'énergie disponible sur terre. Ceci inclut l'énergie thermique directe, l'énergie éolienne et l'énergie hydroélectrique. Le soleil est une boule sphérique gazeuse de diamètre moyen égal à $1,39.10^9$ mètres, sa masse est de l'ordre de 2.10^{30} kg. Il est composé de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments. Il est généralement admis que la source d'énergie du soleil est une réaction thermonucléaire de fusion transformant des noyaux d'hydrogène (protons) en noyau d'hélium (particules) avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique centré sur la gamme du visible. Mais l'analyse du rayonnement qui nous parvient nous montre que le soleil rayonne comme s'il s'agissait d'un corps noir ayant un diamètre de $1,39.10^6$ km et porté à une température de 5762 K. La puissance rayonnée à la surface du soleil est à peu près égale à $3,79.10^{26}$ Watts. Seule une puissance de l'ordre de $1,7.10^{17}$ Watts est interceptée par la terre; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie au cycle d'évaporation – précipitation de l'atmosphère [01].

Au cours de la journée le rayonnement solaire direct s'ajoute au diffus et au rayonnement propre de l'atmosphère pour constituer la partie positive du bilan. Au contraire, l'énergie réfléchi par le sol et les nuages, ainsi que les pertes telluriques en sont les éléments négatifs. Le bilan radiatif est la somme algébrique de ces différentes quantités. La figure 2.1 représente un schéma descriptif des échanges radiatifs entre le sol et l'atmosphère. Si on admet qu'à la limite de l'atmosphère, la terre reçoit du soleil 5.5 KWh/m² jour le sol reçoit 47% de cette valeur dont 31% a traversé directement l'atmosphère et 16% a été diffusée. La réflexion sur différentes couches atmosphériques cause une perte de 23%, la réflexion sur le sol 7%, la diffusion par les aérosols 6%, d'où une perte de 36%. L'absorption par l'air représente 17%.

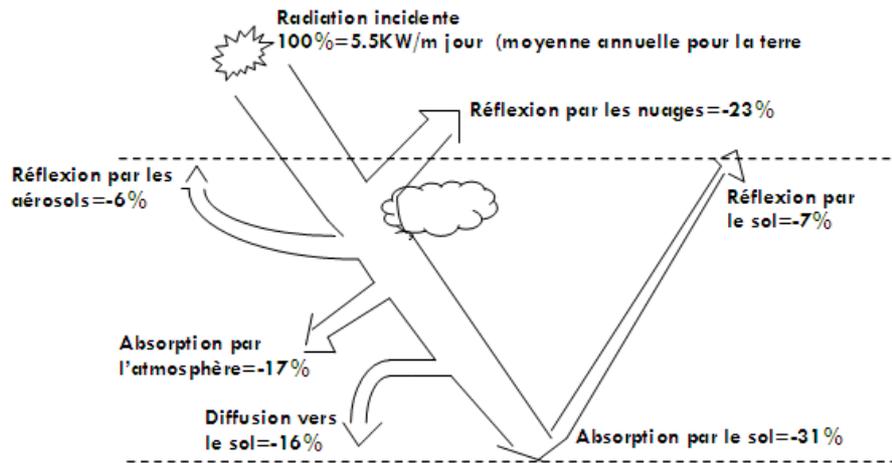


Figure 2.1. Bilan énergétique des échanges radiatifs entre le sol et l'atmosphère

2.2. Objectifs et contexte du travail

La connaissance du gisement solaire en un site donné dépend de la disponibilité des appareils de mesure sur ce site ou à proximité. Or, le réseau météorologique est en général peu dense. C'est pour cette raison que l'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'architecture solaire et bioclimatique. Avant d'aborder l'étude du rayonnement solaire reçu au sol, il serait très utile de donner quelques notions de base. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer des grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation hors atmosphère.....etc. Dans cette partie, nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- Les grandeurs astronomiques,
- Le rayonnement hors atmosphère,
- Les effets de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.

Par ailleurs, plusieurs études ont montré la possibilité d'estimer le rayonnement solaire global d'une surface quelconque au sol. Le modèle nécessite des données mesurées pour tester sa validité, ces dernières sont effectuées à l'aide des pyranomètres. Nous avons ensuite choisi comme exemple d'application les sites de Ghardaïa et Bouzaréah (Alger), le choix de ces sites s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques sur la différence de climat. Les deux sites ont des conditions climatiques différentes; Bouzaréah est un grand arrondissement d'Alger, ville côtière, et Ghardaïa est une ville saharienne située au Nord du Sahara. Les données du rayonnement solaire (global, diffus et direct) utilisées proviennent de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, (URAER) d'une part et du Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah, (CDER) d'autre part.

Nous voulons aboutir à des modèles fiables et adéquats qui peuvent être utilisés durant toutes les phases de nos travaux. Nous allons ensuite importer les données d'irradiations solaires générées par METEONORM et les transformer au format TMY pour les utiliser dans l'environnement de simulation TRNSYS. On s'est intéressé aussi à une étude comparative entre les résultats obtenus par TRNSYS et METEONORM et trois modèles connus dans la littérature. L'outil TRNSYS est aujourd'hui un outil de référence au niveau mondial notamment dans le domaine de la simulation dynamique des bâtiments.

L'élément Type 109 TMY2 est un fichier météo dans TRNSYS, il permet à la fois : la lecture des données météorologiques à travers des intervalles réguliers de données climatiques et la simulation du rayonnement solaire. Le Type 109 lit un fichier de données météorologiques conformément à la norme TMY2. Le format TMY2 est utilisé par "National Solar Radiation Data Base USA", mais ce type de fichier peut être généré par de nombreux programmes, tels que METEONORM [02]. Les valeurs réelles vont être donc collectées des stations radiométriques et ensuite transformées sous forme de fichiers météo TMY2 pour les deux sites Bouzaréah et Ghardaïa. Ces données contiennent la température extérieure, l'humidité relative de l'air, la vitesse et la direction du vent, et les éclairagements solaires (direct, diffus et global). Les mesures choisies couvrant l'année 2013, allant du 01/01/2013 au 31/12/2013. A cet effet, pour les simulations annuelles, les données climatiques ont été générées par le logiciel METEONORM qui calcule les données nécessaires à partir des moyennes mensuelles d'ensoleillement et de température, enregistrées à long terme pour chaque région climatique. Les valeurs horaires d'ensoleillement global, la température ainsi que d'autres paramètres météorologiques peuvent alors être générés par l'intermédiaire des algorithmes de calcul inclus dans le programme [03]. L'utilisateur peut importer ses propres données de mesure ou les interpoler pour n'importe quel point de la surface du globe. La première étape consiste en la détermination des différents paramètres astronomiques, et plus précisément la position exacte du soleil quel que soit le moment de l'année. Avant toute chose, il est nécessaire de définir les deux concepts indispensables en vue de situer un lieu dans le monde: la latitude φ et la longitude λ . Elles sont fondées respectivement sur la position des parallèles qui forment le tour du globe terrestre en passant par les deux pôles et qui se réfèrent au méridien de Greenwich [04,05].

2.3. Mouvement de la terre autour du soleil

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

qu'elle en est la plus éloignée: 152 millions de Km, la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle δ avec la normale du plan de l'écliptique [06, 07].

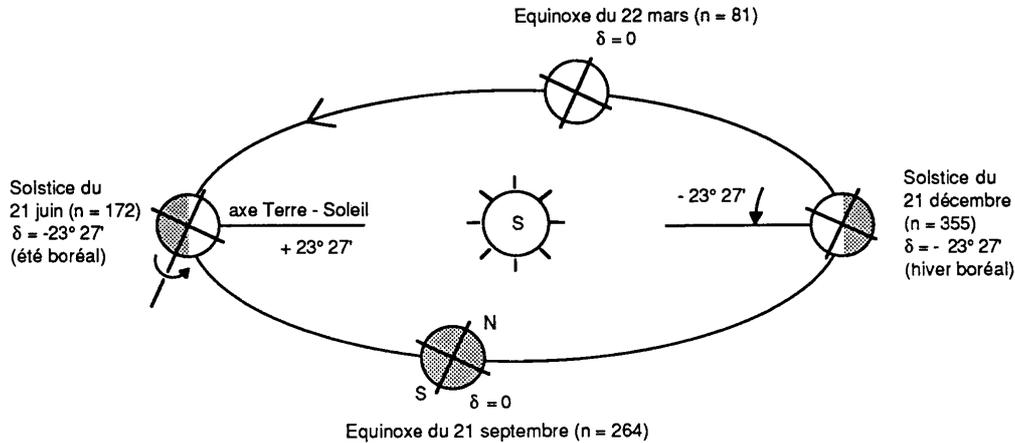


Figure 2.2. Mouvement de la terre autour du soleil

2.4. Rayonnement solaire hors atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre est en fonction de la constante solaire I_0 et de la correction de la distance Terre-Soleil [06]. La constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est de 1367 W/m^2 . I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable (trajectoire elliptique) [07]. La correction terre soleil est donnée par:

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

La constante solaire corrigée est:

$$I = I_0 C_{ts} \quad (2.2)$$

Dans le modèle de R.sun, la correction terre soleil est donnée par la formule suivante [08-10]:

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

Avec

$$N' = 2\pi \times \frac{N}{365.25} \quad (2.4)$$

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

2.5. Position du soleil

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

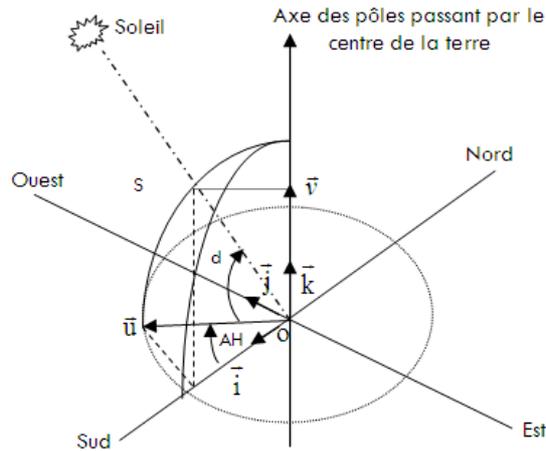


Figure 2.3. Repère équatorial

2.5.1. Coordonnées équatoriales

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

2.5.1.1. Déclinaison du soleil

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial [10].

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

La déclinaison varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. La déclinaison solaire utilisée dans le modèle de R.sun est donnée par l'expression suivante [10]:

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

2.5.1.2. Angle horaire du soleil

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le Sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

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

Dans le modèle R.sun, l'angle horaire est donné par l'équation suivante [08-10]:

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

2.5.1.3. Temps solaire vrai

Pour que les formules de $\sin(h)$ et $\sin(a)$ soient directement utilisables, il faut relier l'angle horaire H au temps légal. Le temps solaire vrai est défini à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. La terre fait un tour complet en 24H, à midi (12H) lorsque le soleil est au zénith, on a donc [11] :

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

TSV : temps solaire vrai qui est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence.

H : vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vrai

TL : temps légal (donné par une montre)

DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 pour l'Algérie)

DE = 1 heure en hiver et 2 heure en été pour la France par exemple

E_t : est la correction de l'équation des temps

Cette correction varie au cours de l'année de -14,3 mn à 16,4 mn, elle peut être calculée par la formule approchée 2.10:

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

La correction E_t est calculée en minutes et en fraction décimale de la minute.

λ : longitude de lieu, en degrés.

2.5.2. Coordonnées horizontales

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

2.5.2.1. Hauteur du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. $h=0$: correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ et -90° . La hauteur du soleil a été adoptée par Capderou [11 -17].

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

φ : latitude de lieu.

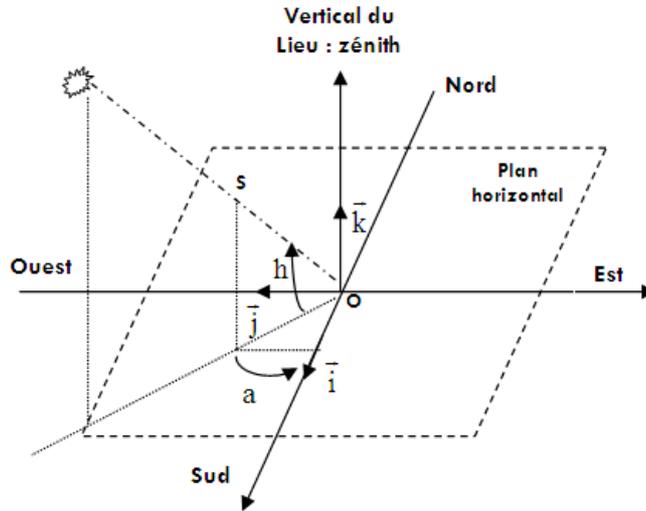


Figure 2.4. Repère équatorial

2.5.2.2. Azimut du soleil

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction Sud. Dans l'atlas solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (2.12) pour calculer l'azimut du soleil [11 -17]:

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

L'azimut est compris entre -180 et 180 [10]. R.sun a utilisé une équation qui dépend de la déclinaison solaire δ , la latitude du lieu φ et de l'angle horaire H.

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

2.6. Orientation d'un plan

Un plan quelconque est défini par deux angles:

- γ : la hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal,
- α : l'azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du Sud
- β : l'inclinaison du plan par rapport au plan horizontal ; elle est donnée par l'équation suivante:

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

2.7. Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan. Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales [10-13]:

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

En coordonnées horaires:

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

2.8. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [17]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'atlas solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante [17] :

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

En 1989, Kasten et al [18-22] donnent une expression pour m_A qui est devenue largement utilisée. Le modèle de R.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

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

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

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

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

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

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

h_0 : est l'altitude du soleil donnée par l'équation (2.20).

2.9. Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke [19] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [19] a utilisé les données spectrales publiées par Feussner en 1930 [09-10]. Il a proposé aussi l'expression (2.20) pour δ_R connue sous le nom de "pyrhéliométrique de Kasten", dont la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique est prise en compte.

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

Dans cette formule, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: CO_2 , O_2 , NO_2 et le CO n'est pas prise en compte. Dans l'atlas solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule pyrhéliométrique de Kasten. En 1986, Louche [18-22] ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4^{ème} ordre pour la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour δ_R [18-23]. Le modèle R.sun a exploité la formule ajustée de Kasten pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule δ_R comme suit:

- Pour $m_A < 20$

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

- Pour $m_A > 20$

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

2.10. Modèle de R.sun

2.10.1. Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [18-23]. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser. Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur T_L selon la formule suivante [18],

$$I_N = I \times \exp(-T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (2.25)$$

La détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement [18]. La plupart des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site [23]. Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles. Par contre, des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes [18-23]. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les données du projet Soda [24] mis en disposition sur un site Web. La méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke.

2.10.2. Eclairement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair

Le rayonnement direct normal B_{0C} est exprimé en fonction du facteur T_{LK} selon la formule suivante [06,07]:

$$B_{0C} = I \times \exp \{ -0.8662 T_{LK} \times m \times \delta_R (m) \} \quad (2.26)$$

Le terme $-0.8662 T_{LK}$ est le deuxième facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair (sans dimension) corrigé par Kasten [09,10].

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

$$B_{hc} = B_{0C} \times \sin h_0 \quad (2.27)$$

2.10.3. Eclairement diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair

Puisque le ciel sans nuage devient plus trouble, donc l'éclairement diffus augmente lorsque l'éclairement direct diminue. L'estimation de la composante diffuse sur un plan horizontal D_{hc} est effectuée en faisant le produit de l'éclairement énergétique I normal extraterrestre, le facteur de transmission (T_n est en fonction uniquement du facteur de trouble atmosphérique de Linke corrigé T_{LK}) et une fonction du diffus de l'altitude solaire F_d qui ne dépend que de l'altitude solaire h_0 [06,07].

$$D_{hc} = I \times T_n(T_{LK}) \times F_d(h_0) \quad (2.28)$$

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

$$T_n(T_{LK}) = -0.051843 + 0.030543 T_{LK} + 0.0003797 T_{LK}^2 \quad (2.29)$$

La fonction de l'altitude solaire F_d est donnée par l'expression (2.30).

$$F_d (h_0) = A_1 + A_2 \sin h_0 + A_3 \sin^2 h_0 \quad (2.30)$$

A_i sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L corrigé défini par les expressions suivantes [08,09]:

$$A'_1 = 0.26463 - 0.061581 T_{LK} + 0.0031408 T_{LK}^2 \quad (2.31)$$

$$A_1 = 0.0022 T_n(T_{LK}) \quad \text{si} \quad A'_1 T_n(T_{LK}) < 0.0022 \quad (2.32)$$

$$A_1 = A'_1 \quad \text{si} \quad A'_1 T_n(T_{LK}) \geq 0.0022 \quad (2.33)$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_{LK} - 0.011161 T_{LK}^2 \quad (2.34)$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T_{LK} + 0.0085079 T_{LK}^2 \quad (2.35)$$

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

$$G_{hc} = B_{hc} + D_{hc} \quad (2.36)$$

2.10.4. Eclairement direct incident sur un plan incliné par ciel clair

Le rayonnement direct normal sur un plan incliné B_{ic} est obtenu en utilisant la relation suivante:

$$B_{ic} = B_{0c} \sin \delta_{exp} \quad (2.37)$$

Ou bien

$$B_{ic} = B_{hc} \sin \delta_{exp} / \sin h_0 \quad (2.38)$$

Avec δ_{ext} qui est l'angle d'incidence solaire mesuré entre le soleil et une surface inclinée défini dans l'équation (2.46). La position du soleil par rapport à une surface horizontale est donnée par les deux coordonnées classiques suivantes:

Altitude solaire h_0 : un angle entre la trajectoire du soleil et une surface horizontale,

Azimut A_0 : angle horizontal entre le soleil et le méridien mesuré à partir de l'Est [09]:

$$\sin h_0 = C_{31} \cos T + C_{33} \quad (2.39)$$

$$\cos A_0 = (C_{11} \cos T + C_{13}) / \left((C_{22} \sin T)^2 + (C_{11} \cos T + C_{13})^2 \right)^{1/2} \quad (2.40)$$

Avec

$$C_{11} = \sin \varphi \cos \delta \quad (2.41)$$

$$C_{13} = -\cos \varphi \sin \delta \quad (2.42)$$

$$C_{22} = \cos \delta \quad (2.43)$$

$$C_{31} = \cos \varphi \cos \delta \quad (2.44)$$

$$C_{33} = \sin \varphi \sin \delta \quad (2.45)$$

Dans le modèle R.sun, nous avons mis une déclinaison du soleil [rad] conformément à [09,23]:

$$\delta = \arcsin(0.398 \times \sin(N' - 14 + 0.0355 \sin(N' - 0.0489))) \quad (2.46)$$

La position du soleil par rapport à une surface inclinée est définie par l'angle δ_{ext} [11]. Si la surface inclinée est définie par l'angle d'inclinaison δ et l'azimut α (un angle entre la projection de la normale sur la surface horizontale et l'Est) alors:

$$\sin \delta_{\text{exp}} = C'_{31} \cos(T - \lambda') + C'_{33} \quad (2.47)$$

Où:

$$C'_{31} = \cos \varphi' \cos \delta \quad (2.48)$$

$$C'_{33} = \sin \varphi' \sin \delta \quad (2.49)$$

Et:

$$\sin \varphi' = -\cos \varphi \sin \beta \cos \alpha + \sin \varphi \cos \beta \quad (2.50)$$

$$\text{tg} \lambda' = -(\sin \beta \sin \alpha) / (\sin \varphi \sin \beta \cos \alpha + \cos \varphi \cos \beta) \quad (2.51)$$

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

$$\cos T_h^{\text{rs}} = -C_{33} / C_{31} \quad (2.52)$$

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

$$\cos(T_i^{\text{rs}} - \lambda') = -C'_{33} / C'_{31} \quad (2.53)$$

2.10.5. Eclairage diffus incident sur un plan incliné par ciel clair

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

- Si $h_0 \geq 0.1 \text{ rad}$, c'est-à-dire si on considère que $h_0 \geq 5.7^\circ$

$$D_{ic} = D_{hc} \left\{ F(\gamma_N)(1 - K_b) + K_b \sin \delta_{exp} / \sinh_0 \right\} \quad (2.54)$$

- Si $h_0 < 0.1 \text{ rad}$

$$D_{ic} = D_{hc} \left\{ F(\gamma_N)(1 - K_b) + K_b \sin \gamma_N \cos A_{LN} / (0.1 - 0.008h_0) \right\} \quad (2.55)$$

$$A_{LN}^* = A_0 - A_N \quad (2.56)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* \quad \text{si } -\pi \leq A_{LN}^* \leq \pi \quad (2.57)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* - 2\pi \quad \text{si } A_{LN}^* > \pi \quad (2.58)$$

$$A_{LN} = A_{LN}^* + 2\pi \quad \text{si } A_{LN}^* < -\pi \quad (2.59)$$

$$K_b = B_{hc} / G_{0h} \quad (2.60)$$

Où G_{0h} [W.m^{-2}] est calculée comme suit:

$$G_{0h} = G_0 \sinh_0 \quad (2.61)$$

2.11. Modèle de Perez

Ce modèle utilise des algorithmes plus évolués qui considèrent l'irradiation diffuse comme anisotrope. Il est basé sur une analyse plus détaillée des trois composants du rayonnement diffus.

2.11.1. Estimation du rayonnement solaire sur des surfaces inclinées

Plusieurs recherches ont été effectuées pour modéliser la radiation solaire reçue sur une surface inclinée à partir de rayonnement à l'horizontale. Cette modélisation est très utile pour simuler la performance de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, ainsi que pour les simulations des bâtiments. Tous les modèles de rayonnement en surface inclinée utilisent les mêmes techniques pour calculer le rayonnement direct sur une surface inclinée; ils ne diffèrent que par l'estimation d'un rayonnement diffus sur une surface inclinée. En terme de précision, et

dans l'environnement de simulation TRNSYS, une étude en 2006 s'est portée sur une comparaison des différents modèles de calcul de rayonnement solaire incidents sur des surfaces inclinées. TRNSYS recommande que les utilisateurs choisissent d'utiliser le haut-modèle de Perez 1987 (Laboratoire d'énergie solaire, 2006). L'étude mentionnée démontre que ce modèle est le meilleur, et il est précis à 7,9% selon les travaux menés par les références [25-29]. En concordance à ces résultats, ce dernier sera utilisé tout au long de ce présent projet.

2.11.1.1. Irradiation diffuse

Le modèle de Perez est un modèle de ciel anisotrope (l'énergie n'est pas distribuée de façon uniforme dans le ciel). L'équation (2.62) montre la façon dont est calculé le total de l'énergie diffuse selon ces trois paramètres, le ciel, le circumsolar et l'horizon. L'expression mathématique du diffus est donnée par [30]:

$$I_{d,T} = I_d (1 - F_1) \frac{1 + \cos\beta}{2} + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin\beta \quad (2.62)$$

Dans le cas présent, la composante de l'horizon ne sera pas utilisée puisque dans un contexte urbain il est rare d'avoir une vue parfaite sur l'horizon. L'équation devient:

$$I_{d,T} = I_d (1 - F_1) \frac{1 + \cos\beta}{2} + I_d F_1 \frac{a}{b} \quad (2.63)$$

Où :

F_1 : Coefficient d'éclat du ciel

I_d : Irradiation diffuse à l'aide de fichier météo (kWh)

Les autres composantes dépendent de la visibilité donc des angles géométriques. Les équations (2.64-2.65) montrent comment obtenir les paramètres a et b.

$$a = \max(0, \cos\theta) \quad (2.64)$$

$$b = \max(\cos 85, \cos\theta_z) \quad (2.65)$$

Pour ce qui est du paramètre $(1 + \cos\beta)/2$, le facteur de vue du ciel est défini par la portion visible du ciel à un point étudié. Le concept d'un ciel anisotrope repose majoritairement sur les conditions climatiques qui ne sont pas réparties uniformément dans le ciel. C'est pourquoi, Perez et son équipe se sont interrogés sur le problème. Ils ont donc trouvé que la luminosité par rapport à une surface au sol varie sur toute la surface du ciel. C'est par des facteurs de luminosité au **tableau 2.1**, calculés statistiquement par Perez en 1987, qu'il est possible d'établir la relation anisotrope. C'est à l'aide de ces facteurs qu'il est possible de calculer le coefficient d'éclat F_1 selon l'équation (2.66) utilisée dans l'équation (2.64).

$$F_1 = \max[F_{11} + F_{12}\Delta + (\pi\theta_Z/180) F_{13}] \quad (2.66)$$

Où :

Δ : paramètre d'éclat donné par l'équation (2.67)

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} \quad (2.67)$$

Où :

m : masse de l'air donnée par l'équation (2.68)

I_{on} : Irradiation extraterrestre donnée par l'équation (2.69)

$$m = \frac{1}{\cos\theta_Z} \quad (2.68)$$

$$I_{on} = 1367(1 + 0.33 \cos(360n/365)) \quad (2.69)$$

Valeur de ε	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1.000-1.065	-0.018	0.705	-0.071	0.058	0.102	-0.026
1.065-1.230	0.191	0.645	-0.171	0.012	0.009	-0.027
1.230-1.500	0.440	0.378	-0.256	0.087	-0.104	-0.25
1.500-1.950	0.756	-0.121	-0.346	0.179	-0.321	-0.008
1.950-2.800	0.996	-0.645	-0.405	0.260	-0.590	-0.017
2.800-4.500	1.098	-1.290	-0.393	0.269	-0.832	0.075
4.500-6.200	0.973	-1.135	-0.378	0.124	-0.258	0.149
≥ 6.200	0.689	-0.412	0.273	0.199	-1.675	0.237

Tableau 2.1. Coefficients de luminosité, modèle de ciel de Perez

L'équation (2.70) montre comment obtenir le coefficient de clarté ε sur une base horaire.

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_b}{I_d} + 5.535 \times 10^{-6} \theta_Z''}{1 + 5.35 \times 10^{-6} \theta_Z''} \quad (2.70)$$

Cet ensemble d'équations permet de calculer les trois composants du rayonnement diffus sur une surface inclinée. Il reste à rajouter le rayonnement direct et réfléchi afin d'obtenir le rayonnement global sur un plan incliné [25-30].

2.12. Outils de simulation

Les outils de simulation restent importants pour tout projet solaire afin de minimiser les risques d'erreur et de dimensionner au mieux une installation. Au cours de ce travail, différents programmes ont été nécessaires pour le traitement des données climatiques et pour la simulation du rayonnement solaire, à savoir :

- TRNSYS : simulation thermique et comparaison des résultats obtenus, simulation des systèmes énergétiques (solaire, récupérateur de chaleur, réseau de production énergétique dynamique du bâtiment, atrium) etc.
- METEONORM : génération de fichiers météo

2.13. Chronologie et architecture des simulations du rayonnement sur TRNSYS

2.13.1. Modélisation du rayonnement sur TRNSYS

TRNSYS est un logiciel destiné pour modéliser des systèmes transitoires. TRNSYS a été construit avec des bibliothèques qui contiennent des sous-programmes de composants communs des systèmes d'énergie thermique. C'est un programme qui offre en option un simulateur de données climatiques. Il est assez représentatif des modèles qui ont pu être développés depuis une dizaine d'années, ce simulateur génère de manière aléatoire une année artificielle à partir des moyennes mensuelles de température, d'irradiation solaire globale sur un plan horizontal et d'humidité spécifique. Le moteur de simulation résout des équations algébriques et différentielles qui représentent l'ensemble du système. Dans les simulations de construction, tous les composants du système sont résolus simultanément avec l'enveloppe du bâtiment à chaque pas de temps [31-35]. Les composants sont configurés et assemblés à l'aide d'une interface visuelle entièrement intégrée connu sous le nom TRNSYS Simulation Studio. Chaque composant est représenté sous la forme d'une boîte, ce qui nécessite un certain nombre de paramètres constants. Les entrées dépendent du temps et ainsi produisent des sorties en fonction du temps. Un diagramme de flux d'information indique la manière dont tous les composants du système sont interconnectés. Une sortie donnée peut être utilisée comme une entrée pour un nombre quelconques d'autres composants.

TRNSYS est parmi les codes de simulation énergétique du bâtiment, il comprend quatre modèles de rayonnement différents, et différentes entrées de rayonnement solaire. L'isotrope, Hay-Davies, Reindl, et Perez sont des modèles qui ont été utilisés avec des entrées de mesure de l'irradiation solaire globale horizontale et directe. Il est à noter que le modèle de Perez donne la meilleure approximation puisque c'est le modèle qui s'approche le mieux vers les

données du rayonnement diffus [31-35]. Les données nécessaires au modèle de Perez pour la simulation sont l'éclairement direct normal et horizontal diffus ainsi que l'angle zénithal du soleil. Ces paramètres sont disponibles directement ou indirectement par le biais de calculs simples à partir de données classiques des stations météorologiques. Pour avoir des résultats plus fiables, nous avons en premier lieu utilisé les données sous forme de fichiers météo de type TMY2. Ces fichiers représentatifs d'une durée d'un an et d'un pas de temps horaire sont des années typiques météorologiques ou TMY pour (typical meteorological year), qui se rapprochent le plus aux conditions climatiques moyennées à long terme vu les résultats des comparaisons effectuées [31-35].

2.13.2. Utilisation et traitement des données climatiques pour la simulation du rayonnement solaire par TRNSYS Type 99 Format user

Les considérations climatiques sont très importantes dans la construction et l'aménagement urbain. L'intégration des techniques solaires passives dans un bâtiment de conception, visant la minimisation des besoins en chauffage, refroidissement, ventilation et éclairage, permet d'offrir un confort thermique tout en utilisant des sources d'énergie naturelles. Nous citons à titre d'exemple: rayonnement solaire, l'air extérieur, les surfaces humides, la végétation, les gains internesetc.

Les systèmes solaires passifs, varient d'un climat à l'autre. A titre indicatif, dans un climat froid l'objectif de l'architecte est de concevoir un bâtiment de façon à ce que les gains solaires sont maximisés, mais dans un climat chaud le but se décline à réduire les gains solaires, maximiser la ventilation naturelle... [31-35]. D'une manière générale, pour l'estimation du rayonnement solaire il faut faire recours à des méthodes et des logiciels qui peuvent donner des résultats fiables qui sont en bon accord avec les mesures expérimentales et qui se rapprochent de la réalité. A ce propos, dans notre étude nous avons opté pour des méthodes utilisées pour le traitement des données climatiques dans le cadre de la simulation du rayonnement solaire. Les deux méthodes de simulation nécessitent des données climatiques:

- La première à l'aide de TRNSYS avec le type 99, noté par TRNSYS-EXP-Type 99 à travers des données climatiques réelles pour les deux sites URAER Ghardaïa et CDER Bouzaréah.
- La deuxième à travers des interpolations suivant les coordonnées géographiques, le type et la situation des stations (dépression, situation ouverte), noté par TRNSYS-MN-TMY2 pour les deux sites.

Pour générer des données météorologiques détaillées sur la base des données réelles mesurées sous le format TMY2 user, il y a des méthodes statistiques, représentées sous forme de générateurs de données météo tels que le logiciel TRY, RNEOLE, TRNSYS et le logiciel de METEONORM. Les données nécessaires pour une simulation et traitement des données météo

par TRNSYS Type 99 sont données dans le **tableau 2.2**. Cependant les données météo trouvées dans les fichiers offerts par le site du logiciel METEONORM ou soit par la forme TMY2 suivant les mesures expérimentales ne correspondent pas aux mêmes unités, ce qui a nécessité des transformations [31-35].

Col	Description	Unité	Variable
1	Rayonnement solaire Direct sur l'horizontale	W/m ²	IBEAM_H
2	Température ambiante	°C	TAMB
3	Rayonnement solaire Diffus sur l'horizontale	W/m ²	IDIFF_H
4	Vitesse du vent	m/s	WSPEED
5	Direction du vent	degrés	WDIR
6	Humidité relative	%	RHUM

Tableau 2.2 : Composition des fichiers météo de TRNSYS

Afin de simplifier le modèle pour la simulation, dans notre cas nous avons utilisé le TYPE 99-User pour importer facilement les fichiers météo réels pour les deux sites Alger (Bouzaréah) et Ghardaïa. Ces données climatiques contiennent 5 paramètres horaires pour l'année 2013 qui sont enregistrées. Ces paramètres sont le rayonnement solaire, la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent. Ce module combine la lecture et le traitement des données radiométriques, c'est à dire qu'il calcule l'éclairement direct, diffus et l'angle d'incidence pour plusieurs surfaces selon leur inclinaison et leur orientation.

2.13.3. Vue d'ensemble de TRNSYS

La première étape consiste tout d'abord à s'assurer que le modèle est adéquat puis l'intégrer dans le logiciel. TRNSYS comprend trois interfaces différentes: Simulation Studio, TRNBuild et TRNEdit.

2.13.3.1. Simulation studio TRNSYS

TRNSYS Studio assure l'interface entre le schéma de principe du projet à modéliser et TRNSYS d'une manière intuitive, permettant de développer des applications de simulation. Un projet de simulation consiste à choisir un ensemble de modules et à décrire ensuite les interactions entre ceux-ci. La traduction des algorithmes se fait par le moteur de simulation TRNDll.dll et son exécutable TRNExe.exe [30]. Chaque module représente un sous-programme et agit comme une boîte (qu'il est cependant possible d'ouvrir).

La conception modulaire de TRNSYS permet aux utilisateurs de contrôler les organigrammes. TRNSYS offre une forme visuelle, modulaire et schématique de la structure et offre des simulations durant les 365 jours/8760 heures de l'année. L'exemple ci-dessous représente la

fenêtre principale de TRNSYS. Prenons l'exemple suivant avec le "Type 99-user format" qui contient les fichiers "météo" et qui comporte plusieurs fonctionnalités. Le projet est effectué sur l'interface graphique de simulation de TRNSYS appelé "studio", suivant le schéma ci-dessous :

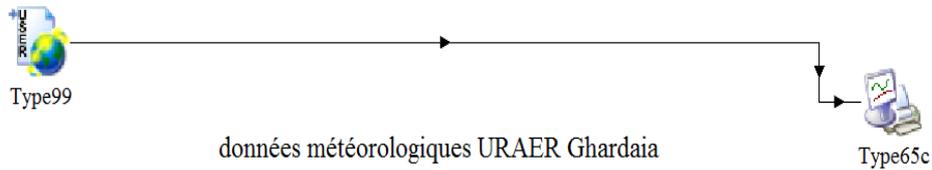


Figure 2.5. Projet de validation météo

Le "Type 99" fournit les informations météorologiques, il est relié au "Type 65c" et au "System printer". Le "Type65c" est un traceur de courbes, il permet ainsi d'afficher l'évolution d'un ensemble de variables pendant le déroulement de la simulation en temps réel. Ce composant est très utile pour suivre l'évolution de n'importe quelle variable de sortie. Il permet de se rendre compte rapidement si la simulation se déroule normalement ou pas.

2.13.3.2. TRNEdit

TRNEdit est un éditeur de texte complet dédié à l'écriture, l'affichage d'entrée, les fichiers de sortie et la course paramétrique de la simulation TRNSYS. Le composant affiche une nouvelle fenêtre avec une courbe pour chaque variable connectée à ses entrées, qui permet d'exporter directement les résultats de simulation en fichier ".txt", avec l'interface des graphes ".dck", voir la **figure 2.6**.

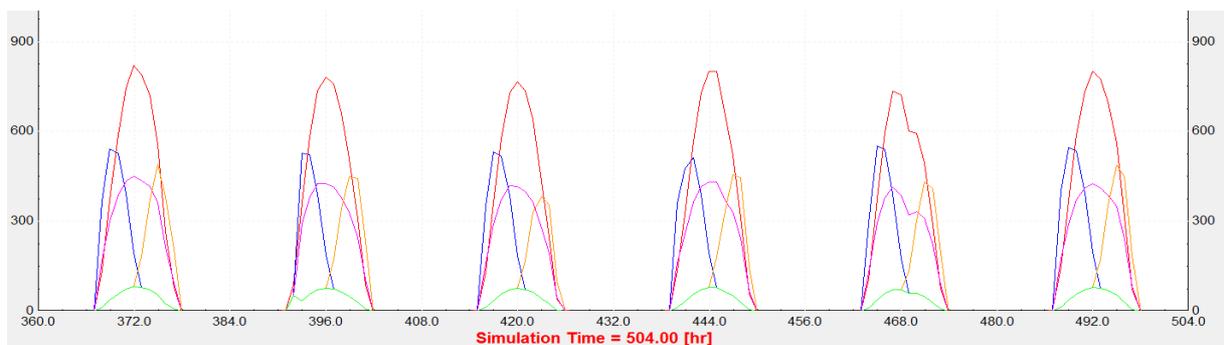


Figure 2.6. Résultats de Simulation sur TRNSYS (éclairage solaire Wm^{-2})

2.14. Génération de données climatiques sous METEONORM

Le logiciel METEONORM est développé par METEOTEST. Il fournit des bases de données pour la météo de différentes villes répertoriées en Europe ou sur d'autres continents, qui englobe à l'heure actuelle plus de 8055 stations météorologiques à travers le monde et effectue des interpolations pour les sites non répertoriés. Concernant les données météo, le

logiciel METEONORM permet de générer des fichiers de données, au format compatible avec TRNSYS, prenant en compte les données des stations météorologiques les plus proches (par triangulation) mais aussi les particularités géographiques du site (altitude, versant montagneux...). Ce logiciel est non seulement un recueil très complet de données météorologiques mais contient également des algorithmes permettant de créer, à partir des valeurs mesurées, des fichiers météo de n'importe quel endroit sur le globe.

METEONORM permet aussi de calculer le rayonnement global sur un plan incliné tout au long de l'année, plus la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent.

Grâce à l'interface graphique avec sélection par carte, c'est-à-dire à partir de la carte, on peut donner le site exact avec la position géographique (altitude, longitude, latitude), et suivant les étapes de l'application on reçoit des valeurs dans un fichier sous format TMY2 avec un affichage graphique des résultats.

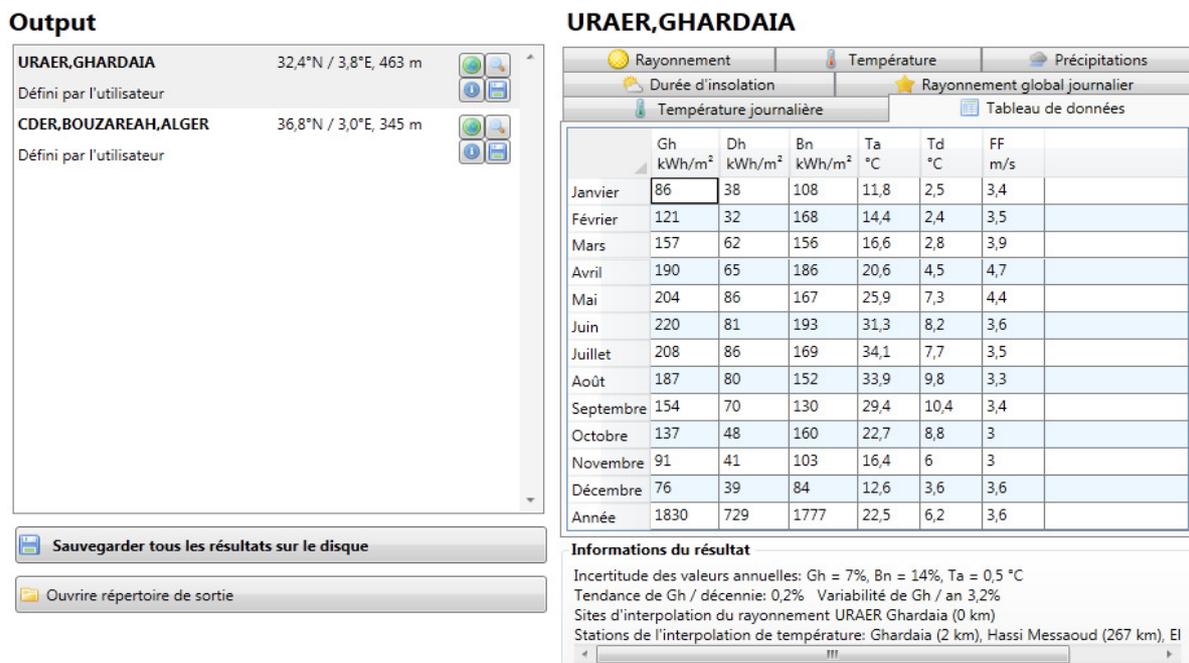


Figure 2.7. Interface graphique METEONORM

Une caractéristique commune de la plupart des logiciels de simulation est que les fichiers météo qui sont utilisés pour la simulation de la performance du bâtiment à un endroit précis sont des fichiers de saisie de texte. Traditionnellement les fichiers météorologiques pour la simulation de bâtiments sont fournis sous forme d'ensembles de données horaires dans une variété de formats. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser le format TMY2 pour effectuer la simulation pour les deux villes algériennes et aussi parce que le format TMY2 est compatible avec TRNSYS.

Les simulations peuvent se faire sur une période de temps d'une année (ou moins au choix) avec un pas de temps variable (couramment une heure).

Dans notre cas, il est impossible d'utiliser les fichiers climatiques intégrés dans la Bibliothèque puisque METEONORM en Algérie permet de générer des données climatiques fiables pour 3 emplacements (Bechar, Alger et Tamanrasset), voir le tableau (2.3).

N°	location	Lat(N°)	Lon (E°)	Alt (m)	SR	Nom de fichier
1	Bechar	31.62	-2.23	772	1	DZ-Becher-605710.tm2
2	Dar el-Beida	36.72	3.25	25	1	DZ-Darel-Beida-603900.tm2
3	Tamanrasset	22.78	5.52	1377	1	DZ-Tamanrasset-606800.tm2

Tableau 2.3 : Emplacements des villes Algériennes données par METEONORM

Donc, pour générer les fichiers climatiques de notre emplacement, on doit prendre en considération tous les paramètres et les coordonnées géographiques de Bouzaréah (CDER) à Alger puisque la position de ce dernier est différente par rapport aux coordonnées sur le fichier intégré dans ce logiciel. Nous signalons une différence entre les stations de Bouzaréah et Dar el Beida (O.N.M) à Alger. Même chose pour la région de Ghardaïa (URAER) à Ghardaïa – Algérie. Voir le tableau (2.4) pour les deux emplacements (URAER, CDER)

N°	location	Lat(N°)	Lon (E°)	Alt (m)	SR	Nom de fichier
1	URAER Ghardaïa	32.9	3.78	463	1	DZ-Ghardaia-605660.tm2
2	CDER Bouzaréah	36.8	3	345	1	DZ-bouzareah-6536 45.tm2

Tableau 2.4 : Emplacements de l'URAER et du CDER selon les coordonnées géographiques

Les simulations sont effectuées durant l'année avec un pas de temps: d'une heure (0 à 8760) à l'aide des données météorologiques de chaque ville, les données expérimentales sont données par des stations implantées sur les deux endroits. Après le traitement des fichiers, nous aurons le choix sur le type de fichier à utiliser: soit le Type 109-TMY2 pour les valeurs de rayonnement dans TRNSYS, ou bien avec les valeurs générées directement par METEONORM à partir des coordonnées géographiques. Dans une première démarche les données climatiques disponibles pour les deux sites, obtenues à l'aide de METEONORM sont analysées pour les insérer dans notre logiciel TRNSYS sous format TMY2. La figure 2.8 représente l'organigramme explicatif.

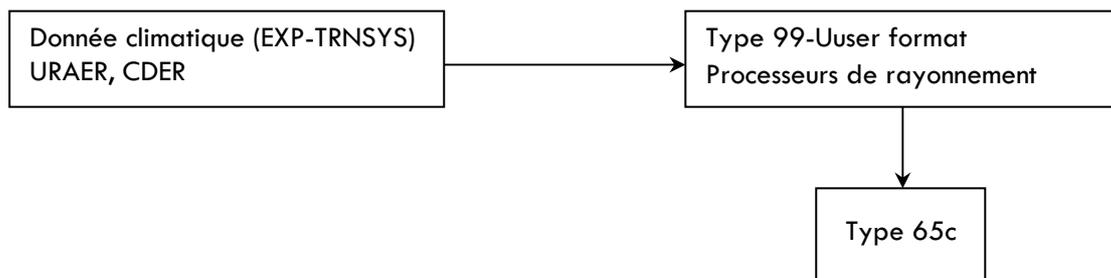


Figure 2.8. Type 99-user format à partir des fichiers climatiques expérimentaux

2.15. Confrontation des résultats obtenus par des valeurs mesurées

2.15.1. Description des sites : URAER Ghardaïa & CDER Bouzaréah Alger

Le site de Bouzaréah est situé sur la façade méditerranéenne nord Algérien à 36.8° de latitude Nord; $3,09^\circ$ de longitude Est; et à 345 mètre d'altitude [33]. La station de mesure radiométrique et météorologique de Bouzaréah CDER, Alger mesure les paramètres intervenant dans le fonctionnement des systèmes à énergies renouvelables, particulièrement les paramètres radiométriques et éoliens.

Cette station professionnelle haut de gamme est composée de [36] :

- trois pyranomètres,
- un pyréliomètre,
- un sun tracker,
- plusieurs capteurs pour la mesure de la température, de l'humidité, de la pluviométrie, de la pression et de la durée d'insolation,
- un capteur à ultrason pour la mesure de la vitesse et de la direction du vent,
- un data logger.



Figure 2.9. Station radiométrique du CDER de Bouzareah

Ghardaïa est située au centre de l'Algérie et distant de 600 km de la capitale Alger à 32.39° de latitude Nord; $3,78^\circ$ de longitude Est et à l'altitude de 463 mètres, présentant un climat désertique. L'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables URAER est située dans la ville de Ghardaïa. Une station radiométrique de haute précision a été installée à l'URAER, celle-ci utilise un système de poursuite tridimensionnel (Sun-Tracker) qui 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 thermo-hygromètre 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 lever jusqu'au coucher 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 toutes les longueurs d'ondes (entre 0.2 et 0.4 micromètre) reçues sur un plan normal. Elle est associée aussi d'un pyranomètre 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 [05].



Figure 2.10. Station radiométrique de l'URAER

Les stations de mesures sont rares à travers le territoire national. Pour l'estimation des irradiances solaires, on a recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation. Pour qu'ils soient applicables aux sites considérés, ces derniers doivent être confrontés aux valeurs réellement mesurées sur le site considéré sur une période qui couvrira les différentes saisons de l'année [05].

2.15.2. Résultats de simulation numérique

Nous présenterons dans cette partie dédiée à la simulation une confrontation des valeurs mesurées et calculées de l'éclairement solaire. Une étude comparative a été effectuée sur les éclairements solaires globaux incidents sur un plan horizontal et sur une surface inclinée à la latitude du lieu orientée vers le Sud. Pour ce faire, plusieurs journées ont été sélectionnées pour comparer les valeurs calculées par trois modèles et celles données par les stations radiométriques de Ghardaïa et de Bouzaréah (Alger). Nous allons donc confronter quelques valeurs du rayonnement solaire fournies par les stations radiométriques avec des valeurs délivrées par un programme de calcul sous le logiciel MATLAB et ceci pour des plans horizontal et incliné [05]. Les approches qui vont être comparées sont: le modèle de Perrin Brichambaut [11], la méthode empirique de Perrin Brichambaut [11] et le modèle de R.sun [23]. La fiabilité sera testée par à la fois le calcul de l'erreur relative instantanée et l'erreur quadratique moyenne. A cet égard, nous avons choisi des journées de ciel clair pendant

l'année 2013 pour juger la précision et la fiabilité de ces approches. Pour le calcul de l'erreur relative instantanée entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales nous avons utilisé l'équation suivante [05]:

$$Err = \frac{|G_{\text{mesuré}} - G_{\text{calculé}}|}{G_{\text{mesuré}}} \quad (2.71)$$

G: éclairement solaire (w/m^2).

L'erreur quadratique moyenne est donnée par la relation suivante :

$$Erqm = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{L=1}^{L=N} (G_{\text{mesuré}} - G_{\text{calculé}})^2} \quad (2.72)$$

L: nombre de mesures.

La figure 2.11 donne un aperçu général sur l'évolution de l'éclairement solaire incident sur un capteur horizontal et sur les erreurs relatives commises par les différentes approches. La figure qui suit (2.12) donne aussi une idée sur le comportement de l'éclairement solaire incident pour une inclinaison à la latitude du lieu (32°) sur le même site et durant la journée (Ghardaïa le 15 Janvier 2013). La figure 2.13 montre en temps réel le comportement de l'éclairement solaire incident pour la même inclinaison (32°) et durant le 01 Août 2013.

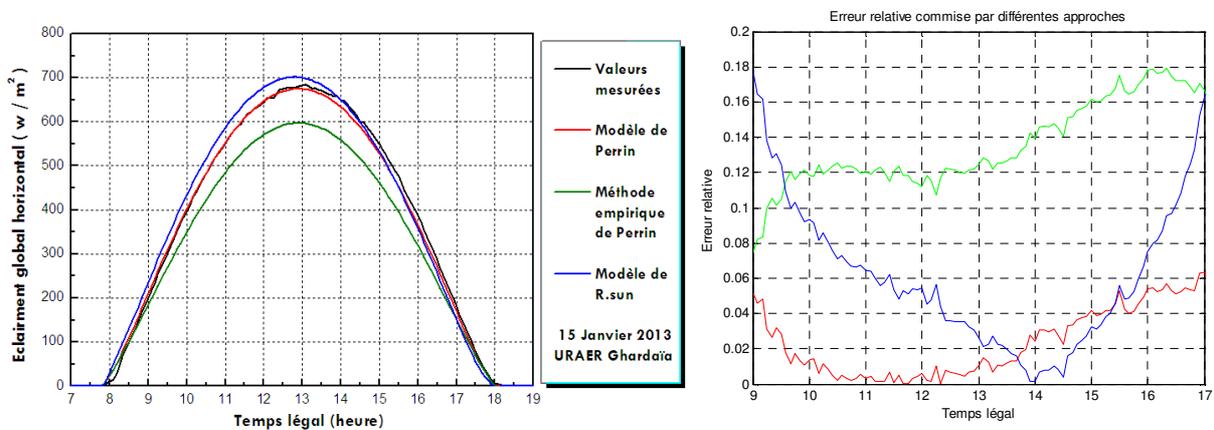


Figure 2.11. Calcul de l'éclairement global horizontal et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 15/01/2013 - URAER Ghardaïa

Les résultats du calcul de l'éclairement solaire pour le site du CDER Bouzareah sont donnés par les figures 2.14 et 2.15. La connaissance simultanée de ce paramètre permet de déterminer les quantités de rayonnement solaire reçu respectivement par une surface horizontale et une façade (surface verticale).

