



RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCCEN

THÈSE

Présentée à la :

FACULTÉ DES SCIENCES – DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Physique énergétique

Par :

Mr. BENDARA Smail

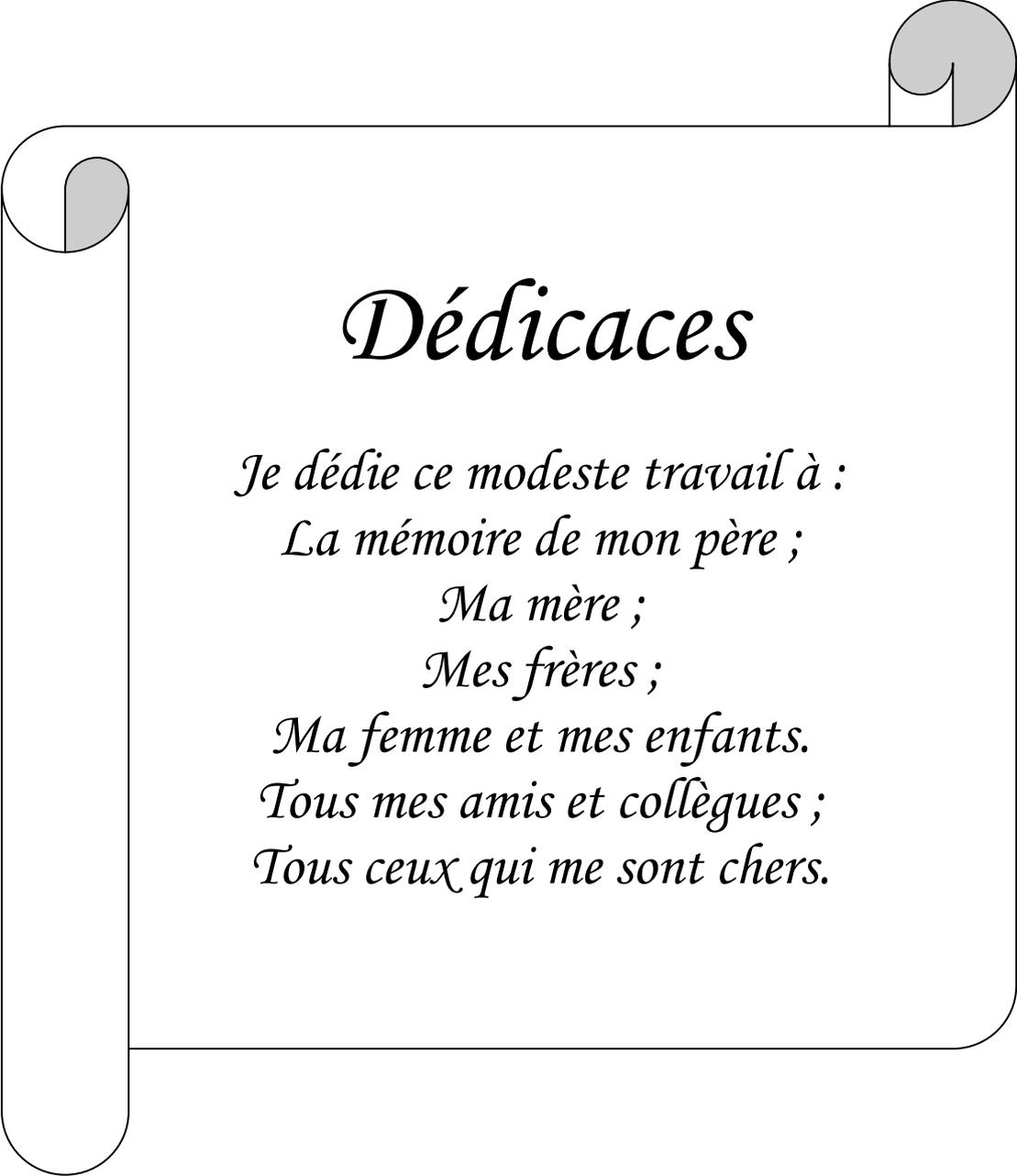
Sur le thème

STRATÉGIES DE CONTRÔLE PASSIF POUR L'AMÉLIORATION DU CONFORT THERMO-AÉRAULIQUE DES BÂTIMENTS MULTI-ZONES

Soutenue publiquement le: 16 / 06 / 2019, devant le jury composé de :

Mr CHABANE SARI Nasreddine	Professeur à l'Université de Tlemcen	Président
Mr BEKKOUCHE Sidi M ^{ed} El Amine	Dir de Recherche à l'URAER Ghardaïa	Directeur de Thèse
Mr CHIKHAOUI Abdelhak	Maître de Conférences Classe A à l'Université de Tlemcen	Co- Directeur de Thèse
Mr TOUAFEK Khaled	Dir de Recherche à l'URAER Ghardaïa	Examineur
Mr AMARA Sofiane	Professeur à l'Université de Tlemcen	Examineur
Mr BOUKLI HACENE M ^{ed} El Amine	Maître de Conférences Classe A à l'Université de Sidi Bel Abbès	Examineur

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



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :
La mémoire de mon père ;
Ma mère ;
Mes frères ;
Ma femme et mes enfants.
Tous mes amis et collègues ;
Tous ceux qui me sont chers.

إهداء خاص

الى روح البروفيسور بن واز الطيب أستاذ الفيزياء بجامعة ابوبكر بلقايد بتلمسان الذي وافته المنية في يوم التاسع عشر أكتوبر عام الفين وثمانية عشر ميلادي، والذي كان يشرف على تأطير هذا العمل قبل وفاته، التي تزامنت مع وفاة البروفيسور مصطفى جعفر مدير جامعة تلمسان في الرابع والعشرون عشر أكتوبر من نفس السنة، فموت العالم مصيبة لا تجبر وثلمة لا تسد فنسأل الله لهم جميعا ان يسكنهم فسيح جنانه ويتغمدهم برحمته الواسعة اللهم آمين.