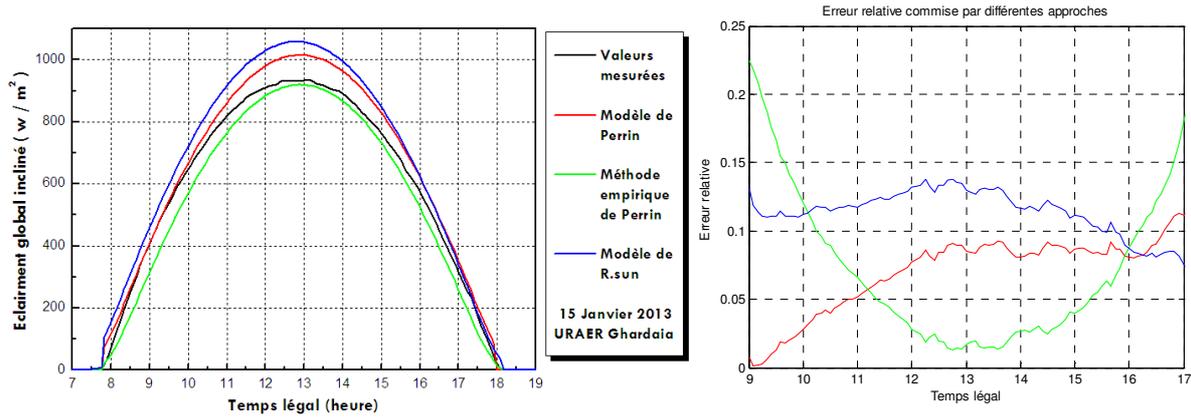


Figure 2.12. Calcul de l'éclairement global incliné (32°) et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 15/01/2013 - URAER Ghardaïa

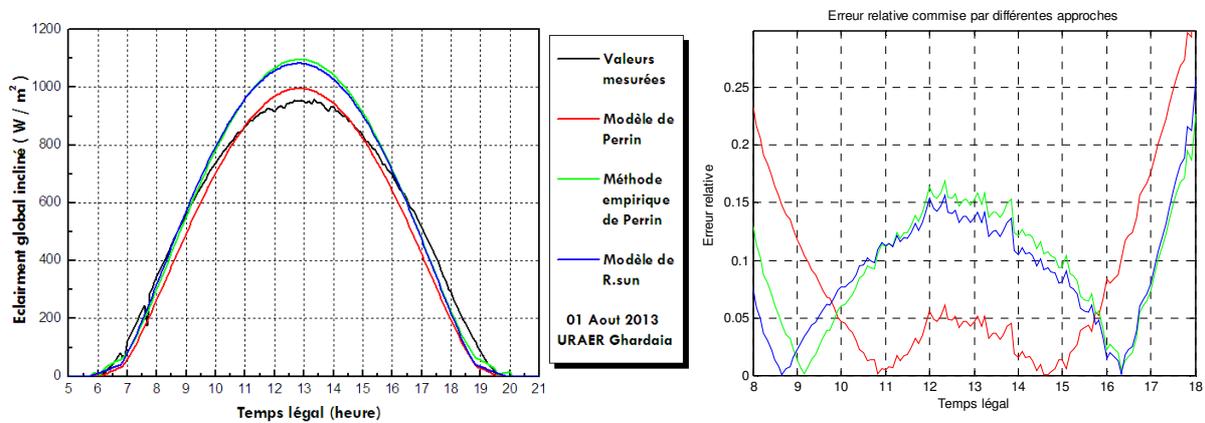


Figure 2.13. Calcul de l'éclairement global incliné (32°) et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 01/08/2013 - URAER Ghardaïa

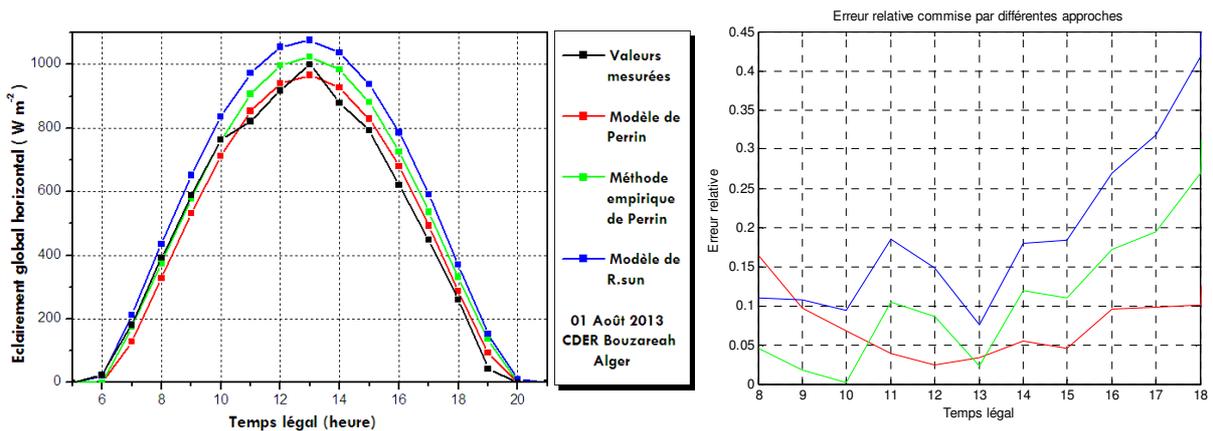


Figure 2.14. Calcul de l'éclairement global horizontal et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 01/08/2013 - CDER Bouzareah Alger

Toute la simulation entreprise ici a été en grande partie motivée par l'obtention de ces courbes qui entrent dans le calcul des charges thermiques des bâtiments en conditionnement d'air.

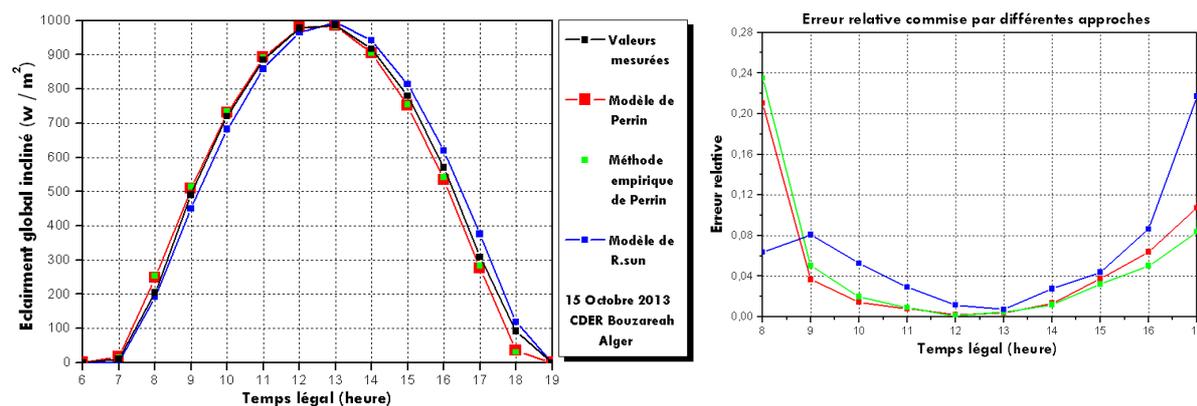


Figure 2.15. Calcul de l'éclairement global incliné (36°) et de l'erreur relative commise par différentes approches pour le 15/10/2013 - CDER Bouzareah Alger

Les résultats théoriques et expérimentaux vont être analysés par l'intermédiaire du tableau 2.5 qui donne un état récapitulatif des erreurs commises par les différentes approches.

Site	Jour	Inclinaison	L'approche utilisée	Er quadratique moyenne Wm^{-2}	Er relative maximale %	Er relative moyenne %	Er relative minimale %
URAER Ghardaïa	15 Janvier	32°	Modèle de Perrin	11.9707	06.3205	02.3613	0.0038
			Méthode empirique de Perrin	61.9798	17.9500	13.5319	7.4432
			Modèle de R.sun	26.3222	17.7636	06.1389	0.1355
	01 Août	32°	Modèle de Perrin	51.2004	11.2811	06.9430	0.1374
			Méthode empirique de Perrin	49.6767	22.4904	07.0900	1.2771
			Modèle de R.sun	81.4501	13.8139	11.4352	7.4853
CDER Bouzareah	01 Août	horizontale	Modèle de Perrin	55.2049	33.2839	08.1397	0.0615
			Méthode empirique de Perrin	77.0647	22.6798	09.7034	0.1148
			Modèle de R.sun	73.3439	25.6917	09.1870	0.0782
	15 Octobre	36°	Modèle de Perrin	42.1071	16.3665	07.4558	2.4113
			Méthode empirique de Perrin	64.3850	26.8651	10.4024	0.1797
			Modèle de R.sun	105.298	41.7312	18.9771	7.5574
			Modèle de Perrin	27.6015	21.0138	4.9705	0.1939
			Méthode empirique de Perrin	27.6623	23.5102	4.9743	0.0988
			Modèle de R.sun	33.6518	21.7070	6.2049	0.7027

Tableau 2.5 : Etats récapitulatifs des erreurs commises par les différentes approches

Nous présentons dans ce chapitre trois modèles de calcul qui permettent la détermination en fonction du temps des composantes horizontales et verticales du rayonnement solaire. Les courbes temporelles du rayonnement global pour tous les plans allant de l'horizontal au vertical peuvent ainsi être tracées en vue de la détermination des charges thermiques des locaux. En effet le manque de résultats expérimentaux fait que les calculs des charges sont presque toujours réalisés à partir des approches et des modèles empiriques qui seront en général adaptés le plus possible aux différents climats rencontrés en Algérie.

Ces résultats permettent par ailleurs de donner un avis technique sur le modèle de Perrin Brichambaut qui apparaît le plus adapté à ces deux sites et durant ces mois.

Pour les modèles proposés dans l'environnement de simulation TRNSYS, nous avons pu tracer les courbes qui représentent l'éclairement solaire reçu par des plans horizontaux et/ou inclinés conformément aux quatre modèles, avec deux formats de "Type 109-TMY2" ; format utilisé par METEONORM, et l'autre format est de Type 109 "user format".

Une comparaison a été faite entre les quatre modèles existants dans la bibliothèque du code de calcul TRNSYS. Nous avons calculé la variation du rayonnement global sur une surface horizontale et inclinée, pour la journée du 15/07/2013 à l'URAER, Ghardaïa. Comme le montre la figure 2.16, il existe une légère différence entre les quatre modèles pour les premières heures du matin pour un plan incliné, et un léger écart entre les trois modèles et le modèle de Perez pour la surface horizontale. La distinction est claire pour le modèle de Pérez puisque ce dernier est utilisé sous METEONORM comme modèle plus fiable par rapport aux trois modèles de TRNSYS. Ce modèle (Modèle de Pérez) semble plus significatif lors du calcul du rayonnement solaire diffus [37].

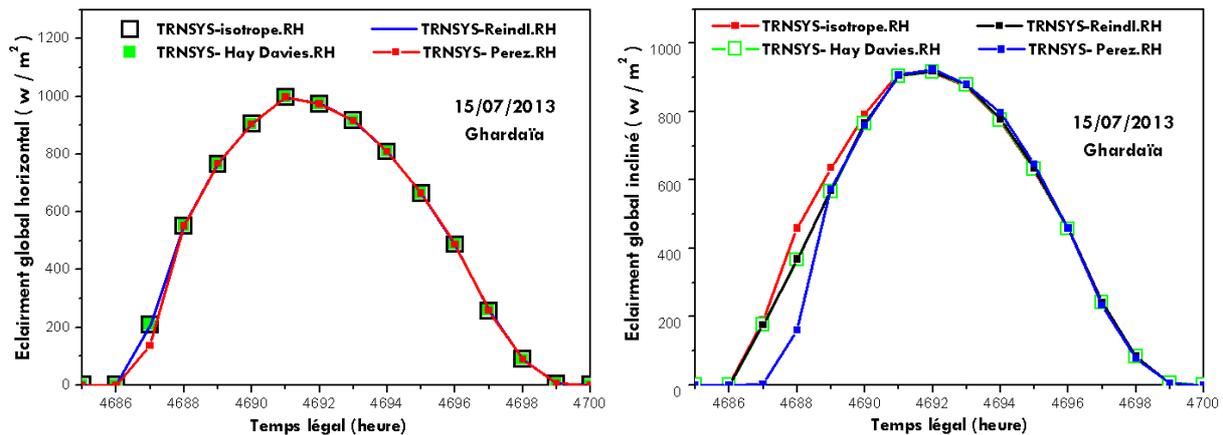


Figure 2.16. Eclairement global incident horizontal et incliné (32°) en utilisant les 4 modèles du TRNSYS, URAER Ghardaïa le 15/07/2013

La figure ci-dessous (2.17) montrent une comparaison entre les résultats obtenus par les modèles théoriques et ceux obtenus expérimentalement concernant l'évolution journalière du rayonnement solaire global.

- Les quatre modèles théoriques sur TRNSYS avec les différents processeurs du rayonnement Type 109-user format, Type 109-TMY2 sont :
 - ✓ Modèle de TRNSYS-ciel isotrope
 - ✓ Modèle de TRNSYS- Hay Davies
 - ✓ Modèle de TRNSYS- Reindl
 - ✓ Modèle de TRNSYS- Perez
- Plus les trois Modèles :

- ✓ Modèle de Perrin Brichambaut
- ✓ Méthode empirique de Perrin
- ✓ Modèle de R.sun
- Avec les données climatiques importées de METEONORM (modèle de Perez) noté par :
 - ✓ TRNSYS - MN- Perez
- plus les données climatiques expérimentales pour les sites de Ghardaïa et Bouzareah récoltées pendant une année (2013), noté par :
 - ✓ G.EXP (soit horizontale ou bien inclinée)

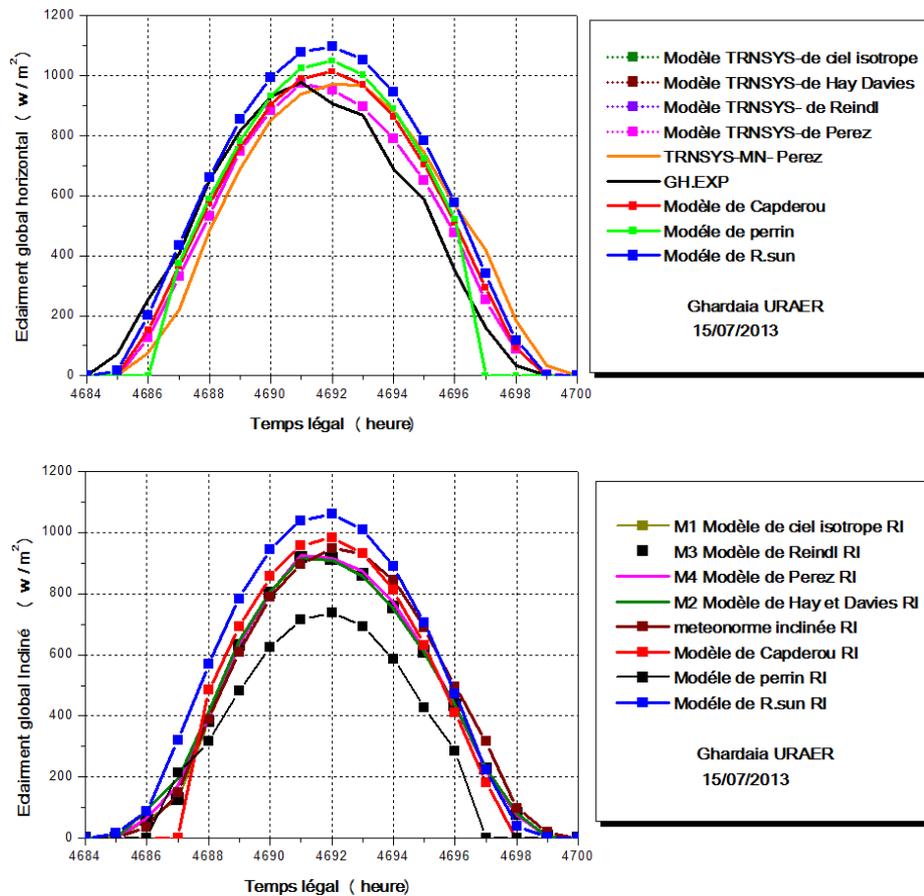


Figure 2.17. Eclairciment global incident sur des surfaces horizontales et inclinées pour différents modèles, URAER Ghardaïa le 15/07/2013

Par cette comparaison, nous avons pu montrer que plusieurs modèles et approches disponibles, peuvent être sélectionnés en vue d'effectuer des travaux de recherche dédiés à l'étude des différents problèmes ayant un lien direct avec la thermique des bâtiments.

2. 16. Conclusion

Une connaissance précise de la distribution des irradiations solaires à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs

d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances. Hélas, pour beaucoup de pays en voie de développement les mesures de l'éclairement solaire ne sont pas facilement disponibles. Il est donc, important d'élaborer des modèles d'estimation de l'éclairement solaire sur la base des données astronomiques et météorologiques.

Les étapes et les démarches qui ont été suivies permettent de choisir un modèle qui pourra être fiable et adéquat et qui peut être exploité durant les futurs travaux consacrés à l'effet de l'orientation sur le confort intérieur. Le choix sera basé conformément aux erreurs commises.

Le traitement des données a été effectué sur des mesures choisies couvrant l'année 2013. Selon les confrontations et les résultats obtenus, nous avons jugé aussi que les autres modèles: ciel isotrope, Hay Davies, Reindl et Perez donnent des résultats presque similaires pour un plan horizontal. Une différence a été constatée si on utilise le modèle de Perez avant midi solaire. Pour le plan incliné, on constate une différence considérable notamment pour le rayonnement diffus. La différence entre le modèle de Perez sous TRNSYS et Perez sous METEONORM est tout à fait claire car Perez "sous TRNSYS" est basé sur des résultats expérimentaux, en revanche le modèle de Perez sous "METEONORM" est basé sur une plateforme de mesures de 10 ans dans notre cas.

En concordance avec les résultats obtenus et faisant suite aux résultats trouvés dans mon mémoire de Magister [05], nous avons décidé d'utiliser la méthode empirique de Perrin Brichambaut pour calculer les éclaircements instantanés incidents sur les murs (surfaces verticales) de l'habitat durant la période d'Octobre jusqu'au mois de Mars. Par ailleurs, le Modèle de Perrin Brichambaut sera sélectionné pour l'estimation de l'éclairement solaire instantané incident sur les toits (surfaces horizontales) pour toute l'année. Il sera aussi appliqué pour la détermination de l'éclairement incident sur les surfaces verticales durant les mois d'Avril, Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre, bien que nous avons trouvé que le modèle de R.sun est le plus adéquat pour le mois de Juin.

Références

- [01]: B Mebarki, B Draoui, S Abdessemed, A Keboucha, S Drici, A. Sahli, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 15 N° 3 (2012) 465 - 478.
- [02]: R Hohotă, Etude numérique des puits canadiens pour la diminution des consommations énergétiques liées à la ventilation des bâtiments, IBPSA FRANCE 2008.
- [03]: <http://download.fisa.fr/PRODUITS/meteonorm.pdf>.
- [04]: M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz et M K Cherier, Etude et modélisation du potentiel solaire adéquat pour l'estimation des éclaircissements incidents à Ghardaïa, Revue Internationale d'Héliotechnique N° 43 (2011) 8-13.
- [05]: M Hamdani, Etude et effet de l'orientation de deux Pièces d'un habitat en pierre situé à Ghardaïa, Mémoire de Magistère en Physique Energies renouvelables, Université de Tlemcen, Janvier 2011.
- [06]: A Ricaud, Gisement solaire, Cythelia Sarl, Septembre 2009.
- [07]: E Torlaschi, Phénomènes radiatifs dans l'atmosphère terrestre, Cours de physique de l'atmosphère, 2003.
- [08]: K Scharmer, J Greif, The European solar radiation atlas, Vol 01, Fundamentals and Maps, Les presses de l'école des Mines Paris, 2000.
- [09]: E R Bird, R L Hulstrom, A Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces, Seri Tr -642-761 February 1981.
- [10]: J Hofierka, M Suri, The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications, Proceedings of the open source GIS - GRASS Users Conference 2002 Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [11]: S M A Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen, Mai 2009.
- [12]: M R Yaïche, S M A Bekkouche, Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie, cas d'un ciel totalement clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, 11 N°3, 2008, 423 – 436.
- [13]: M R Yaïche, S M A Bekkouche, Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire direct en Algérie, Revue Internationale d'Héliotechnique N°39, 2009, 50 – 55.
- [14]: H Maamar, S M A Bekkouche, Caractérisation, étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à eau de type Megasun, Premier Workshop International sur les Energies Renouvelables et leurs Applications, Laghouat, les 10, 11 et 12 Mai 2008.
- [15]: B Ould Bilal, V Sambou, C M F Kébé, M Ndongo, P A Ndiaye, Etude et modélisation du potentiel solaire du site de Nouakchott et de Dakar, J, Sci, Vol. 7, N° 4, 2007, 57 – 66.
- [16]: A Moumami, N Hamani, N Moumami, Z Mokhtari, Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra, 8^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, Béchar, Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.

- [17]: M Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome1, Vol 1 et 2: Modèles théoriques et expérimentaux, Office des publications universitaires, Algérie, 1987.
- [18]: F Linke, Transmissions, koeffizient and trübungsfaktor, beiträge zur physik der atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [19]: R Dogniaux, L'influence de l'estimation du facteur total de trouble atmosphérique sur l'évaluation du rayonnement solaire direct par ciel clair, application aux données radiométriques de l'IRM à Uccle, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N°20, 1984.
- [20]: J Remund, L Wald, M Lefevre, T Ranchin, J Page, in press, Worldwide linke turbidity information, Proceedings of the ISES solar world congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19 June 2003.
- [21]: A Louche, G Peri et M Lqbal, An analysis of Linke Turbidity Factor, Solar Energy, Vol. 37, N°6, p, 393 – 396, 1986.
- [22]: L Diabaté, J Remund, L Wald, Linke turbidity factors for several sites in Africa, Solar Energy, 75, 2003, 111–119.
- [23]: F Yettou, A Malek, M Haddadi, A Gama, Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie , Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 331 – 346.
- [24]: B Gschwind, L Ménard, M Albuison, L Wald, Converting a successful research project into a sustainable service, the case of the soda web service, Environmental Modelling a Software, Vol, 21, N°11, pp, 1555 – 1561, 2006.
- [25]: R Perez, R Seals, P Ineichen, R Stewart, D Menicucci, A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces, Solar Energy 39 (1987) (3), pp. 221– 232.
- [26]: R Perez, R Stewart, R Seals, T Guertin, The development and verification of the Perez diffuse radiation model, October 1988.
- [27]: R Perez, P Ineichen, R Seals, J Michalsky, R Stewart, Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, Solar Energy, Vol. 44 (1990), pp. 271-289.
- [28]: J R Perez Gallardo, Ecodesign of photovoltaic grid-connected systems, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.027>, Renewable Energy, 64-2014.
- [29]: TRNSYS 16, Volume 6, 05-MultizoneBuilding.pdf.
- [30]: D Rahmani, Analyse d'un système de concentration solaire pour la production d'hydrogène, Thèse de Magistère, Université de Chlef, 2012.
- [31]: R Ebert, Thèse de Doctorat, Sciences et Techniques du Bâtiment, Développement d'un environnement de simulation de systèmes complexes, Application aux Bâtiments, Ecole nationale des ponts et chaussées - ENPC PARIS / MARNE LA VALLEE, 25 Novembre 1993.
- [32]: M A Boukli Hacene, Aspects énergétiques, économiques et environnementaux d'une habitation écologique, Thèse de Doctorat en Physique, Option : Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, 08 Mai 2013.

- [33] : L Serir, Impact du microclimat distribué sur la performance énergétique des bâtiments agricoles: cas des serres dans les régions semi-arides et océaniques, Docteur en Mécanique, Option : Energétique, Université de Batna, 06 juin 2012.
- [34] : J Romain, Developing a run-time coupling between ESP-R and TRNSYS, Mémoire Maîtrise es Sciences Appliquées, Génie Mécanique, Département de Génie Mécanique Ecole Polytechnique de Montréal, Décembre 2012.
- [35] : Z Merdaoui, Caractérisation radiométrique des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa, Thèse de Magistère, Université de Saad Dahleb de Blida, Octobre 2007.
- [36] : <http://portail.cder.dz/spip.php?rubrique47>
- [37] : TRNSYS 16 – Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, a TRaNsient System Simulation program Volume 6, <http://www.trnsys.de>

Chapitre 3

Modélisation d'une structure bâtie et principales stratégies de contrôle passif

CHAPITRE 3

MODELISATION D'UNE STRUCTURE BATIE & PRINCIPALES STRATEGIES DE CONTROLE PASSIF

3.1. Introduction

Le cadre bâti a toujours été influencé par le contexte climatique auquel il appartient, et souvent la conception architecturale s'évertue afin de présenter la meilleure adéquation avec l'environnement. A ce niveau une question se pose: quels seront les outils architecturaux passifs susceptibles de provoquer cette alliance ? Nous proposons deux solutions dans ce présent travail à savoir l'orientation du bâtiment et l'isolation thermique [01].

Le développement des villes du Sud Algérien a été fait à l'instar des villes du Nord, marginalisant ainsi les caractéristiques climatiques très rudes de ces régions. Depuis de nombreuses années, suite à une crise due à une forte demande de logements, l'état se trouve victime de cette démarche qui ne reflète pas les aspirations socioculturelles du citoyen algérien et ne répond pas aux exigences climatiques et économiques de ces régions. Des bâtiments avec des orientations arbitraires, et des façades comprenant des baies vitrées n'importe comment, du choix inadapté de l'utilisation des matériaux de construction [02], de l'exposition des bâtiments aux contraintes solaires (non utilisation des brises soleil), la majorité des gens construisent leur propres maisons à leur manière,....etc.

Notre travail se consacre à l'étude de quelques stratégies d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment. Au sens large, consiste d'une part à optimiser l'architecture de façon à exercer un contrôle passif de l'environnement intérieur et d'autre part, à instaurer chez les occupants des comportements favorables aux économies d'énergie.

3.2. Etat de l'art sur la modélisation thermique du bâtiment

Depuis de nombreuses années, les techniques de simulation connaissent un développement considérable. Les mises au point expérimentales, longues et coûteuses sont progressivement remplacées par des études dans lesquelles les outils de simulation prennent une place de plus en plus importante [03]. Au cours de ces dernières décennies, un nombre important d'outils de simulation thermique et aéraulique des bâtiments a été développé pour les domaines aussi

bien de l'industrie que de la recherche. La première motivation de tels développements était de se doter d'outils d'aide à la conception des bâtiments en vue d'une meilleure efficacité énergétique [04].

Il existe deux grandes familles d'approches pour la modélisation du bâtiment. La première considère le bâtiment dans son ensemble vis-à-vis de l'extérieur. Ce type de modèle n'a pas besoin d'une description précise du bâtiment, car l'intérieur du bâtiment est considéré comme un seul point, d'une manière plus générale, le bâtiment a été modélisé en considérant une zone thermique (modèles nodaux) [05]. La deuxième est appelée modélisation multizone, et permet d'estimer l'évolution des températures dans chacune des pièces du bâtiment. Chaque modélisation est une application de l'équation de la chaleur sur les différentes parois du bâtiment avec différentes échelles et différentes hypothèses. Cette loi est appliquée principalement à l'enveloppe du bâtiment, avec comme excitation les conditions extérieures du bâtiment, ainsi que son occupation. Cette génération découpait chaque pièce en quelques dizaines de zones (modèles zonaux). Ces codes sont encore largement utilisés, même s'ils sont progressivement remplacés par des codes commerciaux et intégrés de Mécanique des Fluides Numérique (MFN) [06]. Le choix des différentes modélisations est orienté suivant la précision demandée et le temps de calcul acceptable [07]. La résolution des équations différentielles peut s'effectuer à l'aide de plusieurs méthodes en considérant que (figures 3.1-3.2) [06] :

- le bâtiment est dans son intégralité (modèle nodal monozone);
- le bâtiment inclut différentes pièces qui le composent (modèle nodal multizone);
- les différentes zones constituent une même pièce (modèle zonal);
- les volumes seront définis par un maillage fin de l'ambiance (modèle détaillé)

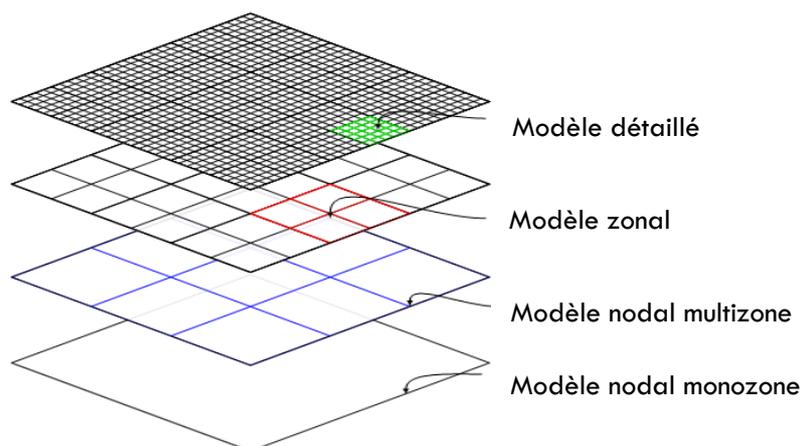


Figure 3.1. Différents niveaux de discrétisation du bâtiment et modèles correspondants

Pour l'étude des ambiances intérieures des bâtiments, ces approches peuvent être utilisées.

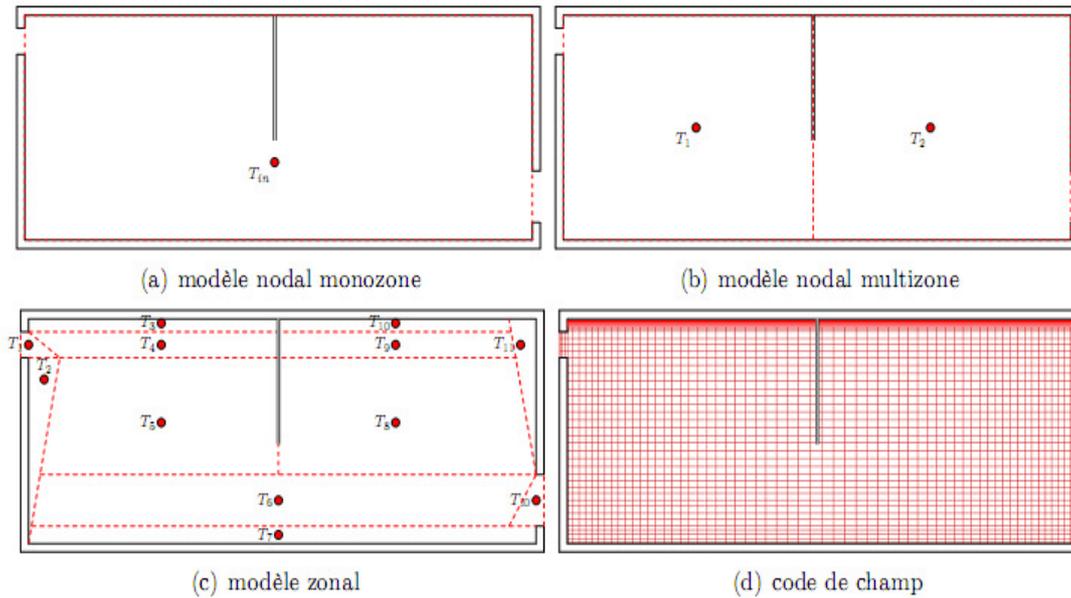


Figure 3.2. Différents modèles nodaux

Dans le cas d'un local équipé d'un système de climatisation par exemple, la modélisation nodale permet des calculs rapides pour le dimensionnement du système. Un modèle zonal permet dans ce cas de définir plus précisément les conditions d'ambiances en différentes zones du local, ce qui permet notamment de définir les zones de confort thermique. Enfin, une modélisation de type CFD permet d'estimer la forme d'un écoulement en régime établi dans le local sans connaissance a priori des phénomènes et des écoulements dominants, contrairement à l'approche zonale où des modèles complémentaires tels que les zones de jet doivent être localisés [07].

3.3. Modèles globaux à l'échelle du bâtiment

La particularité d'un modèle global est de rassembler l'ensemble des parois dans un seul paramètre. Cette approche est intéressante dans le cas de bâtiments déperditifs, mais elle néglige la dynamique de chacune des parois, ce qui a un impact non négligeable sur le comportement du bâtiment. On définit un groupe, comme une unité thermique dans le bâtiment, c'est-à-dire que tout point à l'intérieur de ce groupe est considéré à la même température, on peut rapprocher ce concept d'une zone thermique dans un calcul multizone.

3.3.1. Modèle des degrés-jours unifiés

La méthode de calcul DJU "degrés-jours unifiés" est principalement utilisée par les chauffagistes, elle sert à évaluer rapidement les déperditions du bâtiment par l'enveloppe. Ils sont calculés généralement sur une base de 18°C "température extérieure inférieure ou égale

à 18°C" pour une période de chauffe de 232 jours allant du 1^{er} Octobre au 20 Mai. Pour un lieu donné, le Degré Jour est une valeur représentative de l'écart entre la température d'une journée donnée et un seuil de température préétabli. Il sert en général à évaluer les dépenses en énergie pour le chauffage ou la climatisation [07]. Il existe deux méthodes de calcul des DJU donnant des résultats différents :

- une méthode dite "Météo" avec un calcul simple
- une méthode dite "Professionnels de l'énergie" avec un calcul plus élaboré conforme à la méthode réglementaire du Costic "Centre d'Etudes et de Formation pour le Génie Climatique et l'Equipement Technique du Bâtiment".

3.3.2. Modèles globaux par analogie électrique

Il existe différents modèles R-C "résistance condensateur" pour modéliser un groupe. L'avancée principale par rapport à un modèle DJU est la prise en compte de la dynamique du bâtiment. En effet, dans ce modèle le calcul de la température à l'instant $t+1$ dépend de la température à l'instant t . On peut donc parler de simulation thermique dynamique. À chaque instant t , on réalise un bilan énergétique sur chaque nœud de température pour déterminer les températures à l'instant $t+1$ [07].

3.4. Modèles à l'échelle des parois

Les modèles discrets sont plus fins que les modèles à l'échelle du bâtiment. A chaque zone est attribuée une pièce ou un groupe de pièces, le plus souvent suivant leur orientation. Il est possible de décrire un bâtiment très finement, mais la quantité d'informations à fournir pour réaliser la simulation augmente: préciser les scénarios pour chaque zone, l'emplacement des capteurs de température, des émetteurs... L'utilisation de ces modèles doit donc être adaptée à la quantité d'informations disponibles de même qu'au type de résultat recherché. Chaque zone est délimitée par un ensemble de surfaces qui peuvent donner sur l'extérieur ou une autre zone. Ces surfaces sont principalement des murs, des dalles ou des cloisons de séparation [07].

A la différence du modèle global, ici la dynamique de chaque paroi influence les transferts thermiques avec l'extérieur ou d'une zone à l'autre. Dans l'ensemble des modèles étudiés, le transfert thermique est considéré 1D dans l'épaisseur de la paroi. Chaque paroi est alors décrite en termes de couches et chaque couche en termes d'épaisseur, de conductivité thermique et de capacité (matériaux). Les éléments légers, tels que les fenêtres et les portes, sont considérés sans capacité par rapport aux murs. Ils sont donc assimilés à des résistances pures. Les transferts dans chaque paroi sont alors déterminés par l'application de l'équation de la chaleur en conduction monodimensionnelle en mode transitoire.

La conception de systèmes énergétiques innovants et la caractérisation du confort des occupants requièrent d'être capable d'estimer les détails des écoulements et des transferts de chaleur au sein des zones des bâtiments. Les méthodes de modélisation permettant d'estimer ces détails, telles que les méthodes zonales et CFD, sont difficilement applicables à l'étude d'un bâtiment dans son ensemble et sur de longues périodes de temps.

Notre étude consiste à proposer une plate-forme de simulation permettant dans un premier temps de traiter la plupart des zones du bâtiment et de son enveloppe à l'aide de l'approche nodale qui considère chacune des zones comme un volume parfaitement uniforme. Chaque zone est alors caractérisée par un seul nœud de calcul où sont déterminées les variables d'états (température, pression, concentration, etc.). Ensuite, il s'agit d'étudier les détails au sein d'un nombre limité de zones et d'estimer l'impact de ces détails sur le comportement global du bâtiment. Ainsi, nous proposons différentes méthodes de couplage entre la méthode nodale d'une part et les méthodes zonales d'autre part. Dans ce chapitre, nous allons détailler les différentes méthodes de modélisation qui sont les méthodes nodales, zonales et CFD. Pour chacune, nous rappellerons brièvement l'historique de leur développement ainsi que la formulation mathématique des modèles associés.

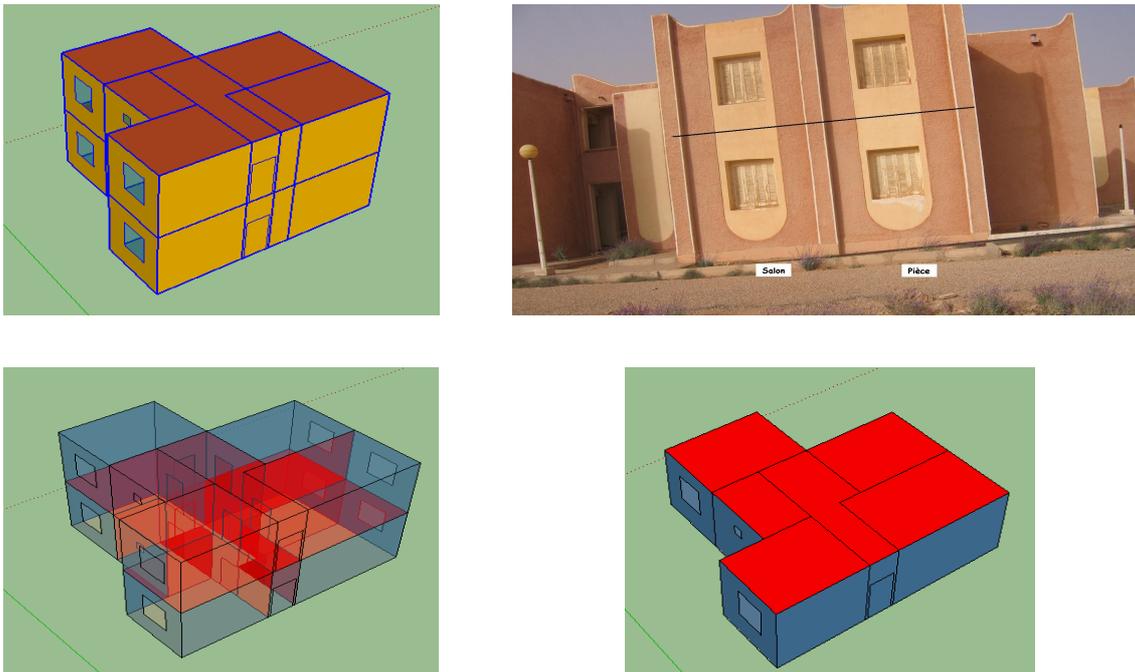


Figure 3.3. Plans descriptifs en 3D, vue en plusieurs coupes

Enfin, nous présenterons des applications de la méthode nodale utilisée pour notre étude. Nous rappellerons brièvement l'historique des différentes méthodes de modélisation qui sont les méthodes nodales, zonales et CFD. Enfin nous présenterons des applications de la méthode nodale utilisée pour notre étude à l'aide d'un programme sensible sous MATLAB qui prend en

compte plusieurs paramètres, ce modèle a été testé par les membres de notre équipe de recherche au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable URAER. Une construction réelle a été notre source d'inspiration pour effectuer cette étude (figure 3.3).

Nous supposons que nous avons deux températures qui sont des conditions aux limites de surface. Le cadre de l'étude est ensuite divisé en un nombre déterminé d'éléments supposés à chaque instant à température uniforme. La transposition du problème thermique de conduction dans un problème électrique est appelée analogie thermoélectrique. En effectuant cette analogie, la méthode nodale conduit à la mise en place d'un réseau électrique comme indiqué dans la figure 3.4. 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 [08-11].

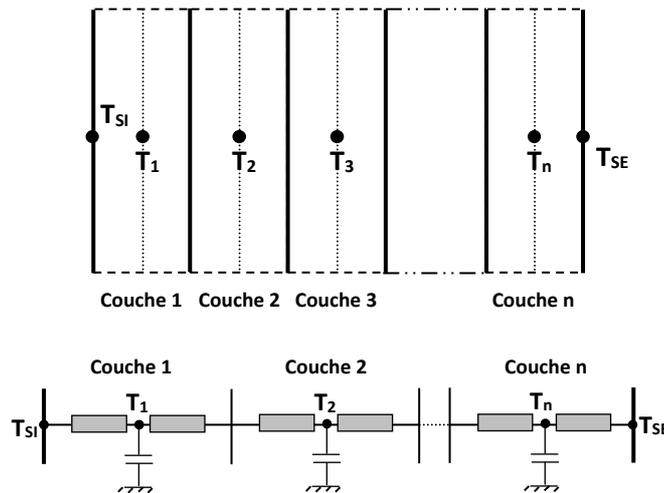


Figure 3.4: Discretisation spatiale d'un mur et réseau électrique associé [09-12]

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 [09-12].

$$C \frac{dT}{dt} = A T + B \quad (3.1)$$

L'indice n est utilisé pour les murs et les fenêtres.

On se base sur une autre approche simplifiée qui permet de représenter le système multicouche par un modèle proposé par Rumianowski et al en 1989 et repris par Con et al

[12] en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud à l'intérieur d'un mur. La figure 3.5 est une illustration du principe de décomposition.

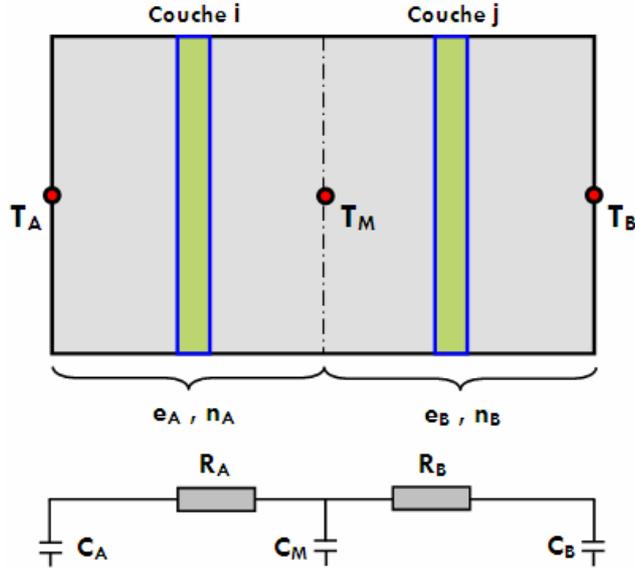


Figure 3.5: Discretisation spatiale d'un mur et modèle de conduction [09-12]

Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes [09-12]:

$$n = n_A + n_B \quad (3.2)$$

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (3.3)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (3.4)$$

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit [09-12]:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad (3.5)$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j \delta_j \quad (3.6)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (3.7)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \quad (3.8)$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \quad (3.9)$$

Le bilan énergétique du bâtiment pour les surfaces est représenté par les équations [09-12]:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{\text{Surf}-i} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{\text{conv}} (T_{\text{air}} - T_A) \quad (3.10)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{\text{Sol,ext}}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{\text{Ciel}}^4 - T_B^4) + S h_{\text{conv,amb}} (T_{\text{amb}} - T_B) \quad (3.11)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = -\frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (3.12)$$

$$h_{\text{conv,amb}} = 2.8 + 3.3 V_{\text{vent}} \quad (3.13)$$

$$T_{\text{Ciel}} = 0.0552 T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (3.14)$$

Le bilan énergétique d'une zone de l'habitat représenté par un nœud est un modèle de bilan de l'air de la zone, ce qui représente la capacité thermique du volume d'air de la zone. Le bilan de puissance de la construction d'une zone est représenté par l'équation ci-dessous qui constitue la variation de l'énergie de l'air de la zone dans l'intervalle de temps dt [09-12]:

$$\rho_{\text{air}} C_{\text{air}} V_{\text{air}} \frac{dT_{\text{air}}}{dt} = Q_{\text{Gain}} + Q_{\text{Surf}} + Q_{\text{Chauf}} + Q_{\text{Refr}} + Q_{\text{Inf}} + Q_{\text{Vent}} \quad (3.15)$$

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

Les taux de transfert d'énergie thermique de l'infiltration et de l'écoulement de l'air de ventilation sont respectivement calculés par les équations suivantes [09-12]:

$$\dot{Q}_{\text{Inf}} = \dot{m}_{\text{Inf}} C_{\text{air}} (T_{\text{air}} - T_{\text{out}}) \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_{\text{Vent}} = \dot{m}_{\text{Vent}} C_p (T_{\text{Vent,out}} - T_{\text{Vent,int}}) \quad (3.17)$$

L'énergie thermique due à l'échange entre l'air et les surfaces intérieures des murs est calculée par l'équation suivante [09-11]:

$$Q_{\text{Surf}} = \sum S h_{\text{Conv}} (T_{\text{Surf}} - T_{\text{air}}) \quad (3.18)$$

La convection naturelle se produit lorsqu'un gradient induit un mouvement dans le fluide (l'air). De tels déplacements s'appellent des mouvements de convection. Le transfert thermique dans une couche de fluide s'effectue par la conduction thermique et le mouvement du fluide. Quand on commence à imposer un gradient thermique entre les surfaces de la couche, un gradient de la masse volumique s'installe. Expérimentalement, on observe qu'au bout d'un certain temps, le fluide se met en mouvement spontanément : c'est le démarrage de la convection. Celui-ci est déterminé par un nombre sans dimension appelé nombre de Rayleigh R_a sans dimension. Le tableau 3.1 donne un état récapitulatif des coefficients de transfert convectifs selon les différents Domaines de validité.

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

Tableau 3.1: Expression des coefficients de transfert convectif [09-11]

3.5. Structure nodale et description de l'habitat

La construction proposée est composée d'un certain nombre de pièces, de parois, de portes et de fenêtres en verre. La scission de l'habitat en zones thermiques induit la création de nœuds de température par zone. Un certain nombre de champs d'information sont connectés à un nœud, traduisant par exemple l'affectation d'un nœud dans une zone ou encore de la topologie du réseau électrique global associé à la maison. Nous avons attribué un type à chaque nœud. En effet, par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes différents. Par exemple, un nœud qui représente un mur va concerner les termes de conduction de la chaleur. Ce même nœud, en fonction de sa situation, peut également concerner des processus de convection. Sur la face externe de la paroi de l'enveloppe, le

nœud de surface est affecté par les radiations extérieures et les échanges convectifs [10-11]. Nous devons noter que la taille de cette structure peut rapidement devenir importante dans la mesure où ce bâtiment est divisé en plusieurs zones et chaque zone possède plusieurs murs et fenêtres de verre. La taille de cette structure étant liée aux dimensions des systèmes à résoudre, la notion de temps de calcul ne doit pas être négligée.

Le modèle de notre étude est un bâtiment résidentiel de type semi-collectif qui se compose de deux blocs, chaque bloc retient 2 étages (RDC + 1^{er} étage) reliés l'un à l'autre par une cage d'escalier (le 3^{ème} bloc), le bâtiment comprend quatre appartements de type F3. L'édifice à quatre façades. La construction est implantée sur une surface de 212 m², avec une surface de 95.74 m² pour chaque bloc 1 et 2 et une surface de 22.52 m² pour la cage d'escalier. Chaque appartement à une surface de 95.74 m² avec un espace habitable de 71.3 m². Le système constructif est un système poteaux poutres, avec des planchers à corps creux. Il existe deux variétés de murs pour ce bâtiment, les murs d'extérieur qui se composent de plusieurs matériaux de construction (pierre, ciment, enduit, sable...etc.) avec une épaisseur de 40 cm. À l'inverse, les murs de l'intérieur (les cloisons) d'une épaisseur de 15 cm se composent de pierre, ciment, enduit, sable...etc. Les façades de cet immeuble se subdivisent en deux types, l'une est principale, comprend plusieurs ouvertures et l'autre secondaire ne portant aucune ouverture. La hauteur des murs est égale à 2,8 m, tandis que les autres dimensions sont représentées en détail dans les figures 3.6 et 3.7. Les fenêtres et les portes contribuent de manière significative à l'équilibre énergétique. Leurs contributions dépendent de plusieurs paramètres comme: le climat, l'orientation, le cadre et la surface relative locale "fenêtre-sol".

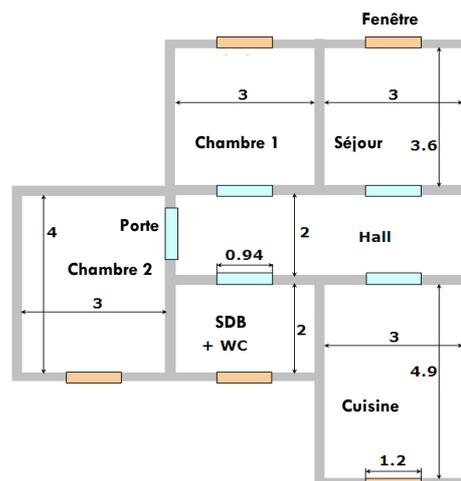


Figure 3.6. Plans descriptifs de la maison

Un certain nombre d'information sont connectés à un nœud type, traduisant par exemple l'affectation de ce nœud dans une zone ou encore de la topologie du réseau électrique global associé. En effet, par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes

différents. Ensuite, il apparaît nécessaire d'attribuer un type à chaque nœud. Le tableau 3.2 indique les types de nœuds rencontrés.