Remerciements

Avant tout je remercie mon grand dieu qui m'a donné la volonté et le puissant pour parachèvement ce travail.

*Ces travaux ont été réalisés au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa sous la direction de Monsieur **BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine** Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa. Qu'il veuille trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour avoir guidé mes travaux avec patience et assiduité tout le long de la préparation de cette thèse.*

*J'exprime aussi ma vive reconnaissance à Monsieur **CHIKHAOUI Abdalhak** Maître de Conférences Classe A à l'Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen pour avoir co-encadré ce travail.*

*Je remercie également Monsieur **CHABANE SARI Nasreddine**, Professeur à ABOU-BEKR BELKAID-Tlemcen pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.*

*Je tiens également à exprimer mes remerciements à Monsieur **TOUAFEK Khaled** Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa., **Monsieur AMARA Sofiane**, Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen, et **Monsieur BOUKLI HACENE Mohamed El Amine**, Maître de Conférences Classe A à l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, de m'avoir font l'honneur de participer à mon jury de mémoire.*

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis de réaliser ce travail, en particuliers :

À toute l'équipe de l'Architecture Solaire et Bioclimatique à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa.

À toute les personelles de l'inspection des impôts garantie assiette de la wilaya de Ghardaïa pour leurs collaborations.

Enfin, je ne saurais oublier ma mère et mon frère pour leurs encouragement combien efficaces et précieux.

Sommaire

Sommaire.....	1
Nomenclature.....	5
Table des figures.....	11
Liste des tableaux.....	15
0. Introduction générale	17
Référence.....	21
1. Chapitre 1 : Étude Bibliographique	22
1.1. Introduction.....	23
1.2. Physique du bâtiment.....	23
1.2.1. Concepts de bâtiments performants.....	25
1.2.2.1. Typologie des bâtiments performants.....	25
Le bâtiment à basse consommation ou "basse énergie"	26
Le bâtiment "passif".....	26
Le bâtiment "producteur d'énergie".....	27
Le bâtiment "zéro énergie" ou "zéro net".....	27
Le bâtiment "à énergie positive".....	27
Le bâtiment autonome.....	27
1.2.2.2. Critères d'évaluation propres aux bâtiments performants	28
1.2.2. Capacité thermique.....	28
1.2.3. Physique des différents transferts d'énergie.....	29
1.2.3.1. Conduction.....	29
1.2.3.2. Convection.....	30
1.2.3.3. Rayonnement.....	30
1.2.3.4. Humidité.....	31
1.3. Consommation énergétique.....	33
1.3.1. Le contexte énergétique.....	34
1.3.2. Notion d'économie d'énergie.....	35
1.3.3. Indice de dépense d'énergie IDE.....	36
1.3.4. Applications de l'énergétique du bâtiment.....	36
1.3.5. Les besoins de l'occupant.....	37

1.3.6.	Refroidissement passif.....	38
1.3.6.1.	Période de refroidissement.....	38
1.3.6.2.	Période de protection.....	39
1.4.	Confort.....	39
1.4.1.	Métabolisme.....	40
1.4.2.	Isolation des vêtements.....	40
1.4.3.	Température de l'air.....	41
1.4.4.	Humidité relative.....	41
1.4.5.	L'approche analytique.....	41
1.4.6.	L'approche adaptative.....	42
1.5.	Méthodes de modélisation énergétique.....	43
1.5.1.	Introduction.....	43
1.5.2.	Modèle de Givoni.....	43
1.5.3.	Modèle de plan d'expériences.....	44
1.5.4.	Modèles de connaissance.....	45
1.5.4.1.	Modèles monozones.....	45
1.5.4.2.	Modèles multizones.....	46
1.5.4.3.	Modèles zonaux.....	47
1.5.4.4.	Modèles de code de champ "CFD".....	48
1.5.5.	Le modèle aéraulique.....	49
1.5.5.1.	L'aération.....	49
1.5.5.2.	Modélisation de l'aération.....	50
1.5.5.3.	L'équation de débit.....	52
1.5.5.4.	Effet de cheminée.....	53
1.6.	Conclusions.....	57
	Référence.....	58
Chapitre 2 : Modélisation thermo-aéraulique des bâtiments & Etude de cas		61
2.1.	Introduction.....	62
2.2.	Les hypothèses.....	63
2.3.	Bilan enthalpique.....	64
2.4.	Bilan massique.....	66
2.5.	Bilan sensible.....	66
2.6.	Bilan latent.....	67

2.7.	Modèle de conduction.....	68
2.8.	L'humidité relative et l'humidex.....	70
2.9.	Simulation et concordance avec les données expérimentales.....	73
2.9.1.	Plan descriptif et propriétés de l'enveloppe.....	73
2.9.2.	Sollicitations climatiques extérieures.....	74
2.9.3.	Etude comparative et évaluation des paramètres du confort	79
2.10.	Conclusion.....	84
	Référence.....	85
Chapitre 3 : Etude de quelques concepts architecturaux passifs.....		88
3.1.	Introduction.....	89
3.2.	L'isolation thermique.....	89
3.3.	La compacité.....	91
3.4.	Simulation numérique : Compacité / Isolation performante.....	94
3.4.1.	Variation de la forme géométrique du bâti à volume constant	95
3.4.2.	Agrandissement du bâti à forme constante.....	99
3.4.3.	Variation du mode de contact à forme constante.....	102
3.5.	Les protections solaires.....	106
3.6.	Effet de l'orientation.....	108
3.7.	Simulation numérique : L'orientation en cas d'une bonne compacité	109
3.8.	Conclusion.....	114
	Référence.....	115
Chapitre 4: Efficacité énergétique d'un studio & Intégration des principaux concepts passifs.....		117
4.1.	Introduction.....	118
4.2.	Etude de cas: Studio occupé par deux personnes situé à Ghardaïa.....	120
4.3.	Bilan énergétique global d'un bâtiment & Méthode d'évaluation...	122
4.3.1.	Besoins énergétiques dus à l'enveloppe.....	123
4.3.2.	Besoins en eau chaude sanitaire.....	132
4.3.3.	Apports internes dus aux occupants.....	133
4.3.4.	Apports internes dus à l'éclairage et aux équipements	

électriques	134
4.3.5. Charges énergétiques dues aux appareils électriques et à l'éclairage.....	134
4.3.6. Les apports solaires.....	135
4.4. Contribution des gains solaires passifs.....	136
4.5. Epaisseur économique d'isolation.....	140
4.6. Épaisseur d'isolation optimale.....	146
4.7. Étude comparative et analyse prédictive des charges de chauffage et de refroidissement	149
4.8. Conclusion.....	152
Référence.....	153
6. Conclusion générale	156
Production scientifique	160

Nomenclature

Chapitre 1

m	: masse [kg]
c	: chaleur spécifique [J/kg K]
$\Delta\theta$: différence de température [K]
Q	: quantité de chaleur [J]
φ	: densité de flux de chaleur [W/m^2]
t	: temps [s]
T	: température [K]
λ	: conductivité thermique du matériau [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]
ρ	: la masse volumique [kg/m^3]
p	: densité de puissance volumique de chaleur [W/m^3]
T_{paroi}	: température entre la surface de la paroi [K]
T_{fluide}	: la température moyenne (au loin) du fluide dite température de référence
h_c	: coefficient d'échange convectif [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$]
L	: longueur caractéristique [m]
T_n	: température neutre [$^{\circ}C$]
T_0	: température mensuelle extérieure moyenne [$^{\circ}C$]
$P(z)$: pression aérodynamique moyenne [Pa]
C_p	: Coefficient de pression moyen
$V(z)$: vitesse moyenne du vent [m/s]
α	: angle d'incidence du vent [degrés]
g	: accélération de la pesanteur [$9.81\ m/s^2$]
z	: est la hauteur [m] au-dessus de celle du niveau neutre défini par le niveau auquel la différence de pression est nulle
C_d	: coefficient de débit
n	: exposant de l'écoulement
K	: le débit massique traversant l'ouverture pour un écart de pression de 1 Pa

P : pression [Pa]
V : volume occupé par n moles de gaz [m³]
R : constante des gaz parfaits 8.31396 J/ (mole K)
M : masse molaire du gaz [kg/mole]
u_d : vitesse débitante de l'air dans l'ouverture considérée [m/s]
C_d : coefficient de décharge
H : distance entre les ouvertures [m]
h : distance entre le niveau neutre et le centre de l'ouverture haute [m]
T_i : température de l'air sortant du volume [K]
T_e : température moyenne dans le volume [K]
W : largeur [m]

Chapitre 2

T : température [K]
T_{amb} : température de l'air ambiant extérieur [K]
t : temps [s]
H^{entr} (i) : enthalpie de la masse d'air humide entrant dans la zone i [J]
H^{sort} (i) : enthalpie de la masse d'air humide quittant le zone i [J]
P_S : puissance sensible fournie par la climatisation [W]
P_L : puissance latente fournie par la climatisation [W]
Cl_S : puissance sensible interne [W]
Cl_L : puissance latente interne [W]
Q_{mas}^{trans}(n,i) : débit massique de transition de l'air de la zone n à la zone i [kg/s]
T_{air} (n) : température de l'air de la zone n [K]
C_{mas} : capacité calorifique de la masse d'air [J Kg⁻¹ K⁻¹]
r_s(n) : humidité spécifique ou teneur en eau de l'air de la zone n
C_v : capacité thermique à volume constant [J Kg⁻¹ K⁻¹]
Q_{mas}^{trans} (i,n) : débit massique de transition de l'air de la zone i à la zone n [kg/s]
Q_{ij} : expression des flux convectifs échangés entre les surfaces [W/m²]
T_{Sij}(i) : température de surface j dans la zone i [K]

S_i	: surface incluses dans la zone i [m^2]
m	: nombre total des surfaces intérieures
$V(i)$: volume de la zone i [m^3]
$V_s(i)$: volume spécifique de l'air humide dans la zone i [m^3]
H_r	: humidité relative [%]
P_{sat}	: pression de vapeur saturante [Pa]
e	: épaisseur [m]
n	: nombre de nœud
λ	: conductivité thermique [$W K^{-1} m^{-1}$]
C_p	: chaleur spécifique [$J kg^{-1} K^{-1}$]
G	: éclairement global incident [$W m^{-2}$]
σ	: constante de Stefan Boltzmann [$W m^{-2} K^{-4}$]
α	: coefficient d'absorption
ε	: émissivité thermique
S	: surface [m^2]
V_{vent}	: vitesse du vent [$m s^{-1}$]
L	: longueur [m]
R	: éclairement solaire [W/m^2]
g	: accélération due à la gravité terrestre [$m s^{-2}$]
F_{Surf-i}	: facteur de forme entre les surfaces d'échange à l'intérieur de la zone thermique
\dot{m}	: débit massique de l'air [kg/s]
U_T	: coefficient de perte de chaleur [$W/m^2 K$]
ρ	: densité volumique [$kg m^{-3}$]
h_c	: coefficient de transfert convectif [$W m^{-2} K^{-1}$]
μ_{air}	: viscosité dynamique de l'air [Pa s]
β	: coefficient volumétrique d'expansion thermique
θ	: température prise en [$^{\circ}C$]
ΔT	: différence en température [$^{\circ}C$]