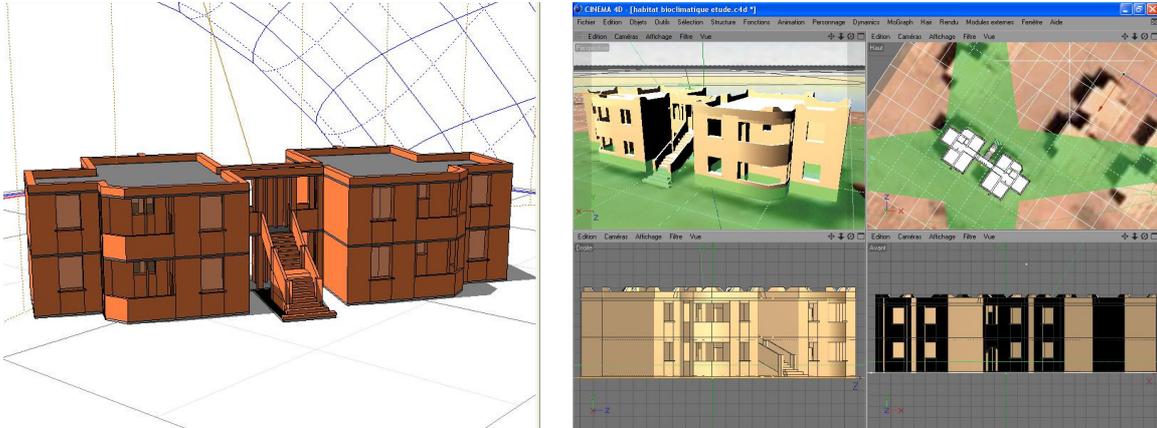


Figure 3.7. Modélisation du bâtiment en 3D

Pour un bâtiment donné, lorsque la structure de nœud est établie, il est facile de remplir chaque élément du modèle mathématique. En effet, il suffit de balayer la structure de nœuds et d'attribuer les termes pertinents (figure 3.8). Les fenêtres doivent être conçues de façon à supprimer les fuites d'air. Les caractéristiques utilisées sont indiquées dans le tableau 3.3.

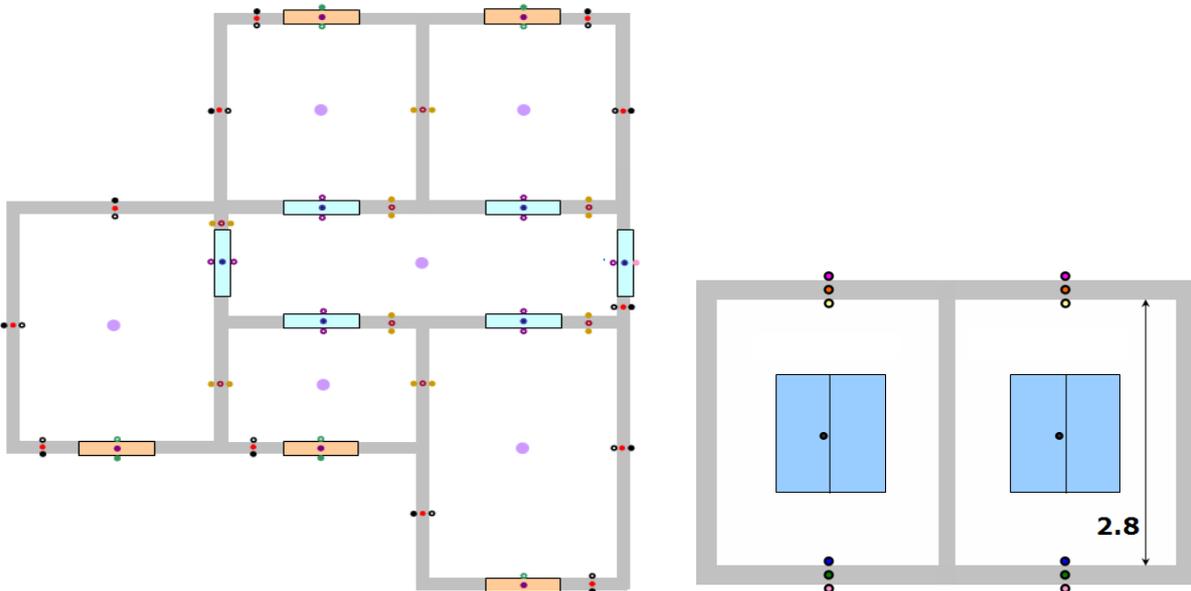


Figure 3.8. Types de nœuds et structure zonale

Si l'on considère que l'habitat est mal isolé, nous utilisons la valeur U dans le premier cas et si l'isolation thermique est renforcée, nous utilisons les valeurs du deuxième cas. Pour notre étude, nous considérons que la composition de fenêtre comprend en plus de la configuration donnée dans le tableau 3.4, les stores en bois habituellement séparés de la configuration précédente par un espace d'air de 2 cm.

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

Tableau 3.2. Couleurs et type de nœuds

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

Tableau 3.3. Propriétés thermiques, épaisseurs des murs et caractéristiques de l'enveloppe [13]

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

Tableau 3.4. Propriétés thermiques, épaisseurs et caractéristiques du verre pour fenêtres [13]

Nous supposons que les transferts de chaleur à travers les murs, les portes et les fenêtres sont unidirectionnels et perpendiculaires à ces parois.

Cependant, les portes sont en bois d'une épaisseur de 2 cm: $\lambda = 0,14 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 500 \text{ kg m}^{-3}$ et $C_p = 2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$. λ , ρ et C_p étant respectivement la conductivité thermique, la masse volumique et la chaleur spécifique [02].

3.6. Cas d'applications : simulation des températures intérieures

Au début, notre démarche s'est basée sur la technique d'interpolation des points de mesures pour obtenir une formule signifiante de la courbe équivalente couvrant le maximum de points. Les résultats d'interpolation s'expriment sous la forme de polynômes de degré optimisé, cette méthode constitue une façon très efficace. Les approches obtenues ont été utilisées avec succès dans de nombreuses applications. Il s'ensuit qu'on peut constituer des fonctions qui décrivent la température ambiante et la vitesse du vent en fonction du temps à travers des mesures établies expérimentalement pour des journées sélectionnées. Par la suite, on les injecte dans le programme de calcul. Notre choix s'est fixé sur deux jours correspondant à un ciel clair qui font partie de la période estivale de l'année 2013. La figure 3.9 décrit explicitement le comportement de la température de l'air ambiant extérieur.

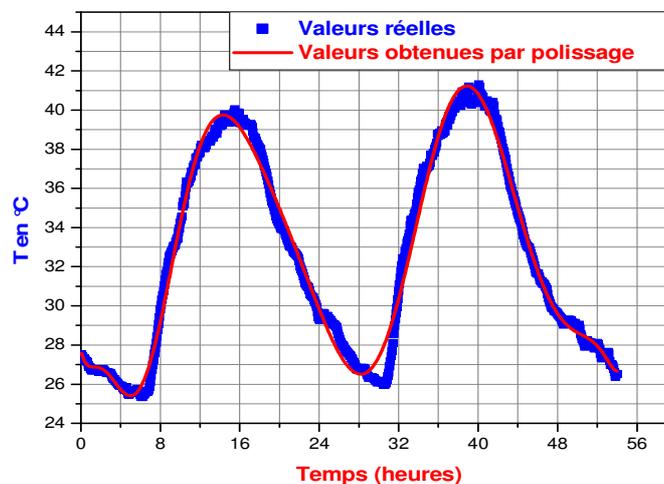


Figure 3.9. Température ambiante, Ghardaïa, les 29-30 Août 2013

On s'intéresse aussi à la vitesse du vent qui fait partie du bilan global de l'habitat. Le vent est par définition le mouvement d'air au sein d'une atmosphère, masse de gaz située à la surface d'une planète. Les vents sont globalement provoqués par un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète provenant du rayonnement stellaire (énergie solaire), et par la rotation de la planète. Sur Terre, ce déplacement est essentiel à l'explication de tous les phénomènes météorologiques. Le vent fait le plus souvent référence aux mouvements de l'air dans l'atmosphère terrestre. La figure 3.10 donne une idée sur ce paramètre déterminant.

Le vent accélère l'échange thermique puisqu'il naît sous l'effet des différences de températures et de pression. C'est un flux d'air: l'air chaud et léger monte, l'air froid et lourd descend. Le mouvement d'air, comme de la grande roue, est circulaire. C'est un mouvement perpétuel: l'air monte et descend, il se réchauffe et se refroidit.

La modélisation d'un bâtiment dans sa globalité est en général constituée d'un réseau complexe de résistances et de capacités thermiques entre les différentes zones internes du bâtiment et entre ces zones et l'environnement proche du bâtiment. Différents types d'outils sont utilisés en physique du bâtiment. Leurs utilisations dépendent principalement des étapes de la conception du projet. En raison du coût et des durées expérimentales, la modélisation-simulation est un moyen efficace pour mettre au point et étudier le comportement thermique des bâtiments en régime variable.

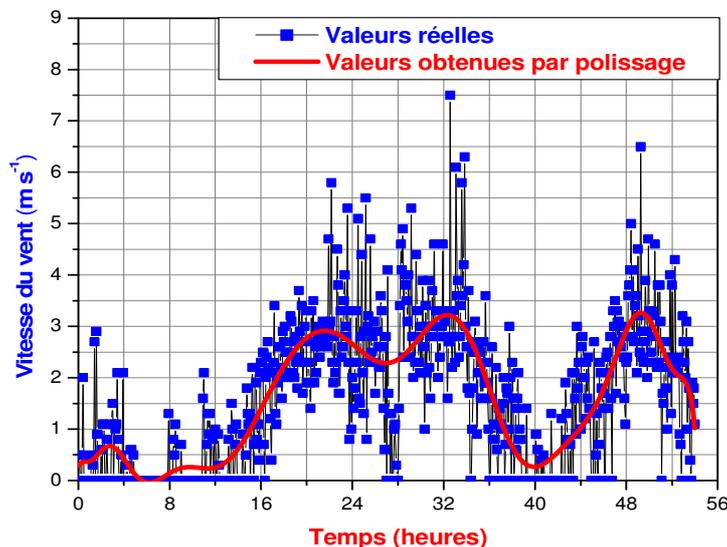


Figure 3.10. Vitesse du vent, Ghardaïa les 29-30 Août 2013

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel MATLAB car il présente l'avantage de posséder une bibliothèque intéressante. Olgay, malgré sa démarche clairement déterministe, reconnaissait ainsi que la modélisation dans l'architecture, dans toute sa diversité, constitue un mode d'expression privilégié du développement durable [02]. Cette modélisation nous permet de décrire l'évolution des températures intérieures de cette maison en été en en hiver. Les

conditions initiales de toutes les surfaces et de l'air ont été choisies par hypothèse. En conséquence, il est légitime de disposer des méthodes numériques permettant de calculer très rapidement ces températures. La simulation ne peut donc être réalisée que si on dispose d'un acquis de connaissances suffisant. Les progrès des méthodes numériques, permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes. Conçu pour répondre à ces besoins, Runge-Kutta d'ordre 4 est une méthode numérique qui permet d'appréhender le comportement thermique des murs et de l'air soumis à des sollicitations variées.

Les courbes tracées dans la figure 3.11 représentent l'évolution de la température de l'air pour différentes zones. On remarque que la température de l'air intérieur de la pièce 3, la cuisine et la salle de bain est plus grande pendant la journée. Ceci s'explique, parce que les murs exposés au soleil influent sur l'évolution de la température intérieure de la pièce spécialement la période matinale. En revanche, pour le salon ce sont les murs Sud et Ouest qui ont été exposés au rayonnement solaire. Donc, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée le matin par les murs de la chambre 1 est supérieure par rapport à celle absorbée par les murs exposés du salon et vice-versa.

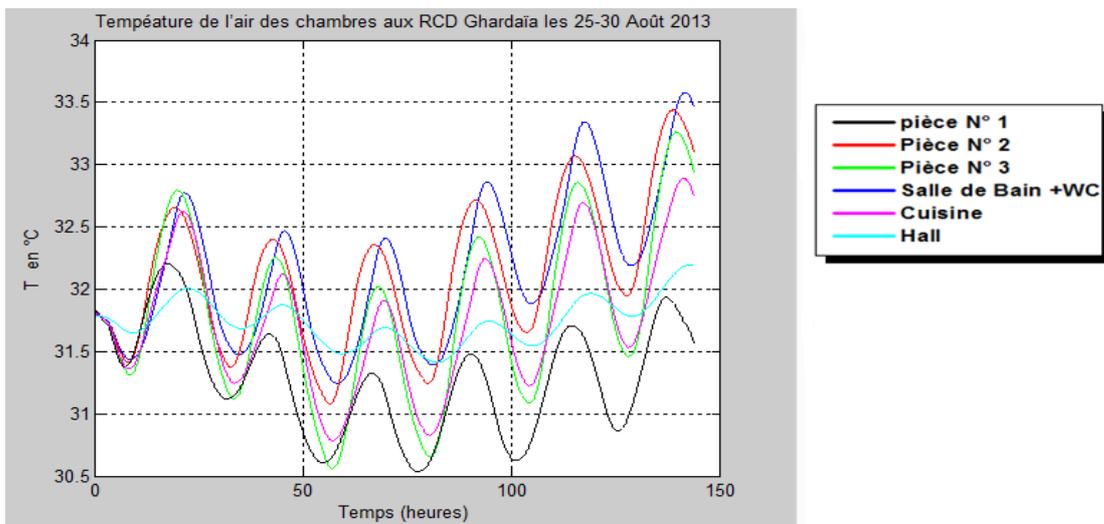


Figure 3.11. Température de l'air dans différentes zones, Ghardaïa les 25-30 Août 2013

A cet égard, une instabilité des températures s'est remarquée aussi pour l'air du hall, ceci est dû entièrement à la surface déperditive correspondante. Cet aspect aura un lien direct avec deux concepts : le niveau d'isolation thermique et le degré de compacité de la construction bâtie. Une bonne compacité et une forte isolation thermique favorisent un amortissement des températures intérieures (diminution des amplitudes) et minimisent les fluctuations des températures.

Par ailleurs, d'autres efforts ont été prodigués pour évaluer convenablement les températures résultantes dans chaque zone et durant toute l'année 2013. La précision à tenir

est meilleure par rapport aux simulations précédentes vu que nos calculs itératifs se sont basés directement sur les données mesurées in situ tout en évitant l'utilisation de la technique de d'interpolation polynomiale. Nous injectons directement les données climatiques extérieures (température, humidité, vitesse du vent, direction de la vitesse de vent, les irradiances solaire) pour déterminer les températures des différentes zones (figure 3.12).

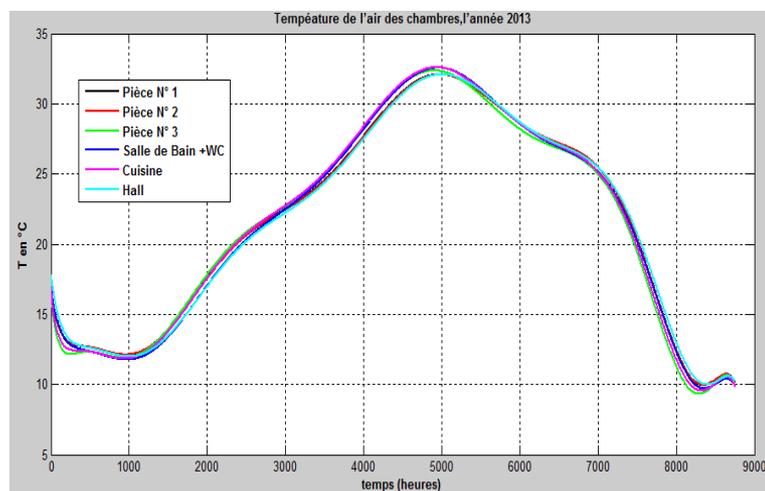


Figure 3.12. Température de l'air dans différentes zones, l'année 2013

Pour information, plusieurs travaux récents [14-26] publiés par l'ensemble des membres d'équipe "Architecture Solaire et Bioclimatique" de l'"Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables" URAER Ghardaïa, ont permis de prouver que l'enveloppe de ces types de construction est la cause principale de la grande part des déperditions incontrôlées.

3.7. Typologie urbaine des bâtiments et influence de la compacité

L'analyse typo-morphologique repose sur la relation qui existe entre les formes des bâtiments et leurs typologies. Cette relation traduit un ensemble complexe de rapports entre les contraintes du parcellaire, les technologies constructives, les fonctions à abriter, les styles architecturaux et les solutions de composition retenues pour résoudre ces problèmes. La composition de la place sera alors fortement impactée par les caractéristiques typo-morphologiques des bâtiments qui la bordent. À l'intérieur d'un même type, le bâti peut prendre plusieurs formes. Toutefois, il existe des éléments invariants qu'on trouve dans chaque unité de bâti grâce auxquels une étude/comparaison est possible parmi lesquels :

La masse : les volumes construits se caractérisent par leur masse qui est fonction des dimensions du bâti "surface au sol, longueur, largeur, hauteur". Le bâtiment se définit aussi par ses proportions "rapport de hauteur et largeur des différentes faces, rapport entre les murs et le toit" qui contribuent à son harmonie [27].

Le gabarit : c'est la hauteur que l'immeuble ne doit pas dépasser.

Le système constructif : ce sont les éléments constructifs et structurels du bâti (ossature, enveloppe-murs, toiture, matériaux...) qui à travers leur assemblage, permettent de définir un type architectural.

Le plan : c'est l'organisation horizontale du bâtiment qui montre la distribution intérieure entre les différentes pièces.

La façade : les façades sur rue est le lieu privilégié d'expression du langage architectural. La façade peut révéler le contenu de l'immeuble et le statut d'un quartier [27]. Leur configuration et leur traitement dépend de l'immeuble dont la forme est dictée par le parcellaire mais aussi des règlements d'urbanisme (l'alignement, la hauteur...etc.) et du courant architectural.

La compacité dépendant directement de l'architecture du bâtiment, il est difficile de lui donner des limites chiffrées. Pour tous types de bâtiment, on cherchera la compacité maximale. Le privilège des mitoyennetés et des formes simples peut être considéré comme des pistes de réflexion lors de l'élaboration du projet d'architecture. Au mode de contact (à forme et volume constants): pour le même volume, la compacité de maisons mitoyennes est inférieure à celle d'un pavillon car les murs mitoyens sont disposés entre deux espaces chauffés et ne seront pas comptés comme déperditifs. C'est pourquoi, la législation de nombreux pays encourage certaines typologies urbaines (rangées de maisons mitoyennes, immeubles collectifs) en abaissant les niveaux d'isolation globale requis si la compacité du bâtiment est inférieure à un niveau de référence. C'est notamment le cas du calcul du niveau K en Belgique. Pour une même composition de paroi, une variation de la compacité modifie considérablement la demande d'énergie. Par exemple, passer d'un indice de compacité (surface de déperdition/volume) de 1.5 à 1 signifie que pour un même volume, l'enveloppe de déperdition a été diminuée de 1/3. Les pertes de chaleur par l'enveloppe auront diminué d'autant.

Depuis quelques dizaines d'année, la maison a pris dans l'imaginaire collectif la forme de la villa 4 façades. Or, cette dernière propose un mode d'aménagement du territoire extrêmement consommateur d'espace. Par la faible compacité de ce type de logement et la grande dispersion de l'habitat, les consommations d'énergie sont aussi plus importantes, tant en chauffage que par les déplacements automobiles induits. Une architecture durable privilégiera donc la mitoyenneté et une relative densité de l'habitat.

Par l'utilisation judicieuse de la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, nous avons pu, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement intérieur des températures. La figure ci-dessous (3.13) donne un aperçu général sur les profils des différentes températures de l'air intérieur de la pièce 2 conformément aux différents niveaux de compacité.

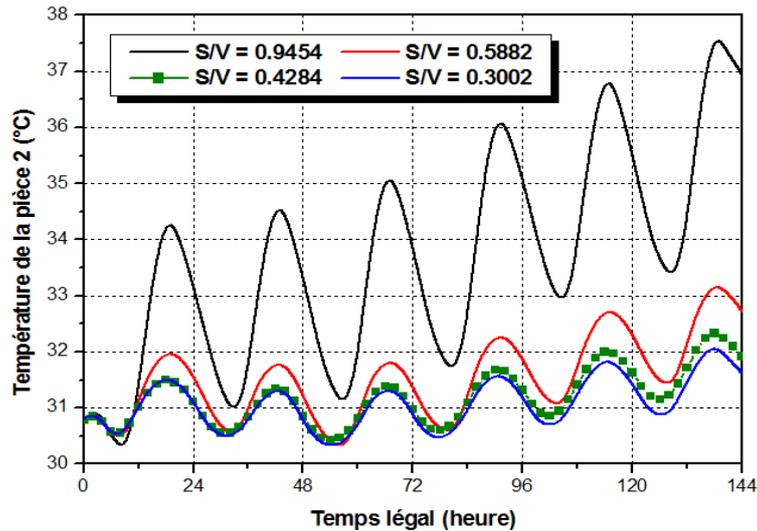


Figure 3.13. Température de l'air intérieur de la pièce 2, les 25-30 Août 2013

Le premier cas correspond à une exposition totale de cette maison (toit et murs opaques) ce qui donne un indice de compacité égale à 0.9454. Le second cas correspond à une maison exposée uniquement au niveau de ses murs opaques ce qui est équivalent à un indice de compacité de 0.5882. Supposant ensuite que les façades Sud, Nord et Ouest sont exposées et en contact avec l'extérieur, ceci est relatif à un indice de compacité S/V égale à 0.4284. Par ailleurs, le dernier cas correspond à une maison mitoyenne orientée en plein Sud, ce qui se traduit par un facteur de compacité plus faible ($S/V=0.3002$).

Ces résultats montrent que la minimisation de la surface des murs en contact avec l'extérieur, permet de se rapprocher du confort thermique. On comprend donc que la compacité puisse donner une indication sur les performances thermiques du projet en limitant chaque fois les déperditions énergétiques relatives. Par ailleurs, une forte compacité (un faible indice de compacité) favorise une stabilité des températures, mais le déphasage entre les températures intérieures et la température ambiante extérieure reste constant quel que soit cet indice. Restons toujours en terme de comparaison, on remarque que la variation des températures de l'air intérieur pour le troisième et le quatrième cas n'est pas vraiment considérable, le phénomène de transfert thermique dans cette situation est plus au moins long. Ceci peut être justifié par le fait que l'indice de compacité de la pièce 2 reste constant, malgré que la compacité de la maison s'améliore de 0.4284 à 0.3002.

3.8. Isolation thermique intérieure : exemples indicatifs

Nous procéderons par les figures tracées ci-après à l'étude de l'isolation thermique intérieure dans deux situations climatiques distinctes, l'une chaude et l'autre froide. Cette étude a pour objet de voir les conséquences de l'isolation thermique (couramment par une couche de

polystyrène de 08 cm d'épaisseur) sur l'évolution des températures de l'air et les surfaces des parois de la pièce isolée durant les périodes d'été et d'hiver. On verra par la suite l'impact de l'épaisseur du polystyrène sur l'efficacité et le rendement de l'isolation. Les conditions initiales des températures de toutes les surfaces et de l'air ont été choisies à partir des valeurs expérimentales [02].

3.8.1. Période très chaude

La figure 3.14 représente les températures de l'air intérieur de la pièce pour différents cas. La simulation numérique par le programme validé précédemment [14-26] permet de prévoir le comportement thermique pour les deux situations: sans et avec isolation thermique. Cette figure montre que l'isolation thermique influe considérablement puisque l'écart moyen de température est d'environ de 2°C. Les relevés des températures pour l'air ambiant intérieur montrent que la meilleure façon de s'approcher vers le confort thermique dans cet exemple, c'est d'isoler toutes les parois intérieures. Les températures en absence d'isolation sont comprises entre 36 et 38.5 °C. C'est une température très élevée par rapport à la température désirée (27 °C). Ce qui justifie l'état énergétique défavorable des murs et des cloisons de séparation. Ces derniers ont emmagasiné extrêmement de la chaleur après les différents échanges thermiques "par rayonnement et par convection".

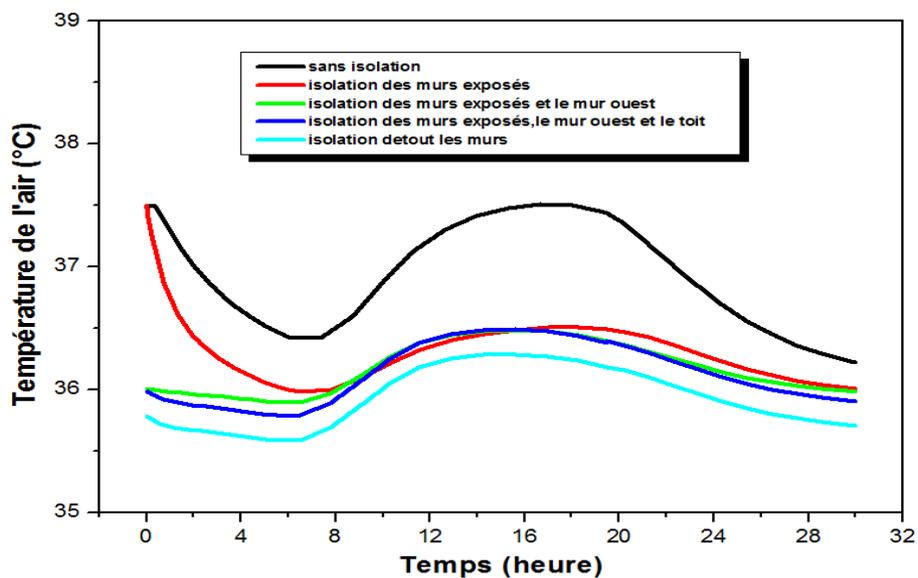


Figure 3.14. Température de l'air intérieur durant une période estivale très chaude

Il est important de signaler que le choix des températures initiales pour chaque cas n'est pas arbitraire. Dans ce contexte, nous avons pris la même valeur initiale pour les deux premiers cas. Ce choix n'empêche pas d'atteindre les mêmes solutions à l'état final car les variations sont acquises uniquement durant les premières heures parce que les conditions aux limites et

environnantes sont toujours gardées [14]. Tandis que pour les autres cas, nous avons calculé par le programme la valeur finale à l'instant $t = 30$ heures pour l'introduire comme condition initiale pour le cas suivant pour être plus réaliste.

3.8.2. Période froide

Le même travail sera effectué dans cette partie mais pour une période froide. De même, la figure 3.15 représente l'évolution de la température de l'air intérieur de la pièce. L'effet de l'isolation thermique se traduit globalement par une différence de 2 °C. Durant la première semaine de mois de Janvier, les conditions climatiques et météorologiques au cours de ce mois engendrent et procréent des journées froides notamment la nuit et sous l'ombre. Cette situation ne permet pas, même en présence de l'isolation, d'atteindre la température désirée du confort thermique (20 °C).

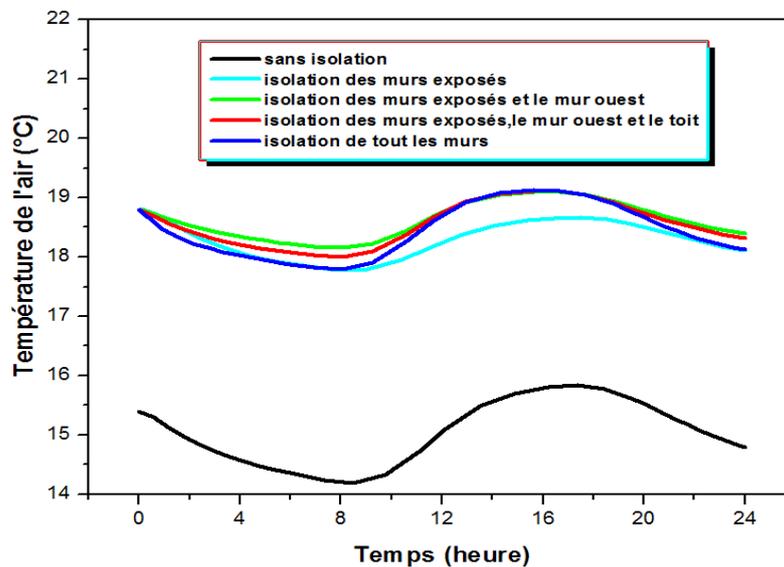


Figure 3.15. Température de l'air intérieur durant une période hivernale

Les dynamismes établis comprennent des calculs et des mesures expérimentaux pendant toute l'année. Nous avons utilisé chaque fois des températures mesurées que se soit pour l'air ou pour les parois superficielles pour les imposer ensuite comme températures initiales. On peut aboutir à un confort thermique souhaité que sous l'effet de certains choix, notamment pour des conditions initiales environnantes précises. Pour être réaliste, nous serons obligés d'utiliser des valeurs réelles.

La modélisation numérique multizone fournit sans aucun problème tous les relevés de températures des surfaces extérieures des murs exposés au soleil. Comme remarque supplémentaire, ces relevés donnent parfois des valeurs plus grandes que ceux obtenues sans isolation thermique. Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que l'isolant joue le rôle

d'une barrière thermique. D'autre part, les pertes sont freinées par l'isolation. Elle valorise efficacement les apports du confort thermique.

3.9. L'influence de l'orientation du bâtiment

Le soleil est souvent recherché l'hiver alors qu'on essaye de s'en protéger l'été. En hiver, seules les façades orientées au Sud apportent un complément solaire significatif par rapport aux besoins de chauffage. L'été, la course du soleil est beaucoup plus longue et plus haute. Les façades Est et Ouest font l'objet de surchauffe et devront être équipées de dispositifs de protection (Fenêtres et baies). En révélant les atouts et les contraintes du site, les contradictions peuvent être ainsi dépassées d'une manière passive.

3.9.1. Sur la température intérieure

Cette étude nous permet de décrire l'évolution des températures intérieures du bâtiment pour les deux niveaux (RDC+1^{er} étage). Les conditions initiales ont été inspirées à travers des valeurs expérimentales obtenues précédemment. Les courbes tracées dans les figures 3.16-3.19 représentent l'évolution de la température de l'air intérieur de toutes les chambres en fonction des quatre orientations : Sud, Ouest Nord et Est, et ceci pour deux situations climatiques distinctes. En faisant tourner chaque fois l'habitat vers l'Est ou vers l'Ouest, nous pouvons facilement effectuer une étude comparative qui sera confiée à l'effet de l'orientation sur les différentes températures.

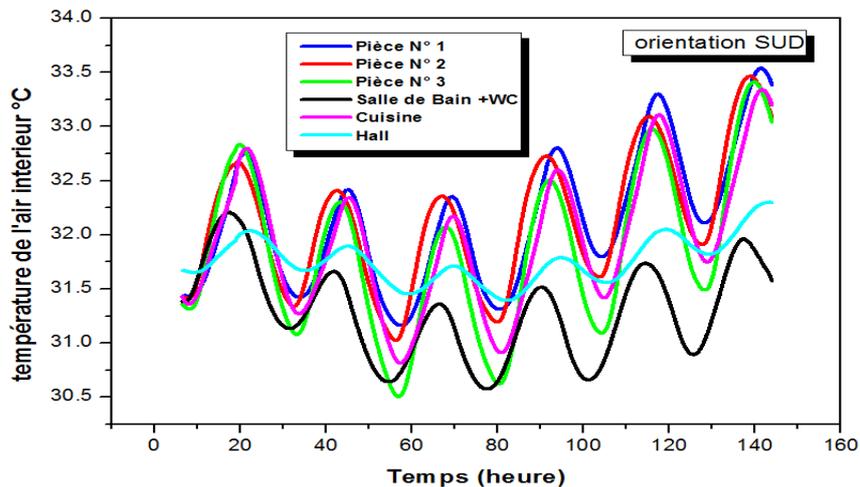


Figure 3.16. Température de l'air intérieur, orientation Sud, première semaine du mois d'Août 2013

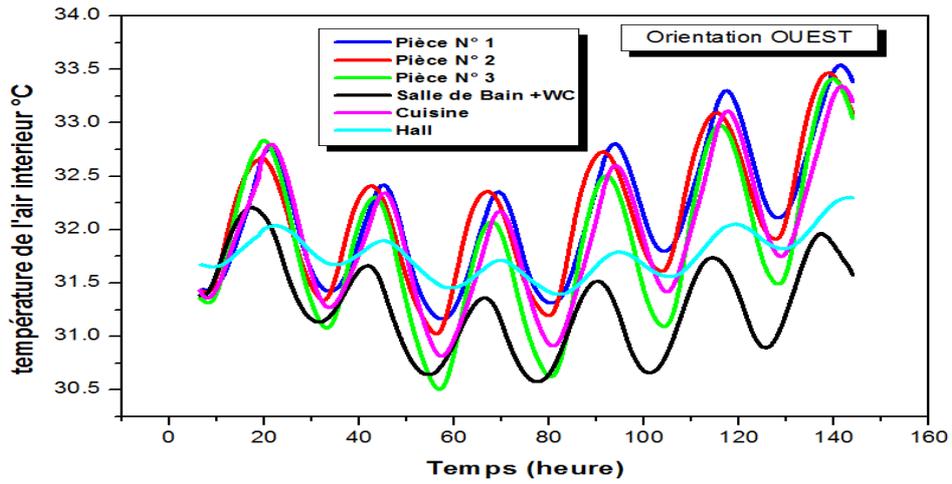


Figure 3.17. Température de l'air intérieur, orientation Ouest, première semaine du mois d'Août 2013

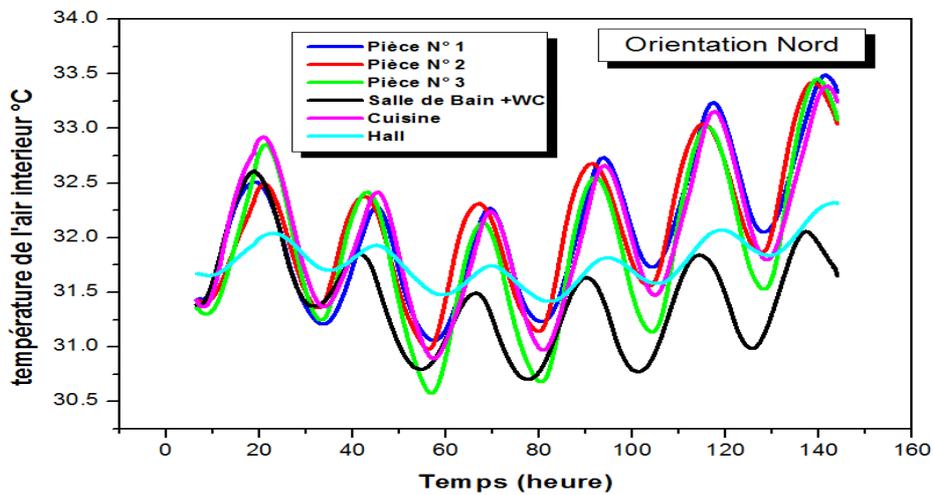


Figure 3.18. Température de l'air intérieur, orientation Nord, première semaine du mois d'Août 2013

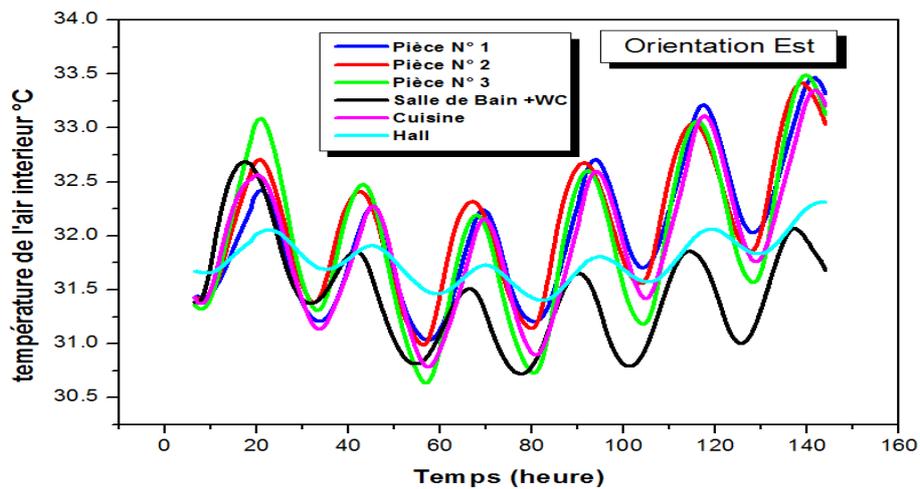


Figure 3.19. Température de l'air intérieur, orientation Est, première semaine du mois d'Août 2013

On peut voir que les températures de l'air sont influencées considérablement par le changement d'orientation. Par exemple dans la première figure, on remarque que dans le cas où le bâtiment est orienté vers le Sud, les températures des pièces N°1 et 2 seront plus élevées

par apport aux autres pièces. Le hall ne sera pas influencé considérablement par le changement d'orientation. En résumé, nous pouvons constater que l'orientation est reliée en quelque sorte par le facteur de compacité de la zone. Le niveau des températures obtenues a un lien direct avec l'indice de compacité de la chambre. Durant une période d'été, un faible indice de la chambre (zone) correspond à des températures plus faibles de cette zone et vice versa.

Le niveau d'isolation thermique présent nous a imposé de revoir l'influence de l'orientation sur les températures obtenues dans deux cas possibles; en absence et en présence de l'isolation thermique intérieure. La figure 3.20 peut donner une idée précieuse sur ce concept et son incidence sur les variations journalières en terme de température. On s'est limité à une journée pour voir nettement l'apport de la variation de l'orientation.

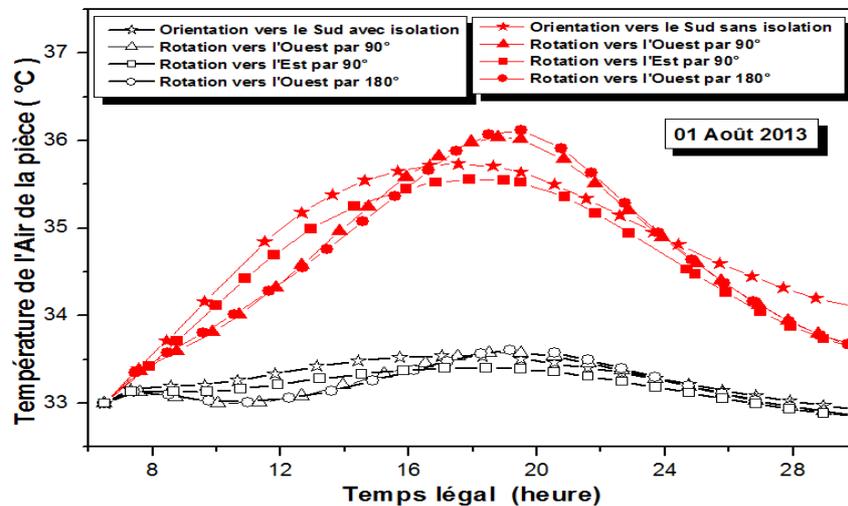


Figure 3.20. Température de l'air intérieur de la Pièce avec différentes orientations, 01 Août 2013.

Nous déduisons tout d'abord que les températures intérieures de la pièce non isolée sont les plus élevées par rapport à celles de la pièce isolée pour toutes les positions envisagées. Les résultats présentés montrent l'effet de l'orientation de l'habitat sur la température de l'air intérieur de la pièce. Les valeurs obtenues à cet égard en absence d'isolation montrent que les températures sont généralement plus élevées si le bâtiment est orienté vers le Nord ou vers l'Ouest à partir à peu près 17 heures. Elles sont par contre plus faibles par rapport aux autres valeurs trouvées dans les deux autres orientations et ceci avant presque 16 heures et demie. L'écart maximum des températures pour toutes les orientations en absence de l'isolation ne dépasse pas l'ordre de 0.8 °C. Par opposition, l'écart maximum des températures intérieures de la pièce isolée ne dépasse pas la valeur de 0.3 °C. On remarque clairement que l'isolation thermique favorise une plus grande stabilité des températures; la différence entre la température minimale et maximale atteint la valeur de 0.6 °C. Par contre, en absence d'isolation thermique, la température maximale moins la température minimale est environ 3

°C pour les orientations Ouest et Nord, et elle est de 2.75 °C pour une orientation en plein Sud et 2.5 °C pour une rotation vers l'Est.

Selon la figure 3.20, les écarts entre les températures maximales et minimales observés sont suffisamment faibles par rapport à la différence (16°C) entre les températures maximales et minimales de l'air ambiant extérieur. C'est tout simplement le rôle persistant de l'inertie thermique. Plus l'inertie thermique de l'habitation augmente, plus les variations de température jour/nuit sont faibles. Ces conditions ne sont pas favorables au profit du confort thermique intérieur pour cette construction qui se situe dans une zone aride. Les températures intérieures sont très élevées. L'opinion commune est que les murs épais et denses protègent naturellement des fluctuations importantes de température et n'ont donc pas besoin d'isolation. En principe, elles devront ralentir par l'inertie, l'entrée de la chaleur ou du froid qu'après un certain temps d'exposition. L'ambiance intérieure doit rester fraîche en été grâce aux murs en pierre à forte inertie thermique. Ces murs épais possèdent un fort déphasage permettant de faire entrer la fraîcheur la nuit dans le mur puis de la restituer la journée. Pour cela, la pierre deviendra le matériau idéal: dense, apte à stocker et conducteur pour favoriser le stockage à condition qu'il existe des nuits fraîches. Effectivement, c'est ça le problème dans ces régions: en été, les températures ambiantes extérieures restent presque tout le temps élevées même durant la nuit. L'inertie thermique consiste alors en une accumulation que de la chaleur dans l'enveloppe pour une restitution intérieure par radiation. La complexité de ce phénomène réside en ce que le flux de chaleur à travers l'enveloppe augmente successivement la température des matériaux ce qui permet d'augmenter en même temps la température de l'air de l'habitat.

Le programme conçu permet aussi de calculer les températures des façades. Les figures 3.21-3.23 décrivent respectivement l'influence de l'orientation sur les températures des murs exposés "Sud, Est et Ouest" aux différentes sollicitations extérieures.

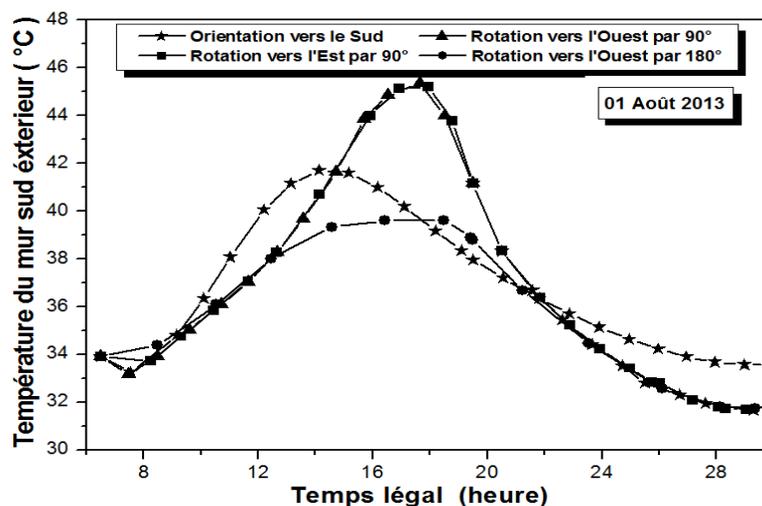


Figure 3.21. Température du mur Sud extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2013.

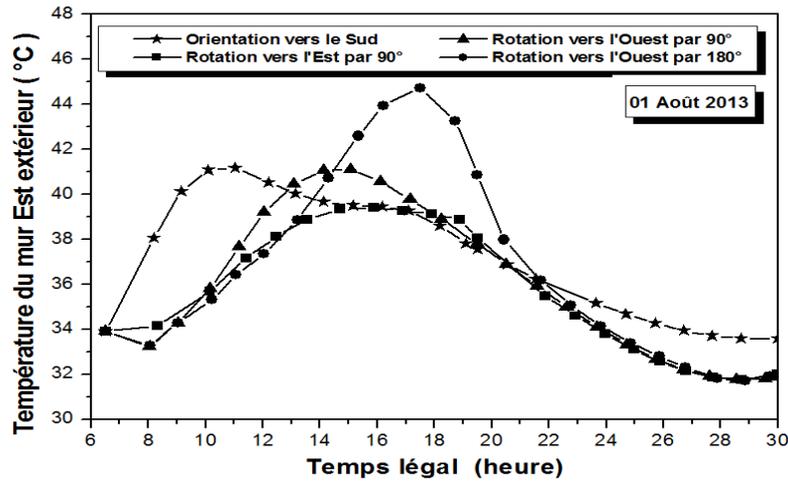


Figure 3.22. Température du mur Est extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2013.

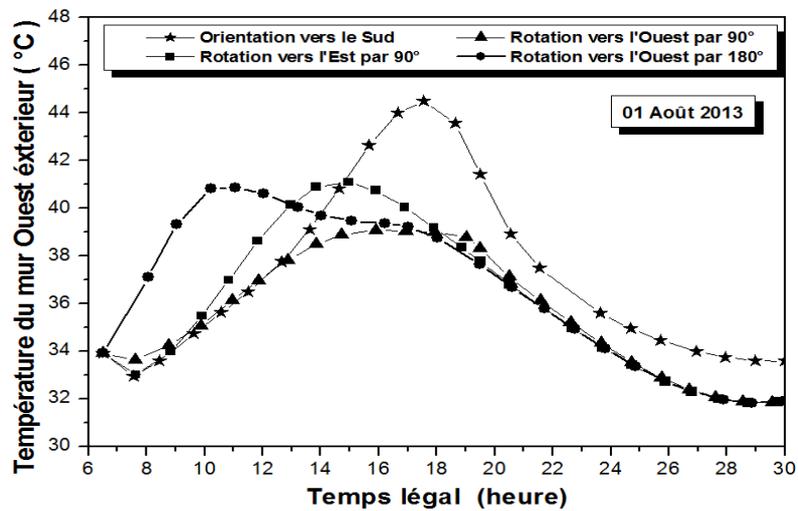


Figure 3.23. Température du mur Ouest extérieur pour différentes orientations, 01 Août 2013.

On peut remarquer qu'en été, les tracés de la température de la façade Sud de la pièce pour les quatre orientations montrent des accroissements importants si le bâtiment est orienté vers l'Est ou vers l'Ouest, et ceci entre 14:50 et 22:00. Contrairement au cas où la pièce est orientée vers le Sud ou vers le Nord, l'élévation de la température obtenue pour l'orientation Sud est apparente entre 07:15 et 14 :15, et reste la plus grande dans la nuit par rapport aux autres orientations.

Les résultats obtenus dans la figure 3.22 prouvent que la température du mur Est extérieur de la pièce pour l'orientation Nord peut atteindre des valeurs record. Les autres scénarios ont été attendus vu que l'orientation Sud permet d'évoquer des températures élevées le matin pour la façade Est. En ce qui concerne le salon, ce sont les murs Sud et Ouest qui ont été exposés aux différentes conditions climatiques. Donc, raisonnablement la quantité d'énergie absorbée le matin par les murs exposés de la pièce est supérieure par rapport à celle absorbée par les murs exposés du salon et vice-versa. En restant toujours dans ce contexte, il est tout à fait légitime de trouver que les températures du mur Ouest exposé du

salon sont plus grandes le soir que celles du mur Est et du mur Sud de la pièce. La rotation du bâtiment évoque des scénarios similaires si les façades ont la même orientation. En d'autres termes, si par exemple l'habitat est orienté vers le Nord, l'évolution des températures des surfaces extérieures du mur Est de la pièce subite les mêmes scénarios avec les températures du mur extérieur Ouest du Salon si le bâtiment est en plein Sud.

Concernant la période froide, nous avons choisi le 01 Janvier comme jour indicatif en vue d'illustrer les résultats de la simulation. Les mêmes démarches ont été suivies dans cette partie. La figure 3.24 donne les résultats de la température intérieure de la pièce sans et avec isolation thermique pour les quatre orientations.

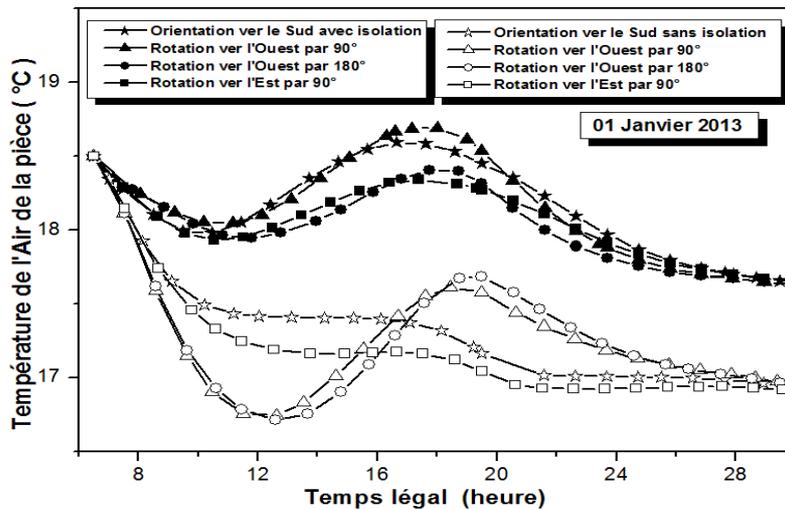


Figure 3.24. Température de l'air intérieure de la Pièce pour différentes orientations, 01 Janvier 2013.

Pour démontrer convenablement l'apport de l'isolation thermique, nous avons utilisé les mêmes démarches pour le choix des conditions initiales, climatiques et météorologiques pour faire la comparaison. Il a fallu choisir des conditions environnantes plus au moins chaudes si on veut procéder à des remarques précieuses. Plus les températures intérieures augmentent, plus les déperditions thermiques augmentent. On peut prouver par ces simples études que l'isolation thermique présente un intérêt énergétique extrêmement important puisque les différences des valeurs moyennes de la température enregistrée peuvent atteindre 1.5 °C. Les températures intérieures de la pièce isolée pour différentes orientations sont plus élevées par rapport aux températures d'une pièce non isolée.

3.9.2. Sur les apports solaires directs à travers les ouvertures

L'emplacement des surfaces vitrées et leurs superficies doivent être définis avec soin. Elles vont contribuer au chauffage solaire direct de chaque pièce. Dans cette étude, on s'intéresse à l'influence de l'orientation sur les apports solaires. Ces apports représentent l'énergie solaire introduite par l'ensoleillement direct via les vitrages et par transmission surfacique des parois

en contact avec l'extérieur. Nous devons aménager alors ces bâtiments en fonction des apports solaires afin de profiter " passivement " de la chaleur et de la lumière du soleil. La première façon de gérer les apports solaires est de penser à l'architecture et à l'orientation de la maison [10].

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

$$Q_s = 24 \sum I_{sj} S_{sj} \quad (3.19)$$

Q_s : est le gain d'énergie solaire (Wh)

I_{sj} : est le rayonnement solaire pour l'orientation j

S_{sj} : est la surface réceptrice calculée de la manière suivante:

$$S_{sj} = A S F_s \quad (3.20)$$

A : est la surface de l'ouverture

F_s : est le facteur de correction pour l'ombrage:

Pour le Nord, $F_s = 0.89$,

Pour le Sud, $F_s = 0.72$,

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

Pour la menuiserie bois $S = 0.44$,

Pour la menuiserie PVC $S = 0.42$,

Pour la menuiserie $S = 0.46$.

S : est le facteur solaire, mesure la contribution d'un vitrage à l'échauffement de la pièce.

Applications Numériques

Surface des ouvertures coté Sud = 3.36 m²

Surface des ouvertures coté Nord = 3.36 m²

Surface des ouvertures coté Est = 2.068 m²

Surface des ouvertures coté Ouest = 2.5080 m²

Ensuite, on détermine S_{sj} :

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

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

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

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

Donc on peut écrire que :

$$Q_s = I_{s_Sud} S_{s_Sud} + I_{s_Nord} S_{s_Nord} + I_{s_Est} S_{s_Est} + I_{s_Ouest} S_{s_Ouest} \quad (3.21)$$

Dans toute l'Algérie, peu de stations de mesure fournissent des données répondant directement à nos besoins. Mis à part ces stations, la seule source de données est l'Atlas Solaire de l'Algérie [28]. Un programme de calcul sous Excel a été adopté par M R Yaiche [29] en choisissant deux approches théoriques qui sont valables pour un ciel totalement clair. Pour l'estimation des irradiations incidentes sur un plan horizontal, il avait utilisé le modèle de Perrin de Brichambaut. Il a ensuite exploité ces valeurs afin d'estimer le mieux possible le rayonnement solaire incident sur un plan incliné mais en utilisant dans ce cas le modèle de Liu Jordan. L'objectif était donc de fournir des données concernant le rayonnement solaire avec une couverture géographique continue. Les tableaux ci-après donnent les valeurs calculées de l'irradiation journalière pour toutes les journées de l'année et pour les quatre orientations. Il représente la variation du gain solaire journalier moyen calculé pour chaque mois selon les quatre orientations classiques: Sud, Nord, Est et Ouest. Nous illustrons ensuite par la quatrième colonne, la variation du gain solaire journalier moyen de l'habitat orienté en plein Sud en considérant qu'il n'y a pas d'ouvertures dans la façade Nord.

	Ghardaïa				El Bayadh				Biskra			
	Sud/ Nord	Est	Ouest	Sud sans ouvertures dans le Nord	Sud/ Nord	Est	Ouest	Sud sans ouvertures dans le Nord	Sud/ Nord	Est	Ouest	Sud sans ouvertures dans le Nord
Janvier	11121	10840	9942	10778	11668	11336	10364	11387	10269	9914	9076	9921
Février	11813	11949	11085	11409	12374	12527	11599	12038	11269	11305	10474	10851
Mars	11438	12147	11447	10935	11733	12523	11789	11313	11194	11771	11076	10664
Avril	10776	12031	11602	9869	10880	12312	11877	10076	10704	11810	11359	9802
Mai	10482	11725	11594	8610	10395	11877	11748	8692	10465	11615	11438	8701
Juin	10754	11798	11857	8011	10582	11940	11998	8094	10621	11630	11616	8151
Juillet	10344	11419	11393	8040	10221	11581	11557	8125	10290	11296	11214	8157
Août	10009	11142	10865	8722	9986	11331	11048	8860	9942	10937	10632	8684
Septembre	10331	11142	10610	9636	10583	11545	10983	10010	10134	10797	10267	9394
Octobre	10802	11070	10351	10273	11289	11605	10824	10863	10325	10483	9795	9764
Novembre	10759	10597	9771	10348	11434	11257	10348	11102	9949	9707	8939	9524
Décembre	10368	9958	9099	10029	10958	10480	9541	10681	9628	9186	8387	9281

Tableau 3.5. Irradiations solaires journalières moyennes pour les sites de Ghardaïa, El Bayadh et Biskra.

Les valeurs obtenues correspondantes à la région de Ghardaïa ont montré que pour se protéger des surchauffes d'été, il est recommandé de choisir l'orientation Sud entre Mars et Septembre et l'orientation Ouest pour le mois d'Octobre. En d'autre part, afin de bénéficier des apports solaires, nous devons choisir l'orientation Sud entre Novembre et Janvier et l'orientation Ouest pour le mois de Février. En conséquence, on peut dire que l'orientation dominante est celle du Sud. Même si on se réfère aux remarques des mois de Février et d'Octobre, nous pouvons constater que la différence des gains d'énergie solaire n'est pas vraiment considérable par rapport aux gains de l'orientation Sud. On peut tirer aussi de cette étude que la fermeture des ouvertures de la façade Nord réduit sensiblement le gain solaire direct par temps chaud.

Nous trouvons presque les mêmes résultats pour les autres régions indiquées dans le tableau 3.5

3.10. Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la compacité, à l'isolation et encore à l'orientation des bâtiments du point de vue température intérieure sans tenir en compte des apports solaires directs et gratuits. L'objectif était l'exploitation passive de l'énergie solaire tout en utilisant le rayonnement naturel du soleil par des mesures constructives optimisées. En impliquant la pose de fenêtres et de vitrages spéciaux au Sud et en tenant compte du parcours du soleil et de l'ombrage, y compris des variations saisonnières, nous pouvons profiter des apports en période froide et se protéger des surchauffes d'été. Par ces techniques on pourra maîtriser les températures intérieures en maîtrisant les apports solaires directs.

D'autre part, à travers les résultats obtenus on a prouvé qu'un mur épais en pierre lourde ralentit par son inertie, l'entrée de la chaleur. Ces murs épais possèdent un déphasage permettant de faire entrer des quantités de chaleur importantes la nuit dans le mur puis les restituer la journée. Faisant suite à cette analyse, il faut dire qu'il est nécessaire donc d'assurer un bon couplage entre ces avantageux aspects (inertie) et une forme géométrique optimale de la construction. On peut remarquer aussi que :

- L'augmentation de l'indice de compacité minimise la stabilité des températures intérieures de la zone.
- L'emplacement et la disposition des zones n'influent pas beaucoup sur le niveau de l'inertie de la zone.

En vue de faire des économies d'énergie, l'optimisation de la forme et la structure fonctionnelle d'un habitat en pierre à Ghardaïa doivent constituer un autre travail pertinent. La compacité d'un bâtiment est calculée comme le rapport entre le volume protégé et la surface de

déperdition, l'enveloppe extérieure du bâtiment. Une bonne solution pour analyser l'effet de la géométrie de la construction sur la consommation d'énergie est d'utiliser par exemple cet indicateur. Nous pouvons conclure aussi que pour cet exemple, un mur en pierre, même plus de 40 cm d'épaisseur, n'empêche nullement la chaleur de traverser à l'intérieur d'un habitat. Les températures obtenues sont très élevées lors d'une période très chaude, l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe peut être obtenue par l'isolation, le traitement des ponts thermiques, la maîtrise des transferts d'air, l'amélioration des vitrages..., ce qui permet de mieux maîtriser la consommation d'énergie, que ce soit pour le chauffage ou la climatisation.

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

Références

- [01]: M Hamdani, Etude et effet de l'orientation de deux pièces d'un habitat en pierre situé à Ghardaïa, Thèse de Magistère en Physique Energies Renouvelables, Université de Tlemcen, Janvier 2011.
- [02]: S M A Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen, Mai 2009.
- [03]: B Mecheri, Refroidissement d'une armoire de télécommunication avec bouche diphasique thermosyphon, Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, Février 2011.
- [04]: L Mora, Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement oriente, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Décembre 2003.
- [05]: H Boyer, A multimodal approach to building thermal simulation for design and research purposes, *Energy and Buildings* 28 (1), 71-78.
- [06]: B Brangeon, Contribution a l'étude numérique de la ventilation naturelle dans des cavités ouvertes par la simulation des grandes échelles, application au rafraîchissement passif des batiments, Thèse de Doctorat, Mécanique et Sciences du Bâtiment, Université de la Réunion, Octobre 2012.
- [07]: E Gengembre, Contribution à la construction de meta-modèles pour l'optimisation sous contraintes de critères énergétiques : application à la conception des bâtiments, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, Décembre 2011.
- [08]: H Boyer, J P Chabriat, B Grondin-perez, C Tourrand, J Brauf, Thermal building simulation and computer generation of nodal models, *Building and Environment* 31 (3) (1996) 207–214.
- [09]: S M A Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaiche et N Benamrane, Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate, Elsevier, *Energy and Buildings* vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [10]: M A C Haddam, Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de Doctorat en Sciences Physiques Option : Physique Electronique et Modélisation, Université Abou Bakr Belkaïd Tlemcen, 2014.
- [11]: S Bendara, L'apport de l'indice de compacité sur les températures intérieures d'une habitation multizone, Université Ahmed Draïa Adrar, Décembre 2015.
- [12]: P Rumianowski, J Brau, J J Roux, An adapted model for simulation of the interaction between a wall and the building heating system, In *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference Orlando, USA*, p. 224-233, 1989.
- [13]: S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, M Hamdani, N Benamrane, M R Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, *Construction and Building Materials* 52 (2014) 59–70.
- [14]: M K Cherier, Etude théorique et expérimentale de l'isolation thermique intérieure d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa, Thèse de Magistère en Physique Energies renouvelables, Université de Tlemcen, Juin 2010.
- [15]: M A C Haddam, S M A Bekkouche, T Benouaz, M Hamdani, M K Cherier, N Benamran, Integration of eaves and shading devices for improving the thermal comfort in a multi-zone building, *Thermal Science*, Article in press, doi: 10.2298/TSCI140422117H

- [16]: S M A Bekkouche, T Benouaz, M Hamdani, M K Cherier, M R Yaiche, N Benamrane, Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, *Advances in Building Energy Research*, 2015.
- [17]: M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, A new modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate, *Thermal Science*, Article in press, doi: 10.2298/TSCI131217026H.
- [18]: S M A Bekkouche, T Benouaz, M Hamdani, M K Cherier, M R Yaiche, N Benamrane, Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate, *Journal of Building Engineering*, 01 (2015) 42–52 Elsevier, 2015.
- [19]: M Hamdani, S M A Bekkouche, M K Cherier, N Benamrane, T Benouaz, Orientation of buildings: predictive control based on the calculation of temperature and solar direct contribution, *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy Vol. 55* (2015) pp 96-103, © (2015) SciPress Ltd., Switzerland doi:10.18052/www.scipress.com/ILCPA.55.96.
- [20]: M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, R Belarbi, M K Cherier, Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate, *Engineering Structures and Technologies*, Taylor & Francis: ISSN 2029-882X / eISSN 2029-8838 2014 6(3): 131–149, doi:10.3846/2029882X.2012.988756.
- [21]: S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, M Hamdani, M R Yaiche, N Benamrane, Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance, *International Journal of Energy and Environment*, Volume 4, Issue 3, 2013 pp. 459-466
- [22]: M K Cherier, T Benouaz, S M A Bekkouche, M Hamdani, N Benamrane, Improving of interior temperatures by reinforced thermal insulation of the building envelope in Ghardaïa climate, *Revue Internationale d'Héliotechnique* N° 45 (2013) 1-7
- [23]: S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, R. Khanniche, Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), *International Scientific Journal, Thermal Science*, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 349-364
- [24]: S M A Bekkouche, T Benouaz, N Benamrane, M K Cherier, M Hamdani, Practical installation methods of thermal insulation in a residential building in hot climate, Published in POWERENG2013 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 13 - 17 May 2013, Istanbul, Turkey. Page(s): 1050 – 1059 ISSN: 2155-5516, DOI 10.1109/PowerEng.2013.6635756
- [25]: M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, N Benamrane, O Halloufi, Effect of orientation of buildings with different materials in distribution of temperatures in walls thickness, 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2013, June 16-22, 2013, 91 - 98 pp, Albena, Bulgaria. SGEM Scientific Papers DataBase -Renewable Energy Sources and Clean Technologies, DOI:10.5593/SGEM2013/BD4/S17.012
- [26]: M K Cherier, S M A Bekkouche, T Benouaz, M Hamdani, N Benamrane, O Halloufi, Studies and choice of local building materials for Improving interior temperatures of a building located in Ghardaïa region, 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2013, June 16-22, 2013, 235 - 242 pp. Albena, Bulgaria. SGEM Scientific Papers DataBase - Renewable Energy Sources and Clean Technologies. DOI:10.5593/SGEM2013/BD4/S17.030
- [27]: R Allain, *Morphologie urbaine, géographie, aménagement et architecture de la ville*, Armand Collin, Paris, 256 p, 2004.

- [28]: M Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome1, vol 1 et 2, Modèles théoriques et expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [29]: M R Yaïche, S M A Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, revue des énergies renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 683 – 695.

Chapitre 4

Etude thermo-aéraulique avancée par le couplage TRNSYS / CONTAM

CHAPITRE 4

ETUDE THERMO-AERAULIQUE AVANCEE PAR LE COUPLAGE TRNSYS / CONTAM

4.1. Introduction

Pour étudier convenablement le confort thermique et les échanges entre les différentes zones à l'intérieur d'un bâtiment, plusieurs travaux et une modélisation thermo-aéraulique plus avancée ont été réalisés dans ce chapitre. Les démarches suivies permettent un temps de calcul raisonnable et réduit. Le modèle numérique décrivant les systèmes de conditionnement d'air est présenté, le couplage thermo-aéraulique complet, en utilisant TRNSYS et CONTAM nous a permis d'étudier et de trouver les niveaux de consommations optimales de fonctionnement de ce type de bâtiment.

Le couplage dynamique tient compte de deux aspects prépondérants: la dynamique des fluides et la thermique du bâtiment. Les températures de surface déterminées par le logiciel de simulation thermique seront utilisées comme conditions aux limites dans la simulation aéraulique. D'autre part, les débits déterminés par le logiciel de dynamique des fluides seront utilisés pour le calcul de l'équilibre thermique de la zone située entre les parois et l'intérieur du bâtiment. Une première modélisation thermique sous TRNSYS permet de déterminer les températures de surface et les flux thermiques à l'intérieur de la lame d'air. Une deuxième simulation sous le logiciel CONTAM détermine le débit d'air, la température moyenne et le coefficient de convection à l'intérieur de chaque zone. Ces valeurs seront réinjectées pour une troisième simulation dans TRNSYS. Ce couplage thermo-aéraulique entre les deux logiciels TRNSYS (thermique) et CONTAM (aéraulique) aide à la réalisation d'une étude paramétrique sur l'influence de la perméabilité de la façade en fonction des matériaux de constructions, de la vitesse du vent, de son orientation et sur les besoins énergétiques du bâtiment. Le comportement thermique du bâtiment, heure par heure, sera modélisé grâce au caractère instationnaire des conditions aux limites imposées (température extérieure, rayonnement solaire, vitesse de vent, pression, direction du vent, humidité etc.) et aux propriétés constructives du bâtiment (masse thermique, etc.) [01-03].

4.2. Choix de l'outil de simulation

Les codes spécialisés sont des outils numériques détaillés et sophistiqués, issus d'une connaissance fine des phénomènes physiques (dynamique des fluides, thermique, lumière, etc.).

Ils permettent d'évaluer les besoins énergétiques d'un bâtiment de manière plus précise. Il s'agit de programmes qui calculent et étudient l'évolution temporelle du bilan énergétique d'un bâtiment sur des pas de temps faibles (inférieurs à une heure), à partir d'une description fine du bâtiment, de ses équipements et de scénarios de fonctionnement. Parmi les logiciels existants, le plus largement validé est l'outil TRNSYS, développé depuis 1975 par un groupement international de laboratoires de recherche et d'universités (Solar Energy Laboratory de l'Université du Wisconsin-Madison, le CSTB, la société Transolar) [04].

Nous avons choisi TRNSYS17 parmi les logiciels de simulation thermique pour plusieurs raisons. D'abord TRNSYS17 n'est pas un logiciel dédié uniquement à l'étude du comportement thermique du bâtiment, il est plutôt un solveur de systèmes d'équations, capable de réaliser des simulations dynamiques. Il est basé sur une approche modulaire et permet de créer de nouveaux modèles et d'y intégrer en plus ceux de la bibliothèque. La bibliothèque contient quelques 50 familles de composants permettant de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono ou multizone), les systèmes de chauffage et de climatisation. En plus, la nouvelle version TRNSYS17 permet d'appeler des programmes de langage MATLAB et ensuite les coupler avec les autres types via un nouveau composant "type 155". Puisque nous avons utilisé MATLAB pour l'écriture des différents programmes, cela facilite leur intégration et leur couplage avec les différents types de TRNSYS17. Ainsi le couplage entre les types 56 (modèle de thermique du bâtiment) et 97 (modèle aéraulique) de TRNSYS, les sorties des modèles aérauliques servent directement de données d'entrée au modèle thermique. Il est par exemple possible d'exporter les résultats de CONTAM vers TRNSYS. Cette approche ne permet pas d'évaluer l'interaction entre les transferts thermiques et aérauliques. Pour cette raison, on lui préférera un couplage synchrone [05].

4.3. Modélisation du Bâtiment Multizone sous TRNSYS

4.3.1. Fonctionnement

La simulation a été réalisée en utilisant la dernière version de TRNSYS. La création de la géométrie en 3D de l'édifice a été réalisée par le plug-in TRNSYS3D pour Google SketchUp. Le comportement thermique de la maison est simulé à travers une modélisation transitoire multizone (type 56) avec un pas de temps de 1 heure. TRNBuild est utilisé pour saisir les informations nécessaires à la simulation de bâtiments multi-zonaux à travers la description de l'enveloppe (matériaux, épaisseur des couches et paramètres thermo-physiques), les fenêtres, le chauffage/refroidissement, la ventilation, l'infiltration, les gains et le taux d'occupation de la maison [06].

La simulation a été effectuée sous des conditions climatiques réelles, mesurées sur deux sites de régimes climatiques différents correspondant à l'année 2013. Les paramètres mesurés sont: la température, l'humidité, le rayonnement solaire global, la vitesse et la direction du vent. Ce type de modélisation consiste à subdiviser la maison en plusieurs zones thermiques (figure 4.1) afin de simuler la température moyenne dans chaque zone. Face à ces objectifs, nous avons défini six zones pour le RDC et l'étage. Concernant la température du sol, nous avons opté un maillage sur SketchUP en gardant les mêmes zones thermiques pour les prélèvements des températures.

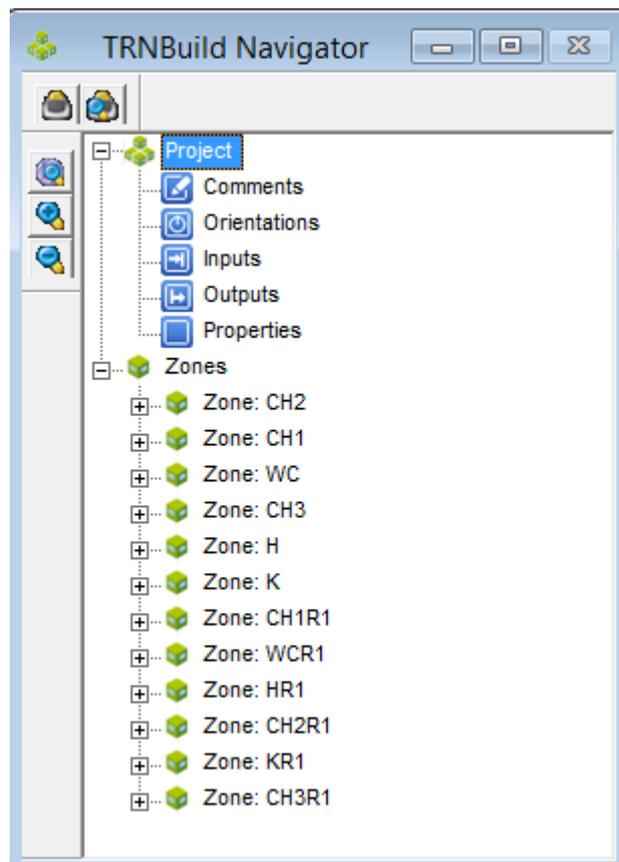


Figure 4.1. Zones thermiques

Dans ce chapitre, quatre outils ont été utilisés pour construire les modèles énergétiques du bâtiment. Pour produire un modèle précis, les quatre étapes suivantes doivent être prises :

- SketchUp, un outil de dessin 3D,
- TRNBUILD, une interface pour ajouter les propriétés physiques de la construction aux définitions géométriques,
- TRNSYS, un logiciel de simulation des systèmes énergétiques, et
- CONTAM (type 97), le modèle aéraulique.

Google SketchUp rend la description du bâtiment relativement simple (géométrie, orientation, ouvertures...). Un bâtiment dessiné sous SketchUp peut être directement importé sous TRNBUILD.

Les caractéristiques des matériaux, l'occupation, l'éclairage, les charges électriques et les conditions météorologiques sont ensuite paramétrés directement sous TRNSYS [04].

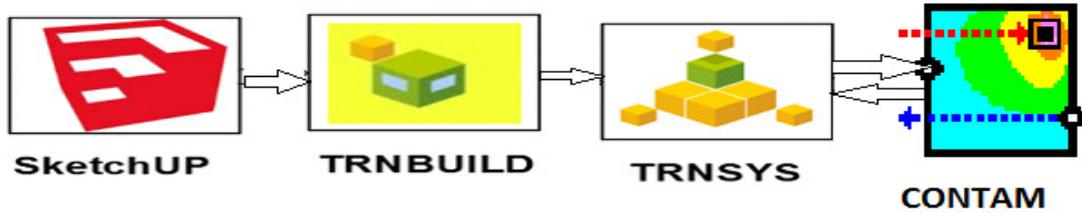


Figure 4.2. Les outils de simulation - programmes auxiliaires dans l'interaction avec TRNSYS

4.3.2. Google SketchUp

Le bâtiment peut-être modélisé par Google SketchUp, un logiciel de dessin gratuit capable de créer des modèles en trois dimensions. Grâce au plug-in Open Studio, il est possible d'exporter des fichiers créés sous Google SketchUp dans TRNSYS mais aussi d'importer des fichiers créés sous TRNSYS afin de les visualiser sous Google SketchUp. On peut ainsi observer les différentes pièces sous différents angles. En résumé, Google SketchUp offre une visualisation du bâtiment et les différents ombrages [07].

La première étape consiste à modéliser ou importer la géométrie du bâtiment. Elle peut être réalisée de différentes manières [08]:

- Création de la géométrie par dessin en 3D avec le module complémentaire SketchUp de TRNSYS (génération d'un fichier *.idf),
- Création de la géométrie par dessin en 3D avec le module complémentaire Open Studio (génération d'un fichier *.osm ou *.idf),
- Importation d'un fichier *.ifc dans SketchUp avec le module complémentaire IFC Converter,
- Utilisation d'un convertisseur *.ifc à *.idf (en cours de développement par la NREL).

Google SketchUp est un logiciel qui présente de nombreux avantages notamment au niveau de la facilité d'utilisation de son interface de présentation ainsi que les multiples opportunités offertes pour la présentation du modèle. Sa versatilité en fait aujourd'hui un outil utilisé par de nombreux champs d'étude, il est possible de modifier l'affichage des différents volumes présents dans le monde 3D. Ainsi, il est possible de décider de rendre opaques ou transparents les volumes thermiques dessinés mais également de rendre opaques, transparents ou mêmes invisibles les éléments d'environnement importés. L'ensemble de ces options est accessible dans le menu, en cochant les différentes options possibles (figure 4.3).

- La deuxième étape consiste à passer du modèle géométrique au modèle énergétique par l'exportation de notre plan au TRNBUILD

Nous devons spécifier l'orientation de notre bâtiment par rapport au Nord.

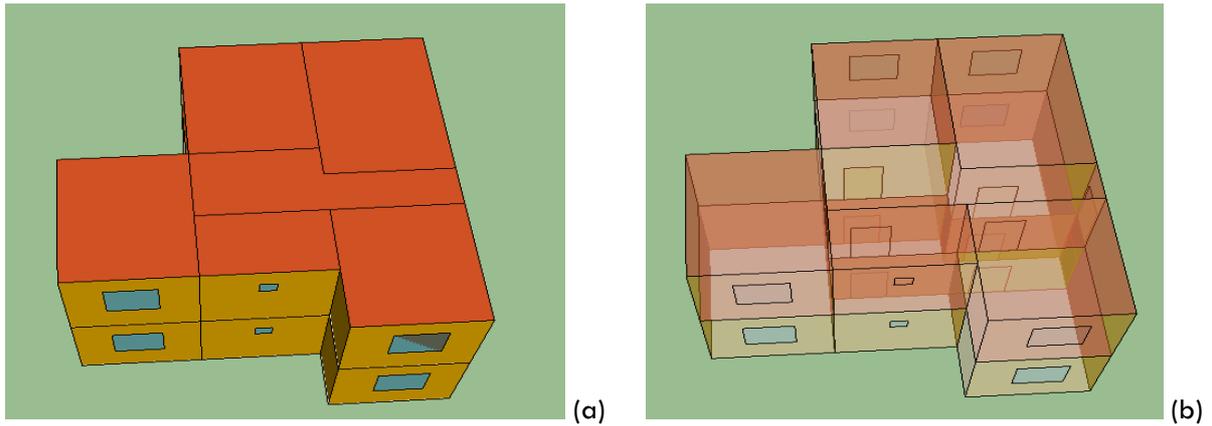


Figure 4.3. Maquette numérique du bâtiment : (a) Plan opaque, (b) plan transparent

Par défaut, le Nord est confondu avec la direction de l'axe vert du repère absolu de l'application et a comme valeur 0° . Par défaut également, l'axe du Nord est non visible. Pour l'afficher, il faut aller dans le menu par le bouton situé à droite de la fenêtre et on peut par la suite modifier les orientations [08].

Avec l'apparition de SketchUp, les informations géométriques seront centralisées et structurées dans un seul support, il présente une réelle opportunité pour effectuer automatiquement une passerelle entre la définition géométrique d'un projet et l'outil de simulation thermique dynamique [09].

4.3.3. TRNBuild

Dans notre travail, nous allons nous servir du Type 56 qui correspond au module de bâtiments multizones. Le Type 56 est très particulier parce qu'il possède sa propre interface de gestion des données nommée TRNBuild. C'est un logiciel de prétraitement des données qui permet de rentrer toutes les caractéristiques du bâtiment: dimensions des parois, caractéristiques des matériaux.....etc.

Dans le modèle correspondant au Type 56, le bâtiment est représenté par un ensemble de nœuds modélisant des pièces ou des zones thermiques (groupement de pièces) [10]. Les bâtiments étudiés peuvent être décomposés en plusieurs zones distinctes. Une zone correspond à une page d'interface à compléter (figure 4.4) [11]. Le projet étudié est une maison type construite à Ghardaïa avec des matériaux locaux et d'une surface habitable à environ 72 m^2 .

Pour ce faire, il faut définir les zones, et pour chacune d'elles, définir les parois (opaques et vitrées), c'est-à-dire leurs compositions et leurs orientations, spécifier les gains, les infiltrations, la ventilation, le chauffage, la climatisation, le confort et l'humidité. Le logiciel propose une librairie sur les matériaux utilisés avec les paramètres correspondants: conductivités, capacités thermiques, épaisseurs, ce qui vous donne la densité et d'autres paramètres thermo physiques.

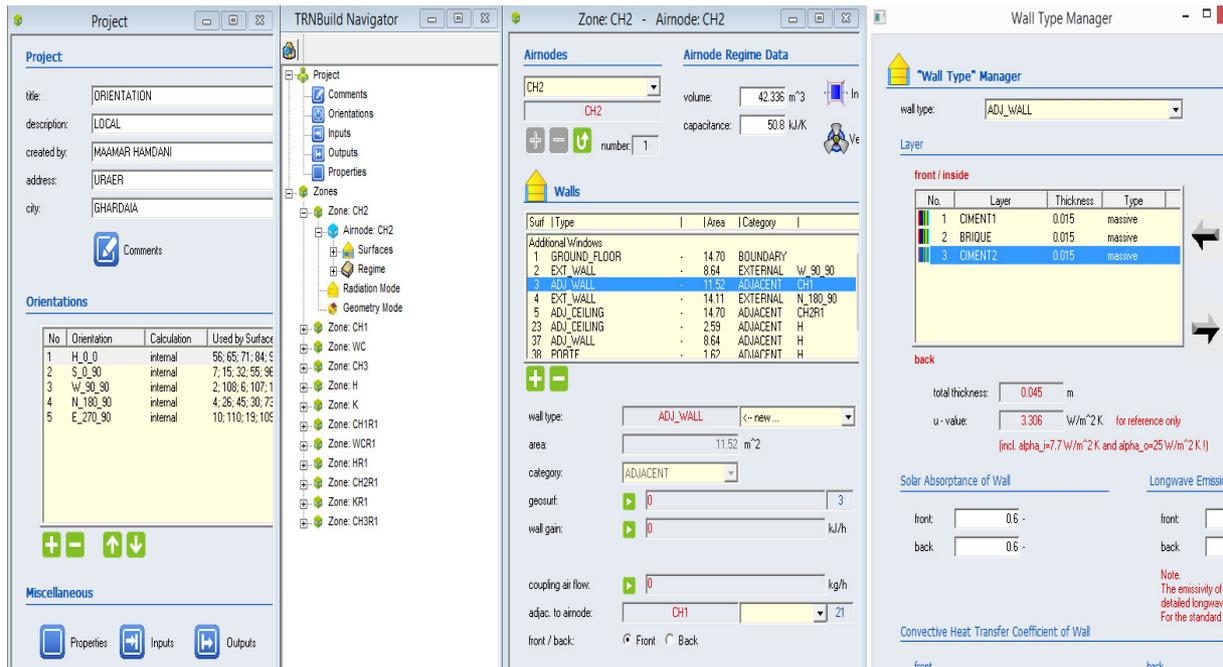


Figure 4.4. Panneau d'entrée, propriétés des zones et paramètres de calcul

4.3.4. Conditions climatiques & Format TMY2

Le premier objectif est donc le développement d'une méthode de génération des fichiers climatiques en format TMY2 pour un an à partir de données mesurées en temps réel pour les deux sites, par le code python pour remplacer les fichiers climatiques sous format compatible avec notre type. Le travail de traitement des données est long, surtout avec d'aussi grosses campagnes de mesure. Il consiste d'abord à s'assurer que les données sont "propres", qu'il n'y a pas de doublons dans la base, ni de trous. De nombreux tests de cohérence sont réalisés jusqu'à être certain que la base de données est fiable et utilisable [12]. En utilisant ce fichier, on a pu obtenir la variation de la température ambiante extérieure, la vitesse du vent, l'humidité, la radiation solaire durant l'année (figures 4.5 - 4.6).

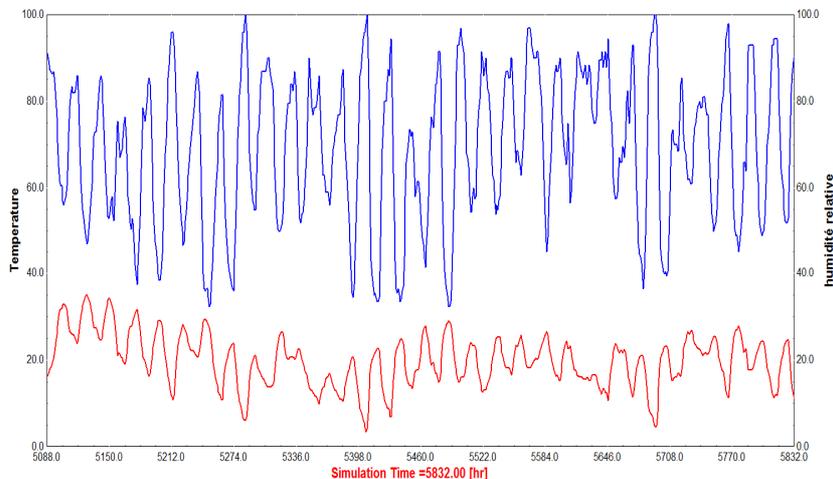


Figure 4.5. Données météorologiques (type 15); bleu: humidité relative, rouge: température ambiante

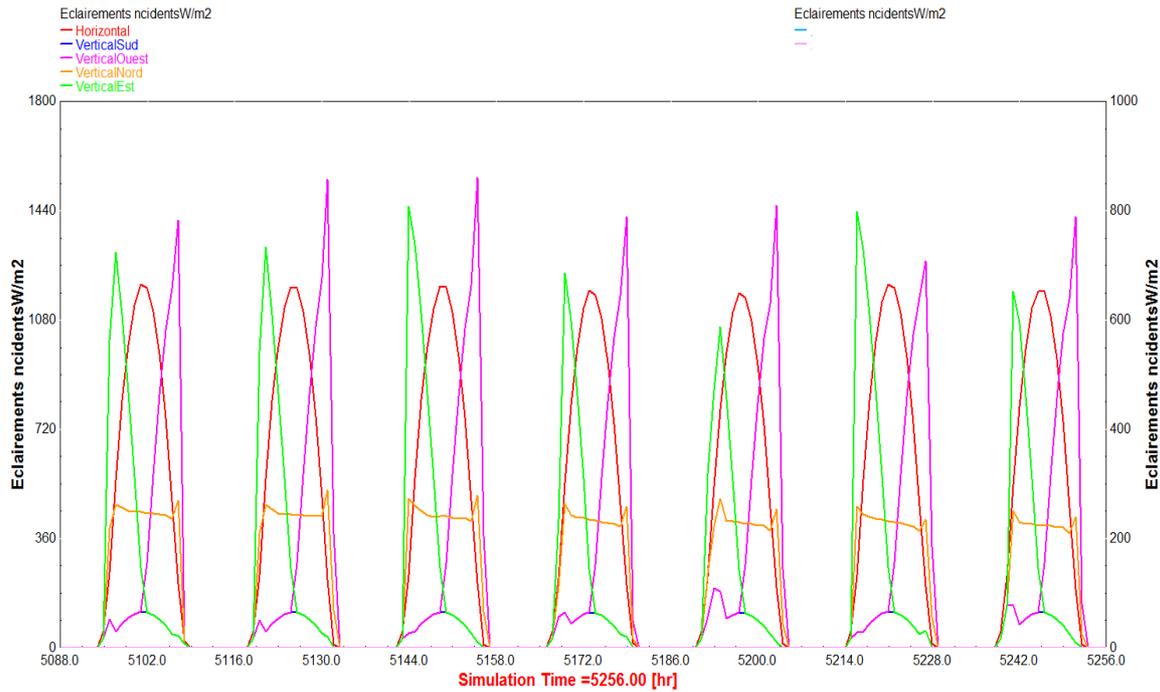


Figure 4.6. Données radiométriques (type 15)

4.3.5. Modélisation sous TRNSYS & Type 49 & Températures du sol

Nous nous intéressons à la méthode de calcul du coefficient de transmission thermique des parois en contact thermique avec le sol. Cette méthode tient compte de la nature tridimensionnelle du flux thermique dans le sol situé sous le bâtiment. En général, nous avons trois niveaux de la surface du plancher intérieur, quand il s'agit de planchers sur terre-plein, planchers sur vide sanitaire et sous-sols non chauffés, et au niveau de la surface du sol extérieur, pour les sous-sols chauffés. Dans notre travail on utilise le premier cas puisqu'il coïncide avec notre projet. La température du sol Type 49 est un sous-programme TRNSYS pour modéliser la distribution verticale et horizontale de la température de la terre. Le sous-programme "comme entrées" nécessite une interaction effective de la température moyenne annuelle de la surface de la masse, l'amplitude en température pour la surface du sol durant l'année, la différence de temps entre le début de l'année et au moment de l'apparition de la température minimale de surface, et la diffusivité thermique du sol. Ces paramètres ont été calculés pour le fichier météo utilisé et ils ont été fournis manuellement comme entrées à la sous-routine. Les distributions en température ont été utilisées pour prédire la température de l'air.

Le sol (dalle sur terre-plein) a été modélisé sous TRNSYS version 17-00-0019 (TR-GCT) en utilisant le modèle de bâtiment multizone type 49. La prédiction des transferts de chaleur au sein du sol et l'estimation de ses températures, plusieurs hypothèses et choix de modèles ont été considérés:

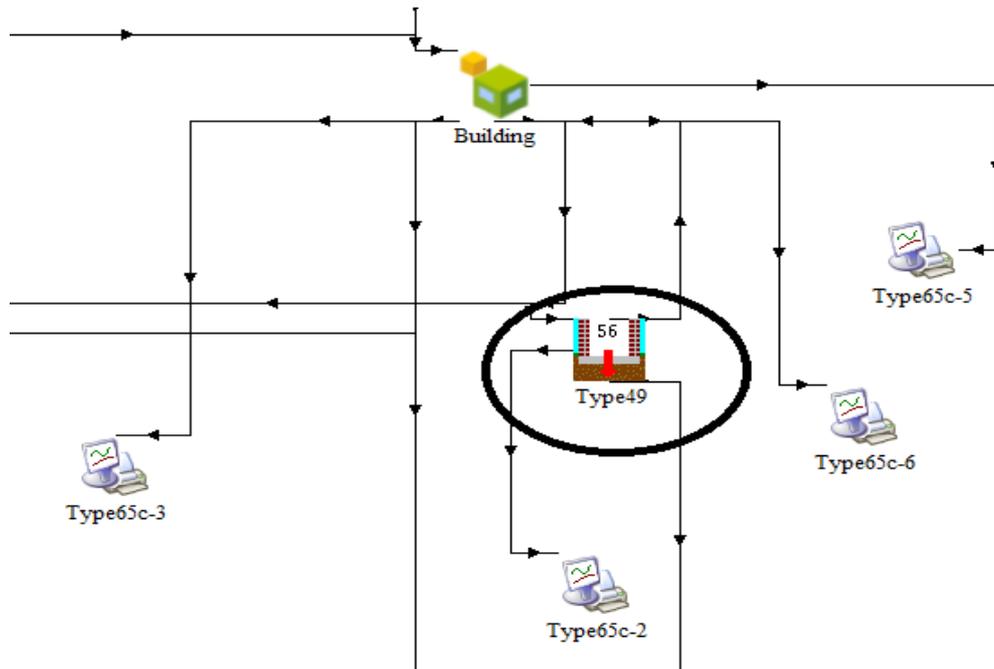


Figure 4.7. Multizone Slab dans TRNSYS (type 49)

- Pour un bâtiment sur terre-plein, l'interface avec le sol est constituée d'un plancher et d'un terre-plein.
- La géométrie de la dalle et les paramètres du sol ont été introduits dans le modèle de TRNSYS complète.
- Les tailles des nœuds de TRNSYS modèle dalle sur terre-plein ont été déterminées pour les directions horizontale et verticale à travers un ensemble de séries de tests initiaux.
- La plus petite taille de nœud le long du périmètre de la dalle a finalement été réglée sur 0,1 m.
- La distance entre les nœuds a été multipliée par un facteur de 2 en tant que nœuds élargis à une distance à partir du périmètre de la dalle.
- La limite en champ lointain en champ proche a été définie comme "conducteur" dans tous les axes, x, y et z.
- Dans TRNSYS, la température du sol en profondeur est supposée être très proche de la température annuelle moyenne de l'air extérieur.
- Les températures annuelles moyennes de l'air extérieur ont été calculées pour les quatre saisons et elles ont été ensuite introduites dans le type 49 (température de la surface moyenne du sol profond).
- L'amplitude du profil de la température annuelle de la surface du sol est supposée être égale à la moitié de la température mensuelle moyenne maximale de l'air extérieur moins la moitié de la température minimale mensuelle moyenne de l'air extérieur.

- La température du sol a été également supposée être affectée par le bâtiment à une distance de 10 m au-dessous du fond du pied dans le sens vertical et de 10 m à partir du bord du bâtiment dans le sens horizontal.

Par ailleurs, le rôle du sol ne doit pas être négligé. La surface du plancher et les caractéristiques du sol jouent un rôle important dans le bilan énergétique et par conséquent la performance thermique des bâtiments. Une étude menée par LAPISA et al [13] sur les déperditions thermiques à travers un plancher a montré que si le bâtiment est non-isolé, les déperditions représentent 10 % des pertes totales et de 30 % à 50 % pour les enveloppes bien isolés. De plus, le sol constitue un facteur clé à prendre en considération en raison de son inertie thermique pour les bâtiments de faible hauteur. Cela signifie que pour les bâtiments de grands volumes à faible hauteur, le sol est un facteur important à prendre en considération. En revanche, l'isolation du sol pourrait avoir un effet négatif pendant la période estivale.

4.3.6. Récupération et visualisation des données (Output - Type 65c)

Sur simulation studio, on définit les outputs désirés (résultats), ces résultats seront affichés par des graphes et sous forme de tableaux qu'on pourra exploiter. Les outputs fixés sont les températures et les besoins en chauffage et rafraîchissement pour différentes zones de l'habitat. Les sorties de modèles sont récupérées sous forme de courbe et de fichier Excel via le Type 65.

4.4. Modélisation mathématique & TRNSYS Type 56

Chaque logiciel possède ses propres caractéristiques, bien que la famille d'outils Multizone repose sur des fondements communs. Dans le cadre de ce travail, l'approche retenue par le logiciel TRNSYS sera présentée. Ce logiciel a été privilégié pour cette recherche en raison de son utilisation répandue à la fois dans le monde académique et industriel ainsi qu'en raison de son universalité. Il est en effet possible de développer des extensions à ce programme et de modifier aisément les fichiers sources de modélisation. TRNSYS 17 permet également de définir plusieurs nœuds de calculs dans une seule zone thermique. Cette fonctionnalité permet de diviser le volume d'une paroi en plusieurs strates thermiques de manière à calculer la température moyenne de chaque strate et simuler ainsi macroscopiquement le gradient thermique à l'intérieur de la paroi [14]. La description mathématique de l'approche multizone abordera successivement :

- Le bilan thermique au sein d'une zone,
- Le bilan thermique au travers d'une paroi,
- Le regroupement de ces deux types de bilan en un seul groupe cohérent,

- Le bilan aéraulique du bâtiment,
- Le regroupement des bilans thermique et aéraulique en une seule simulation.

Le module Type 56 restitue entre autre les températures de zones et l'énergie consommée dans chaque zone (figure 4.8). Le gain de chaleur convectif d'une zone i (Q_i) du bâtiment est par définition la somme des gains convectifs dus aux infiltrations de l'air extérieur ($Q_{inf,i}$), les débits de ventilation ($Q_{vent,i}$), l'air provenant des zones adjacentes ($Q_{cplg,i}$), les échanges convectifs internes liés aux occupants, aux équipements et à l'éclairage artificiel ($Q_{g,c,i}$) et les échanges convectifs avec la surface.

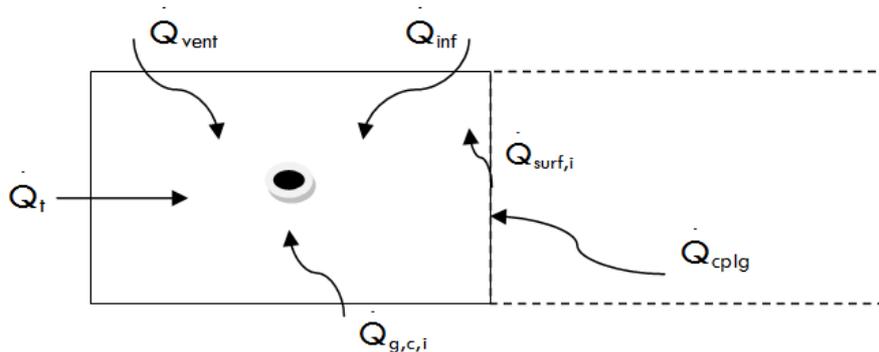


Figure 4.8 Bilan convectif d'un nœud d'air

$$Q_{conv,i} = Q_{surf,i} + Q_{inf,i} + Q_{vent,i} + Q_{g,c,i} + Q_{cplg,i} \quad (4.1)$$

Avec :

$Q_{surf,i}$: Gains provenant des surfaces internes (W)

$$Q_{surf,i} = U_{mur,i} A_{mur,i} (T_{mur,i} - T_{air}) \quad (4.2)$$

U : Le coefficient de transmission thermique d'une paroi (W/m²)

A : La surface (m²)

T : Température en Kelvin

$Q_{inf,i}$: Gains provenant des infiltrations (W)

$$Q_{inf,i} = V \rho C_p (T_{ext} - T_{air}) \quad (4.3)$$

$Q_{vent,i}$: Gains provenant de la ventilation (W)

$$Q_{vent,i} = V \rho C_p (T_{vent,i} - T_{air}) \quad (4.4)$$

V : Le volume (m³)

ρ : La masse volumique (Kg m⁻³)

C_p : La chaleur spécifique (J kg⁻¹ K⁻¹)

$Q_{g,c,i}$: Gains convectifs intérieurs (W)

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

$Q_{gplg,i}$: Gains convectifs dus aux écoulements d'air provenant des zones adjacentes (W)

$$Q_{gplg,i} = V \rho C_p (T_{zone,i} - T_{air}) \quad (4.5)$$

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

$$Q_{rd,i} = Q_{CLO,i} + Q_{GLO,i} = Q_{g,r,i} + Q_{sol,i} + Q_{long,i} + Q_{gains\ internes,i} \quad (4.6)$$

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

$$Q_{GLO,e} = \sigma \varepsilon_{S,O} (T_{S,O}^4 - T_{f,ciel}^4) + S_{S,O} \quad (4.7)$$

Avec

$Q_{rd,i}$: Gains radiatifs du nœud de température de surface du mur (W),

$Q_{g,r,i}$: Gains radiatifs internes de la zone reçus par le mur (W),

$Q_{sol,i}$: Gains solaires à travers les fenêtres reçus par le mur (W),

$Q_{long,i}$: Flux de grande longueur d'onde échangé entre le mur et les autres murs, les fenêtres et les gains internes (W),

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

$S_{S,O}$: Rayonnement solaire absorbé par la surface (W m^{-2}),

$Q_{r,wi}$: Les gains radiatifs reçus par le nœud de température de la surface murale interne, proviennent des échanges radiatifs à l'intérieur de la zone du nœud d'air vers le mur

$Q_{g,r,i,wi}$: Les gains solaires traversant les fenêtres de la zone

$Q_{sol,i,wi}$: Les échanges radiatifs grandes longueurs d'ondes entre le mur et tous les autres murs et fenêtres.

Pour $\varepsilon_i = 1$, $Q_{long,wi} = Q_{GLO,e}$

$$Q_{r,wi} = Q_{g,r,i,wi} + Q_{sol,i,wi} + Q_{long,wi} + Q_{sol,i} + Q_{mur-gain} \quad (4.8)$$

Où $Q_{mur-gain}$ est le flux de chaleur reçu par les murs ou les surfaces vitrées, spécifié par l'utilisateur.

Les flux de chaleurs conduits de la surface extérieure vers le mur q_{so} et du mur vers la surface intérieure q_{si} sont modélisés à partir des fonctions de transfert de Mitalas et Arseneault [15] sous forme de séries temporelles de températures de surface et de flux de chaleur. Les échanges de rayonnement GLO entre les surfaces dans la zone et le flux de chaleur convectif

entre les surfaces intérieures et le nœud d'air de la zone sont approximés en utilisant un réseau en étoile [16].

Cette méthode utilise un nœud de température artificiel T_{star} pour remonter au flux convectif entre une surface et le nœud d'air $q'_{c,s,i}$ et au flux radiatif $q'_{r,s,i}$ de cette surface vers les autres surfaces. Le transfert de chaleur total pour chaque surface intérieure $q'_{comb,s,i}$ correspond à la somme de ces deux flux tel que:

$$q'_{comb,s,i} = q'_{c,s,i} + q'_{r,s,i} \quad (4.9)$$

$$q'_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i}} A_{s,i} (T_{si} + T_{star}) \quad (4.10)$$

Où $A_{s,i}$ correspond à la surface intérieure de la zone

A noter que les échanges GLO pour les surfaces extérieures font intervenir la température de ciel T_{ciel} , qui est une des données d'entrée du Type 56 et le facteur de vue du ciel f_{ciel} pour chaque surface extérieure, qui est donnée dans TRNBUILD.

4.5. Modélisation Multizone des échanges aérauliques

En complément de notre approche, nous proposons dans ce chapitre une approche numérique permettant de prédire à long terme les performances énergétiques sur site. Le modèle utilisé est issu du couplage d'un modèle thermique "TRNSYS" et d'un modèle aéraulique "CONTAM" du bâtiment dont l'approche se veut multizone. Il nous permet également de tester d'autres stratégies de confort thermique selon différents scénarios d'orientation, différents climats ou tout autre paramètre du modèle (exposition, isolation, matériaux, vitrage...etc.).