η : rendement

Chapitre 4

D_j : nombre de degrés-jours de chauffage et de refroidissement

S_i : surface [m^2]

b_i : coefficient de réduction des déperditions thermiques

U_i : coefficient de transmission thermique par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur [$W/m^2 K$]

R_{si} : résistance d'échange thermique superficielle intérieure [$m^2 K/W$]

R_i : résistances thermiques de chaque couche de construction [$m^2 K/W$]

R_{se} : résistance d'échange thermique superficielle extérieure [$m^2 K/W$]

h_{Moy_Plaf} : hauteur moyenne du plafond [m]

N_{appart} : nombre d'appartements

N_{niv} : nombre de niveaux

l_{men_i/m_j} : longueur du pont thermique, charpenterie i - mur j [m]

k : conductivité thermique [$W/m K$]

DP_{Ventil} : déperditions thermiques dues au système de ventilation par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur [W/K]

q_{vFen_H} : débit d'air d'aération quand les fenêtres sont utilisées comme système de ventilation d'hygiène [m^3/h]

q_{vEn} : débit d'air équivalent transitant dans le logement [m^3/h]

D_{Hyg} : débit d'hygiène [m^3/h]

q_{vFen_S} : débit supplémentaire dans le cas où l'ouverture des fenêtres vient en complément du système spécifique (aspect comportemental de l'occupant) [m^3/h]

S_p : surface de la pièce [m^2]

q_{vComb} : débit supplémentaire extrait lié au fonctionnement des appareils à combustion quand ils se trouvent dans les pièces chauffées [m^3/h]

P_{Chauf} : puissance fournie par le système de chauffage [W]

U_T : coefficient de déperdition par transmission [$W/m^2 K$]

U_V : coefficient de déperdition par renouvellement d'air [$W/m^2 K$]

ΔT : différence entre la température de la pièce et celle de base [$^{\circ}C$]

$q_{v_{vmc}}$: débit d'air extrait par la ventilation mécanique [m^3/h]
C_d	: coefficient de dépassement
$q_{v_{perm}}$: débit de fuite de l'enveloppe [m^3/h]
$q_{v_{condext}}$: débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel [m^3/h]
M	: masse d'air [kg]
T_{ext}	: température extérieure [K]
T_{int}	: température intérieure [K]
Q_{ECS}	: énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire pour la journée [Wh]
ρ	: masse volumique de l'eau en fonction de sa température [Kg/litre]
V_{ECS}	: volume d'eau [m^3]
N_{Pers}	: nombre de personnes occupant le logement
T_{ECS}	: température de l'eau chaude au point de soutirage [K]
T_{ef}	: température moyenne de l'eau froide du mois considéré entrant dans le ballon ou le serpentin de production d'eau chaude sanitaire (production instantanée) [K]
C_p	: chaleur dégagée par occupant [W/occupant]
$D_{pres/jour}$: durée de présence par jour [h/jour]
N_{Jch}	: nombre de jours chauffés [jours/an]
I_{sj}	: irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j [Wh/m^2]
A_{Snj}	: aire réceptrice équivalente de la surface ayant l'orientation j [m^2]
A	: aire de la baie [m^2]
F_{Red}	: facteur de réduction pour les encadrements des vitrages
F_{Omb}	: facteur d'ombre
F_{Omb_R}	: facteur d'ombre des rideaux
F_{Omb_S}	: facteur d'ombre de la surface
F_{Cor_h}	: facteur de correction pour l'horizon
F_{Cor_Sur}	: facteur de correction pour les surplombs
F_{Cor_Ecr}	: facteur de correction pour les écrans latéraux
g	: facteur solaire de la baie

C_{ener}	: coût énergétique [DZD]
E_{ener_opt}	: épaisseur énergétique optimale [m]
C_{fin}	: coût financier [DZD]
E_{fin_opt}	: épaisseur financier optimale [m]
e	: épaisseur de l'isolant [m]
P_i	: prix unitaire du matériau isolant [DZD/m ³]
P	: prix de l'énergie [DZD/J = DZD/KWh/3.6 10 ⁶]
λ	: conductivité thermique du matériau isolant [W/mK]
R_i	: résistance initiale de l'élément de construction (sans isolation) [m ² K/W]
D_v	: durée de vie de l'immeuble [années]
η_{ch}	: efficacité de la production de chaleur

Table des figures

Chapitre 1

- Figure 1.1 : Paramètres clés dans la physique du bâtiment
- Figure 1.2 : Domaine de variation de l'humidité relative optimal pour maintenir une qualité de l'air intérieur satisfaisante
- Figure 1.3 : Gammes d'indices de dépense d'énergie des bâtiments (normes suisses)
- Figure 1.4 : Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'une approche monozone
- Figure 1.5 : Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'une approche multizone
- Figure 1.6 : Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'un modèle zonal
- Figure 1.7 : Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'un modèle de code de champ "CFD"
- Figure 1.8 : Débit d'air requis pour évacuer les divers polluants produits par une personne assise ayant une activité de bureau
- Figure 1.9 : Modélisation nodale d'un bâtiment a deux zones
- Figure 1.10 : Détermination du niveau neutre dans le cas de deux ouvertures
- Figure 1.11 : Courant passant au travers d'une ouverture
- Figure 1.12 : Entrée d'air unique

Chapitre 2

- Figure 2.1 : Modèle de conduction pour une paroi opaque
- Figure 2.2 : Plan descriptif de l'espace à étudier
- Figure 2.3 : Photos prises pour les stations météorologiques : anémomètre et Consoles
- Figure 2.4 : Eclairage solaire incident sur les parois planes, Ghardaïa le 01 Janvier
- Figure 2.5 : Eclairage solaire incident sur les parois planes, Ghardaïa le 13 Juin
- Figure 2.6 : Température ambiante extérieure, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

- Figure 2.7 : Température ambiante extérieure, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 2.8 : Vitesse du vent, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 2.9 : Vitesse du vent, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 2.10 : Humidité relative, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 2.11 : Humidité relative, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 2.12 : Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 2.13 : Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 2.14 : Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 2.15 : Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 2.16 : Plage du confort hygrothermique selon la norme DIN 1946-4:2008-12
- Figure 2.17 : Erreur absolue $|\Delta T|$ commise sur la température de l'air
- Figure 2.18 : Erreur absolue $|\Delta H_r|$ commise sur l'humidité relative de l'air
- Figure 2.19 : L'indice humidex à l'intérieur du bureau

Chapitre 3

- Figure 3.1 : Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.2 : Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.3 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.4 : Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.5 : Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.6 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.7 : Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.8 : Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.9 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.10 : Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.11 : Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015

- Figure 3.12 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.13 : Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.14 : Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.15 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.16 : Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.17 : Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.18 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.19 : Irradiation solaire estivale et hivernale
- Figure 3.20 : Profil d'ombre d'un écran horizontal
- Figure 3.21 : Profil d'ombre d'un écran vertical
- Figure 3.22 : Schéma de principe pour l'étude
- Figure 3.23 : Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.24 : Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.25 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015
- Figure 3.26 : Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.27 : Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015
- Figure 3.28 : L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Juin 2015

Chapitre 4

- Figure 4.1 : Carte de situation géographique de la wilaya de Ghardaïa
- Figure 4.2 : Plans descriptifs 2D et 3D du studio pour différentes types d'exposition (totale mitoyenne et partielle)
- Figure 4.3 : Sources principale de déperditions
- Figure 4.4 : Diminution des besoins énergétiques due aux apports solaires passifs
- Figure 4.5 : L'influence du mode de contact sur les besoins énergétiques (en incluant les apports solaires passifs)
- Figure 4.6 : Le niveau d'économie d'énergie atteint en cas d'une bonne isolation

- Figure 4.7 : Variation du coût total en fonction de l'épaisseur d'isolation
- Figure 4.8 : Epaisseur économique d'isolation en fonction du coût du panneau isolant
- Figure 4.9 : Epaisseur économique d'isolation en fonction de l'augmentation du prix unitaire de la facture énergétique
- Figure 4.10 : Temps de retour d'investissement en fonction de l'épaisseur de la couche isolante ajoutée à l'épaisseur économique
- Figure 4.11 : Variation du coût total en fonction de l'épaisseur de l'isolant pour différents indices de compacité
- Figure 4.12 : Temps de retour d'investissement en fonction de l'épaisseur de la couche isolante
- Figure 4.13 : Epaisseur optimale de l'isolant en fonction de la durée de vie du studio, efficacité de la production de chaleur = 0.8
- Figure 4.14 : Epaisseur optimale de l'isolant en fonction de l'efficacité de la production de chaleur, durée de vie du studio = 50 ans
- Figure 4.15 : Consommation énergétique mensuelle, annuelle et saisonnière en se référant à l'équation de base d'Auliciens
- Figure 4.16 : Temps de retour d'investissement en fonction du coût des travaux d'isolation thermique
- Figure 4.17 : Schéma de labellisation des bâtiments

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Valeurs de débit massique pour les fissures

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Propriétés et caractéristiques générales de l'enveloppe

Tableau 2.2 : Calcul d'erreurs sur les températures et l'humidité relative

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Comparaison entre les différents types d'isolants par rapport 90 cm de béton

Tableau 3.2 : Volume et surface de quelques formes géométriques

Tableau 3.3 : Indice de compacité S_p/V

Tableau 3.4 : Dimensions et caractéristiques des différentes formes

Tableau 3.5 : Etat récapitulatif sur les valeurs moyennes et les écarts entre ces valeurs moyennes par rapport à l'orientation sud

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Valeurs des résistances thermiques superficielles

Tableau 4.2 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue}

Tableau 4.3 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue}

Tableau 4.4 : Valeur de la perméabilité

Tableau 4.5 : Diffusion de chaleur par personne

Tableau 4.6 : Diffusion de chaleur par l'éclairage et équipements électriques (cas de notre étude)

Tableau 4.7 : Consommation moyenne des appareils électriques par jour (cas de notre étude)

- Tableau 4.8 : Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants
- Tableau 4.9 : Valeurs annuelles et mensuelles des gains solaires journaliers moyens Q_{Solar} par unité de surface (KWh / m²)
- Tableau 4.10 : Consommation énergétique mensuelle et annuelle requise pour maintenir une température du confort T_{Conf}

Introduction générale

Introduction générale

Les bâtiments sont conçus pour jouer un rôle de filtre thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. La forme, l'orientation, l'agencement et la composition des éléments constitutifs déterminent les caractéristiques de ce filtre. Les ambiances intérieures ne répondant pas toujours aux exigences de confort des occupants, la réponse du bâtiment est corrigée par des appareils de climatisation agissant comme des sources contrôlées de chaleur ou de froid, et ayant parfois un effet sur les taux d'humidité. Les normes de confort sont encore relativement frustrées, les appareils de climatisation consomment de l'énergie et entraînent de ce fait des coûts de fonctionnement qui peuvent être très élevés [1].

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus concernés par les enjeux du développement durable, il représente ainsi un important gisement d'économies d'énergies. Les chiffres indiquent que le bâtiment représente environ 40 % des émissions de CO₂ des pays développés, 37 % de la consommation d'énergie et 40 % des déchets produits [2].