Parmi les modèles multizones les plus récents et les plus complets, nous pouvons citer, pour les modèles aérauliques, CONTAM, et pour les codes thermiques (énergétiques) TRNSYS. Le module type 56 ne permet pas de calculer les échanges aérauliques entre les différentes zones d'un bâtiment ainsi que les infiltrations de l'extérieur, il les considère comme des entrées. Or l'échange aéraulique joue un rôle important dans la détermination des conditions thermiques, surtout dans les bâtiments naturellement ventilés en été où les infiltrations par ouverture des fenêtres constituent le seul moyen de rafraîchissement. Les différents débits d'échange d'air doivent être connus avec précision pour pouvoir les fournir au type 56 en entrée à chaque pas de temps.

Dans le cadre de cette thèse, la ventilation naturelle n'est abordée que par rapport aux effets du vent [17]. Il est donc important de connaître le comportement des écoulements d'air

dans les bâtiments, de manière à pouvoir les intégrer dans une démarche globale visant à rendre les bâtiments performants et confortables. Le lien entre les effets du vent et la répartition de l'air au sein du bâtiment est effectué par les ouvertures (liens aérauliques), qui vont canaliser l'écoulement fluide. En fonction de la taille des ouvertures, l'écoulement d'air, en particulier sa direction [18].

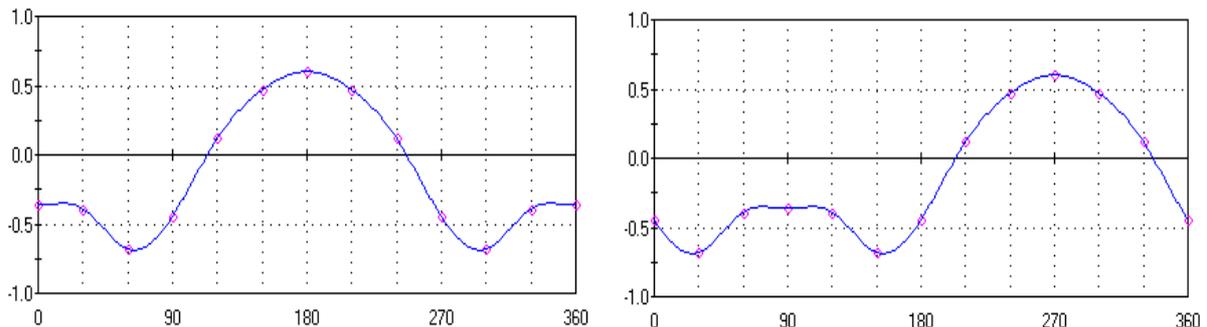
En effet, dès la conception l'utilisation d'outils informatiques simplifiés pour la prédiction des débits n'est pas parfaitement fiable car souvent il faut introduire des paramètres source d'erreur, le coefficient de décharge (C_d) et les coefficients de pressions (C_p). Pour estimer les débits d'infiltration en conditions naturelles, il est également nécessaire de déterminer la différence de pression de part et d'autre de chaque orifice.

4.5.1. Coefficient de pression

Le coefficient de pression (C_p) est un paramètre dérivé de façon empirique et expérimentale pour corriger l'effet de la pression initiale du vent rencontrant une façade. En effet, la direction du vent génère un angle avec la normale du mur et la pression théorique du vent (ou pression de stagnation) sur la façade s'en trouve réduite par un rapport qui est le coefficient de pression (C_p). Sa valeur tient compte des changements de pression du vent en fonction du type d'environnement, le coefficient de pression dépend donc de la forme du bâtiment, de la direction du vent et de l'influence des bâtiments environnants, de la végétation et des caractéristiques du terrain [19]. Le coefficient de pression du vent sur l'enveloppe est déterminé pour chaque paroi en fonction de l'angle d'incidence du vent sur celle-ci.

$$C_p = C_p \ln (1.2480.703 \sin(\alpha/2) - 1.175 \sin^2(\alpha) - 0.131 \sin^3 + 0.769 \cos(\alpha/2) + 0.07G^2 \sin^2(\alpha/2) + 0.717 \cos^2(\alpha/2)) \quad (4.11)$$

Où α est l'angle d'incidence du vent sur la surface considérée.



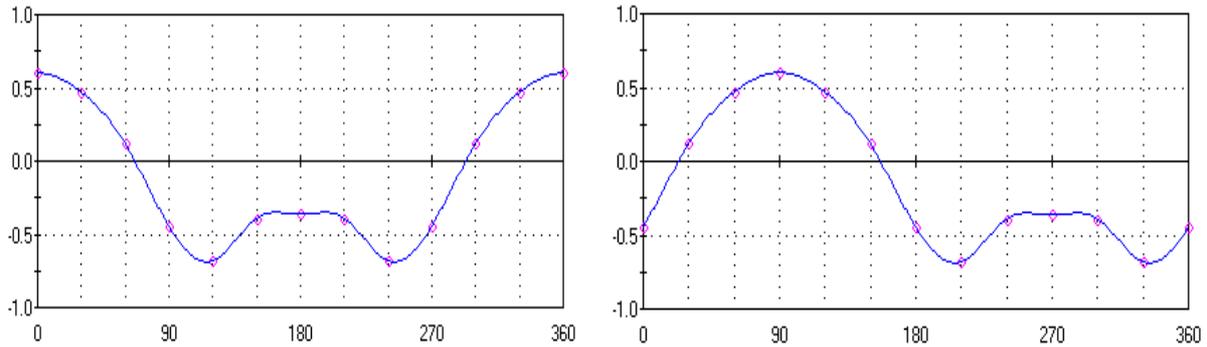


Figure 4.9. Coefficients de pression du vent sur le bâtiment pour les quatre directions : Sud, Ouest, Est et Nord

4.5.2. CONTAM & Type 97

Le logiciel CONTAM utilise les algorithmes AIRNET développés par Walton pour l'institut américain des normes et de la technologie (National Institute of Standards and Technology) [Walton, 1984, 1989]. Cet outil permet de modéliser l'échange aéraulique multizonale dans un bâtiment. Le bâtiment est représenté sous forme d'un réseau de nœuds dont chacun représente une zone du bâtiment. L'ambiance extérieure est aussi représentée par une zone. Chaque nœud du réseau est caractérisé par sa pression et sa température. Les passages d'air possibles entre les différents nœuds sont représentés par des connexions entre ces nœuds.

Ce modèle vérifie la conservation de la masse à chaque nœud et tient compte de l'hypothèse d'homogénéité pour chaque nœud, supposant ainsi que les zones sont bien mélangées et que la température et la pression sont uniformes dans chaque zone. Le modèle ne traite pas les phénomènes de transfert de chaleur, mais permet d'imposer une température (constante ou variable) dans chaque zone. Les températures intérieures peuvent être renseignées par le couplage à un code thermique et les conditions extérieures (T_{air} , Hr, Patm et vitesse et direction du vent) par des fichiers météo [20].

Par ailleurs, les échanges d'air entre les différentes zones et l'extérieur influencent beaucoup la température. Il suffit de rentrer la dimension des portes et fenêtres pour modéliser ces ouvertures et rentrer le débit de ventilation et la température de soufflage d'air pour une ventilation double flux. Il est plus délicat de modéliser un module d'entrée d'air et les infiltrations (figure 4.10).

Dans notre modèle, les ouvertures se trouvent sur les deux façades Sud et Nord avec une porte principale sur la façade Est. Pendant le jour la température de l'air extérieur est supérieure à celle de l'intérieur. Pour éliminer l'échange par ventilation avec l'air extérieur, les fenêtres et la porte seront fermées pendant le jour, ouvertes la nuit (l'heure ou la fenêtre et la porte seront fermées correspond à l'heure ou $T_{ai} < T_{ao}$, dans le cas inverse correspond à

l'heure où elles seront ouvertes). Par simulation numérique du modèle on détermine l'heure qui correspond à chaque cas.

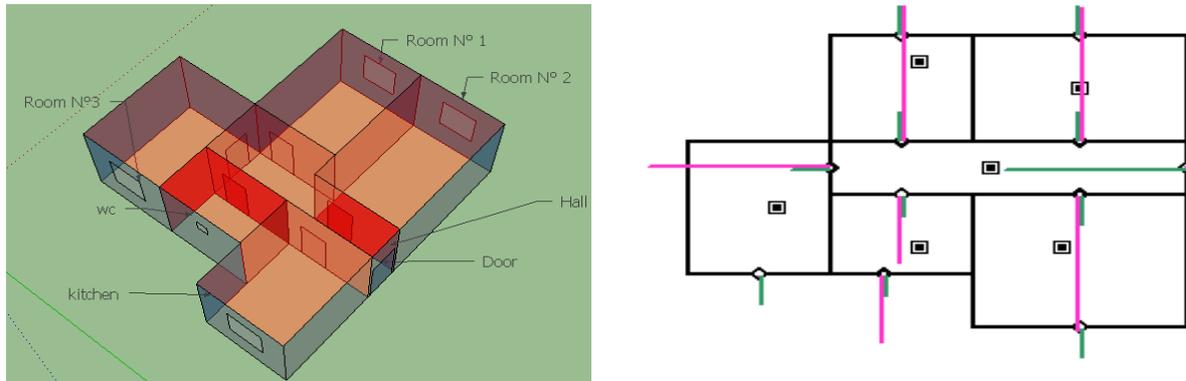


Figure 4.10. Débit d'air et distribution de pression dans les six zones, calculés par CONTAM

Pour une meilleure ventilation de l'espace intérieur pendant la nuit, la porte et la fenêtre seront sur deux différentes parois opposées. Il est nécessaire de chercher leurs orientations pour minimiser le gain de chaleur. Pendant la journée, les fenêtres et la porte seront fermées de telle sorte que le transfert de chaleur se fait comme le cas d'un élément opaque.

4.5.3. Couplage TRNSYS-CONTAM

La bibliothèque de TRNSYS offre des types qui permettent de faire le calcul aéraulique en utilisant les modèles aérauliques du logiciel CONTAM (type 97). Ce type utilise en entrée les données climatiques et les températures d'air des différentes zones fournies par le type 56 et déterminent les différents débits nécessaires pour le type 56 à chaque pas de temps.

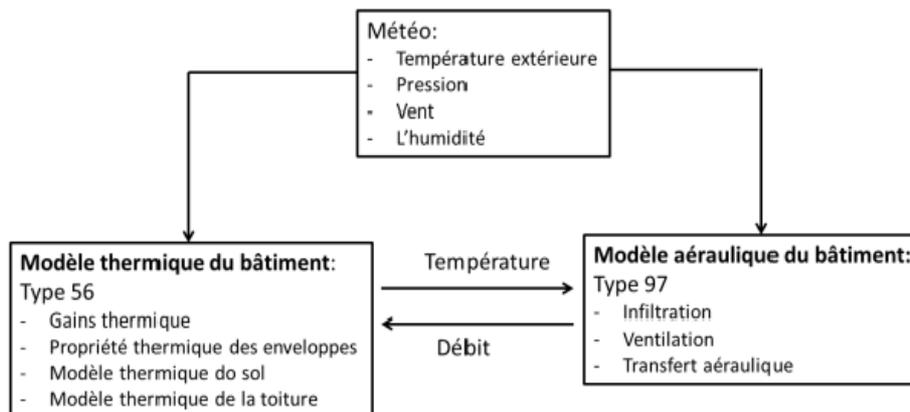


Figure 4.11. Schéma du couplage entre les types 56 et 97

Le type 97 utilise un fichier qui comporte la description des zones et des connexions aérauliques composant le bâtiment. Ce fichier est généré par CONTAM. Le couplage dynamique se traduit par l'échange des données thermiques et aérauliques à même échelle de

résolution pour les deux modèles. Un temps d'initialisation d'une année a été effectué afin d'éviter l'influence des conditions initiales.

Le projet est ainsi défini depuis l'interface graphique Simulation Studio où chaque icône (Type) représente un sous-programme (boîte noire) possédant un jeu de variables d'entrées et un jeu de variables de sortie. La figure 4.12 représente le projet final qui est utilisé pour les simulations annuelles, avec couplage au modèle CONTAM qui est introduit via le Type 97. Nous avons choisi d'utiliser le Type 97 qui fait appel à un fichier *.air créé depuis Contam.

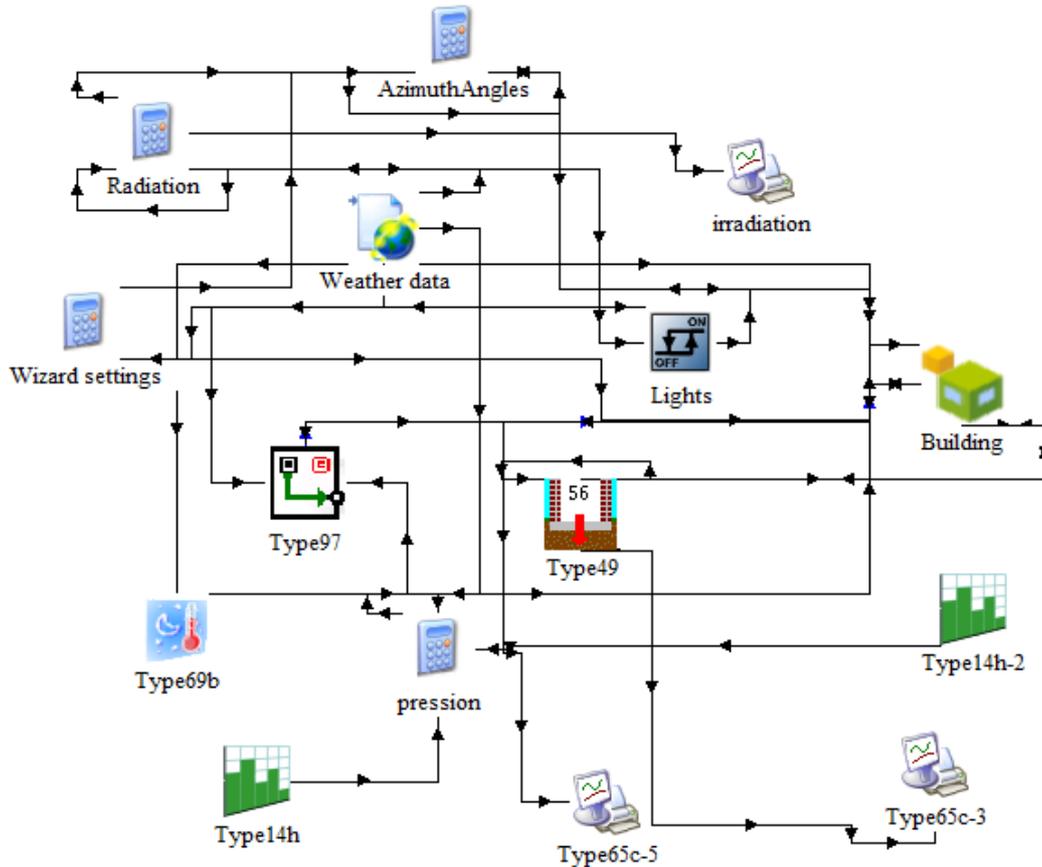


Figure 4.12. Interface TRNSYS Simulation Studio

4.6. Validation et confrontation des températures

L'objectif de cette section est d'étudier l'impact des éléments extérieurs (le soleil, la température extérieure et le vent) sur le modèle à différentes orientations durant une année entière. Une étude comparative a été effectuée pour évaluer l'effet de l'orientation, premièrement à l'aide d'un code thermique et énergétique "TRNSYS", et deuxièmement par le biais d'un couplage avec un modèle aéraulique "CONTAM Type 97". A ce propos, nous allons simuler une maison de deux étages avec 6 zones par étage pour des conditions météorologiques correspondant à l'année 2013.

Pour vérifier le modèle qui décrit les comportements réels définis dans TRNBUILD, nous allons comparer les températures et les humidités relatives mesurées avec des données relatives au site de l'URAER de Ghardaïa pour l'année 2013. Certaines journées de ciel clair, qui s'étendent du 20 au 25 Juillet 2013, ont été sélectionnées pour achever une confrontation des températures entre les valeurs calculées par notre approche (modèle fourni dans le troisième chapitre) et par TRNSYS 17. La température ambiante est généralement comprise entre 29 et 45 °C (figure 4.13), alors que l'humidité relative est dans la plupart du temps faible, supérieure à 7% et inférieure à 45% (figure 4.14). La figure 4.15 prouve que la vitesse du vent subit un comportement complexe. Pour évaluer l'approche proposée, il est judicieux d'estimer l'erreur absolue, l'erreur algébrique relative et l'erreur quadratique moyenne.

$$Er_R = 100 \frac{|Er_{ABS}|}{T_{Mesurée}} = 100 \frac{|T_{Mesurée} - T_{Calculée}|}{T_{Mesurée}} \quad (4.12)$$

$$Er_{QM} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{L=1}^{L=N} (T_{Mesurée} - T_{calculée})^2} \quad (4.13)$$

N: nombre de mesures

Er_{ABS} : l'erreur absolue,

Er_R : l'erreur algébrique relative

Er_{QM} : l'erreur quadratique moyenne

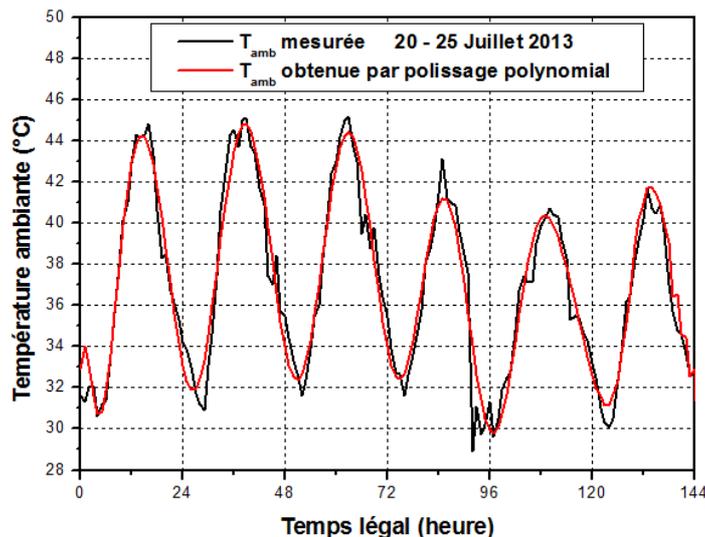


Figure 4.13. Température ambiante de l'air extérieur

La figure 4.16 donne un aperçu sur la comparaison des températures de l'air du séjour pour un débit massique égale à 10^{-3} kg/s.

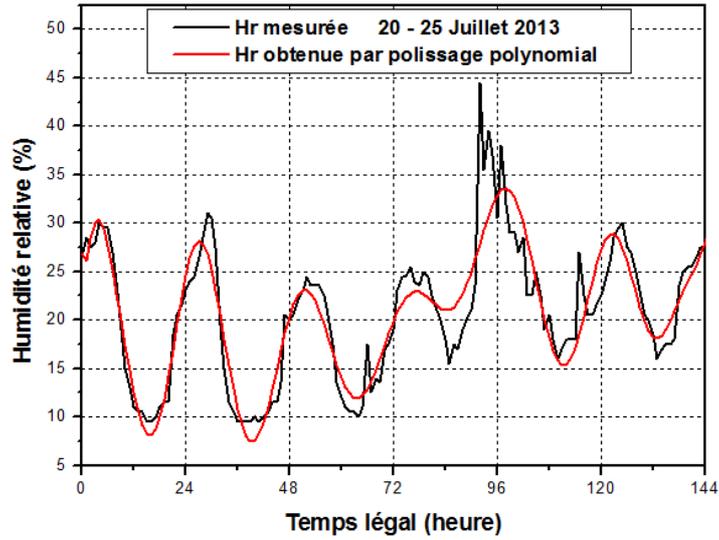


Figure 4.14. Humidité relative de l'air ambiant

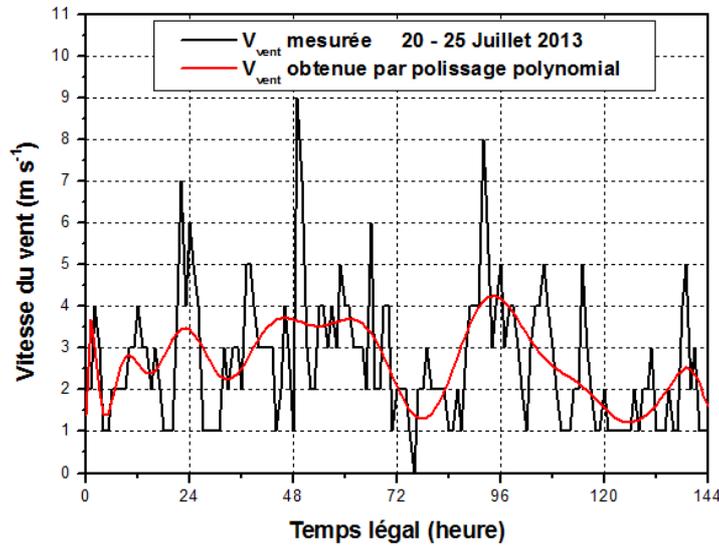


Figure 4.15. Vitesse du vent

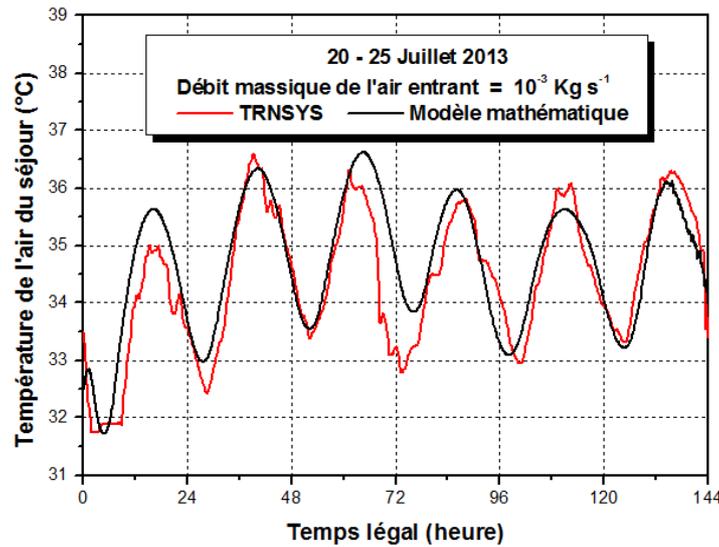


Figure 4.16. Température de l'air du séjour

En supposant que les valeurs calculées par TRNSYS sont des températures de référence, nous pouvons faire des calculs d'erreur qui sont réellement significatifs pour notre comparaison. L'erreur quadratique moyenne est de 0,6252 °C, on trouve également que les erreurs absolues et relatives moyennes sont respectivement de l'ordre de 0,2592 °C et 0,77 %. Ces petites perturbations sont généralement dues à l'état du ciel et la température ambiante extérieure. Pour calculer l'éclairement solaire, nous avons considéré que le ciel est complètement dégagé. En outre, les méthodes peuvent être aussi l'origine de ces petites perturbations. La méthode d'interpolation permet de réduire considérablement le temps d'exécution du programme, mais elle peut parfois influencer la précision des calculs, en particulier en présence d'un comportement aléatoire complexe. C'est précisément le cas de la variation instantanée de la vitesse du vent; nous pouvons voir cet aspect spécifiquement autour de l'intervalle de temps compris entre 68 et 73 heures où l'erreur absolue peut atteindre la valeur de 2,01 °C.

Cette marge d'erreur est certainement causée par les pics de la vitesse du vent qui ont lieu avant cet intervalle (avant 68 heures). Cet aspect gêne énormément pour identifier l'importante inertie thermique que possède l'enveloppe du bâtiment. Il convient de noter que la différence entre la valeur mesurée et obtenue par interpolation (régression non linéaire) de la vitesse du vent peut atteindre l'ordre de 5,5 m / s, ce qui est vraiment significatif. Pour résoudre et éviter ces problèmes rencontrés, nous avons besoin dans les futures recherches d'une discrétisation rigoureuse de l'intervalle de temps, et ceci en fonction de la complexité de la variable climatique en terme d'interpolation polynomiale. Cette méthode permettra d'accroître le temps d'exécution du programme, et permettra aussi une meilleure précision des calculs.

Pour la période d'hiver, nous avons choisi les jours du 21 au 26 Décembre 2013. La température ambiante tracée dans la figure 4.17 permet d'obtenir de faibles valeurs (jusqu'à 3 °C). L'humidité relative est comprise entre 17 et 65 % (figure 4.18). La vitesse du vent est généralement inférieure à 6 m s⁻¹ (voir la figure 4.19). La figure 4.20 donne les températures prédites par les deux modèles; représente des courbes de températures de l'air intérieur.

La concordance pour cet exemple semble mieux par rapport à l'exemple précédent. L'erreur quadratique moyenne est de 0,2908 °C, les erreurs absolues et relatives moyennes sont respectivement équivalentes à 0,0728 °C et 0,52 %. Ces résultats sont justifiés par le comportement de la vitesse du vent qui n'est pas identique par rapport au premier cas. L'intensité du caractère aléatoire n'est pas importante par rapport au niveau de la complexité observée dans le premier exemple.

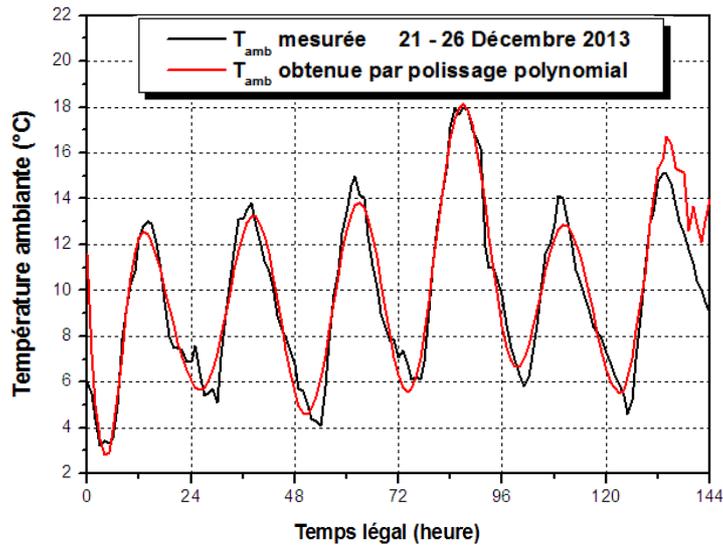


Figure 4.17. Température ambiante de l'air extérieur

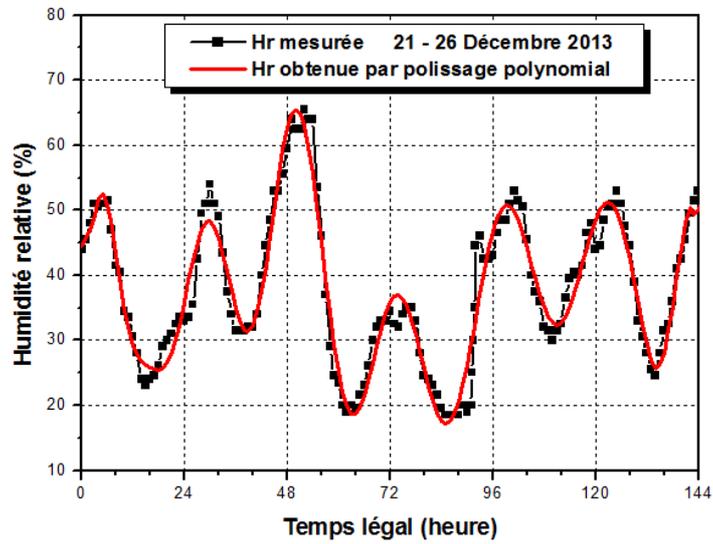


Figure 4.18. Humidité relative de l'air ambiant

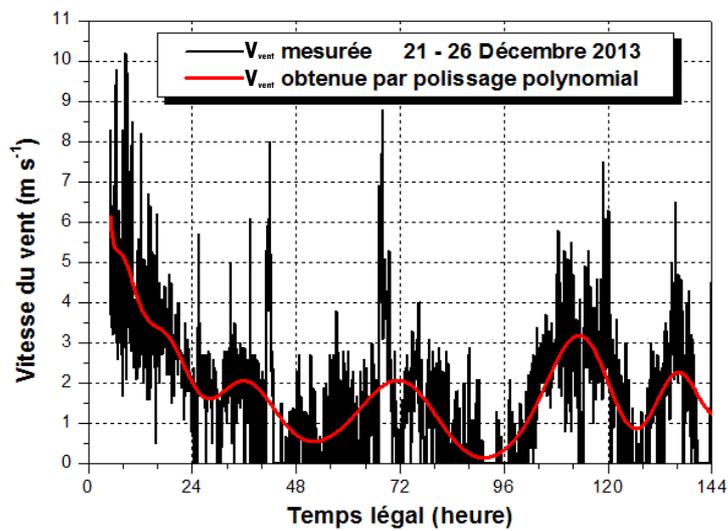


Figure 4.19. Vitesse du vent

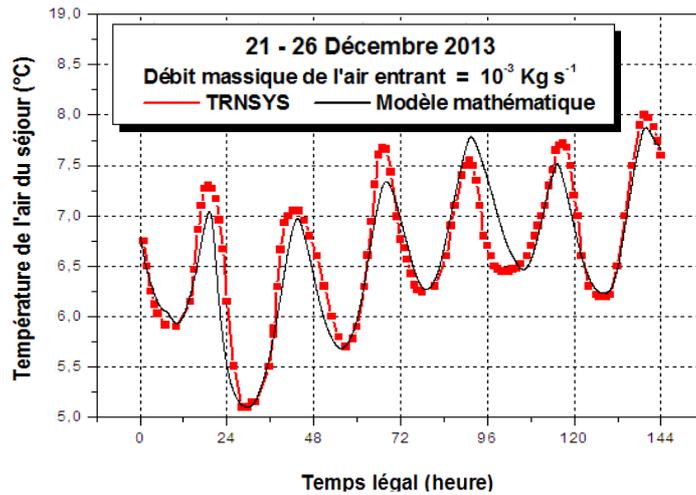


Figure 4.20. Température de l'air du séjour

4.7. Études paramétriques

À présent, l'influence de certains paramètres sur les températures intérieures de cette maison multizone exige des simulations numériques avancées grâce à notre chaîne de modélisation. Deux sites ont été choisis à cet égard, Ghardaïa "URAER Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables" et Bouzaréah Alger "CDER Centre de Développement des Energies Renouvelables". L'objectif principal est de favoriser un espace thermiquement plus confortable en fonction des besoins des occupants pour ces deux climats de régimes différents. Les caractéristiques thermiques et physiques de ces matériaux ont fait déjà l'objet d'un travail détaillé par notre équipe. Les valeurs utilisées sont données dans l'article de la référence [21].

4.7.1. Influence des matériaux de construction

La matière du mur joue un rôle primordial sur le confort thermique intérieur à la fois et la consommation énergétique de l'habitat. En effet, il est constaté que la masse volumique du mur non isolé joue un rôle important dans notamment pour la détermination des courbes de températures. Plus la masse est importante plus le temps de montée ou de descente de la température sera long. La masse volumique n'est pas le seul facteur qui influe sur la capacité d'accumulation de la chaleur. La résistance thermique et l'inertie thermique de la matière vont constituer alors un facteur non négligeable pour le choix de ces matériaux. Les figures 4.21 et 4.22 évoquent deux exemples indicatifs des évolutions journalières de la température intérieure de l'air de la pièce 1 en fonction du site et en fonction du matériau de construction durant les journées du 20 au 22 Juillet 2013.

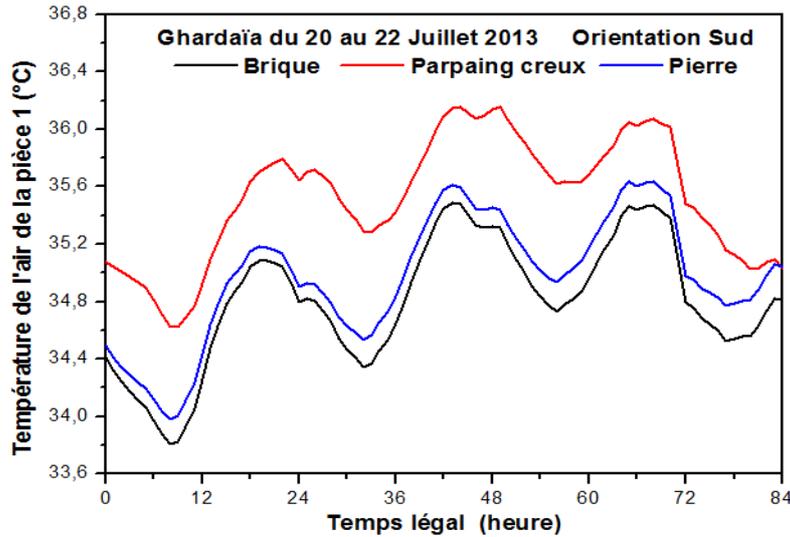


Figure 4.21. Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud et en fonction des matériaux de construction, Ghardaïa les 20-22 Juillet 2013

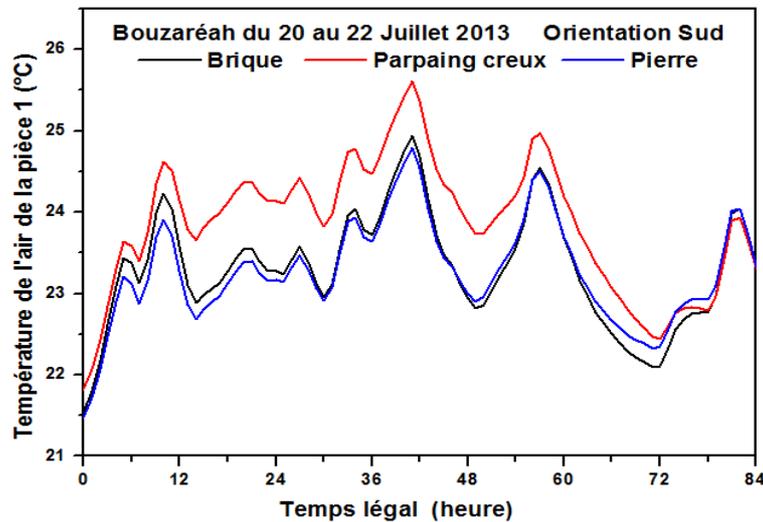


Figure 4.22. Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud et en fonction des matériaux de construction, Bouzaréah les 20-22 Juillet 2013

Cette investigation a été menée sur cette construction typique afin de prédire l'influence de la pierre, le parpaing et la brique sur les températures intérieures. L'utilisation et le choix d'un matériau local adapté au climat de la région sont à l'origine de la réalisation du confort et la consommation réduite de l'énergie. Nous avons prouvé que dans les régions Sahariennes la brique creuse apporte le meilleur compromis de confort par rapport à la pierre lourde et le parpaing. Pour un régime climatique côtier, une sorte de similitude en terme de température peut apparaître entre la pierre et la brique. Les résultats obtenus prouvent que l'interaction des propriétés thermiques et physiques des matériaux d'une part et la spécificité du climat d'autre part intervient sensiblement pour la prise d'une telle décision dans ces genres de problèmes.

4.7.2. Disposition des zones selon l'étage

Le comportement dynamique de la maison sera simulé à travers une modélisation transitoire multizone par TRNSYS avec un pas de temps d'une heure. La maison est ainsi subdivisée en 12 zones; 6 au rez-de-chaussée et 6 à l'étage. Nous pouvons prendre comme exemple la pièce 1 du rez-de-chaussée et/ou du premier étage pour le deux climats (Saharien et littoral méditerranéen) et avec les deux périodes (estivale et hivernale). Par ailleurs, durant la saison estivale (figures 4.23, a et 4.24, a), nous observons une nette distinction entre deux groupes de températures. Les températures correspondantes aux zones du niveau R+1 sont généralement plus élevées par rapport à celles des zones relatives au RDC. Les différences des températures intérieures sont très importantes d'un étage à l'autre quelque soit le matériau de construction et l'orientation. Un autre point qui semble important durant la période hivernale (figures 4.23, b et 4.24, b), il s'agit d'une diminution considérable des températures avec des différences claires entre les valeurs relatives au RDC et celles du premier étage.

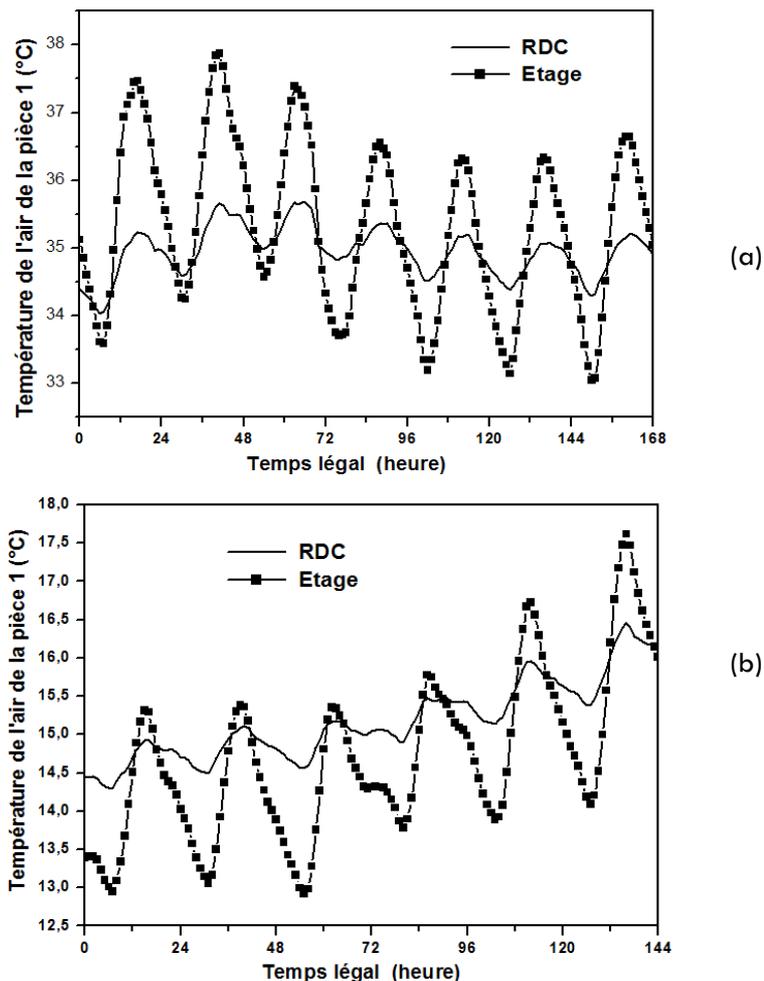


Figure 4.23. Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud, Ghardaïa: (a) du 20 au 26 Juillet 2013, (b) du 22 au 27 Décembre 2013

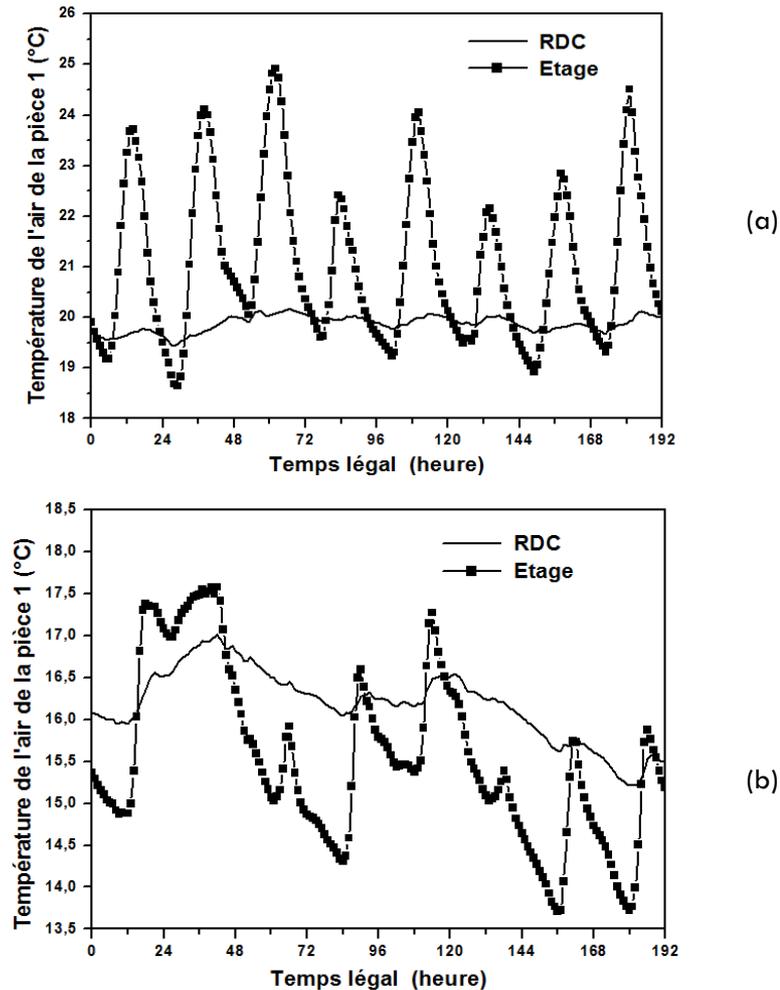


Figure 4.24. Température de l'air intérieur pour une orientation en plein Sud, Bouzaréah: (a) les 22-29 Juin 2013, (b) les 23-30 Décembre 2013

Dans ce cas, l'étude comparative en terme de température a été effectuée pour une même composition de paroi et pour à la fois une forme constante et un volume constant. La compacité est le seul facteur différent dans ce genre d'étude. L'indice de compacité est calculé comme le rapport entre la surface de déperdition et le volume protégé. Cet indice est plus faible pour la pièce située au RDC, ce qui engendre une meilleure compacité. Une variation de la compacité modifie considérablement la demande d'énergie. Par exemple, passer d'une compacité de 1.5 à 1 signifie que pour un même volume, les déperditions thermiques vont diminuer de 1/3. La compacité donc est un critère d'évaluation thermique intéressant, l'augmentation de l'indice de compacité minimise la stabilité des températures intérieures de la zone.

4.7.3. Orientation

Dans une architecture solaire adaptée, nous devons savoir, contrôler et maîtriser la quantité de chaleur captée pour éviter les surchauffes lors des périodes de la journée

fortement ensoleillées. Cela est possible au niveau de la conception en choisissant l'orientation appropriée des espaces de vie ou par la mise en place du système de régulation. Il est de même important d'installer des protections solaires efficaces afin de limiter la quantité de chaleur reçue. La chaleur du côté ensoleillé du bâtiment peut être distribuée vers les zones plus froides. Pour éviter les pertes thermiques importantes pendant la nuit et pendant les périodes de moindre température externe, il est conseillé d'utiliser les fenêtres thermiquement performantes ou des isolants mobiles supplémentaires du côté intérieur du vitrage.

L'orientation du bâtiment peut avoir des conséquences sur la consommation de chauffage, de refroidissement et d'éclairage. C'est pourquoi, il faut bien choisir l'orientation du bâtiment car une solarisation trop importante ou mal gérée peut s'avérer inconfortable. Ceci dépend également du taux de surfaces vitrées et de leurs caractéristiques ainsi que de la géométrie du bâtiment. Par exemple pour un bâtiment résidentiel l'orientation des pièces de vie au Sud est la plus favorable. Les apports solaires gratuits pénètrent à l'intérieur par les surfaces vitrées, réchauffent ainsi les parois opaques qui peuvent stocker la chaleur, et assurent un chauffage de base lors des journées ensoleillées d'hiver. Les ouvertures au Nord sont à éviter et celles à l'Ouest à limiter pour des questions de surchauffe en été.

Dans les figures suivantes énumérées de 4.25 jusqu'à la figure 4-28, on s'est intéressé à la détermination de la meilleure orientation possible en terme de température intérieure. En faisant varier l'orientation des façades par 90°, on pourra chaque fois établir une comparaison quantitative et qualitative du point de vue confort. Par la suite, dès que le choix de l'orientation du bâtiment est fait, il est aisé d'estimer les apports solaires transmis à chaque zone thermique au cours de la période sur laquelle on se base pour étudier la performance du bâtiment.

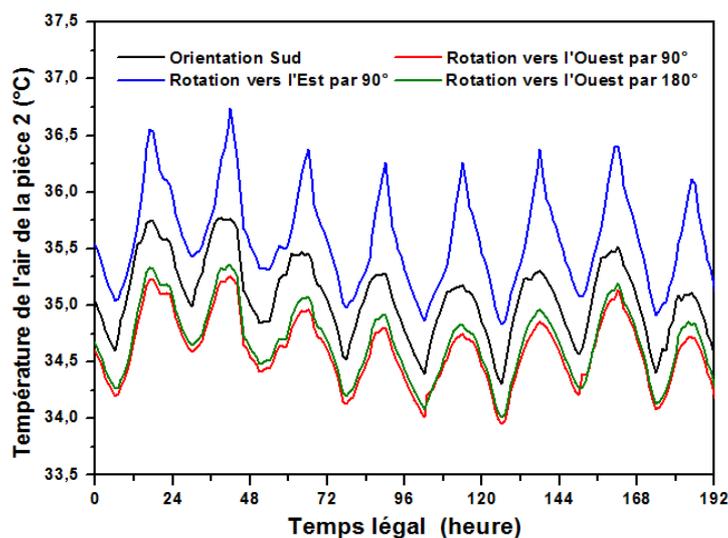


Figure 4.25. Température de l'air intérieur de la pièce 2 durant une période de surchauffe en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en brique situé à Ghardaïa

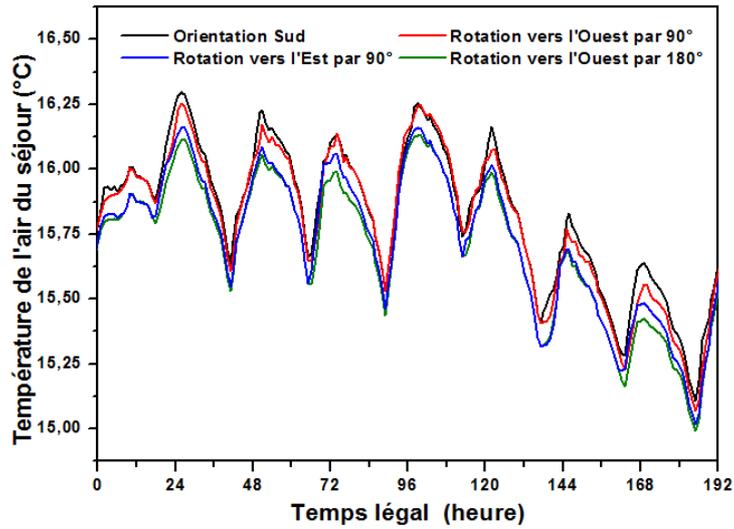


Figure 4.26. Température de l'air intérieur du séjour durant une période hivernale en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en parpaing situé à Ghardaïa

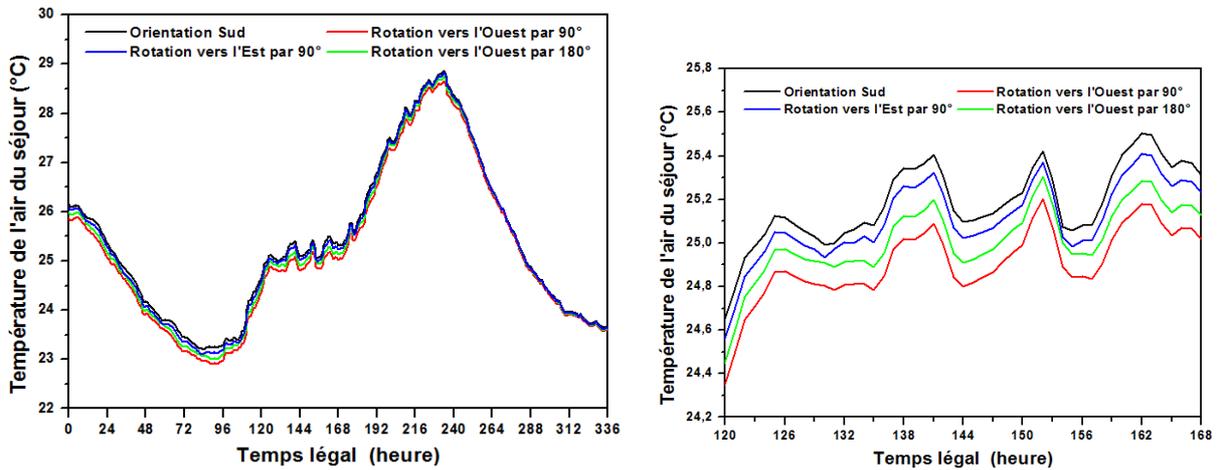


Figure 4.27. Température de l'air intérieur du séjour durant une période estivale en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en parpaing situé à Bouzaréah

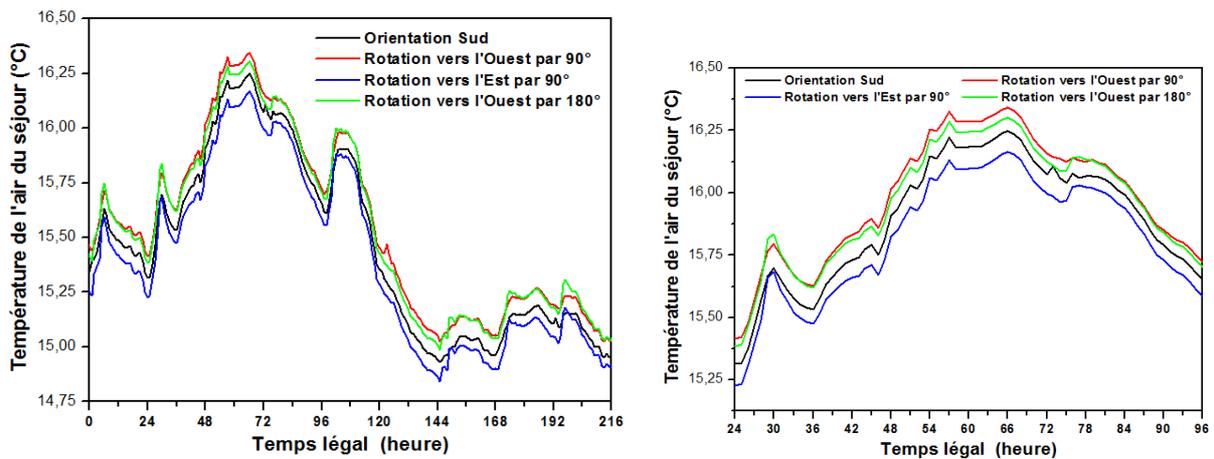


Figure 4.28. Température de l'air intérieur du séjour durant une période hivernale en fonction de l'orientation, cas d'un bâtiment en pierre situé à Bouzaréah

Pour avoir une explication argumentée basée sur les courbes des températures obtenues pour différentes orientations, il est recommandé de se baser sur la quantité du flux de chaleur absorbée par chaque paroi de l'enveloppe quelque soit la disposition du bâtiment y compris la zone à étudier.