En Algérie, avec l'absence des réglementations énergétiques spécifiques aux différentes régions, notamment dans le domaine des bâtiments résidentiels, on se trouve toujours à la recherche d'une solution intermédiaire entre le confort, la consommation énergétique et l'écologie du bâtiment. Le confort thermique est un effet combiné résultant de certains paramètres environnementaux et individuels. Le contrôle et la prédiction des paramètres de confort dans les bâtiments sont essentiels pour le bien-être humain. Les indices de confort thermique ont été développés par différents chercheurs intéressés par le sujet [1]. La maîtrise des ambiances habitables doit assurer la qualité des espaces intérieurs en réduisant la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. Cela passe par le perfectionnement de la qualité de l'enveloppe, puis par l'amélioration des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation et enfin par l'utilisation des énergies renouvelables. Ces exigences sont plus importantes dans les zones urbaines denses [3]. Par conséquent, la

recherche et l'utilisation de techniques de construction innovantes permettant de répondre à la double problématique de la réduction de la consommation énergétique des bâtiments et de l'atténuation des îlots de chaleur urbains sont impératives.

Dans notre pays, le secteur du bâtiment est le secteur le plus gourmand en énergie. La consommation représente plus de 42% de la consommation finale. La consommation est toujours en croissance graduelle à cause de l'augmentation substantielle de la population, le nombre de logements, les prix bas de l'énergie conventionnelle, l'augmentation du nombre d'équipements électriques dans chaque foyer, l'utilisation des équipements électriques non-économiques tels que les lampes à incandescence et l'absence de la sensibilisation sur la maîtrise et l'efficacité énergétique [4]. Dans les climats chauds, il est possible de remédier à ce problème par l'intégration des concepts architecturaux passifs adéquats. Une consommation énergétique optimale et judicieuse repose sur un choix pertinent des matériaux et une conception globale conforme en lien avec les caractéristiques locales climatiques [4].

Selon l'APRUE (Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie), la mise en application de la réglementation thermique des bâtiments permettra de réduire les besoins énergétiques de nouveaux logements de l'ordre de 30% à 40%. Malheureusement, aujourd'hui cette réglementation n'est toujours pas entrée en vigueur. Parmi les raisons, l'absence d'outils opérationnels permettant aux bureaux d'études et architectes d'évaluer l'efficacité énergétique de n'importe quelle construction. Sa mise en application, nécessite, donc, sa vulgarisation auprès des bureaux d'études, des architectes et des promoteurs [5].

Dans cette thèse, le confort thermique a pris un grand intérêt vu son impact sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant. Toutefois, il est donc considéré comme un élément essentiel de la qualité globale du bâtiment. Ce confort ne peut être assuré que par la prise en considération

des paramètres architecturaux lors de la conception et la maîtrise des éléments passifs.

Notre contribution s'est articulée autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit, d'abord, des notions principales sur la physique du bâtiment en mettant l'accent sur certaines lois physiques qui vont être déployées dans différentes applications. Ensuite, il apporte des éléments concernant le contexte énergétique et la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment. Le confort et le bien-être des occupants sont présentés comme solution permettant de réduire la facture énergétique. Une description de certains modèles qui contribuent étroitement à la quantification des phénomènes a été présentée. Cela permet de situer une partie de ce travail par rapport aux travaux antérieurs et de mettre l'accent sur l'apport de notre contribution.

Le modèle proposé sera confronté aux mesures effectuées dans le chapitre 2, il nous permet de prédire les résultats en utilisant deux bilans sensible et latent. Une approche de modélisation de bâtiments multizones en climat saharien a été introduite dans ce travail. La méthode nodale a été utilisée pour déterminer le comportement thermo-aéraulique de l'air soumis aux sollicitations climatiques extérieures.

Le chapitre 3 présente essentiellement l'application des principaux concepts qui permettent d'améliorer le confort et répondre à une architecture assez simple et énergétique.

Le dernier chapitre est consacré à l'utilisation d'un outil d'évaluation d'efficacité énergétique des constructions. Le chauffage et le refroidissement tiennent un intérêt prépondérant. On s'est intéressé à l'étude de l'impact de certaines solutions passives et leurs influences sur les économies potentielles sous un climat saharien.

La conclusion générale propose une synthèse des résultats ainsi obtenus, les démarches à adopter pour une meilleure efficacité énergétique et les concepts architecturaux qui doivent être mis en évidence.

Références

1. Lefebvre, G., Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, B 2 041, 1994.
2. Deshayes, P., Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement, Laboratoire de modélisation et de management des organisations (LM2O), École centrale de Lille, en ligne sur Cairn.info 21/02/2012, <https://doi.org/10.3917/inno.037.0219>.
3. Djedjig, R., Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain, Doctorat en Génie Civil, Université de La Rochelle, décembre 2013.
4. Saifi, N., contribution a la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie dans les zones arides, Doctorat Spécialité: Génie des procédés, Option: Génie des procédés, Université Kasdi Merbah Ouargla, Janvier 2016.
5. Ouadadi, A., Lasfar, K., Élaboration d'une interface graphique calculant les apports calorifiques des bâtiments "ClimBâtim", Mécanique Energétique, Master Académique, 2018.

Étude Bibliographique

Chapitre 1 : Étude Bibliographique

1.1. Introduction

Ce chapitre constitue une revue de la littérature qui consiste à approfondir les connaissances et permettre une meilleure compréhension des problématiques. Cette revue s'organise autour de quatre parties.

La première est consacrée à la physique du bâtiment, la prise en compte des phénomènes de physique du bâtiment dans les constructions est une discipline pratiquée intuitivement. Le développement rapide des nouvelles techniques de construction, les exigences en matière d'économie d'énergie et de protection de l'environnement demandent des connaissances approfondies des lois physiques et de leurs applications pratiques dans la construction.

Durant ces dernières années, la consommation de l'électricité en Algérie a été en forte progression, notamment dans le secteur résidentiel, à cause de la croissance démographique élevée, l'amélioration du niveau de vie, et le phénomène de l'urbanisation qui est de plus en plus important. C'est pourquoi, la deuxième partie sera focalisée sur le contexte énergétique, plus particulièrement sur la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment.

La troisième partie concerne le bien-être des occupants. La notion du confort est une problématique constante dans le domaine de l'architecture. Nos bâtiments sont façonnés afin de créer un espace de vie en adéquation avec nos problématiques.

Le bâtiment est un système complexe où de nombreux phénomènes physiques interviennent. Ils sont généralement traduits par des équations résolues à l'aide de méthodes numériques. La dernière partie constitue une description de certains modèles qui contribuent étroitement au développement de la connaissance et de la quantification des phénomènes.

1.2. Physique du bâtiment

La physique du bâtiment doit aider le concepteur ou l'architecte à exploiter correctement les lois physiques fondamentales dans leurs domaines d'activité. Elle

ne procure pas de recettes de construction mais cherche à démontrer et expliquer les phénomènes physiques dans le processus à l'oeuvre autour du bâtiment afin de les employer correctement pour la construction et/ou rénovation déjà dans la phase de planification. La physique du bâtiment doit fournir un élément entièrement intégré à la manière de penser et à la méthode de travail; ceci veut dire que pour résoudre un problème spécifique à la construction, tous les aspects liés à la physique du bâtiment tels que l'isolation thermique, la protection contre l'humidité, l'isolation acoustique, etc... doivent être pris en considération.

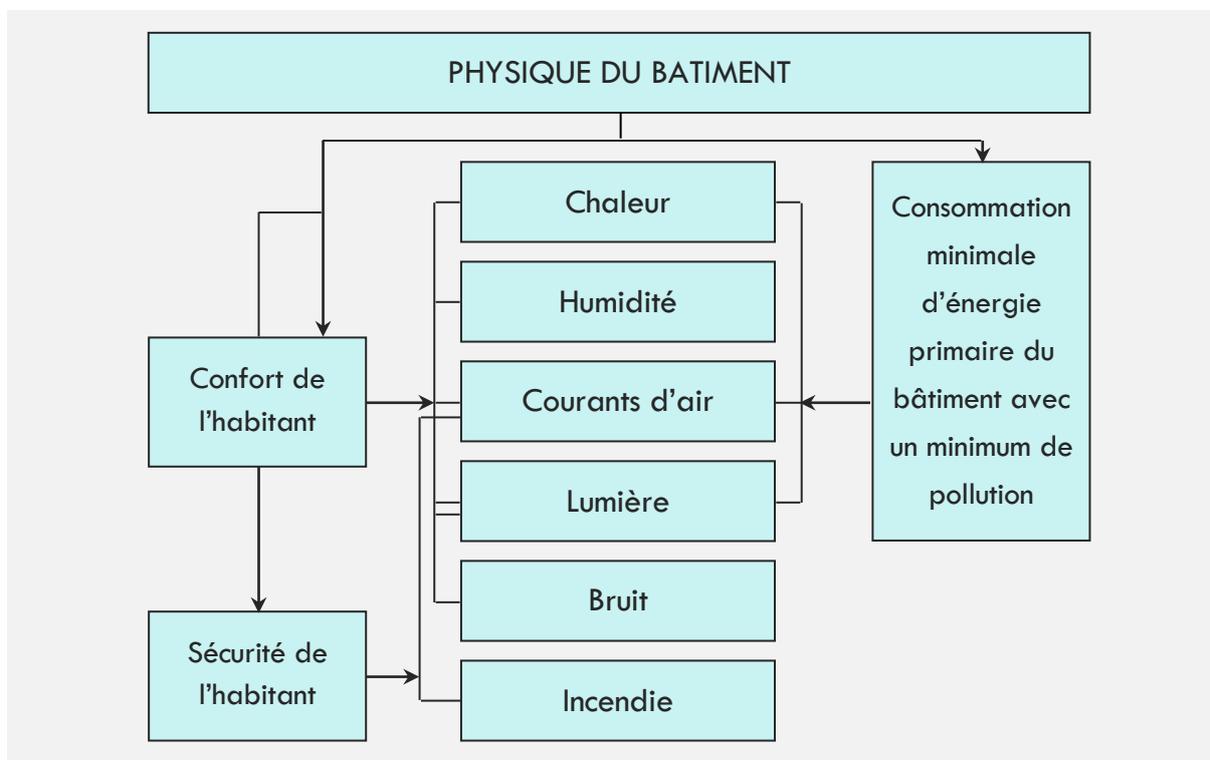


Figure 1.1. Paramètres clés dans la physique du bâtiment [1]

Le comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment est influencé par de très nombreux facteurs: la présence de sources de chaleur ou de mécanismes de ventilation mécanique, un échauffement localisé par rayonnement solaire. Malheureusement, il en est actuellement dépourvu en raison de l'absence d'outils prédictifs performants qui définiraient simultanément les conditions thermiques et aérauliques au sein d'un bâtiment [2]. Il existe bien certaines approches empiriques ou logiciels pour prédire les surchauffes estivales. Néanmoins, aucune

de ces approches ne permet d'obtenir des résultats exhaustifs et fiables pour tous les locaux et bâtiments. C'est dans ce contexte qu'est apparue une nouvelle branche du secteur de la construction : la physique du bâtiment [2, 3].