Pour une même composition de la paroi et pour les mêmes propriétés thermiques et physiques, les interprétations seront logiquement fondées sur des aspects basés en priorité sur la quantité du rayonnement absorbée par ces surfaces opaques sachant que les autres conditions extérieures (température ambiante, humidité relative, vitesse du vent, pression atmosphérique...etc) auront presque le même degré d'influence sur toutes les parois soumises à ces conditions. Néanmoins, si le ciel subit continuellement des perturbations nuageuses, l'interprétation sera basée forcément sur les valeurs mesurées des irradiances solaires journalières qui vont dépendre de la durée d'insolation. Dans le cas inverse, le problème ne se pose pas, on peut calculer les irradiances solaires journalières en utilisant des modèles fiables [22-26]. Prenons comme exemple le cas de la figure 4.25 qui représente la variation de la température de l'air intérieur de la pièce 2 durant une période de surchauffe pour un bâtiment en brique situé à Ghardaïa. Lorsque toute la construction est orientée en plein Sud, les parois de la pièce 2 seront orientées vers le Sud, l'Est et le Nord. De toute façon, pour avoir un état récapitulatif permettant de prendre des conclusions convaincantes sur la quantité du flux de chaleur incidente sur toutes les parois de chaque zone pour un ciel clair, nous mettons à disposition le tableau 4.1 qui apporte tous les détails nécessaires conformément aux exemples illustrés par les précédentes figures.

Site	Zone & Jour	Irradiances solaires journalières incidentes sur les murs verticaux (whm ⁻²)				Irradiances solaires journalières (Kwh et Kwh/m ³) incidentes sur toutes les parois pour une orientation du bâtiment vers le							
		Horizontal	Sud	Est / Ouest	Nord	Sud		Est		Ouest		Nord	
						RDC	1 ^{er} étage	RDC	1 ^{er} étage	RDC	1 ^{er} étage	RDC	1 ^{er} étage
Ghardaïa	Pièce 2, 20 Juillet	7993	2399	4098	1674	80.111 2.3843	176.03 5.2389	87.595 2.607	183.51 5.4616	95.715 2.8487	191.63 5.7033	80.111 2.3843	176.03 5.2389
	Séjour, 02 Janvier	3828	6584	2345	250	78.963 2.6112	120.31 3.9781	86.062 2.8466	127.42 4.2138	22.235 0.7350	63.577 2.1024	25.758 0.8518	67.100 2.2189
Bouzaréah	Séjour, 27 Juin	8247	2241	4076	1687	59.910 1.9812	148.98 4.9265	56.828 1.8792	145.90 4.8246	51.243 1.6946	140.31 4.6399	55.257 1.8273	144.32 4.7726
	Séjour, 28 Décembre	3135	6185	2017	229	72.285 2.3904	106.14 3.5100	79.288 2.6219	113.15 3.7416	19.251 0.6366	53.109 1.7563	22.255 0.7359	56.113 1.8556

Tableau 4.1. Irradiances solaires journalières globales incidentes sur toutes les parois de chaque zone, conformément aux exemples précédents, pour un ciel clair et en fonction de l'orientation et de la disposition de la zone

Conformément à cette étude, nous remarquons que l'optimisation de l'orientation d'un édifice en terme de température dépend de plusieurs facteurs, nous citons plus particulièrement:

- Irradiations solaires journalières globales incidentes sur toutes les parois de chaque zone, le problème se complique en cas d'un ciel couvert ou partiellement couvert, l'estimation théorique ne peut pas devenir parfois évidente
- La compacité qui est en fonction de la surface totale exposée aux sollicitations extérieures (le rayonnement solaire en priorité),
- Le design et l'aspect géométrique qui traduit le niveau de compacité,
- La disposition de la zone dans la construction multizone (qui interprète la compacité de la zone et non pas par de celle de l'habitat),
- La composition de la paroi extérieure qui permet de définir la quantité du flux de chaleur absorbée par l'enveloppe d'origine solaire (propriétés thermiques physiques: l'absorption, l'émissivité, la conductivité...etc.)

Face à cette analyse, et même si la composition de la paroi est la même dans tous l'enveloppe, il y'aura toujours une différence au niveau de la résistance thermique équivalente globale de chaque façade puisque certaines contiennent aussi des fenêtres. En conséquence, contrairement à ce qui est conclu à travers l'étude de l'influence de l'orientation sur les apports solaires directs, les caractéristiques énoncées de l'enveloppe sans tenir compte des apports gratuits (directs, occupants...) rendent la généralisation des résultats impossible au profit de l'effet de l'orientation de l'habitat sur les températures de l'ambiance intérieure. Donc, chaque cas (mois) est particulier, il faut qu'on se penche sur l'ensemble de ces cas tout en balayant toute l'année. On constate selon l'ensemble des résultats obtenus (même s'ils ne sont pas présentés) que la différence ne semble pas vraiment significative en terme de température en changeant l'orientation du bâtiment pour les quatre saisons.

4.8. Protections solaires et fermetures

En été, la chaleur reçue peut être source d'inconfort. En interposant un écran entre le rayonnement solaire et l'ambiance intérieure, les protections solaires et les fermetures réduisent le flux solaire directement reçu par les occupants.

En hiver ou demi-saison, ces apports naturels gratuits sont intéressants car ils permettent de réduire la consommation de chauffage du bâtiment. Le caractère mobile des protections solaires et des fermetures permet de doser au mieux, selon la saison et les conditions climatiques, la part de rayonnement transmis et de garantir le confort d'utilisation. Pour la limitation des déperditions thermiques, la conservation de la température ambiante de la pièce est très importante et ceci doit se faire notamment par la réduction de ces déperditions et de l'effet de la "paroi froide" au niveau des vitrages. A cet effet, l'utilisation de protections solaires ou de fermetures est une solution pour garantir le confort d'hiver. Au niveau des

protections solaires, toutes les menuiseries sont équipées de volets. Les fenêtres ont toutes été conçues de manière identique sur les deux étages et pour les deux climats, nous avons des simples vitrages.

Fermeture des volets

Toutes les fenêtres sont équipées de volets en bois, qui occultent 100% des rayonnements quand ils sont fermés. Dans certaines des modélisations effectuées, on considère que les habitants les ferment pendant la journée lorsque l'ensoleillement incident dépasse 300 W/m^2 . C'est un des paramètres dont on étudie l'influence sur le confort d'été dans les simulations qui concernent l'étude paramétrique.

Ouverture des fenêtres

La maison ne dispose pas de ventilation mécanique, nous ne pouvons agir que sur la ventilation naturelle. Les périodes propices au rafraîchissement passif sont cependant bien identifiées en climat saharien (amplitude thermique importante entre le jour et la nuit). Ce type d'ouverture de fenêtres quotidienne, indépendante des conditions de température intérieures et extérieures sera pris en compte dans toutes les simulations.

La ventilation naturelle par l'ouverture des fenêtres pour le rafraîchissement en cas de surchauffe est un des paramètres dont on étudie l'influence sur le confort d'été. Cette ventilation a été programmée de cette façon :

- Ouvertes par 1
- Fermées par 0

Pendant la journée dans les zones exposées au soleil, lorsqu'elles sont occupées et si la température intérieure est supérieure à la température extérieure, alors les utilisateurs ouvrent les fenêtres et profitent de la fraîcheur extérieure. Dans la nuit, on considère que les habitants ouvrent un pan de leur fenêtre et le laissent ouvert toute la nuit.

Nous avons donc considéré les scénarios suivants pour l'ouverture des fenêtres selon le tableau 4.2.

Etats des fenêtres	Jour	Nuit
Scénarios 1	1	1
Scénarios 2	1	0
Scénarios 3	0	1
Scénarios 4	0	0

Tableau 4.2. Les différents scénarios des volets pour la journée et la nuit

La figure 4.29 décrit l'évolution de la température de l'air intérieur du séjour en tenant compte des débits de l'air entrant qui traverse les fenêtres pendant une période en fonction des scénarios proposés.

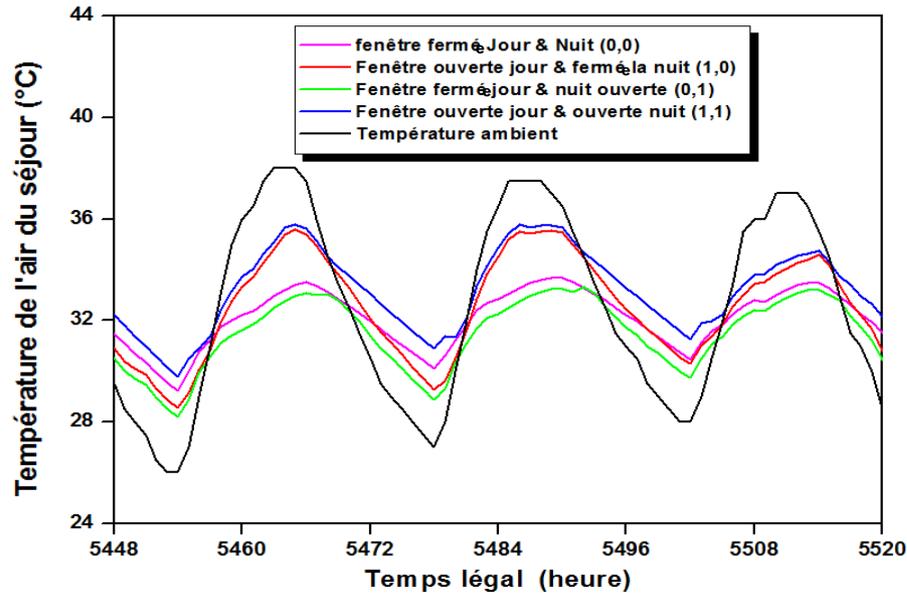


Figure 4.29. Température de l'air intérieur du séjour en fonction des scénarios d'ouverture des fenêtres

Les résultats obtenus sont tout à fait raisonnables. Le troisième scénario (fermeture des fenêtres le jour et ouverture nocturne) apporte le meilleur compromis du confort, il permet de profiter de la fraîcheur nocturne de l'air extérieur par une ventilation naturelle.

4.9. Consommation énergétique : mise en valeur de l'orientation/matériaux

Afin de déterminer les bilans énergétiques correspondant aux deux climats, nous avons calculé les besoins énergétiques annuels de chaque maison pour une température de confort qui s'étend de à 18°C pour le chauffage et 25 °C pour le refroidissement. Lorsque le bâtiment est soumis à un système de chauffage ou de climatisation, un flux de chaleur Q_p est ajouté au bilan énergétique de la pièce pour maintenir une température intérieure égale à une valeur de consigne T_{cons} . Comme dans le cas précédent, nous redressons le bilan énergétique du volume d'air intérieur et celui des échanges de chaleur entre les parois et l'air. Les histogrammes donnés par les figures suivantes (4.30-4.33) présentent une estimation des besoins mensuels de chauffage/climatisation en tenant compte du site, des 3 matériaux ainsi que l'orientation de l'édifice. La quantité d'énergie nécessaire "par définition les besoins en climatisation et en chauffage pour garder une température stable à l'intérieur" est estimée en évaluant la quantité de chaleur pour assurer le confort des zones.

Pour la région de Ghardaïa, la période estivale est caractérisée par des températures élevées. Par ailleurs, la période hivernale est caractérisée par des températures plus basses et des heures d'ensoleillement plus courtes. Pour le site de Bouzaréah, les écarts de températures restent en général modérés, la température de l'air est douce. Sur le littoral, les moyennes du

semestre froid s'étend de Novembre jusqu'au mois d'Avril, tandis que les moyennes chaudes se sont observées entre Mai et Octobre.

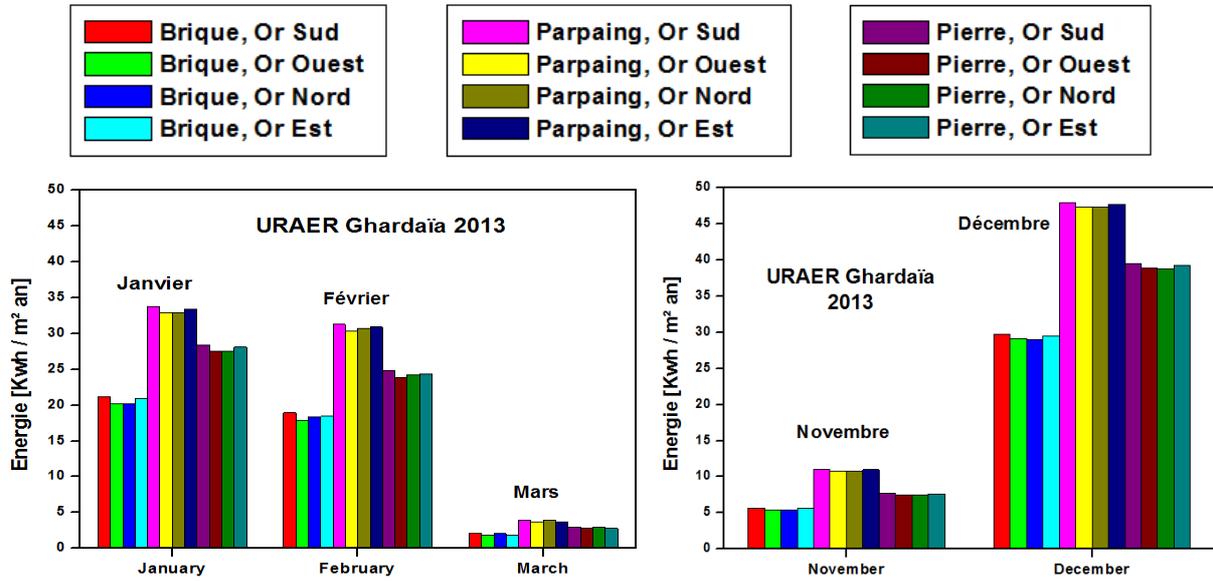


Figure 4.30. Besoins énergétiques mensuels en chauffage, URAER Ghardaïa 2013

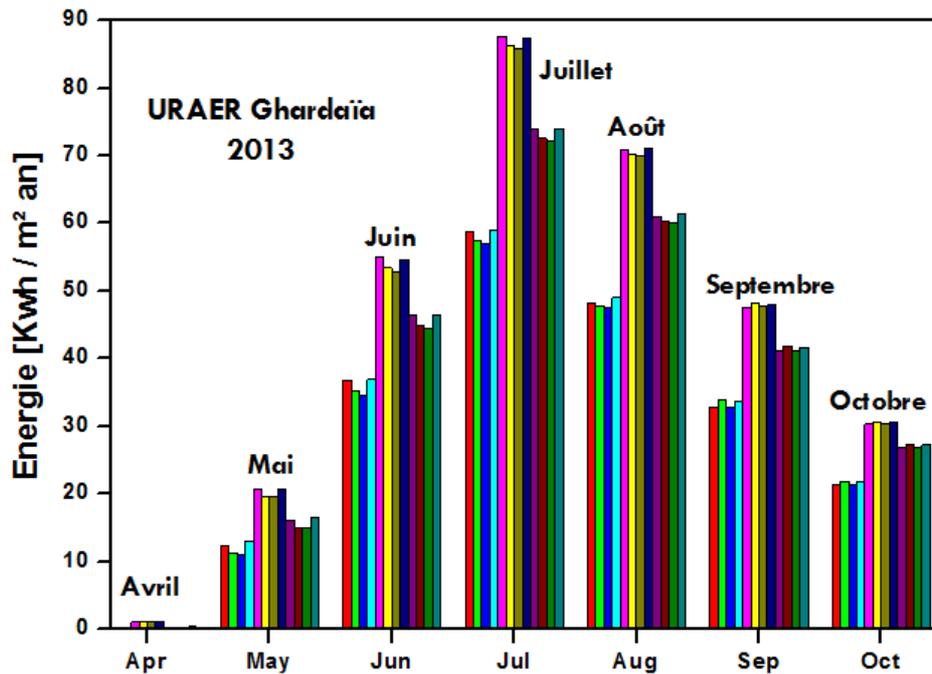


Figure 4.31. Besoins énergétiques mensuels en climatisation, URAER Ghardaïa 2013

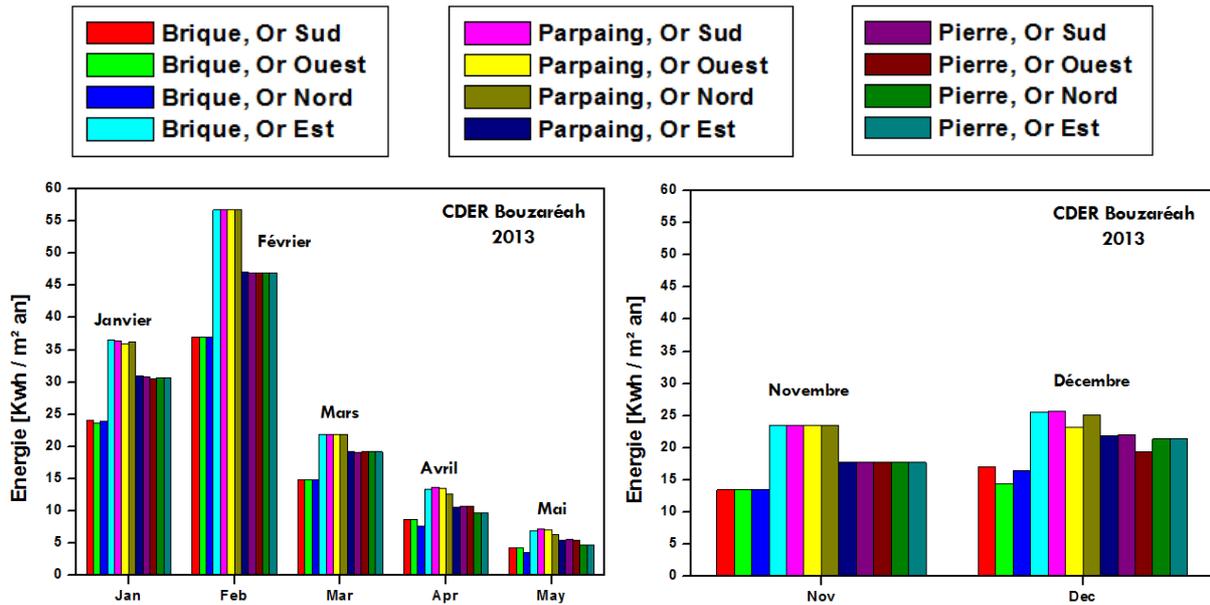


Figure 4.32. Besoins énergétiques mensuels en chauffage, CDER Bouzaréah Alger 2013

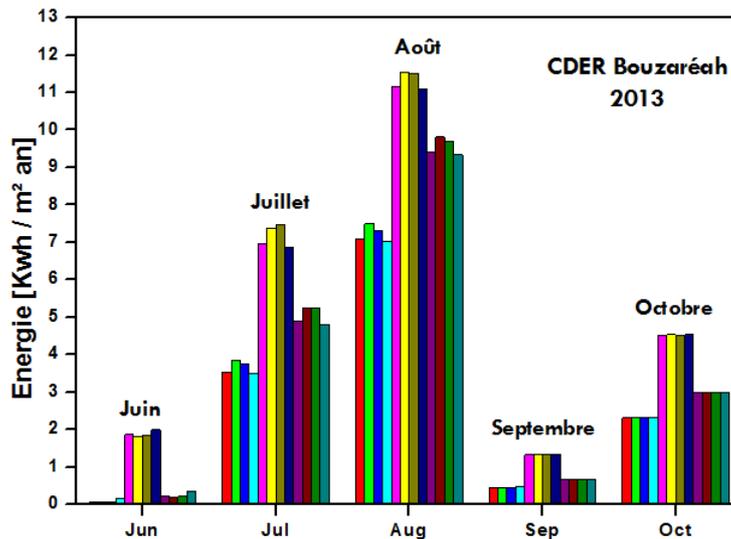


Figure 4.33. Besoins énergétiques mensuels en climatisation, CDER Bouzaréah Alger 2013

Pour le site de Ghardaïa, nous remarquons que :

- Les pics de la consommation énergétique apparaissent en été et dépassent les 85 kWh/m² pour un bâtiment en parpaing.
- La climatisation est plus coûteuse en terme de consommation énergétique par rapport au chauffage.
- Nous confirmons encore une fois que la brique est le matériau le plus économe en énergie.
- En ce qui concerne l'orientation et en absence des apports solaires gratuits et directs, la variation de l'orientation du bâtiment n'engendre pas un changement radical en terme de consommation.

- Mais il faut rappeler toujours que ce bâtiment est une construction énergivore de faible compacité et mal isolé.

Pour le site de bouzaréah

- Les pics de la consommation énergétique apparaissent le mois de Février et dépassent les 55 kWh/m² pour un bâtiment en parpaing.
- Contrairement au site de Ghardaïa, le chauffage est plus coûteux en terme de consommation énergétique par rapport à la climatisation.
- Nous confirmons toujours que la brique est le matériau le plus économe en énergie.
- De même pour l'orientation, en absence des apports solaires gratuits et directs, la variation de l'orientation du bâtiment n'engendre pas un changement radical en terme de consommation.
- Le climat de Bouzaréah est plus favorable en terme de consommation énergétique

4.10. Conclusion

Selon ces résultats qui ont été déduits d'une base de données récente "2013" et même selon d'autres travaux menés par notre équipe [27], nous avons eu une quantification préliminaire des déperditions thermiques qui permet de certifier que le toit, les murs extérieurs et le sol sont les sources principales, elles incluent en moyenne plus de 70 % des pertes globales.

Par la faible compacité de ce type de logement, les consommations d'énergie sont aussi plus importantes, tant en chauffage que par la climatisation. Une architecture durable privilégiera donc la mitoyenneté des formes géométriques optimales tout en diminuant le maximum l'indice de compacité. Par l'intermédiaire de ces techniques et résultats, on peut abaisser les niveaux d'isolation globale requis si la compacité du bâtiment est inférieure à un niveau de référence. Nous jugeons donc que la meilleure façon pour réduire la consommation énergétique est de renforcer tout d'abord l'isolation thermique extérieure de l'enveloppe.

Puisque ce type de logement est une construction énergivore, il est recommandé donc de profiter des apports solaires directs en période hivernale et se protéger des surchauffes d'été en intégrant des protections solaires surtout pour le site de Ghardaïa vu que le climat de Bouzaréah est plus favorable en terme de consommation énergétique.

Références

- [01]: B Moujalled, Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 19 Janvier 2007.
- [02]: B Favre, Etude de stratégies de gestion énergétique des bâtiments par l'application de la programmation dynamique, Thèse de Doctorat en Énergétique, l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 10 Mar 2014.
- [03]: G Damien, S Jérôme, J Kévyne, V Joseph, Influence des données aérauliques sur le comportement d'un bâtiment pourvu d'une façade double-peau, IBPSA 2012.
- [04]: L Arantes, l'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située, Thèse de Doctorat en Matériaux, Mécanique, Énergétique, Environnement, Procédés, Production, Université de Grenoble, janvier 2013.
- [05]: M Trocmé, Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie, Thèse de Doctorat en Énergétique, Ecole des Mines de Paris, Novembre 2009.
- [06]: I Sobhy, A Brakez, B Benhamou, Dynamic modeling of thermal behaviour of a solar floor heating system for a hammam in Marrakech, Conference: Int Renewable and Sustainable Energy Conf IRSEC2015, at Marrakech, Morocco, March 2015.
- [07]: O Marc, Etude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment, Thèse de Doctorat en Spécialité Mécanique Énergétique et Environnement, Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie et l'environnement, Université de la Réunion, Décembre 2010.
- [08]: M C Murray, N Finlayson, M Kummert, J Macbeth, Live energy TRNSYS – TRNSYS simulation within google SketchUp, Eleventh International IBPSA Conference Glasgow, Scotland July 27-30, 2009.
- [09]: <http://www.construction21.org/france/communities/>
- [10]: D Gossard, Impact de l'enveloppe sur la performance énergétique des bâtiments: de la caractérisation jusqu'à l'optimisation, Thèse de Doctorat en Énergétique et Transferts, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, 25 novembre 2011.
- [11]: E Wurtz, Rapport dynasimul : Projet ANR-06-PBAT-004-01, Rapport scientifique final.
- [12]: http://www.renaissance/project.eu/IMG/pdf/Rapport_Methodologie_Monitoring_FR_ENERTECH-2.pdf
- [13]: R Lapisa, M Abadie, E Bozonnet, P Salagnac, Etude numérique de la stratification thermique pour l'évaluation du confort thermique d'un bâtiment commercial de faible hauteur, Conférence IBPSA France-Arras-2014, May 2014, Arras, France pp 000-008, 2014.
- [14]: https://www.polytech.univsavoie.fr/fileadmin/polytech_autres_sites/sites/augc2012/actes/Contribution1188.pdf
- [15]: D G Stephenson, G P Mitalas, Calculation of heat conduction transfer functions for Multi-layer Slabs, ASHRAE Trans, vol 77, p II 7-126, 1971. 7.

- [16]: F Munaretto, Etude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments, Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, février 2014.
- [17]: J R Salliou, Analyse de l'influence de paramètres géométriques et physiques sur le coefficient de décharge appliqué à la ventilation dans le bâtiment, Thèse de Master STEU, l'Université de Nantes Institution, 2011.
- [18]: N Rebah, Modélisation des estimations énergétiques d'une maison photo-solaire, apport photothermique sur sites de Tlemcen et bouzereah, Thèse de Doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, Décembre 2010.
- [19]: M V Swami, Chandra S, Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings, ASHRAE Final Report FSEC-CR-163-86, ASHRAE Research Project 448-RP, March 1987.
- [20]: A Dhalluin, Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université de La Rochelle, May 2013.
- [21]: S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, M Hamdani, N Benamrane, M R Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, *Construction and Building Materials* 52 (2014) 59–70.
- [22]: M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, M K Cherier, A new modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate, *Thermal Science*, Article in press, doi: 10.2298/TSCI131217026H.
- [23]: M Hamdani, S M A Bekkouche, M K Cherier, N Benamrane, T Benouaz, Orientation of buildings: predictive control based on the calculation of temperature and solar direct contribution, *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy* Vol. 55 (2015) pp 96-103, © (2015) SciPress Ltd., Switzerland doi:10.18052/www.scipress.com/ILCPA.55.96.
- [24]: M Hamdani, S M A Bekkouche, T Benouaz, R Belarbi, M K Cherier, Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate, *Engineering Structures And Technologies*, Taylor & Francis: ISSN 2029-882X / eISSN 2029-8838 2014 6(3): 131–149, doi:10.3846/2029882X.2012.988756.
- [25]: M R Yaïche, S M A Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°4 (2010) 683 – 695.
- [26]: M R Yaïche, S M A Bekkouche, Conception et validation d'un logiciel sous Excel pour la modélisation d'une station radiométrique en Algérie cas d'un ciel totalement clair, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°4 (2009) 677 – 688.
- [27]: S M A Bekkouche, T Benouaz, M Hamdani, M K Cherier, M R Yaiche, N Benamrane, Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, *Advances in Building Energy Research*, article accepté en 2015.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif prioritaire dans cette thèse consiste à prouver l'importance des moyens de la conception bioclimatique pour assurer un niveau de confort thermique plus acceptable avec une consommation énergétique plus réduite. En proposant certains outils de simulation numérique, nous pouvons prédire l'influence de l'orientation en prenant en considération certains concepts. On s'est intéressé à l'influence des matériaux de construction, la disposition de la zone, la ventilation naturelle et à la consommation énergétique. Deux sites de régimes radiatifs différents ont été choisis, Alger et Ghardaïa. Le premier est de type Méditerranéen et le second de type Saharien avec une forte persistance des journées de beau temps tout au long de l'année.

A cet égard, nous avons utilisé des modèles mathématiques de transfert de chaleur à l'intérieur d'un espace multizone. Ces modèles ont été basés sur des approches multizones existantes. Nous avons pu avoir ensuite des connaissances et des outils de travail performants qui permettront d'étudier et ensuite intégrer dès la conception du projet les meilleures solutions passives de la future construction. Une confrontation des résultats théoriques et expérimentaux s'est effectuée avec satisfaction. Les modèles ont été testés en utilisant une méthode appropriée à notre équipe de recherche en ajoutant en même temps une nouvelle méthodologie qui s'est basée sur le couplage TRNSYS / CONTAM. Une construction réelle mal isolée à faible compacité a été notre source d'inspiration pour effectuer cette étude. La précision à tenir est meilleure vu que nos calculs itératifs se sont basés directement sur les données mesurées in situ de l'année 2013 tout en évitant l'utilisation de la technique d'interpolation polynomiale. Nous injectons directement les données climatiques extérieures (température, humidité, vitesse du vent, direction et vitesse de vent, irradiances solaires) pour déterminer les températures des différentes zones. Le couplage thermo-aéraulique complet développé par TRNSYS et CONTAM nous a permis d'étudier et de trouver les niveaux de consommation optimale de fonctionnement de ce type de bâtiment. Pour accélérer le calcul, nous avons appelé le programme écrit dans Python pour réaliser une étude comparative entre les deux climats selon les matériaux de construction locaux. L'avantage de ces modélisations est qu'elles permettent de transformer un problème très complexe en une série de problèmes plus faciles à traiter.

La conception bioclimatique consiste à mettre à profit les conditions climatiques favorables tout en se protégeant de celles qui sont indésirables, ceci afin d'obtenir le meilleur

confort thermique. En période froide, une architecture bioclimatique favorise les apports de chaleur gratuits, diminue les pertes de chaleur et assure un renouvellement d'air suffisant. En période chaude, elle réduit les apports caloriques et favorise le rafraîchissement. Le bien-être thermique dépend de plusieurs paramètres sur lesquels le concepteur d'un bâtiment peut agir. Nous citons à titre illustratif: la température de l'air et des parois. Pour satisfaire à cette stratégie, l'orientation la plus favorable est celle du Sud, elle facilite aussi l'intégration des éléments d'une conception bioclimatique.

Suite aux résultats obtenus, avant tout, il est nécessaire d'assurer un bon couplage entre l'isolation, l'inertie et la forme géométrique convenable à la construction. On peut conclure qu'une mauvaise compacité minimise la stabilité des températures intérieures de la zone. L'emplacement et la disposition des zones dans ces conditions n'influent pas beaucoup sur le niveau d'inertie de la zone. Une ouverture verticale peut être facilement gérée par rapport aux apports solaires. Les surfaces horizontales captent peu d'énergie en hiver et apportent des surchauffes en été.

Une quantification préliminaire des déperditions thermiques permet de prouver que le toit, les murs extérieurs et le sol sont les sources principales de déperditions thermiques, elles incluent en moyen plus de 70 % des pertes globales. Pour ce type d'habitat, la consommation énergétique est très coûteuse, tant pour le chauffage ou la climatisation. En renforçant la compacité, on peut abaisser les niveaux d'isolation globale requis.

Pour cette construction énergivore, il est recommandé donc de profiter des apports solaires directs en période hivernale et se protéger des surchauffes d'été en intégrant des protections solaires surtout pour le site de Ghardaïa vu que le climat de Bouzaréah est plus favorable en terme de consommation énergétique. A travers ces analyses thermiques adoptées, nous jugeons que la meilleure façon pour réduire la consommation énergétique est de renforcer tout d'abord l'isolation thermique extérieure de l'enveloppe.

Pour la région de Ghardaïa, la climatisation est plus coûteuse en terme de consommation énergétique par rapport au chauffage. La brique est le matériau le plus économe en énergie. En absence des apports solaires gratuits et directs, la variation de l'orientation du bâtiment n'engendre pas un changement radical en terme de consommation. Par ailleurs, pour la région d'Alger, la brique est le matériau le plus économe en énergie. La pierre est mieux placée par rapport au parpaing, son utilisation apporte moins de consommation énergétique en la comparant par rapport à une construction en pierre. Contrairement au site de Ghardaïa, le chauffage est plus coûteux en terme de consommation énergétique par rapport à la climatisation. La même chose, le changement d'orientation ne cause pas une nette différence en terme de consommation. Le climat de Bouzaréah est plus favorable en terme de consommation énergétique.

Enfin, nous espérons dans un prochain avenir développer cet axe par des recherches plus avancées, notamment l'utilisation des modèles hygro-thermo-aérauliques, le couplage entre l'isolation, l'inertie et la forme géométrique, engendrer d'autres paramètres de confort, voir l'influence de l'infiltration, la ventilation naturelle.... etc.

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

Résumé

Dans ces travaux, nous voulons proposer une démarche méthodologique permettant de quantifier les performances thermiques et la consommation énergétiques d'un bâtiment multizone. Pour cette raison, le test et la validité des outils utilisés pour le calcul des températures multizones semblent très indispensables. L'objectif primordial est d'appliquer ces modèles à l'étude de l'orientation en fonction de la compacité en faisant en même temps une comparaison entre trois matériaux de construction locaux. Deux sites appartiennent à des régimes radiatifs très différents vont être choisis, Alger et Ghardaïa. Pour ce type d'habitat, la consommation énergétique est très coûteuse, tant pour le chauffage et la climatisation. En renforçant la compacité, on peut abaisser les niveaux d'isolation globale requis. La meilleure façon pour réduire la consommation énergétique est de renforcer en priorité l'isolation thermique extérieure de l'enveloppe. Nous avons trouvé que la brique est le matériau le plus économe en énergie. Pour Ghardaïa, contrairement à Alger, la climatisation est plus coûteuse en terme de consommation énergétique par rapport au chauffage. En absence des apports solaires gratuits et directs, la variation de l'orientation du bâtiment n'engendre pas un changement radical en terme de consommation. Le climat d'Alger est plus favorable en terme de consommation énergétique.

Mots clés: Température, orientation, matériaux de construction, consommation énergétique, compacité.

Summary

In this work, we propose a methodological approach to quantify the thermal performance and energy consumptions of a multizone building. For this reason, testing and validation of tools used for the calculation of internal temperatures seem very essential. The primary objective is to apply the models to the study of orientation according to the compactness including a comparison between three local building materials. Two sites belong to different radiative regions, will be selected, Algiers and Ghardaïa. For this type of habitat, energy consumption is very costly, both for heating and air conditioning. By strengthening the compactness, we can reduce the required overall level of thermal insulation. The best way to reduce energy consumption is to enhance the external thermal insulation of the building envelope. We found that the brick was the most economical material. For Ghardaïa, unlike Algiers, air conditioning is more expensive by comparing heating needs.

In the absence of direct sunlight and free gain, the change in the building orientation does not result a radical change in terms of consumption. Algiers climate is more favorable because the generated energy consumption is minimal.

Keywords: Temperature, orientation, building materials, energy consumption, compactness.

ملخص

في هذا العمل، نقترح مقارنة منهجية لقياس الأداء الحراري والاستهلاك الطاقي للمبنى المتعدد الأنظمة في المنطقة، لهذا السبب فإن اختبار وصلاحيّة الأدوات المستخدمة لحساب درجات الحرارة يبدو ضروريا للغاية. إن الهدف الرئيسي هو تطبيق هذه النماذج لدراسة التوجهات المناسبة للبناءات اعتمادا على الاكتناز بحيث نقوم في الوقت ذاته بمقارنة بين ثلاث مواد للبناء والتي تكون بطبيعة الحال محلية المصدر. لهذا قمنا باختيار موقعين ينتمي كل منهما إلى نظام إشعاعي شمسي مختلف عن الآخر، الجزائر العاصمة وگرداية.

إن الاستهلاك الطاقي لهذا النوع من البناءات هو أمر مكلف للغاية، سواء لأغراض التدفئة أو التكييف الهوائي. إذن من خلال تعزيز الاكتناز، فإنه يمكن خفض المستويات الكلية المطلوبة للعزل. أفضل وسيلة للحد من استهلاك الطاقة هو إعطاء الأولوية لتعزيز العزل الحراري الخارجي للعلاف. لقد وجدنا أن الطوب يشكل المادة الأكثر اقتصادا للطاقة. لكن بالنسبة لمدينة گرداية، على عكس الجزائر، تكييف الهواء هو أكثر تكلفة من حيث استهلاك الطاقة من التدفئة لأنه في غياب المساهمات الشمسية الحرة والمباشرة، فإن التغيير في التوجه للبناء لا ينتج تغييرا جذريا من حيث الاستهلاك. مناخ منطقة الجزائر العاصمة هو أكثر ملاءمة من حيث استهلاك الطاقة.

كلمات البحث : درجة الحرارة، التوجه، مواد البناء، الاستهلاك الطاقي، الاكتناز.

This article was downloaded by: [maamar hamdani]

On: 24 December 2014, At: 06:39

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Engineering Structures and Technologies

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tesn20>

Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate

Maamar Hamdani^{ab}, Sidi Mohammed El Amine Bekkouche^a, Tayeb Benouaz^b, Rafik Belarbi^c & Mohamed Kamel Cherier^a

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

^b University of Tlemcen, BP. 119, Tlemcen R.p. 13000 Algeria

^c Laboratoire Des Sciences De L'ingénieur Pour L'environnement Lasie, Université De La Rochelle, France

Published online: 22 Dec 2014.



[Click for updates](#)

To cite this article: Maamar Hamdani, Sidi Mohammed El Amine Bekkouche, Tayeb Benouaz, Rafik Belarbi & Mohamed Kamel Cherier (2014) Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate, *Engineering Structures and Technologies*, 6:3, 131-149, DOI: [10.3846/2029882X.2014.988756](https://doi.org/10.3846/2029882X.2014.988756)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.3846/2029882X.2014.988756>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>



MINIMIZATION OF INDOOR TEMPERATURES AND TOTAL SOLAR INSOLATION BY OPTIMIZING THE BUILDING ORIENTATION IN HOT CLIMATE

Maamar HAMDANI^{a,b}, Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE^a, Tayeb BENOUAZ^b, Rafik BELARBI^c, Mohamed Kamel CHERIER^a

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

^b*University of Tlemcen, BP. 119, Tlemcen R.p. 13000 Algeria*

^c*Laboratoire Des Sciences De L'ingénieur Pour L'environnement Lasie, Universite De La Rochelle, France*

Received 27 October 2013; accepted 13 November 2014

Abstract. In order to reduce the energy load, understanding the overall architectural design features and optimizing building orientation are important. They are guided by natural elements like sunlight and its intensity, direction of the wind, seasons of the year and temperature variations. The main aim of presented analysis is to give solutions for architects to design standard and low energy buildings in a proper way. The orientation effect of a non-air-conditioned building on its thermal performance has been analyzed in terms of direct solar gain and temperature index for hot-dry climates. This paper aims at introducing an improved methodology for the dynamic modeling of buildings by the thermal nodal method. The study is carried out using computer simulation. This study examines also the effect of geometric shapes on the total solar insolation received by a real building. As a result, the influence of orientation changing depends on the floors and exterior walls construction materials, the insulation levels and application of the inseparable rules of the bioclimatic design. Solar radiation is the most major contributor to heat gain in buildings.

Keywords: temperature, orientation, building materials, time lag, decrement factor, building size, geometric shapes.

Introduction

During certain synoptic conditions building orientation can have a great influence on the thermal behavior of different facades for two very different thermal regimes (for the very hot and very cold periods).

Design for orientation is a fundamental step to ensure that buildings work with the passage of the sun across the sky. Knowledge of sunpaths for any site is fundamental in design building facades to let in light and passive solar gain, as well as reducing glare and overheating to the building interior. Along with massing, orientation can be the most important step in providing a building with passive thermal and visual

comfort. Orientation should be decided together with massing early in the design process, as neither can be truly optimized without the other.

Raychaudhuri *et al.* 1965, present the results of a year-round experimental investigation carried out to study the effect of orientation on the indoor thermal conditions of thirty-two occupied dwellings of similar plans and design specifications but having eight different orientations. From both the experimental observations and the theoretical computations, it is found that the dwellings facing south-east and south directions have better indoor climatic environment throughout the year. However, in 1985 (Anderson *et al.* 1985), the

Corresponding author:

M. Hamdani E-mail: hamdanimaamar@yahoo.fr

Copyright © 2014 Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) Press
<http://www.tandfonline.com/TESN>

study was carried out for 25 climates in the United States. It was found that in all climates, when the more extensively glazed exposure is oriented to south, total loads are significantly lower than those in the same building oriented east or west. North orientation also produces lower total loads than east or west orientations in the southern two-thirds of the U.S., and roughly equivalent loads in the northern third. The impact of building location and climate and orientation on thermal comfort were investigated. Haase *et al.* 2009, prove that the orientation of a building depends on the climate.

Chwieduk, Bogdanska 2004 consider solar energy availability on different surfaces that constitute the envelope of a building. An analysis is presented to give recommendations for architects to help them design standard and low energy buildings in a proper way, including the integration of active and passive solar systems into building structure. For different periods of time, architects can decide on the orientation of the elements of a building envelope, including solar passive and active elements. To design the orientation and the inclination of building walls and roofs, to meet seasonally varying energy needs, the irradiation data for different azimuth and inclination angles for different period of time should be known (or calculated). The resulting modeled internal heat source rate of boundary elementary volume depends on the location of the volume, i.e. the orientation (azimuth) and the inclination (slope) angles of the outer surfaces have direct contact with the ambient surroundings. It is proved that distributions of daily energy demands for heating or cooling in months of the averaged year by every hour of the day for a room with the orientation and inclination under consideration are very similar to distributions of the daily solar irradiance of the surfaces of the same orientation and inclination at every hour of a day (Dorota 2008). According to Morrissey *et al.* (2011), the best solution to have a low cost, is to orient buildings in order to maximize their passive solar benefits. Design adaptability by change of orientation was modelled across two scenarios; current building energy efficiency standards and pending improved energy efficiency standards. The effect of size and overall energy efficiency rating was included in consideration of variance across orientations (Morrissey *et al.* 2011). In other studies, the authors have treated the case of a careful orientation of existing designs in order to optimize passive solar performance. This idea is the main

concern of this contribution, which also serves to test the case made elsewhere that passive design is a potentially significant contributor to thermal performance and, therefore, energy efficiency (Givoni 1991). Good orientation and location on site may potentially reduce the energy requirements of a typical dwelling by 20 percent (Spanos *et al.* 2005). Therefore, they ensured that there are two ways to ensure optimal orientation. The first is to analyse various parameters and ensure optimal design and orientation on a building by building basis, and the second is to develop “adaptable” designs which perform well across a range of orientations (Hoffman 1983; Balcomb *et al.* 1977). In addition, appropriate passive solar design should consider key building parameters such as building orientation, plan proportion and shape, facade glazing design and obstruction by surrounding buildings. Of these parameters appropriate orientation is the most fundamental and generally most easily addressed aspect of passive solar design. In addition, appropriate orientation can create potential for additional savings from more sophisticated passive solar techniques (Morrissey *et al.* 2011; Numan *et al.* 1999; Aksoy, Inalli 2006). By combining the optimization of shape and orientation, it is possible to obtain benefits that can lead to heat energy savings of 36% according It is generally agreed that a southern orientation is optimal for gaining heat in the winter and for controlling solar radiation in the summer. As a general rule, the longest wall sections should be oriented toward the south (Chwieduk, Bogdanska 2004). However, orientation can also be studied with a view to optimizing other parameters such as the total solar radiation received, building shape, ground plan surface, and the annual energy demand in article of Aksoy, Inalli (2006). However, it is generally agreed that a southern orientation is optimal for gaining heat in the winter and for controlling solar radiation in the summer, and the longest wall sections should be oriented toward the south. Orientation can also be studied with a view to optimizing other parameters such as the total solar radiation received, building shape, ground plan surface, and the annual energy demand (Mingfang 2002; Pacheco *et al.* 2012). Indeed, Ozel *et al.* (2007) found that for various wall orientations in both summer and winter conditions, the optimum location of insulation was obtained from consideration of time lag and decrement factor. In other research (Keplinger 1978), there is proved that the cost of systems and solar devices may be considered high, it is insignificant

compared to the irretrievable cost of improper orientation or design. Once a building is poorly located or faultily oriented, the opportunity for correction is gone forever, or the cost is prohibitive. A building properly designed and oriented can greatly reduce the demands on the heating and cooling system, in turn reducing the needed area of expensive solar collectors. Reducing the initial costs of solar systems will speed acceptance and implementation of solar energy utilization. While Givoni (1994), discusses objectives and principles for building design, from the human comfort aspects, in regions with hot humid summers and mild winters. The issues discussed are: building layout, openings and ventilation, thermal mass, orientation with respect to the sun and the wind.

The improvement of building thermal behaviour is a very important challenge because of the electrical consumption, thermal discomfort generates undesired temperatures either for the summer season or even the winter season, both situations result a need for heating and cooling within the building which urges to use automatically the electric power. The use of building thermal simulation software is necessary to achieve this task. But, before using such a program, one must ensure that its results are reliable. To do so, a methodology must be applied including the verification of numerical implementation and experimental validation.

1. Objective of the study

This paper provides a simplified analysis method to predict the impact of the orientation for a building on its instantaneous temperature. A proposed model is developed based on detailed simulation analyses utilizing several combinations of building geometry, orientation, thermal insulation level, glazing type, glazing area and climate. The aim of this paper is to determine the optimum orientation due to this type of climate to control the maximum indoor temperatures and direct solar gain. The originality of this paper lies in determining the favorable orientation taking into account the building compactness, the location of the zone, the geometrical shape, the building size and building materials

2. Nodal analysis applied to heat conduction and coupling with superficial exchanges

The computing of temperatures, whether for air or for layers of walls, and also the perception of dynamic aspect of thermal transfer are of paramount impor-

tance. A review of the literature reveals many applied methods of such modeling approaches for residential buildings. Polish standards (PN-B-03406: 1994; PN-EN 12831: 2006) on calculation methods of heat demand for space heating of buildings take into account averaged global monthly solar radiation incident on surfaces with inclination with different inclination and azimuth angle (Chwieduk, Bogdanska 2004). Energy flow can be modeled using a thermal resistance method corresponding to calculation of equivalent electrical circuit flow (Gordon 2001). However, to describe the energy flow using the thermal resistance method, it can be assumed that heat transfer between temperature nodes is proportional to respective temperature difference (Dorota 2008). It should be stated that the main aim of this paper is to present some aspects of modeling the energy balance of a room in regard to the impact of solar energy. Raychaudhuri *et al.* (1965) provide matrix method of computation used for predicting the indoor temperatures. This method, although it has its limitations, is certainly capable of presenting comparative performance on variously oriented dwellings. But it would be rather impossible to take into account precisely the occupied-in conditions and other uncertain variables in the computation for occupied dwellings.

In this contribution, thermal nodal method was used to apprehend thermal behavior of air subjected to varied solicitations. The nodal analysis is a powerful method of investigation in thermal systems. It has been used in several branches such as solar energy systems (Saulnier, Alexandre 1985), micro-electronics (Auger *et al.* 1981) or also the spatial field (Chapman 1984). We will gradually use this approach in the domain of building's physics and we'll interest ourselves in the automatic generation of nodal models.

A simplified approach allows representing the multilayer system by a model based on an electrical analogy proposed by Rumianowski *et al.* (1989), and then it was taken by Cron *et al.* (2003). It is often used when we intresse to the determination of the temperature of any node inside a wall. The following Figure 1 is an illustration of the decomposition principle.

The equivalent resistances are calculated by the following formulas:

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

Heat capacities are determined as follows:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S(1 - \beta_i); C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j \delta_j; \quad (2)$$

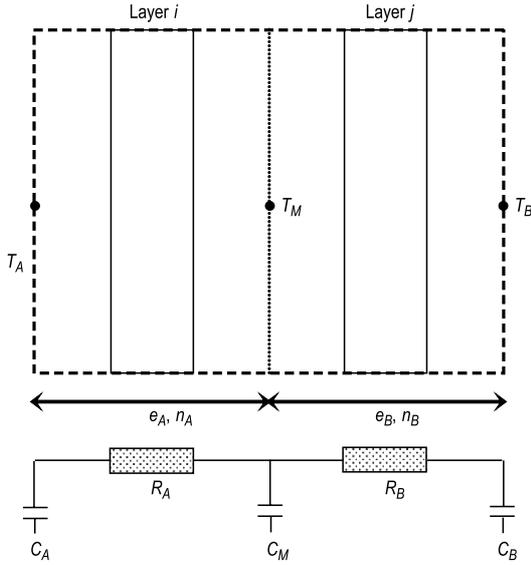


Fig. 1. Wall spatial discretisation and conduction model

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j (1 - \delta_j); \quad (3)$$

$$\beta_i = \frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}; \quad \delta_j = \frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}. \quad (4)$$

The energy balance of the building for surfaces is represented by equations 5–7:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{Surf-i} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{conv} (T_{air} - T_A); \quad (5)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{Ground\ outside}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{Sky}^4 - T_B^4) + S h_{conv\ amb} (T_{amb} - T_B); \quad (6)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = -\frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B}; \quad (7)$$

$$h_{conv\ amb} = 2.8 + 3.3 V_{Wind}; \quad (8)$$

$$T_{Sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5}, \quad (9)$$

where e – thickness (m); n – number of node; α – absorption coefficient; ε – thermal emissivity; G – the incident global irradiation on the surfaces ($W\ m^{-2}$); S – surface (m^2); λ – thermal conductivity ($W\ K^{-1}\ m^{-1}$); C_p – specific heat ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$); ρ – density ($kg\ m^{-3}$); F – form factor between the exchange surfaces; σ – Stephane-Boltzmann constant ($W\ m^{-2}\ K^{-4}$); V_{Wind} – wind speed ($m\ s^{-1}$); $h_{conv\ amb}$ – coefficient of heat flux exchanged by convection (W).

In the multizone-zone model a given building is made up with a certain number of rooms, walls, doors and also glass windows. The physical model of the building is obtained by assembling thermal models of each element. The different zones' temperatures (principal variables) are linked together through heat conduction and air movement.

We developed in Refs (Bekkouche *et al.* 2009, 2011, 2013a, 2013b) mathematical models based on first law of thermodynamics were elaborated to obtain different air temperatures of the inside parts. But in this paper, we make a coupling between the equations proposed by Rumianowski *et al.* (Mora 2003) and equations of a building thermal energy model found in the TRNSYS user manual (TRNSYS16 2004; Schmidt 2004; Sakulpipatsin *et al.* 2010). The building energy balance for a zone is a balance model with one air node per zone, representing the thermal capacity of the zone air volume. The building power balance for a zone is shown as equation 10 representing the variation of the power energy of the air in the zone in the time interval dt :

$$\rho_{air} C_{air} V_{air} \frac{dT_{air}}{dt} = Q_{Gain} + Q_{Surf} + Q_{heating} + Q_{cooling} + Q_{Inf} + Q_{Vent}. \quad (10)$$

With thermal powers are algebraic values: T – temperature (K); ρ_{air} – air density ($kg\ m^{-3}$); C_{air} – the specific heat of air, it is assumed constant and estimated at $1008\ (m^2\ s^{-2}\ K^{-1},\ J\ kg^{-1}\ K^{-1})$; V_{air} – air volume (m^3); $Q_{heating}$ – thermal power provided by heating equipment (W); $Q_{cooling}$ – thermal power provided by cooling equipment (W); Q_{Inf} – thermal power gain due to air infiltration (W); Q_{Vent} – thermal power gain due to air ventilation (W); Q_{Surf} – thermal power due to exchange between the air and, (i) walls inner surfaces and (ii) windows and doors, (W); Q_{Gain} – direct solar gain due to openings (W).

The boundary conditions of the system include the nodes of the inner surface for all surfaces of the zone, including radiative energy flows. We also note that the energy of an active layer and the energy stored in the walls are not part of this energy balance, but they are part of detailed balance for surfaces.

The transfer rates of thermal energy of infiltration and ventilation air flow are respectively calculated by equations 11 and 12.

$$\dot{Q}_{Inf} = \dot{m}_{Inf} C_{air} (T_{air} - T_{out}); \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{Vent} = \dot{m}_{Vent} C_p (T_{Vent,out} - T_{Vent,int}), \quad (12)$$

where \dot{m}_{Inf} – the air flow due to infiltration (kg/s); \dot{m}_{Vent} – the air flow due to ventilation (kg/s); T_{int} – ir temperature inside the building (K); T_{out} – air temperature outside the building (K); $T_{Vent,out}$ – air temperature at the ventilation outlet (K); $T_{Vent,int}$ – air temperature at the inlet ventilation (K).

Thermal energy due to exchange between the air and walls inner surfaces are calculated by equation 13:

$$Q_{Surf} = \sum S h_{Conv} (T_{Surf} - T_{air}), \quad (13)$$

where T_{Surf} – air temperature walls inner surfaces (K); h_{Con} – the convective transfer coefficient ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$). Numerical formulas are given in Table 1.

3. The nodal structure and description of the building

A given building is composed of a certain number of rooms, walls, doors and also glass-windows. At the beginning of this variable description, the building’s decomposition into a certain number of zones is a simulation parameter. Therefore, the splitting up of the building into thermal zones induces the setting of nodes of temperature by zone. A certain number of information fields are connected to a node, traducing for instance the allocation of a node to a zone or also the topology of the global electrical network associated with the building. Considering the objective to be reached, we have been induced to assign a type to each node. Indeed, relative to the equations, the nodes are concerned with different phenomena. For instance, a wall node is going to concern terms of heat conduction. This same node, depending on its location, can also concern convective process. On the external face of the envelope’s wall, the surface node is concerned with outdoor radiative and convective exchanges. We have to note that the size of this structure can quickly become significant, a building having most of the

time several zones and for each zone several walls and glass-windows. This structure’s size being linked to the dimensions of the systems to be solved, the notion of calculation time must not be overlooked.

The study was carried out on a building in Ghardaïa. The exterior envelope, apart from contributing to the energy savings during the entire life span of the building by controlling the energy exchange between indoor space and environment, also promotes the development of a comfortable indoor environment. Figure 2 is a schematic outline of apartment building, the house has a habitable area of 71.3 m², and wall heights are equal to 2.8 m while the other dimensions are shown in detail in Figure 2. The flooring is placed on plan ground to lodge the ground floor. The concrete of the flooring is directly poured on the ground thus minimizing losses. Floor tiles are inter-

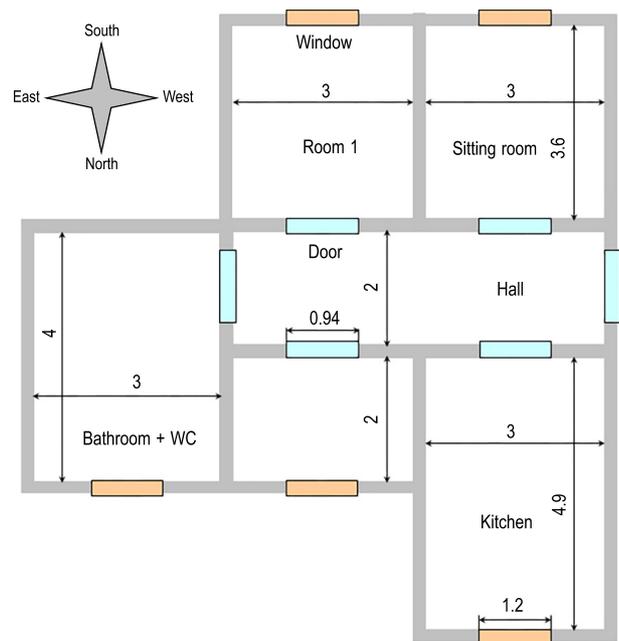


Fig. 2. Descriptive plane: southern orientation

Table 1. Expression of convective transfer coefficients (George 1999)

Surface description	Flow regime	Condition	Expression
Vertical wall	Laminar regime	$10^4 < Gr\ Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1.42 (\Delta T/L)^{1/4}$
	Turbulent regime	$Gr\ Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1.31 (\Delta T/L)^{1/3}$
An upper surface of an hot horizontal plate or an underside surface of a cold plate	Laminar regime	$10^4 < Gr\ Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1.32 (\Delta T/L)^{1/4}$
	Turbulent regime	$Gr\ Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1.52 (\Delta T/L)^{1/3}$
An underside surface of a hot plate or an upper surface of an cold plate	Laminar regime	$10^4 < Gr\ Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 0.59 (\Delta T/L)^{1/4}$
	Turbulent regime	$Gr\ Pr > 10^9$	

Note: Gr – Grashof number; Pr – Prandtl number; L length of the plate (m); ΔT – temperature difference between the surfaces and volumes exchange (K).

imposed, it is an end coating resisting to corrosion and chemical agents. The roof is composed of cement slabs and concrete slab made so that it handles the load and be economical. A roof sloping of 5° allowed water evacuation through several openings. Until now the flat roofs are considered as nest infiltration and as architectural solution. Windows and doors contribute significantly to the energetic balance. Their contribution however depends on several parameters as: local climate, orientation, frame, relative surface (window-flooring), and concealment performance during night and sunny days. In this case focus is made particularly on windows and doors dimensions and all are made of woods. The apartment has a surface of 95.74 m² with an occupied space of 71.3 m².

A certain number of information fields are connected to a node, traducing for instance the allocation of a node to a zone or also the topology of the global electrical network associated with the building. We have been induced to assign a type to each node. Indeed, relative to the equations, the nodes are concerned with different phenomena. Then, it appears necessary to attribute a type to each node. Table 2 gives the types of nodes encountered. For a given building, when the node structure is established, it is easy to fill up each element of the mathematical model. Indeed, we have just to sweep the node structure and attribute the relevant terms. Then, the structure will include six zones' numbers (Figure 3).

Table 2. Types of nodes encountered

Node	Type
●	Outdoor surface node of outside wall
●	Internal node of outside wall
○	Indoor surface node of outside wall
●	Outdoor surface node of window
●	Internal node of window
○	Indoor surface node of window
○	Indoor surface node of inside and outside door
○	Outdoor surface node of inside door
○	Outdoor surface node of outside door
●	Internal node of inside and outside door
●	Outdoor surface node of outside door
●	Dry indoor air temperature
●	Outdoor and indoor surface node of inside wall
○	Internal node of inside wall
●	Surface node of ground
●	Internal node of ground
○	Terminal node of ground
●	Outdoor surface node of outside roof
●	Internal node of outside roof
○	Indoor surface node of outside roof

In Ghardaïa region building envelopes or outer wall consisting of a heavy structure generally constituted of stones (40 cm thick), jointed and surrounded by two layers having thickness of 1.5 cm of mortar cement. The most inner face is coated with 1 cm thick plaster layer. The inner walls (or splitting walls) whose sides are in contact only with the internal ambient are

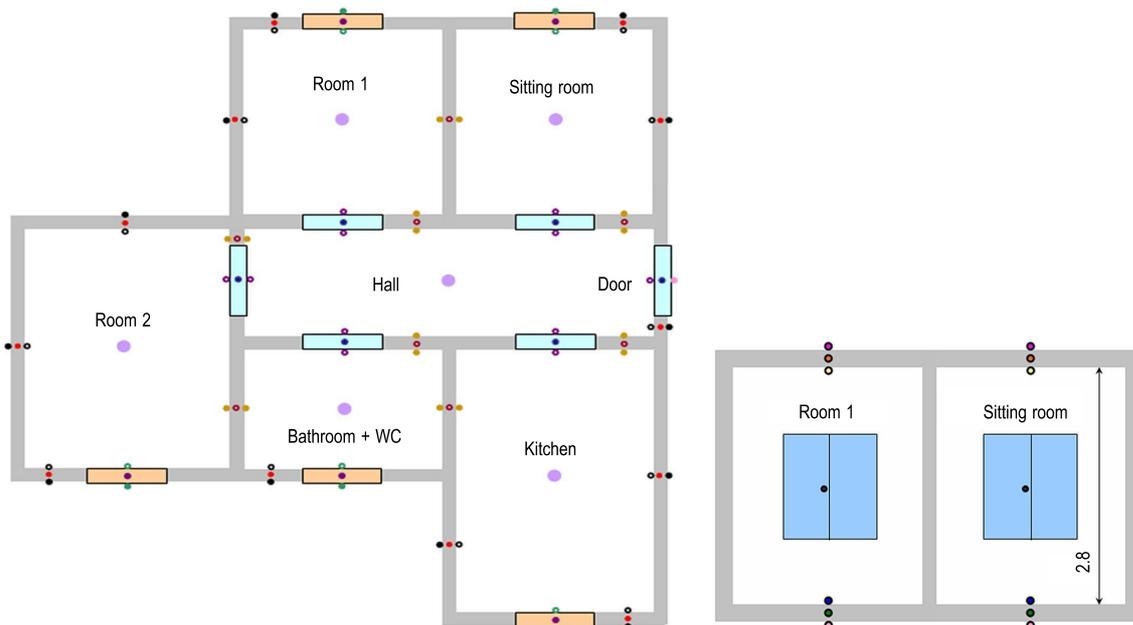


Fig. 3. Descriptive plane: southern orientation

considered to be of heavy structure constructed of stones of 15 cm width jointed and surrounded by two mortar cement layer of 1.5 cm thick and two layers of 1 cm thick of plaster (Table 3).

Windows and doors contribute significantly to the energetic balance. Their contribution however depends on several parameters as: local climate, orientation, frame, relative surface (window-flooring), and concealment performance during night and sunny days. In this case focus is made particularly on windows and doors dimensions and all are made of woods. Windows and doors have significant impacts on a building's energy usage, as they contribute to a building's heating and cooling loads as well as lighting if daylighting sensors and controls are deployed. Windows shall be designed to limit air leakage. The air infiltration rate shall not exceed 2.8 m³/hr per linear meter of sash crack when tested under a pressure differential of 75 Pa (George 1999). The used characteristics are given in Table 4.

If we consider that the habitat is poorly insulated, we use the U-value in the first case for glazing, and if the thermal insulation is reinforced, we use the values of the second case. For our study, we consider that the window composition comprises in addition

Table 4. Thermal properties, thicknesses of walls and building envelope characteristics

Glass Type		U-Value
Flat Glass Case 1: without thermal insulation	Single pane, clear For all windows	5.91
Insulating Glass Case 2: with thermal insulation	Double pane, clear, 12.5 mm air space For WC and bathroom	3.18
	Double pane, with low emittance coating $e = 0.20$ For rooms 1 and 2, kitchen and sitting room	2.21

to the configuration given in table 4, wood blinds usually separated from the previous configuration by an air gap of 2 cm. We assume that the heat transfers through windows are only by conduction. However, the doors are made of wood with a thickness of 2 cm: $\lambda = 0.14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\rho = 500 \text{ kg m}^{-3}$ and $C_p = 2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, λ , ρ and C_p are respectively thermal conductivity, density and specific heat). Each wall type is described in Table 3. Some thermal properties of the materials are the usual values found in reference (Bekkouche *et al.* 2013a, 2013b; Silvana *et al.* 2009; Mazroud *et al.* 2010; Howlader *et al.* 2012).

Table 3. Thermal properties, thicknesses of walls and building envelope characteristics

Material and wall composition		L , m	λ , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	ρ , kg m^{-3}	C_p , $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	
Exterior walls	Type-1 wall	Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
		Stone	0.4	2.3	2000	1000
		Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
		Plaster	0.01	0.56	1400	1000
	Type-2 wall	Plaster	0.015	0.56	1400	1000
		Brick	0.3	0.81	1800	835
Plaster clay		0.005	0.45	1200	840	
Interior walls	Type-1 wall	Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
		Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
		Stone	0.15	2.3	2000	1000
		Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
		Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
	Type-2 wall	Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
		Brick	0.2	0.81	1800	835
		Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
Ground	Tiling	0.025	6.14	2300	875	
	Cement	0.02	1.4	1800	1000	
	Concrete dense	0.2	2.4	2400	800	
Roof	Plaster	0.015	0.56	1400	1000	
	Lightweight concrete	0.12	0.33	800	719	
	Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000	

4. Experimental validation

This model took into account only thermal exchanges thus air stratification, whereas wind influence on air infiltration and water diffusion into walls body were not considered. Also states changes are not considered therefore storage of latent heat and moisture effects were neglected. The moisture problem does not arise in this building and in addition the climate is dry and the used building materials are generally ecological materials. Implementing the general law of building energy conservation, we arrive to a non stand alone system governed by one hundred and forty one non linear ordinary differential equations. Subsequently, it is essential to implement numerical methods that compute these temperatures. Designed to solve such problems, Runge-Kutta fourth order numerical method was used to apprehend thermal behavior of walls and air subjected to varied solicitations. The elaborated interactive programs allowed a better understanding heat transfer phenomenon of walls and air under dynamic regime. Windows and black-out curtains remained closed all over the period. The instantaneous temperatures of air and wall surfaces were calculated by entering the measured meteorological data.

The steps of this scientific method are: test of the hypothesis by doing an experiment, data analyses, communicate the results and draw a conclusion. The scientific method, used for most experiments, has several steps that we will need to follow carefully in order to make sure that the experiment is accurate and accepted as possible. The experimental method is usually taken to be the most scientific of all methods. In order to accomplish the measurement phase, a data acquisition unit of type Fluke Hydra Series II which in spite of its high accuracy, it accumulates some errors, not really considerable. Data acquisition systems are used extensively in many fields in order to accurately acquire and log data for measurement and analysis. Technicians know that they can count on Fluke to deliver quality measurements which meet all of their acquisition and analysis needs. Fluke data acquisition systems are perfect for small to medium scale process monitoring and testing, plugs into existing network allowing to quickly and easily sending data directly to PC. Hydra Fluke for Windows is a configuration and data management program. This program is available as a 32-bit application, contains modem support for remote data communications, and is available with or

without Trend Link for Fluke trending and data analysis capabilities. Trend Link is a comprehensive trend plotting and analysis package that plots data graphically in real time. Calibrated type-K thermocouples were used to measure temperatures, their measuring principle is based on Seebeck effect. It produces a voltage when the temperature of one of the spots differs from the reference temperature at other parts of the circuit. For recording the temperatures of south and north walls, five thermocouples were placed in different locations of walls. Also, the temperatures of the internal ambient air were registered by placing other five thermocouples in different points. The plotted temperatures experimental values are those corresponding to the average of the registered ones. We introduced the thermocouples so that:

First is located in the center of the sitting room.

The second and the third are placed on the middle axis of the horizontal plane at 1.4 m in height so that each thermocouple is at 20 cm of the southern wall and the Northern wall.

The others thermocouples were inserted into the normal line which passes through the first thermocouple, they were implanted in such way the distance between the thermocouples and the walls (the roof and floor) will be about 10 cm.

Indeed, we judged that five thermocouples are largely sufficient because the temperature gradients are not really significant. According to the measurements in summer and for any position of the vertical plane, the maximum difference between air temperature at a point near the roof and another point on the same normal and at proximity to the ground does not exceed the value of 0.85 °C. Similarly, for any height, the maximum variation in temperature is about 1 °C between two points, one near the southern wall and the other near the northern wall, which lie along the same axis and same horizontal plane.

Then to measure the temperatures of the walls, we introduced the five thermocouples on surfaces of the walls by respecting the same distances. The first will be at the center, the second and the third will be on the vertical line which passes by the center and the last thermocouples will be on the horizontal line which passes by the center. The data were collected at 30 minutes intervals.

One of the main problems with most buildings in Ghardaïa, is that the envelope is not designed to cope with the extreme summer climate. The hot summer

outside air penetrates into the building and increases the cooling load. The external walls also readily conduct solar gains to the inner wall surface, which then warm and radiate into the room.

For the purpose of proper design of a modern low energy building it is necessary to calculate solar radiation on surfaces with different inclinations and orientation. The sets of averaged hourly sums of solar radiation, global and diffuse, are applied as input data for simulation of solar radiation availability for various surfaces. To estimate the incident global irradiation, we have selected Perrin Brichambaut model that utilizes the atmospheric Linke turbidity factor in order to compute direct and diffuse components of solar irradiation. Absorption and diffusion caused by atmospheric particles are expressed in terms of the Linke turbidity factors. From these factors direct and diffuse irradiation are determined in case of clear sky model (Capderou 1987; Mefti *et al.* 1999; Kasten *et al.* 1980, 1989, 1996). We are interested in determining the incident irradiation on the roof (horizontal) and the vertical surface of external walls. Solar radiation distributions on the exterior façades of the zone, as in 20 min time steps for January and July are shown in Figure 4 under clear sky condition.

As seen, south façades receive the greatest total annual irradiation; they do not receive the maximum in summer, because the sun is too high in the sky. During winter the sun is at a much lower altitude and it is then they receive the maximum radiation. The two peaks in the morning and evening at respectively eastern and western walls are due to the influence of direct gain during these hours; the dome in between represents exclusively the diffuse radiation that occurs

at these times. At the east, high direct gain occurs in the morning hours and only diffuses radiation in the afternoon. The direct solar beam drops down at solar noon. At the south, diffuse and direct radiations coexist with a peak at solar noon.

This summer period was characterized by sunny days with high solar irradiance. The outdoor air temperature oscillated between 30.55 °C and 46.75 °C, with a mean value around 37.98 °C. The results, i.e., the simulation and the experimental temperatures for the air temperature profile are presented in Figure 5 for the type-1 walls.

The sitting room air temperature reaches its calculated maximum value of 37.54 °C and its measured maximum value of 37.74 °C around 23:00, and reaches its calculated minimum value of 36.1 °C and its measured minimum value of 35.58 °C around 11:00. The mean thermal amplitude was 3 °C on the temperature for calculated values and 2.79 °C on the temperature for measured values.

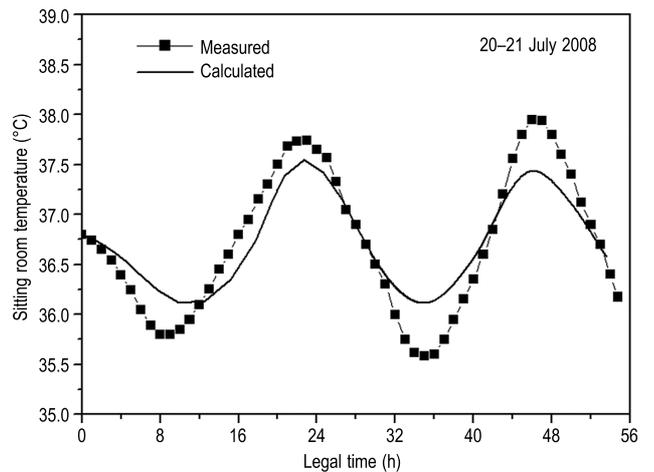


Fig. 5. Measured and simulated temperature of sitting room

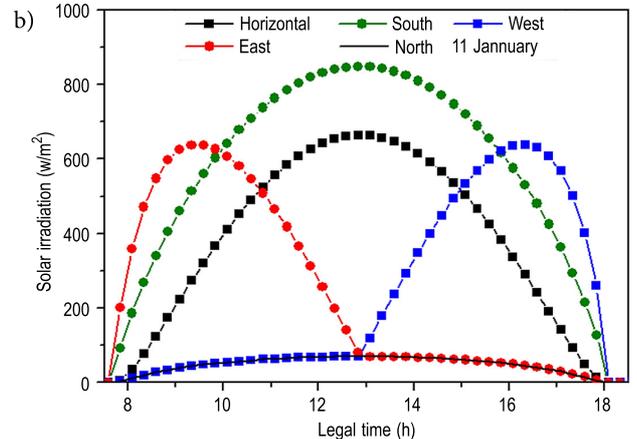
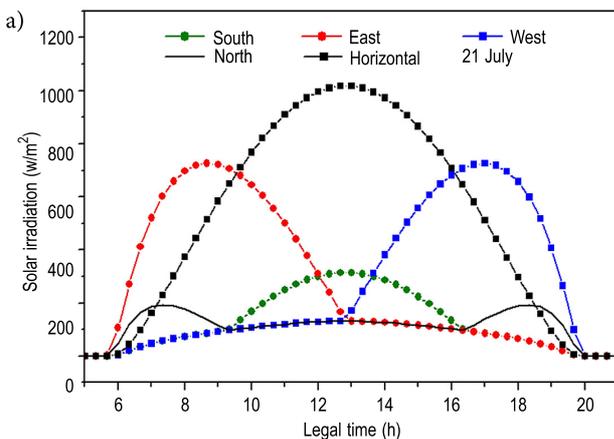


Fig. 4. Solar radiation at the exterior zone façades: the 21 of July (a) and 21 of January (b)

Indeed, this new numerical model for this building was also applied to the days of the winter season. Figure 6 shows the measured temperatures and those predicted by the identified model; represents temperatures curves of the internal air. All time traces shown are for the 54 hour time period mentioned above, the inputs used for these simulations are obtained from measured data during midnight of January 10, 2009 to 06:00 of January 13, 2009, which is part of the validation data set. The calculation result is compared with the measurement result. These days correspond to a clear sky and an ambient temperature between 6 °C and 14.5 °C, wind speed varies randomly between 3 m/s and 5 m/s in time. Running the program for several solicitations allows us to obtain this figure.

The found results show that the measured temperatures of the sitting room were found to be between 17.7 °C and 19.3 °C and between 17.55 °C and 19.2 °C for the simulated temperatures. The comparison proves as a whole acceptable, with a mean difference which not exceeds the order of 0.8 °C for air temperature. The margin of error is greater in this period compared to the summer. This margin is justified by the weather which is not stable: wind speed varies greatly in very complex. The input data, ie, ambient temperature and wind speed were included in the program by determining an interpolation function (polishing polynomial) that identifies each parameter to ensure the execution speed of the program designed. In this situation, randomized evaluation of these parameters does not establish the exact functions that properly approaching the experimental values.

The prediction of air temperatures from this model of a whole building is a step forward in the

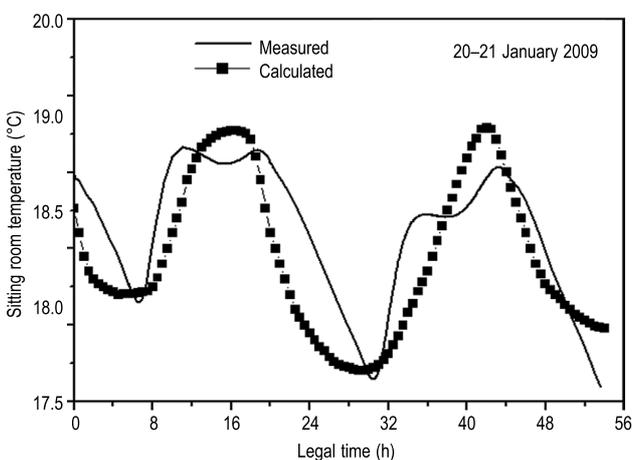


Fig. 6. Measured and simulated temperature of sitting room

simulation process that helps the comprehension of the building behavior, the improvement of the building envelope, and the estimation of the comfort levels inside it. This simplified method is good approach to the understanding of the thermal behavior of air in a real building.

5. Result and discussions: ideal orientation

Along with massing, orientation can be the most important step in providing a building with passive thermal and visual comfort, generally used to refer to solar orientation which is the sitting of building with respect to solar access. Although any building will have different orientations for its different sides, the orientation can refer to a particular room, or to the most important facade of the building. In these studies, the orientation of the building as well as the relative dimensions of surfaces facing different directions would have to be considered. These studies are very useful for good planning to ensure design which agrees with a low-energy building.

5.1. Indoor temperature

5.1.1. According to the area's location

Figure 7 gives an overview of the sitting room temperatures during the days of July 24–25. These two days are characterized by a totally clear sky, an intensive solar radiation, an outdoor ambient temperature between 32 °C and 47 °C in the shade and a very low wind speed. In summary, the climatic conditions correspond to extremely hot days. From these results, we note that the obtained temperatures are very high. The higher interior air temperature during the evening hours is caused by the thermal storage. Thermal storage or thermal inertia of any wall can be defined as the maximum minus minimum surface temperature (temperature variation interval). The difference between the peaks of air temperature does not exceed the threshold of 1.7 °C; this can be justified by the high thermal inertia that promotes stable indoor temperatures because the difference between the peaks of external air temperature can reach around 15 °C.

It is known that, in the East and West facades, the low position of the sun can not glare treatment. The results predict that the west orientation is the least favorable. In the afternoon, the room is very glare and overheated, the sun leads to the overheating due to the long exposure time (07 hours: see Figure 4). In addition to that, the largest amount of daily radiation in-

cident on the West side will be received during this period. It has approximately 92.56% of the total daily radiation which is estimated at 4025 Wh/m². In addition to this, the thermal phase shift caused by the high thermal inertia is another indicator that reflects the number of hours required (it is estimated at 06:03, show Figure 7) for the heat transfer through the wall. Moreover, the South and East orientations are more favorable before 21:00 with a slight advantage for South orientation in the morning and a net advantage to the East direction in the evening. Regarding the north direction, it may become more favorable between 24:00 and 07:30. Knowing that the maximum value of the room temperature is reached at 14:42, we found that the thermal phase shifts of the South, North, East and West directions are estimated at 07:49, 06:07, 07:51 et 06:03 respectively. It can be drawn from these indications that the thermal phase shift depends on the building's orientation.

Some variables with that are related to building shape and which influence heating and cooling requirements are the following: compactness index; the height of walls, climate; and the characteristics of the building envelope. These characteristics are crucial variables that should be taken into account because they are relevant to the energy requirements for maintaining the building at a comfortable temperature. The proper use of compactness index parameters will noticeably improve the internal temperature of the building. The compactness of a building, indicated by the S/V ratio (S: area of building envelope surface, V: volume of the building) has a considerable influence on the heating energy demand of buildings. The compactness is better when the compactness index is lower.

In this example, it is assumed that the building is a house with two fronts; the South and the North side if we refer to Figure 2. That is to say, we assume that the building is in a rural region. This means that the compactness index will decrease from 0.5882 (the case of the first example) to 0.27.

According to Figure 8, the most favorable orientations are those of the South and North with a small advantage for the North orientation. These results can be explained by the amount of solar radiation received by each façade. The total daily solar radiation is estimated at 2486 Wh/m² and 1514 Wh/m² for the South and the North orientation respectively. The obtained temperatures for the East and West directions are higher due to the long exposure time, and to the important amount of the incident daily radiation, which is of the order

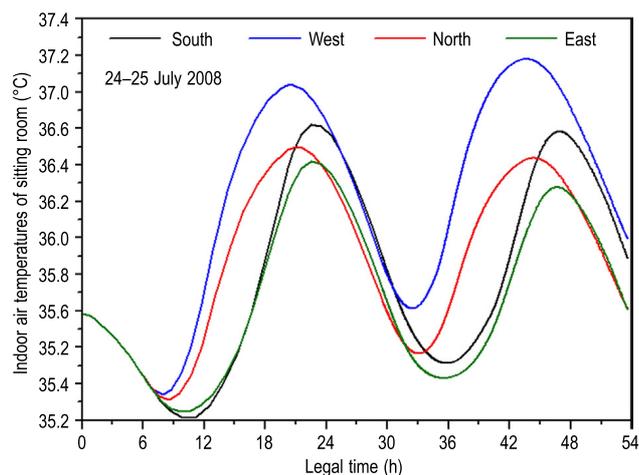


Fig. 7. Sitting room temperatures, S/V ratio = 0.5882, July 24 and 25, 2008

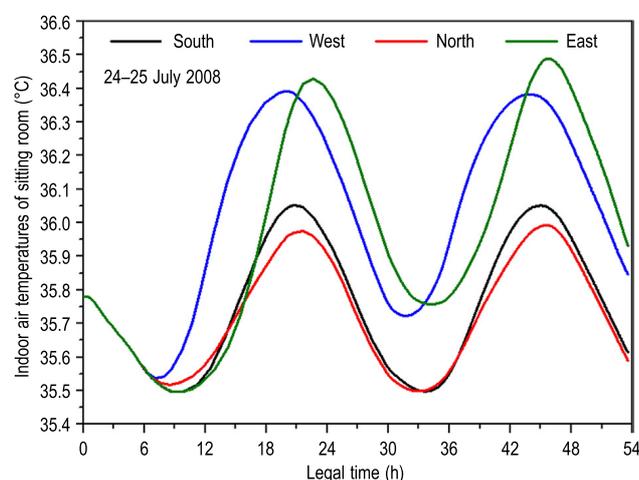


Fig. 8. Sitting room temperatures in the case of stone, S/V ratio = 0.27, July 24 and 25, 2008

of about 4025 Wh/m². We can also draw that internal temperatures of the room are great for west orientation during most of the day (before 20:00), then they become the lower in the morning. These observations coincide with the long duration and timing (morning or evening) of exposure which is always justified by the thermal phase shift caused by the high thermal inertia. We conclude that the building orientation depends largely on the compactness index and the contact mode with the outside.

5.1.2. According to building materials

For the region of Ghardaïa, the influence of orientation changing depends on the floors and exterior walls constructing materials, the insulation levels and application of the inseparable rules of the bioclimatic design (Bekkouche *et al.* 2011, 2013a, 2013b; Cherier *et al.* 2013). For enhanced thermal insulation (the use of

massive brick for example: type-2 wall). Figure 9 confirms almost the same observed scenario for the case of stone described in Figure 7, the difference appears only at the order of values.

However, we spent another study to appear the influence of the orientation of this habitat during the winter, January 06 and 07, 2013. We selected two days characterized by a totally clear sky and an outdoor ambient temperature between 8 and 19 °C, the maximum value is reached around 16:30. The wind speed varies between 0 and 2.5 m/s. Numerical simulation certifies that the positive orientation is the Southern whose compactness index of the construction equal to 0.27 (Fig. 10). One can interpret this result by the fact that the amount of the incident solar radiation on the Southern wall is the highest. By numerical calculation, the daily global radiation incident on the South wall is estimated at 6602 Wh/m². The Northern orientation is

less favorable due to the very low amount of the incident solar radiation (251 Wh/m²) which is much less than the amount of the incident solar radiation on the East and West walls (2373 Wh/m²).

The calculated values of daily global radiation are based on work previously published (Yaïche, Bekkouche 2008, 2009, 2010).

5.1.3. According to the building size

In this section, we will study the influence of the enlargement of an individual building fully exposed to the sun (at the roof and walls). The plan enlargement corresponds to multiplying each surface "S" by the "Agr" expansion parameter, and consequently we multiply the internal volume by "Agr \sqrt{Agr} ".

With respecting results of the literature and reference (Bekkouche *et al.* 2013a), the obtained temperatures for each area prove that the enlargement of this construction improves the level of thermal inertia and provide higher thermal insulation performance. The increasing size consolidates the thermal insulation of the building external envelope and allows maintaining and limiting temperature fluctuations. Thermal insulation can keep an enclosed area such as a building warm, or it can keep the inside of a container cold. Therefore, we can discover the appearance of the high thermal inertia which provides more stable temperature change. The calculated temperatures of the internal air in sitting room are given below respectively in Figures 11 and 12 below. The chosen initial conditions are the final conditions of the previous day (23 July).

We consider this time that only the south and north facades are in contact with the outside which corresponds to a compactness index equal to 0.1977, knowing also that the sitting room is subjected to the outside air through one façade that contains the opaque wall and window.

Increasing the size promotes thermal comfort; therefore we must privilege the tall buildings. A very simple example is shown; consider a cube of side length $L = 4$ m, the corresponding index value is 1.25, when we compare to a cube of side length 8 m, we observe that the compactness index of the new cube is 0.625.

In both cases, the most favorable orientation is the North, since firstly, one façade is subject to the external environment and, on the other hand, the obtained values from software designed by Yaïche, Bekkouche (2008, 2009, 2010) show that the received power in the north side is lowermost 1514 (Wh m⁻²). The

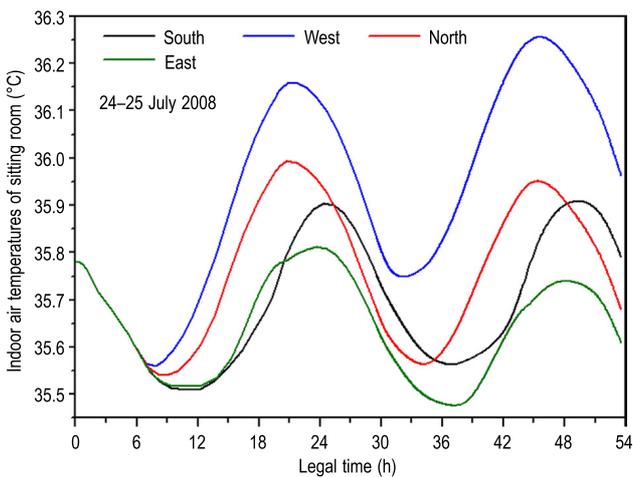


Fig. 9. Sitting room temperatures in the case of massive brick S/V ratio = 0.27, July 24 and 25, 2008

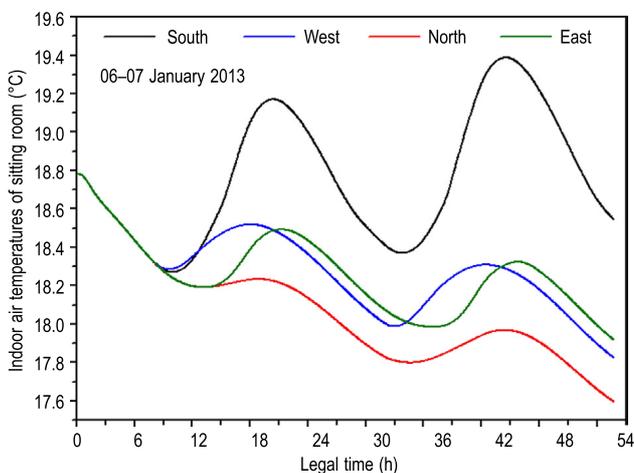


Fig. 10. Sitting room temperatures, S/V ratio = 0.27, January 06 and 07, 2013

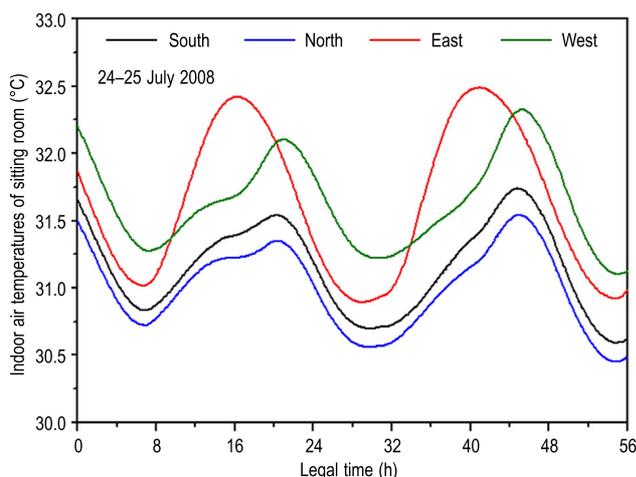


Fig. 11. Sitting room temperatures for an ordinary plane in the case of stone, S/V ratio = 0.1977, July 24 and 25, 2008

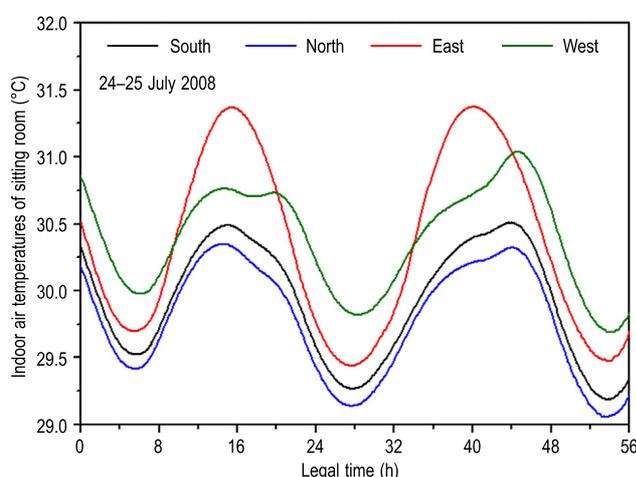


Fig. 12. Sitting room temperatures for an expansion parameter $A_{gr} = 3$ in the case of stone, S/V ratio = 0.1977, July 24 and 25, 2008

daily solar radiation amounted to 2486 Wh m^{-2} for the vertical South and 4025 Wh m^{-2} for the vertical East and West for the day of July 24. As a result, one can see that the behavior of temperatures undergoes the same scenario by comparing it with the evolution of the incident solar irradiance on different planes.

5.2. Total solar radiation: effect of geometric shapes and heat exchange surfaces

Vertical surfaces are the most critical to the impact of solar radiation. This study examines the effect of geometric shapes on predicting temperature and total solar radiation in the sitting room. Two generic shapes (square and rectangular) have been studied with variations in building orientation using the computer simulation program. Further analysis focuses on the optimum shape for both basic geometric shapes. We show in Table 5 the contribution of the orientation according to geometric shapes. As indicative example, we choose the day of July 25 for the predicted values of the total solar radiation. The obtained values (Yaïche *et al.* 2008, 2009, 2010) show that the daily solar radiation amounted to 2505 Wh m^{-2} for the vertical South and 4022 Wh m^{-2} for the vertical East and West. Table 5 depicts three possible cases:

- Case 1: Total exposure;
- Case 2: Building with two facades, Exposition of South and North walls with exposed roof;
- Case 3: Building with two facades, Exposition of South and North walls with unexposed roof.

From this purely geometric analysis, we propose to compare the change in the zone compactness relative to the geometric shape at constant volume according to the Figure 13. That is to say, by fixing the volume, one can determine the corresponding value of the compactness index. For the sitting room, we choose the following dimensions:

- $V = 3.2 \times 10 \times 3 \text{ (m}^3\text{)}$ for a parallelepipedic form, whose the height is 3 metres.
- $V = 4.5789 \times 4.5789 \times 4.5789 \text{ (m}^3\text{)}$ for a cubic form.

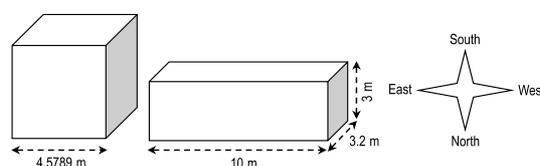


Fig. 13. Dimensions of the chosen geometric shape

Table 5. Total solar radiation received by the sitting room according to the orientation and geometric shapes

Type of the building exposure	Geometric shape of the sitting room	Compactness index of the sitting room	Total solar radiation received by the sitting room according to the orientation Wh			
			South	East	West	North
Case 1	Parallelepipedic form	0.7458	367110	398052	388270	336540
	Cubic form	0.6552	302830	302830	281470	281470
Case 2	Parallelepipedic form	0.6458	113760	144708	134930	83191
	Cubic form	0.4368	218510	250310	250310	197140
Case 3	Parallelepipedic form	0.3125	75150	120660	120660	44580
	Cubic form	0.2184	52521	84325	84325	31155

For this type of building, the results revealed that the cubic shape with S/V ratio = 0.2184 is the most optimum shape in minimising total solar insolation. The cubic shape of sitting room in a north orientation receives the lowest total solar insolation compared to other orientations.

For the other areas (rooms), this same method is used to determine the appropriate geometrical shape and the optimal orientation of these rooms to derive the optimum orientation of the house.

But for regulating the temperature by controlling solar radiation, we would like to choose the Southern orientation to implement passive bioclimatic design strategies.

Another reason again, the difference between the total solar radiation received by both the Southern and the Northern orientations is not really decisive.

5.3. Time lag and decrement factor

Two factors characterize the wall: the time lag ϕ and the decrement factor f , defined by Asan and Sancaktar (1998). They were found that thickness of material and the type of the material have a very profound effect on the time lag and decrement factor.

$$\phi_{\min} = t_{T_{i,\min}} - t_{T_{o,\min}}; \quad (14)$$

$$\phi_{\max} = t_{T_{i,\max}} - t_{T_{o,\max}}; \quad (15)$$

$$f = \frac{T_{i,\max} - T_{i,\min}}{T_{o,\max} - T_{o,\min}}, \quad (16)$$

where $t_{T_{o,\min}}$, $t_{T_{i,\min}}$, $t_{T_{o,\max}}$ and $t_{T_{i,\max}}$ are the times when exterior and interior surface temperatures reaches their minima and maxima. $T_{o,\min}$, $T_{i,\min}$, $T_{o,\max}$ and $T_{i,\max}$ are the minimum and maximum surface temperatures on the interior and exterior sides.

The time lag “ $\phi = (\phi_{\max} + \phi_{\min})/2$ ” is the time required by the maximum (or minimum) of a temperature wave of period P , to propagate through a wall from the outer to the inner surface (Asan, Sancaktar 1998). The decrement factor f is defined as the decreasing ratio of its temperature amplitude during the transient process of a wave penetrating through a solid element. The time lag and decrement factor were extensively studied in the heat transfer literature (Asan, Sancaktar 1998; Asan 2000, 2006; Kontoleon, Eumorfoulou 2008), as well as their dependence upon wall thickness, materials, thermo physical properties, solar absorptivity...

In our contribution, we are interested in determining the orientation influence on these two factors. The developed simulation model gives Figure 14 which is deduced from the variation of inner and outer surface temperatures of the South wall of sitting room if we refer to Figure 2. The calculated values are given in Table 7, Appendix.

The estimation of the time lag of type-1 wall shows that, because the outdoor and indoor temperatures are not sinusoidal, the values of ϕ_{\max} and ϕ_{\min} are different. An analysis of obtained values shows that the highest time lag ($\phi = 5$ h: 54 min) is that which corresponds to the South orientation while the minimum value is reached by the walls oriented to North. We find by calculation that the time lag for West, North and East directions are 5 h: 17 min, 3 h: 40 min and 4 h: 59 respectively.

Similarly, for the type-2 wall, the South orientation corresponds to the highest value of the time lag. The calculated time lag for South, West, North and East directions are 8 h: 24 min, 7 h: 25 min, 6 h:

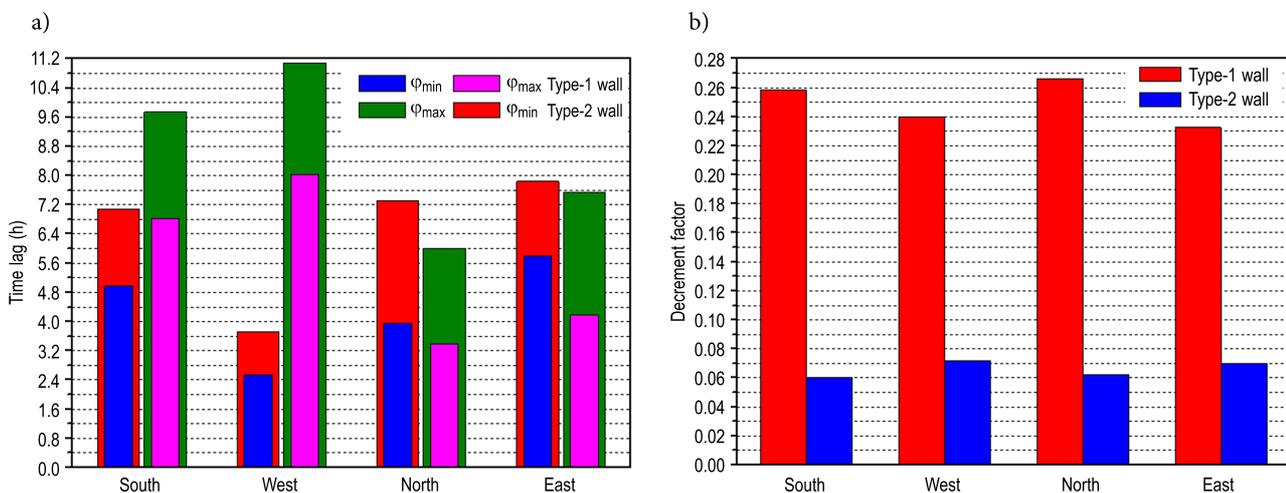


Fig. 14. Time lags ϕ_{\max} and ϕ_{\min} (a) and decrement factor f (b) for type-1 and type-2 walls for a typical summer day, 25 July 2008

40 min and 7 h: 41 respectively. These values are significantly higher compared to the previous case; it is logical, a thermal insulater is a material through which heat moves slowly.

Also walls with low decrement factor are preferred, so from this point of view the type-2 wall is better than type-1. Another consideration must be pointed out. A low decrement factor is not sufficient to ensure the indoor thermal comfort, i.e. a lightweight insulated can have f -values as low as 0.008, but when the initial conditions correspond to very hot temperatures, the indoor air temperature could rise beyond the acceptable comfort limits. The thermal mass of a type-2 wall considerably decreases the exterior temperature swing with an acceptable time delay. Under hot initial temperature, the higher interior air temperature can be caused also by the thermal storage because the brick wall is characterized by both its high thermal inertia, and that better thermal insulation compared to the stone wall.

In conclusion, a sufficient time lag and a low decrement factor will delay the hot outdoor temperature which will comes at the end of the day in the building, period in which it is more easy to cool off with a single opening windows. We can say also that the time lag and the decrement factor depend on the building's orientation.

5.4. Direct solar gain

A direct gain system includes facing windows and a large mass placed within the space to receive the most direct sunlight in cold weather and the least direct sunlight in hot weather. In this type of system, sunlight passes through the windows, and its heat is trapped by the thermal mass in the room. In this situation we will require to change the orientation of the building to determine the direction that reduces the need to use heating and cooling systems by minimizing direct solar gain in summer and maximizing direct solar gain in winter. They are calculated by the following equation:

$$Q_s = 24 \sum I_{sj} S_{sj}, \quad (17)$$

where Q_s – is the solar gain (Wh), the sum is over all directions j ; I_{sj} – is the solar irradiation for orientation j , it is expressed in W/m^2 ; S_{sj} – is the receiving surface of j orientation (m^2), is computed as follows:

$$S_{sj} = ASFs, \quad (18)$$

where A – is the surface openings (m^2); F_s – is the correction factor for shading: for Northern $F_s = 0.89$, for

the South $F_s = 0.72$ and finally for the East and West $F_s = 0.67$; S – is the solar factor; is the ratio of the total solar energy flux entering the premises through the glass to the incident solar energy flux., it's all just the contribution of a window to the heating of the room.

Surface openings, South side $A = 3.36 m^2$.

Surface openings, North side $A = 3.36 m^2$.

Surface openings, East side $A = 2.068 m^2$.

Surface openings, West side $A = 2.508 m^2$.

Then we deduce S_{sj} : $S_{s_South} = 1.0644 m^2$, $S_{s_North} = 1.3158 m^2$, $S_{s_East} = 0.6096 m^2$ and $S_{s_West} = 0.7394 m^2$.

So we can write:

$$Q_s = I_{s_South} S_{s_South} + I_{s_North} S_{s_North} + I_{s_East} S_{s_East} + I_{s_West} S_{s_West}, \quad (19)$$

where I_s – is the daily irradiation incident on the considered direction (Wh/m^2).

We are required to calculate the average values of daily irradiation calculated for each month and for the four possible orientations in Ghardaïa, El Bayadh and Biskra region (see Table 5).

Table 6 presents values of the average daily solar gain calculated by equation 19 according to the four classical orientations: South, North, East and West. We illustrate also the average daily solar gain of the habitat oriented in full South but with considering that there are not openings in the Northern façade.

Calculations showed that to protect itself from the summer overheating caused by the solar gain, it is recommended to choose the Southern orientation between March and September and the Western orientation for October. On the other hand, to benefit from this solar gain, it is preferably to choose the Eastern orientation for February and Southern orientation between November and January. However, we can say that the prevailing orientation is south. Even if we refer to February and October remarks, we can see that the difference in solar gain is not considerable compared to the Southern orientation. We can also draw from this study that closing openings of North facade reduces the solar gain in hot weather. Consequently, this initial study shows that to effect significant energy savings, special shading systems are needed, combining low solar transmittance in summer with useful solar gain in winter.

Table 6. Average daily irradiation (Wh m⁻²) for Ghardaïa, El Bayadh and Biskra region respectively

	Ghardaïa				El Bayadh				Biskra			
	South and North	East	West	South, No openings in North	South and North	East	West	South, No openings in North	South and North	East	West	South, No openings in North
January	11121	10840	9942	10778	11668	11336	10364	11387	10269	9914	9076	9921
February	11813	11949	11085	11409	12374	12527	11599	12038	11269	11305	10474	10851
March	11438	12147	11447	10935	11733	12523	11789	11313	11194	11771	11076	10664
April	10776	12031	11602	9869	10880	12312	11877	10076	10704	11810	11359	9802
May	10482	11725	11594	8610	10395	11877	11748	8692	10465	11615	11438	8701
June	10754	11798	11857	8011	10582	11940	11998	8094	10621	11630	11616	8151
July	10344	11419	11393	8040	10221	11581	11557	8125	10290	11296	11214	8157
August	10009	11142	10865	8722	9986	11331	11048	8860	9942	10937	10632	8684
September	10331	11142	10610	9636	10583	11545	10983	10010	10134	10797	10267	9394
October	10802	11070	10351	10273	11289	11605	10824	10863	10325	10483	9795	9764
November	10759	10597	9771	10348	11434	11257	10348	11102	9949	9707	8939	9524
December	10368	9958	9099	10029	10958	10480	9541	10681	9628	9186	8387	9281

Conclusions

The buildings thermal performance can be characterized by the balance between the heat losses and heat gains taking into account their heat storage capacity. In this balance the three fundamental parameters are the insulation level, thermal inertia use and solar radiation control. A new approach to modelling of multizone buildings in Saharan climate was introduced. Thermal nodal method was used to apprehend thermal behavior of air subjected to varied solicitations.

The main findings were summarized as follows:

This simplified method is good approach to the understanding of the thermal behavior of walls and air in a real building. The proposed numerical model is one of the tested methods that correctly predicted the experimental value of the time lag under stable meteorological conditions and a completely clear sky. But, climatic disturbances can cause some problems, especially for estimating the time lag and the decrement factor.

Solar radiation is the most major contributor to heat gain in buildings. In Saharan climate, the highest level of daily average solar insolation is received on the horizontal, followed by the south, east/west and north wall.

Simulated temperatures prove that the optimal building orientation depends largely on the building materials, thermal inertia and compactness index which characterizes the building size, the geometric shape and the contact mode with the outside.

It has been found that to keep the sun of glazed openings in the summer and to let the sun fall on the glass in the winter, south is the most favorable orientation. A building that faces South is generally easier to shade for summer coolness than one that faces East or West. In addition, using southern exposure for solar heat gain is recommended to reduce heating loads in the winter season. Southern exposure allows also using shading strategies to reduce cooling loads caused by direct solar gain on south façades. They have to be equipped with shading devices like overhangs for summer time. These results are coincided with those found by Raychaudhuri *et al.* (1965). From both the experimental observations and the theoretical computations, they found that dwellings facing south-east and south directions have better indoor climatic environment throughout the year. The observed effective temperatures are found to be within the comfort zones only during the winter afternoons while for the rest of the periods of observation in the year; it is beyond the comfort zones in all the houses. On the contrary, in our case, we can not reach the comfort zone for some causes. Wall thermal inertia is used for cold storage. It means that walls will accumulate the cold during the night and will reconstitute it in the air when temperature increases during the day. But in hot arid climates (e.g. desert), the problem is that in summer, outdoor ambient temperatures are almost always high even during the night. Consequently, in very hot period, we can not avoid outdoor heat to come indoor during 24 hours. We can retain that the walls thermal

inertia in these situations, play a contradictory role because the nights are not fresh.

This study guides designers on choosing optimum geometric shape and appropriate orientation for this type of building. The results of parametric analysis indicate that the effect of building shape on total building energy use depends on the building compactness and the level of thermal insulation. With a compact cube shape and with an orientation towards the South-North direction, we can approach to the thermal comfort.

The calculations show that under real meteorological conditions, the time lags and decrement factors of walls change their values depending on the variations of the outdoor temperature, wind velocity, solar radiation and the building's orientation. A sufficient time lag and a low decrement factor will delay the hot outdoor temperature which will come at the end of the day in the building, period in which it is more easy to cool off with a single opening windows.

The proposed computer program can be coupled with a professional interface that is manipulated by a user-friendly scientists, architects and teachers. The advantage of this program is to integrate the calculated data for optimizing thermal and photovoltaic solar systems.

References

- Aksoy, U. T.; Inalli, M. 2006. Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region, *Building and Environment* 41(12):1742–1754. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.011>
- Anderson, B.; Place, W.; Kammerud, R. 1985. The impact of building orientation on residential heating and cooling, *Energy and Buildings* 8(3): 205–224. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(85\)90005-2](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(85)90005-2)
- Asan, H.; Sancaktar, Y. S. 1998. Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor, *Energy and Buildings* 28(8): 59–166.
- Asan, H. 2000. Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view, *Energy and Buildings* 32(2): 197–203.
- Asan, H. 2006. Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials, *Building and Environment* 41(5): 615–620. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020>
- Auger, J. L.; Alexandre, A.; Martinet, J. 1981. Fonctionnement de Capteurs Solaires Plans en Régime Variable, *Revue Générale de Thermique* 239: 811–824.
- Balcomb, J. D.; Hedstrom, J. C.; McFarland, R. D. 1977. Simulation analysis of passive solar heated buildings – Preliminary results, *Solar Energy* 19(3): 277–282. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(77\)90071-8](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(77)90071-8)
- Bekkouche, S. M. A.; Benouaz, T.; Cheknane, A. 2009. Simulation and experimental studies of an internal thermal insulation of tow pieces of rooms located in Ghardaia (Algeria), *IJACE International Journal of Advanced Computer Engineering* 1(2): 1–6.
- Bekkouche, S. M. A.; Benouaz, T.; Cherier, M. K.; Hamdani, M.; Yaiche, M. R.; Benamrane, N. 2013a. Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, *Energy and Buildings* 66: 678–687. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.077>
- Bekkouche, S. M. A.; Benouaz, T.; Cherier, M. K.; Hamdani, M.; Yaiche, M. R.; Benamrane N. 2013b. Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance, *International Journal of Energy and Environment* 4(3): 459–466.
- Bekkouche, S. M. A.; Benouaz, T.; Yaiche, M. R.; Cherier, M. K.; Hamdani, M.; Chellali, F. 2011. Introduction to control of solar gain and internal temperatures by thermal insulation, proper orientation and eaves, *Energy and Buildings* 43: 2414–2421. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.018>
- Capderou, M. 1987. *Modeles théoriques et expérimentaux, Atlas solaire de l'Algérie*, Tome 1, Vols 1–2. Office des Publications Universitaires, Algérie.
- Cherier, M. K.; Benouaz, T.; Bekkouche, S. M. A.; Hamdani, M.; Benamrane, N. 2013. Improving of interior temperatures by reinforced thermal, insulation of the building envelope in Ghardaia Climate, *Revue Internationale d'Héliotechnique* 45: 1–7.
- Chapman, A. J. 1984. *Heat transfer*. New York: Macmillan.
- Chwieduk, D.; Bogdanska, B. 2004. Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions, *Renewable Energy* 29: 1569–1581. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2003.12.018>
- Cron, F.; Inard, C.; Belarbi, R. 2003. Numerical analysis of hybrid ventilation performance depending on climate characteristics, *International Journal of Ventilation* 1(Special Edition): 41–52.
- Dorota, A. C. 2008. Some aspects of modelling the energy balance of a room in regard to the impact of solar energy, *Solar Energy* 82: 870–884. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.04.004>
- George, S. S. 1999. Architectural utilities 3, *Lighting & Acoustics*. Revised edition, Philippine Copyright. JMC Press. INC. ISBN 971-11-1028-8.
- Givoni, B. 1994. Building design principles for hot humid regions, *Renewable Energy* 5(II): 906–916. Elsevier Science.
- Givoni, B. 1991. Characteristics, design implications, and applicability of passive solar heating systems for buildings, *Solar Energy* 47(6): 425–435. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90110-1](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(91)90110-1)
- Gordon, J. (Ed.) 2001. *Solar energy the state of the art*. ISES position papers, UK.
- Haase, M.; Amato, A. 2009. An investigation of the potential for natural ventilation and building orientation to achieve thermal comfort in warm and humid climates, *Solar Energy* 83: 389–399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.015>
- Hoffman, M. 1983. Solar heating using common building elements as passive systems, *Solar Energy* 30(3): 275–287. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90157-3](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(83)90157-3)

- Kasten, F. 1980. A simple parameterization of two pyrhelio-metric formulae for determining the Linke Turbidity factor, *Meteorology Rdsch* 33: 124–127.
- Kasten, F. 1996. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness, *Solar Energy* 56(3): 239–244. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00114-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(95)00114-7)
- Kasten, F.; Young, A. T. 1989. Revised optical air mass tables and approximation formula, *Applied Optics* 28 (22): 4735–4738. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.28.004735>
- Keplinger, D. 1978. Designing new buildings of optimum shape and orientation, *Habitat International* 3(5–6): 577–585. Pergamon press. [http://dx.doi.org/10.1016/0197-3975\(78\)90021-8](http://dx.doi.org/10.1016/0197-3975(78)90021-8)
- Kontoleon, K. J.; Eumorfopoulou, E. A. 2008. The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region, *Renewable Energy* 33(7): 1652–1664. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.008>
- Mazioud, A.; Ibos, L.; Dumoulin, J. 2010. Detection of a mosaic hidden behind a plaster layer by IR thermography, in 10th *International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 27–30 July 2010, Québec, Canada.
- Mefti, A.; Bouroubi, M. Y.; Khellaf, A. 1999. Analyse critique du modèle de l'atlas solaire de l'Algérie, *Revue des Energies Renouvelables* 2: 69–85.
- Howlader M. K.; Rashid, M. H.; Mallick, D.; Haque, T. 2012. Effects of aggregate types on thermal properties of concrete, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 7(7), July 2012.
- Mingfang, T. 2002. Solar control for buildings, *Building and Environment* 37: 659–664. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00063-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00063-4)
- Mora, L. 2003. *Prédiction des Performances Thermo-aérouliques 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, Septembre 2003.
- Morrissey, J.; Moore, T.; Horne, R. E. 2011. Affordable passive solar design in a temperate climate: an experiment in residential building orientation, *Renewable Energy* 36: 568–577. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.013>
- Numan, M. Y.; Almaziad, F. A.; Al-Khaja, W. A. 1999. Architectural and urban design potentials for residential building energy saving in the Gulf region, *Applied Energy* 64(1–4): 401–410. [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00109-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00109-9)
- Ozel, M.; Pihtili, K. 2007. Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations, *Building and Environment* 42: 3051–3059. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.025>
- Pacheco, R.; Ordóñez, J.; Martínez, G. 2012. Energy efficient design of building: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 3559–3573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>
- PN-B-03406:1994. *Heating, Calculation of heat load for buildings, volume less than 600 m3 (cancelled)*. Polish Standard (in Polish).
- PN-EN 12831:2006. *Heating systems in buildings, Method for calculations of the design heat load*. Standard (in Polish).
- Raychaudhuri, B. C.; Ali, S.; Garg, D. P. 1965. Indoor climate of residential buildings in hot arid regions, effect of orientation, *Building Science*, 1: 79–88. Pergamon Press. [http://dx.doi.org/10.1016/0007-3628\(65\)90008-3](http://dx.doi.org/10.1016/0007-3628(65)90008-3)
- Rumianowski, P.; Brau, J.; Roux, J. J. 1989. An adapted model for simulation of the interaction between a wall and the building heating system, in *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference*, 1989, Orlando, USA, 224–233.
- Sakulpipatsin, P.; Itard, L. C. M.; van der Kooi, H. J.; Boelman, E. C.; Luscuere, P. G. 2010. An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems, *Energy and Buildings* 42: 90–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.015>
- Saulnier, J. B.; Alexandre, A. 1985. La Modélisation Thermique par la Méthode Nodale, Ses Principes, Ses Succès et Ses Limites, *Revue Générale de Thermique* 280: 363–372.
- Schmidt, D. 2004. Design of low exergy buildings – method and a pre-design tool, *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* 3(1): 1–47.
- Silvana, F. L.; Celina, F.; Graciela, L. 2009. Thermal behavior of building walls in summer: comparison of available analytical methods and experimental results for a case study, *Building Simulation* 2: 3–18. <http://dx.doi.org/10.1007/S12273-009-9103-6>
- Spanos, I.; Simons, M.; Holmes, K. L. 2005. Cost savings by application of passive solar heating, *Structural Survey* 23(2): 111–130. <http://dx.doi.org/10.1108/02630800510593684>
- TRNSYS16. 2004. *TRNSYS User Annual*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison, USA.
- Yaïche, M. R.; Bekkouche, S. M. A. 2009. Conception et validation d'un logiciel sous Excel pour la modélisation d'une station radiométrique en Algérie, cas d'un ciel totalement clair, *Revue des Energies Renouvelables* 12(4): 677–688.
- Yaïche, M. R.; Bekkouche, S. M. A. 2008. Conception et validation d'un programme sous Excel pour l'estimation du rayonnement solaire incident en Algérie, Cas d'un ciel totalement clair, *Revue des Energies Renouvelables* 11(3): 423–436.
- Yaïche, M. R.; Bekkouche, S. M. A. 2010. Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel, *Revue des Energies Renouvelables* 13(4): 683–695.

Appendix

Table 7. Values of time lag, decrement factor and corresponding temperatures for type-1 and type-2 walls, case of a typical summer day, 25 July 2008

	South		West		North		East	
	Type-1 wall	Type-2 wall						
$t_{i,min}$	10.55	13.17	8.11	9.45	9.52	13.1	11.46	13.98
$T_{i,min}$	34.53	35.34	35.46	35.71	34.71	35.4	35.31	35.25
$t_{o,min}$	5.58	6.1	5.58	5.72	5.58	5.79	5.65	6.14
$T_{o,min}$	30.54	28.89	30.97	28.96	30.53	28.97	31.68	28.91
Φ_{min}	4.97	7.07	2.53	3.73	3.94	7.31	5.81	7.84
$t_{i,max}$	21.8	24.94	19.2	22.52	22.31	24.94	22.49	26.03
$T_{i,max}$	37.55	36.15	39.41	37.09	37.32	36.07	39.88	36.91
$t_{o,max}$	14.97	15.2	11.16	11.43	18.92	18.93	18.32	18.5
$T_{o,max}$	42.22	42.29	47.45	48.2	40.34	39.74	51.34	52.69
Φ_{max}	6.83	9.74	8.04	11.09	3.39	6.01	4.17	7.53
f	0.2586	0.0604	0.2397	0.0717	0.2661	0.0622	0.2325	0.0698

Maamar HAMDANI. Born in Tiaret (Algeria), MSc in physics option: renewable energy from Tlemcen University (2011), researcher in Applied Research Unit on Renewable Energies “URAER Ghardaia”, research team: solar and bioclimatic architecture. He has many research papers in international and national journals/conferences. Currently he prepares PhD degree, and he concentrates his studies on developing an adaptive model of thermal comfort in reacting on the orientation, thermal insulation and building materials. He has published many articles in national and International Journals.

Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE. Born in Nedroma (Tlemcen, Algeria), MSc in Tlemcen University (2006), holds a PhD degree in Physics at Tlemcen University (2009). He was a student of Professor Tayeb BENOUAZ, he works as researcher in Applied Research Unit on Renewable Energies “URAER Ghardaia”, research team: solar and bioclimatic architecture. His research field is computational physics, modeling in Physics and simulation of the nonlinear systems, concentrating now on thermal building.

Tayeb BENOUAZ. Born in Ain Sefra (Algeria), MSc in Tlemcen University (Algeria) (1984), PhD in Tlemcen University (1996). His current research interest includes the computational physics, modeling in Physics and simulation of the nonlinear systems, Stability of systems. Director several research projects and has several publications in this field.

Rafik BELARBI. Director of the civil engineering department, LaSIE, University of La Rochelle. His Main responsibilities: Coordinator of the ANR-Habisol project AGROBAT “Agronomy and Building Impact of green roofs on energy performance building a multidisciplinary approach”. Coordinator of the project ANR-Habisol characterization task: Hygrobat: Towards a method HYGRO-thermal design of efficient buildings. Scientific Head of the European project Marie Curie 7 FP: Exchange of Experience on the Preservation of Historic and Old Water Masonry Structures.

Mohamed Kamel CHERIER. Born in Tiaret (Algeria), MSc in physics option: renewable energy from Tlemcen University (2010), researcher in Applied Research Unit on Renewable Energies “URAER Ghardaia”, research team: solar and bioclimatic architecture. He is interested in several areas, such as: thermal standards in buildings, passive and active solar architecture, and adaptive thermal comfort. He has published a number of papers in International Journals and conference proceedings dealing with thermal building.

A NEW MODELLING APPROACH OF A MULTIZONE BUILDING TO ASSESS THE INFLUENCE OF BUILDING ORIENTATION IN SAHARAN CLIMATE

by

**Maamar HAMDANI^{a,b}, Sidi Mohammed El Amine BEKKOUCHE^{a*},
Tayeb BENOUAZ^b, and Mohamed Kamel CHERIER^a**

^aApplied Research Unit on Renewable Energies, URAER, Renewable Energy Development Center,
CDER, Ghardaia, Algeria

^bUniversity of Tlemcen, Tlemcen, Algeria

Original scientific paper

DOI: 10.2298/TSCI131217026H

Orientation of building is a very important factor which is directly connected to the standards of thermal comfort within building. It is guided by natural elements like sunlight and its intensity, direction of the wind, seasons of the year, and temperature variations.

The orientation effect of a non-air-conditioned building on its thermal performance has been analyzed in terms of direct solar gain and temperature index for hot-dry climates. This paper aims at introducing an improved methodology for the dynamic modeling of buildings by the thermal nodal method. The evaluation is derived from a series of computer simulations. As a result, the influence of orientation changing depends on the floors and exterior walls constructing materials, the insulation levels and application of the inseparable rules of the bioclimatic design.

Key words: *orientation, multizone model, nodal method, temperature, building materials, time lag, decrement factor*

Introduction

Design for orientation is a fundamental step to ensure that buildings work with the passage of the Sun across the sky. Knowledge of sunpaths for any site is fundamental in design building façades to let in light and passive solar gain, as well as reducing glare and overheating to the building interior [1]. Along with massing, orientation can be the most important step in providing a building with passive thermal and visual comfort. Orientation should be decided together with massing early in the design process, as neither can be truly optimized without the other [2].

Raychaudhuri *et al.* [3] presents the results of a year-round experimental investigation carried out to study the effect of orientation on the indoor thermal conditions of thirty-two occupied dwellings of similar plans and design specifications but having eight different orientations. From both the experimental observations and the theoretical computations, it is found that the dwellings facing south-east and south directions have better indoor climatic environment

* Corresponding author; e-mail: smabekkouche@yahoo.fr

throughout the year. However, in [4], the study was carried out for twenty five climates in the United States. It was found that in all climates, when the more extensively glazed exposure is oriented to south, total loads are significantly lower than those in the same building oriented east or west. North orientation also produces lower total loads than east or west orientations in the southern, two-thirds of the USA, and roughly equivalent loads in the northern, one third.

This paper provides a simplified analysis method to predict the impact of the orientation for a building on its instantaneous temperature. A proposed model is developed based on detailed simulation analyses utilizing several combinations of building geometry, orientation, thermal insulation level, glazing type, glazing area, and climate. The present paper wants to emphasize the importance of building orientation in the estimation of a building energy performance on the base of an analysis of a building in Saharan climate.

Nodal analysis applied to heat conduction and coupling with superficial exchanges

A review of the literature reveals many applied methods of such modeling approaches for residential buildings. Energy flow can be modeled using a thermal resistance method corresponding to calculation of equivalent electrical circuit flow [5]. However, to describe the energy flow using the thermal resistance method, it can be assumed that heat transfer between temperature nodes is proportional to respective temperature difference. It should be stated that the main aim of this paper is to present some aspects of modeling the energy balance of a room in regard to the impact of solar energy. Raychaudhuri *et al.* [3] provide matrix method of computation used for predicting the indoor temperatures. This method, although it has its limitations, is certainly capable of presenting comparative performance on variously oriented dwellings. But it would be rather impossible to take into account precisely the lived-in conditions and other uncertain variables in the computation for occupied dwellings.

In this contribution, thermal nodal method was used to apprehend thermal behavior of air subjected to varied solicitations. The nodal analysis is a powerful method of investigation in the thermal analysis of systems. It has been used in several branches such as solar energy systems [6], micro-electronics [7] or the spatial field [8]. We will gradually use this approach in the domain of building's physics and we'll interest ourselves in the automatic generation of nodal models. A simplified approach allows representing the multilayer system by a model based on an electrical analogy proposed by Rumianowski *et al.* [9], and then it was taken by Con *et al.* It is often used when we are interested to determine the temperature of any node inside a wall.

In the multizone-zone model a given building is made up with a certain number of rooms, walls, doors, and glass windows. The physical model of the building is obtained by assembling thermal models of each element. The different zones' temperatures (principal variables) are linked together through heat conduction and air movement. We developed in [10-14] mathematical models based on thermodynamic first principle were elaborated to obtain different air temperatures of the inside parts. But in this paper, we make a coupling between the equations proposed by Rumianowski *et al* [9]. and equations of a building thermal energy model found in the TRNSYS user manual [15]. The building energy balance for a zone is a balance model with one air node per zone, representing the thermal capacity of the zone air volume. The used mathematical model is given in detail in [16, 17].

The Sahara is characterized by a very dry climate. Therefore, these cases took into account only thermal exchanges thus air stratification, whereas wind influence on air infiltration

and water diffusion into walls body was not considered. Also, specific humidity and states changes are not considered therefore storage of latent heat and moisture effects were neglected.

The nodal structure and description of the building

The study was carried out on a building in Ghardaia, Algeria. The exterior envelope, apart from contributing to the energy savings during the entire life span of the building by controlling the energy exchange between indoor space and environment, also promotes the development of a comfortable indoor environment. This research was conducted on a real building, fig. 1(a) is a schematic outline of apartment building, the house has a habitable area of 71.3 m², and wall heights are equal to 2.8 m while the other dimensions are shown in detail in fig. 1(b). The flooring is placed on plan ground to lodge the ground floor. The concrete of the flooring is directly poured on the ground thus minimizing losses. Floor tiles are inter-imposed, it is an end coating resisting to corrosion and chemical agents. The roof is composed of cement slabs and concrete slab made so that it handles the load and be economical. A roof sloping of five degrees allowed water evacuation through several openings. Until now the flat roofs are considered as nest infiltration and as architectural solution. Windows and doors contribute significantly to the energetic balance. Their contribution however depends on several parameters: local climate, orientation, frame, relative surface (window-flooring), and concealment performance during night and sunny days. In this case focus is made particularly on windows and doors dimensions and all are made of woods. The apartment has a surface of 95.74 m² with a living space of 71.3 m².

If the nodal method is used, it is assumed that one node corresponds to the average temperature of the air in a zone or in any surface. Considering the objective to be reached, we have been induced to assign a type to each node. Indeed, relative to the equations, the nodes are concerned with different phenomena. For instance, a wall node is going to concern terms of heat conduction. This same node, depending on its location, can also concern convective process. On the external face of the envelope's wall, the surface node is concerned with outdoor radiative and convective exchanges. We have to note that the size of this structure can quickly become significant, a building having most of the time several zones and for each zone several walls and glass-windows. This structure's size being linked to the dimensions of the systems to be solved, the notion of calculation time must not be overlooked.

A certain number of information fields are connected to a node, traducing for instance the allocation of a node to a zone or also the topology of the global electrical network associated with the building. We have been induced to assign a type to each node. Indeed, relative to the equations, the nodes are concerned with different phenomena. Then, it appears necessary to attribute a type to each node. Table 1 gives the types of nodes encountered. For a given building, when the node structure is established, it is easy to fill-up each element of the mathematical

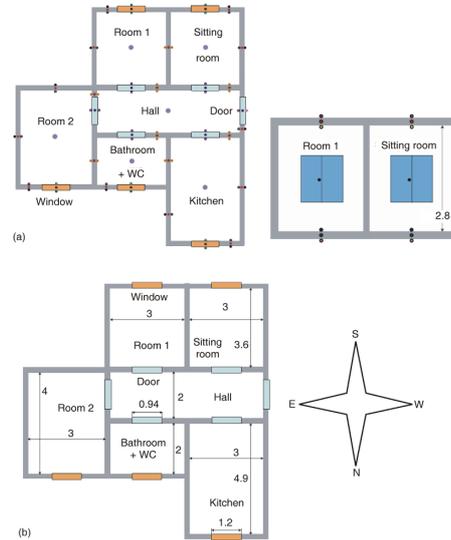


Figure 1. Dimensions, types of nodes, and zonal structure (for color image see journal web-site)

Table 1. Types of nodes encountered

Node	Type
●	Outdoor surface node of outside wall
●	Internal node of outside wall
○	Indoor surface node of outside wall
●	Outdoor surface node of window
●	Internal node of window
○	Indoor surface node of window
○	Indoor surface node of inside and outside door Outdoor surface node of inside door Outdoor surface node of outside door
●	Internal node of inside and outside door
●	Outdoor surface node of outside door
●	Dry indoor air temperature
●	Outdoor and indoor surface node of inside wall
○	Internal node of inside wall
●	Surface node of gorund
●	Internal node of ground
○	Terminal node of ground
●	Outdoor surface node of outside roof
○	Internal node of outside roof
●	Indoor surface node of outside roof

* (for color table see journal web-site)

If we consider that the habitat is poorly insulated, we use the U-value in the first case for glazing, and if the thermal insulation is reinforced, we use the values of the second case.

For our study, we consider that the window composition comprises in addition to the configuration given in tab. 3, wood blinds usually separated from the previous configuration by an air gap of 2 cm. We assume that the heat transfers through windows are only by conduction. However, the doors are made of wood with a thickness of 2 cm: $\lambda = 0.14$ W/mK, $\rho = 500$ kg/m³, and $C_p = 2500$ J/kgK. The λ , ρ , and C_p are thermal conductivity, density, and specific heat respectively). Each wall type is described in tab. 2.

Computational result and ideal orientation

Indoor temperature

Figure 2 gives an overview of the sitting room temperatures during the days of July 24-25. These two days are characterized by a totally clear sky, an intensive solar radiation, an outdoor ambient temperature between 32 °C and 47 °C in the shade and a very low wind speed. In summary, the climatic conditions correspond to extremely hot days. From these results, we note that the obtained temperatures are very high. The higher interior air temperature during the eve-

model. Indeed, we have just to sweep the node structure and attribute the relevant terms. Then, the structure will include six zones numbers. The nodes that represent the dry indoor air temperature correspond to the different zones of this building.

In Ghardaia region building envelopes or outer wall consisting of a heavy structure generally constituted of stones (40 cm thick), jointed and surrounded by two layers having thickness of 1.5 cm of mortar cement. The most inner face is coated with 1 cm thick plaster layer. The inner walls (or splitting walls) whose sides are in contact only with the internal ambient are considered to be of heavy structure constructed of stones of 15 cm width jointed and surrounded by two mortar cement layer of 1.5 cm thick and two layers of 1 cm thick of plaster. Floor tiles are inter-imposed, it is an end coating resisting to corrosion and chemical agents (tab. 2).

The air infiltration rate shall not exceed 2.8 m³/hr per linear meter of sash crack when tested under a pressure differential of 75 Pa. The used characteristics are given in tab. 3.

Table 2. Thermal properties, thicknesses of walls, and building envelope characteristics

		Material and wall composition	L [m]	λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	ρ [kgm^{-3}]	C_p [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Exterior walls	Type-1 wall	Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
		Stone	0.4	2.3	2000	1000
		Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
		Plaster	0.01	0.56	1400	1000
	Type-2 wall	Plaster	0.015	0.56	1400	1000
		Brick	0.3	0.81	1800	835
		Plaster clay	0.005	0.45	1200	840
Interior walls	Type-1 wall	Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
		Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
		Stone	0.15	2.3	2000	1000
		Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
		Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000
	Type-2 wall	Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
		Brick	0.2	0.81	1800	835
		Plaster clay	0.01	0.45	1200	840
Ground	Tiling	0.025	6.14	2300	875	
	Cement	0.02	1.4	1800	1000	
	Concrete dense	0.2	2.4	2400	800	
Roof	Plaster	0.015	0.56	1400	1000	
	Lightweight concrete	0.12	0.33	800	719	
	Mortar cement	0.015	1.4	1800	1000	

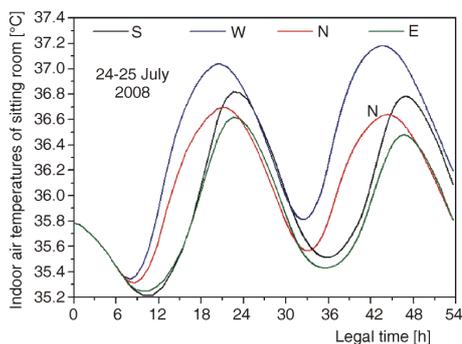


Figure 2. Sitting room temperatures, July 24 and 25, 2008
 (for color image see journal web-site)

Table 3. Glass thermal transmittance values (glass only)

Glass type		U-value
Flat glass Case 1: without thermal insulation	Single pane, clear for all windows	5.91
Insulating glass Case 2: with thermal insulation	Double pane, clear, 12.5 mm air space for WC and bathroom	3.18
	Double pane, with low emittance coating $e = 0.20$ for rooms 1 and 2, kitchen, and sitting room	2.21

ning hours is caused by the thermal storage. Thermal storage or thermal inertia of any wall can be defined as the maximum minus minimum surface temperature (temperature variation interval).

The difference between the peaks of air temperature does not exceed the threshold of 1.7 °C. This can be justified by the high thermal inertia that promotes stable indoor temperatures because the difference between the peaks of external air temperature can reach around 15 °C.

It is essential to implement numerical methods that compute these temperatures. Designed to solve such problems, Runge-Kutta fourth order numerical method was used to apprehend thermal behavior of walls and air subjected to varied solicitations. In this study, to vary the orientation of the building, all specifications (size, structure, openings of the walls) will be maintained. By varying the orientation of the building facing south towards the eastern side for example, changes made to calculation programs will be at the radiation incident on the façades and exposed openings. The southern side shown in fig. 2 becomes the eastern side, the eastern side becomes the northern side, the north becomes the west and the western façade becomes the southern façade.

It is known that, in the east and west façades, the low position of the Sun can not glare treatment. The results predict that the west orientation is the least favorable. In the afternoon, the room is very glare and overheated, the Sun leads to the overheating due to the long exposure time (seven hours: see fig. 4). In addition to that, the largest amount of daily radiation incident on the west side will be received during this period. It has approximately 92.56% of the total daily radiation which is estimated at 4025 Wh/m². In addition to this, the thermal phase shift caused by the high thermal inertia is another indicator that reflects the number of hours required (it is estimated at 06:03, show fig. 8) for the heat propagation through the wall. Moreover, the south and east orientations are more favorable before 21:00 with a slight advantage for south orientation in the morning and a net advantage to the east direction in the evening. Regarding the north direction, it may become more favorable between 24:00 and 07:30. Knowing that the maximum value of the room temperature is reached at 14:42, we found that the thermal phase shifts of the south, north, east and west directions are estimated at 07:49, 06:07, 07:51, et 06:03, respectively. It can be drawn from these indications that the thermal phase shift depends on the building's orientation.

The proper use of compactness index parameters will noticeably improve the internal temperature of the building. The compactness of a building, indicated by the S/V ratio (S – area of building envelope surface, V – volume of the building) has a considerable influence on the heating energy demand of buildings. The compactness is better when the compactness index is

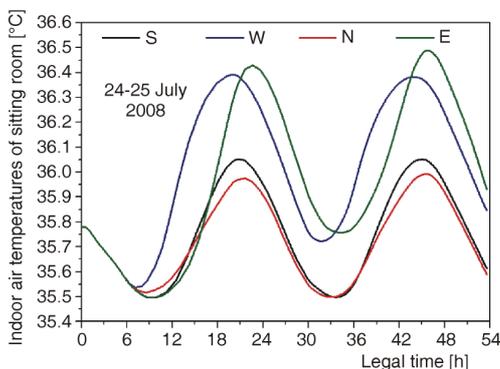


Figure 3. Sitting room temperatures, S/V = 0.27, July 24 and 25, 2008

(for color image see journal web-site)

lower. In this example, it is assumed that the building is a house with two fronts; the south and the north side if we refer to fig. 1. This means that the compactness index will decrease from 0.5882 (the case of the first example) to 0.27. The decrease of this index is due to the reduction of the exchange surfaces that are in contact with the outside. According to fig. 3, the most favorable orientations are those of the south and north with a small advantage for the north orientation. These results can be explained by the amount of solar radiation received by each façade. The total daily solar radiation is estimated at 2486 Wh/m² and 1514 Wh/m² for the south and the north orientation, respectively. The obtained temperatures for the

east and west directions are higher due to the long exposure time, and to the important amount of the incident daily radiation, which is of the order of about 4025 Wh/m². We can also draw that internal temperatures of the room are great for west orientation during most of the day (before 20:00), then they become the lower in the morning. These observations coincide with the long duration and timing (morning or evening) of exposure which is always justified by the thermal phase shift caused by the high thermal inertia. We conclude that the building orientation depends largely on the compactness index and the contact mode with the outside.

For the region of Ghardaia, the influence of orientation changing depends on the floors and exterior walls constructing materials, the insulation levels and application of the inseparable rules of the bioclimatic design. For enhanced thermal insulation (the use of massive brick for example: type-2 wall). Figure 4 confirms almost the same observed scenario for the case of stone. The difference appears only at the order of values.

However, we spent another study to appear the influence of the orientation of this habitat during the winter, January 06 and 07, 2013. We selected two days characterized by a totally clear sky and an outdoor ambient temperature between 8 °C and 19 °C, the maximum value is reached around 16:30. The wind speed varies between 0 and 2.5 m/s. Numerical simulation certifies that the positive orientation is the southern whose compactness index of the construction equal to 0.27 (fig. 5). One can interpret this result by the fact that the amount of the incident solar radiation on the southern wall is the highest. By numerical calculation, the daily global radiation incident on the south wall is estimated at 6602 Wh/m². The northern orientation is less favorable due to the very low amount of the incident solar radiation (251 wh/m²) which is much less than the amount of the incident solar radiation on the east and west walls (Wh/m² 2373).

The calculated values of daily global radiation are based on work previously published [18-20].

Time lag and decrement factor

Two factors characterize the wall: the time lag φ and the decrement factor f , defined by Asan and Sancaktar [21]. They were found that thickness of material and the type of the material have a very profound effect on the time lag and decrement factor.

$$\varphi_{\min} \quad t_{T_i, \min} \quad t_{T_o, \min} \quad (1)$$

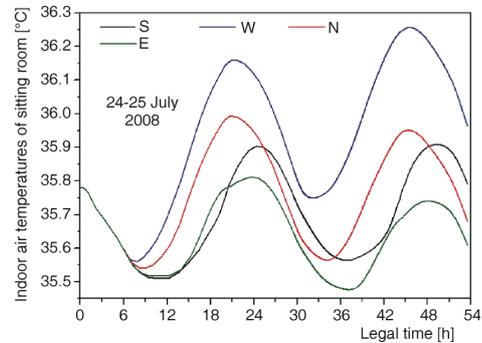


Figure 4. Sitting room temperatures, S/V = 0.27, July 24 and 25, 2008
 (for color image see journal web-site)

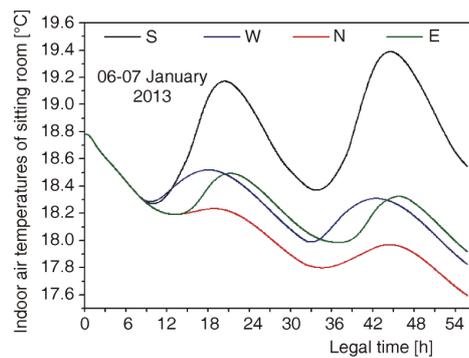


Figure 5. Sitting room temperatures, S/V = 0.27, January 06 and 07, 2013
 (for color image see journal web-site)

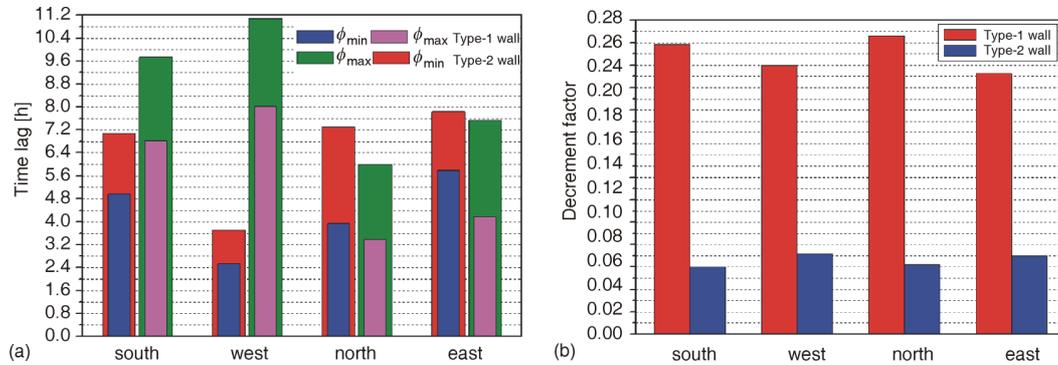


Figure 6. Time lags φ_{\max} and φ_{\min} (a) and decrement factor f (b) for type-1 and type-2 walls for a typical summer day, 25 July 2008 (for color image see journal web-site)

$$\varphi_{\max} \quad t_{T_i, \max} \quad t_{T_o, \max} \quad (2)$$

$$f = \frac{T_{i, \max} - T_{i, \min}}{T_{o, \max} - T_{o, \min}} \quad (3)$$

where $t_{T_o, \min}$, $t_{T_i, \min}$, $t_{T_o, \max}$, and $t_{T_i, \max}$ are the times when exterior and interior surface temperatures reaches their minima and maxima. The $T_{o, \min}$, $T_{i, \min}$, $T_{o, \max}$, and $T_{i, \max}$ are the minimum and maximum surface temperatures on the interior and exterior sides.

The time lag $\varphi = (\varphi_{\max} + \varphi_{\min})/2$ is the time required by the maximum (or minimum) of a temperature wave of period P , to propagate through a wall from the outer to the inner surface [9]. The decrement factor f is defined as the decreasing ratio of its temperature amplitude during the transient process of a wave penetrating through a solid element. The time lag and decrement factor were extensively studied in the heat transfer literature [21], as well as their dependence upon wall thickness, materials, thermo physical properties, solar absorptivity *etc.*

In our contribution, we are interested in determining the orientation influence on these two factors. The developed simulation model gives fig. 6 which is deduced from the variation of inner and outer surface temperatures of the south wall of sitting room.

The estimation of the time lag of type-1 wall shows that, because the outdoor and indoor temperatures are not sinusoidal, the values of φ_{\max} and φ_{\min} are different. An analysis of obtained values shows that the highest time lag ($\varphi = 5$ h: 54 min) is that which corresponds to the South orientation while the minimum value is reached by the walls oriented to north. We find by calculation that the time lag for west, north and east directions are 5 h:17 min, 3 h:40 min, and 4 h:59 min, respectively.

Similarly, for the type-2 wall, the south orientation corresponds to the highest value of the time lag. The calculated time lag for south, west, north and east directions are 8 h:24 min, 7 h:25 min, 6 h:40 min and 7 h:41 min, respectively. These values are significantly higher compared to the previous case. It is logical, a thermal insulator is a material through which heat moves slowly. Also walls with low decrement factor are preferred, so from this point of view the type-2 wall is better than type-1. Another consideration must be pointed out. A low decrement factor is not sufficient to ensure the indoor thermal comfort, *i. e.*, a lightweight insulated can have f -values as low as 0.008, but when the initial conditions correspond to very hot temperatures, the indoor air temperature could rise beyond the acceptable comfort limits.

The thermal mass of a type-2 wall considerably decreases the exterior temperature swing with an acceptable time delay. Under hot initial temperature, the higher interior air temperature can be caused also by the thermal storage because the brick wall is characterized by both its high thermal inertia, and that better thermal insulation compared to the stone wall.

In conclusion, a sufficient time lag and a low decrement factor will delay the hot outdoor temperature which will come at the end of the day in the building, period in which it is more easy to cool off with a single opening windows. We can say also that the time lag and the decrement factor depend on the building's orientation.

Direct solar gain

A direct gain system includes facing windows and a large mass placed within the space to receive the most direct sunlight in cold weather and the least direct sunlight in hot weather. In this type of system, sunlight passes through the windows, and its heat is trapped by the thermal mass in the room. In this situation we will require to change the orientation of the building to determine the direction that reduces the need to use heating and cooling systems by minimizing direct solar gain in summer and maximizing direct solar gain in winter. They are calculated by the following equation [11]:

$$Q_s = 24 \sum_j I_{sj} S_{sj} \quad (4)$$

where Q_s [Wh] is the solar gain, the sum is over all directions j , I_{sj} [Wm^{-2}] – the solar irradiation for orientation j , S_{sj} [m^2] – the receiving surface of j orientation, is computed:

$$S_{sj} = A F_s S \quad (5)$$

where A [m^2] is the surface openings, F_s – the correction factor for shading: for northern $F_s = 0.89$, for the south $F_s = 0.72$, and finally for the east and west $F_s = 0.67$, S – the solar factor, the ratio of the total solar energy flux entering the premises through the glass to the incident solar energy flux, it's all just the contribution of a window to the heating of the room.

Surface openings, south side $A = 3.36 \text{ m}^2$, surface openings, north side $A = 3.36 \text{ m}^2$, surface openings, east side $A = 2.068 \text{ m}^2$, surface openings, west side $A = 2.508 \text{ m}^2$, then we deduce S_{sj} , $S_{s_South} = 1.0644 \text{ m}^2$, $S_{s_North} = 1.3158 \text{ m}^2$, $S_{s_East} = 0.6096 \text{ m}^2$, and $S_{s_West} = 0.7394 \text{ m}^2$.

So we can write:

$$Q_s = I_{s_south} S_{s_south} + I_{s_north} S_{s_north} + I_{s_east} S_{s_east} + I_{s_west} S_{s_west} \quad (6)$$

where I_s [Whm^{-2}] is the daily irradiation incident on the considered direction.

We are required to calculate the average values of daily irradiation calculated for each month and for the four possible orientations in Ghardaia, El Bayadh, and Biskra region.

The obtained fig. 7 presents the variation of the average daily solar gain calculated by eq. 6 according to the four classical orientations: south, north, east and west. In the fifth curve (black color), we illustrate the average daily solar gain of the habitat oriented in full south but with considering that there are not openings in the northern façade.

Calculations showed that to protect itself from the summer overheating caused by the solar gain, it is recommended to choose the southern orientation between March and September and the western orientation for October. On the other hand, to benefit from this solar gain, it is preferably to choose the eastern orientation for February and southern orientation between November and January. However, we can say that the prevailing orientation is south. Even if we refer to February and October remarks, we can see that the difference in solar gain is not considerable compared to the southern orientation. We can also draw from this study that closing

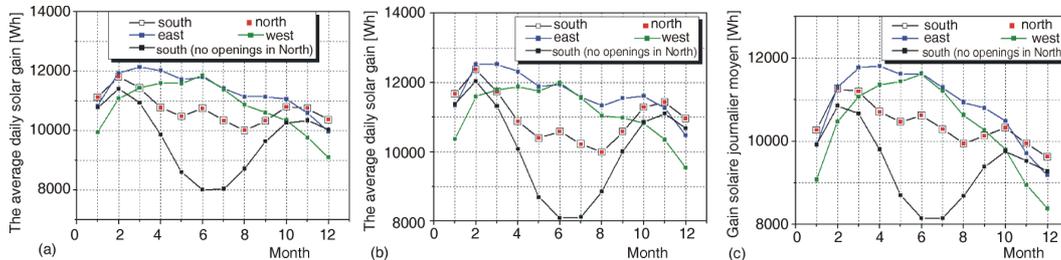


Figure 7. Average daily solar gain for each month, (a) Ghardaia, (b) El Bayadh, and (c) Biskra

openings of north façade reduces the solar gain in hot weather. Consequently, this initial study shows that to effect significant energy savings, specialist forms of shading are needed, combining low solar transmittance in summer with useful solar gain in winter.

Conclusions

A new approach to modelling of multizone buildings in Saharan climate was introduced. Thermal nodal method was used to apprehend thermal behavior of air subjected to varied solicitations. This simplified method is good approach to the understanding of the thermal behavior of walls and air in a real building. As a conclusion, the calculations show that under real meteorological conditions, the time lags and decrement factors of walls change their values depending on the variations of the outdoor temperature, wind velocity, solar radiation, and the building's orientation. A sufficient time lag and a low decrement factor will delay the hot outdoor temperature which will come at the end of the day in the building, period in which it is more easy to cool off with a single opening windows.

Simulated temperatures prove that the optimal building orientation depends largely on the building materials, thermal inertia, compactness index, and the contact mode with the outside. It has been found that to keep the Sun of glazed openings in the summer and to let the Sun fall on the glass in the winter, south is the most favorable orientation. A building that faces South is generally easier to shade for summer coolness than one that faces east or west. In addition, using southern exposure for solar heat gain is recommended to reduce heating loads in the winter season. Southern exposure allows also using shading strategies to reduce cooling loads caused by direct solar gain on south façades. These results are coincided with those found by Raychaudhuri *et al.* [3]. From both the experimental observations and the theoretical computations, they found that dwellings facing south-east and south directions have better indoor climatic environment throughout the year. The observed effective temperatures are found to be within the comfort zones only during the winter afternoons while for the rest of the periods of observation in the year, it is beyond the comfort zones in all the houses. On the contrary, in our case, we can not reach the comfort zone for some causes. Wall stone thermal inertia is used for cold storage. It means that walls will accumulate the cold during the night and will reconstitute it in the air when temperature increases during the day. But in hot arid climates (*e. g.*, desert), the problem is that in summer, outdoor ambient temperatures are almost always high even during the night. Consequently, in very hot period, we can not avoid outdoor heat to come indoor during 24 hours. We can retain that the walls thermal inertia in these situations, play a contradictory role because the nights are not fresh.

References

- [1] ***, <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/building-orientation>
- [2] ***, <http://www.architecture.com/SustainabilityHub/Designstrategies/Earth/1-1-3-2-Buildindorientation.aspx>
- [3] Raychaudhuri, B. C., et al., Indoor Climate of Residential Buildings in Hot Arid Regions, Effect of Orientation, *Building Science*, 1 (1965), 1, pp. 79-88
- [4] Andersson, B., et al., The Impact of Building Orientation on Residential Heating and Cooling, *Energy and Buildings*, 8 (1985), 3, pp. 205-224
- [5] Gordon, J., Solar Energy the State of the Art, ISES position papers, Freiburg, Germany, 2001
- [6] Saulnier, J. B., Alexandre, A., Heat Transfer Modeling by the Nodal Method: Its Principles, Successes and Limitations, *Revue Générale de Thermique*, 280 (1985), pp. 363-372
- [7] Auger, J. L., et al., Operation of Plane Solar Collectors in Dynamic Regime, *Revue Générale de Thermique*, 239 (1981), pp. 811-824
- [8] Chapman, A. J., Heat Transfer, Macmillan, New York, N. Y., USA, 1984
- [9] Rumianowski, P., et al., An Adapted Model for Simulation of the Interaction Between a Wall and the Building Heating System, *Proceedings, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings*, IV Conference, Orlando, Fla., USA, 1989, pp. 224-233
- [10] Bekkouche, S. M. A., et al., Simulation and Experimental Studies of an Internal Thermal Insulation of Two Pieces of Rooms Located in Ghardaïa (Algeria), *Thermal Science*, 13 (2009), 4, pp. 233-244
- [11] Bekkouche, S. M. A., Introduction to Control of Solar Gain and Internal Temperatures by Thermal Insulation, Proper Orientation and Eaves, Elsevier, *Energy and Buildings*, 43 (2011), May, pp. 2414-2421
- [12] Bekkouche, S. M. A., Thermal Resistances of air in Cavity Walls and their Effect Upon the Thermal Insulation Performance, *International Journal of Energy and Environment*, 4 (2013), 3, pp. 459-466
- [13] Cherier, M. K., et al., Improving of Interior Temperatures by Reinforced Thermal, Insulation of the Building Envelope in Ghardaïa Climate, *Revue Internationale d'Héliotechnique*, (2013), 45, pp. 1-7
- [14] Bekkouche, S. M. A., Influence of Building Orientation on Internal Temperature in Saharan Climates, Building Located in Ghardaïa Region (Algeria), *International Scientific Journal, Thermal Science*, 17 (2013), 2, pp. 349-364
- [15] ***, TRNSYS16, TRNSYS User Annual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, Wis., USA, 2004
- [16] Bekkouche, S. M. A., et al., Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate, Elsevier, *Energy and Buildings*, 66 (2013), pp. 678-687
- [17] Bekkouche, S. M. A., et al., Thermal Resistances of Local Building Materials and their Effect Upon the Interior Temperatures Case of a Building Located in Ghardaïa Region, *Construction and Building Materials*, 52 (2014), Feb., pp. 59-70
- [18] Yaïche, M.R., Bekkouche, S. M. A., Estimation of Direct Solar Radiation in Algeria for Different Types of Sky, *Revue Des Energies Renouvelables*, 13 (2010), 4, pp. 683-695
- [19] Yaïche, M.R., Bekkouche, S. M. A., Design and Validation of a Software in Excel for Modeling of a Radiometric Station in Algeria for a Totally Clear Sky, *Revue des Energies Renouvelables*, 12 (2009), 4, pp. 677-688
- [20] Yaïche, M. R., Bekkouche, S. M. A., Design and Validation of an Excel Program for the Estimation of Solar Radiation in Algeria. Case of a Totally Clear Sky, *Revue des Energies Renouvelables*, 11 (2008), 3, pp. 423-436
- [21] Asan, H., Sancaktar, Y. S., Effects of Wall's Thermophysical Properties on Time Lag and decrement Factor, *Energy and Buildings*, 28 (1998), 8, pp. 59-166