La physique du bâtiment est un domaine technique qui vise une meilleure isolation thermique et acoustique, une bonne étanchéité pour éviter la condensation intérieure et les moisissures et obtenir un climat intérieur sain et agréable. On se focalise généralement sur une bonne qualité écologique et économique, en vue de minimiser la consommation énergétique et augmenter le confort intérieur d'un bâtiment. Les éléments entrant en compte dans la physique du bâtiment sont nombreux, il faudra connaître la nature, l'exposition, la surface des murs, des parois vitrées, des plafonds, des sols, fenêtres, toiture, façades, plancher, ventilation, traitement de l'air, climatisation, dépoussiérage et désenfumage, systèmes de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire.

1.2.1. Concepts de bâtiments performants

Un concept de bâtiment performant est défini par un ensemble d'objectifs et de solutions techniques destinées à guider le concepteur. Ce dernier, en s'appuyant sur divers outils d'aide à la conception, associe des techniques, matériaux, structures et équipements de manière à atteindre au mieux les objectifs fixés. Enfin, après la mise en service du bâtiment, une phase d'évaluation permet au concepteur et au maître d'ouvrage de quantifier les performances réelles du bâtiment et de les comparer aux objectifs originaux. Dans cette partie, l'analyse de différentes définitions et dénominations rencontrées dans la littérature amène à proposer une typologie des principaux concepts de bâtiments performants et à en identifier les principales caractéristiques.

1.2.2.1. Typologie des bâtiments performants

Les concepts de bâtiments performants se trouvent le plus souvent définis dans le cadre de certifications, de labels ou de réglementations. Ils sont alors associés à un cahier des charges décrivant leurs objectifs ou à une méthode

d'évaluation de leur niveau de performance. Leurs dénominations sont variées, chacune mettant l'accent sur une caractéristique majeure du bâtiment.

Les concepts purement énergétiques accompagnent des réglementations visant la performance énergétique des bâtiments et incitent à l'intégration de sources d'énergies renouvelables au bâtiment. Pour ces approches, les critères évalués sont peu nombreux, bien définis et quantifiables ce qui facilite l'identification des concepts sous-jacents. Ceux qui ont été identifiés sont les suivants :

Le bâtiment à basse consommation ou " basse énergie "

Ce bâtiment se caractérise par des besoins énergétiques plus faibles que les bâtiments standards. Ce premier niveau de performance peut être atteint par l'optimisation de l'isolation, la réduction des ponts thermiques et l'accroissement des apports passifs. Ce concept ne comprend à priori aucun moyen de production local d'énergie, sans toutefois l'exclure. Les bâtiments à basse consommation d'énergie existants, non seulement bien isolés mais encore construits pour utiliser au mieux les gains solaires passifs, présentent une consommation annuelle de moins de 160 MJ/m^2 , soit environ 4 litres de mazout. Voilà enfin un chiffre comparable à la consommation d'une voiture économique. De tels bâtiments existent, sont habités et trouvés très confortables. Leur coût de construction est égal ou très légèrement supérieur (quelque pour-cent) à celui d'un bâtiment classique conforme aux normes modernes. Ce surcoût est dû en partie aux frais d'étude, ces bâtiments nécessitant une planification plus soignée que les constructions usuelles. Ils sont toutefois encore rares et l'on ne peut que regretter que l'on ose encore construire autre chose ! [4]

Le bâtiment " passif "

Ce bâtiment très faiblement consommateur d'énergie ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins en électricité spécifique et éventuellement une production d'électricité

à base de sources d'énergie renouvelables. En pratique, un petit système d'appoint est nécessaire au maintien du confort thermique durant les jours les plus froids; il est le plus souvent associé à la ventilation.

Le bâtiment " producteur d'énergie "

Il est doté de moyens de production d'énergie locaux. Cependant, cette dénomination ne spécifie ni le niveau de consommation ni la part de cette consommation couverte par la production ni même la nature de l'énergie produite. Il s'agit donc plus d'une caractéristique du bâtiment que d'un concept de bâtiment à proprement parler. L'expression bâtiment producteur d'énergie est néanmoins parfois employée pour désigner un " bâtiment à énergie positive ".

Le bâtiment " zéro énergie " ou " zéro net "

Ce bâtiment combine de faibles besoins d'énergie à des moyens de production d'énergie locaux. Sa production énergétique équilibre sa consommation si celle-ci est considérée sur une année. Son bilan énergétique net annuel est donc nul.

Le bâtiment " à énergie positive "

Ce bâtiment producteur d'énergie dépasse le niveau " zéro énergie " : il produit globalement plus d'énergie qu'il n'en consomme. Comme le précédent, ce bâtiment est raccordé à un réseau de distribution d'électricité vers lequel il peut exporter le surplus de sa production électrique.

Le bâtiment autonome

Un bâtiment est autonome lorsque sa fourniture énergétique ne dépend d'aucune ressource distante. Ainsi la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est produite sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan net d'énergie de ce bâtiment est nul à tout instant. Un tel bâtiment se passe des avantages apportés par les réseaux d'approvisionnement (foisonnement, sécurité d'approvisionnement), ce qui impose l'usage de moyens de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs, inertie thermique etc.). Ce type de bâtiment

est particulièrement adapté aux sites isolés ou insulaires car il évite les coûts de raccordement aux divers réseaux.

1.2.2.2. Critères d'évaluation propres aux bâtiments performants

Il apparaît une forte convergence des concepts autour de quelques caractéristiques principales telles que :

- Le besoin énergétique annuel de chauffage, rapporté à une surface, généralement la surface chauffée
- La consommation d'énergie, également par unité de surface, pouvant inclure le chauffage, mais aussi l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, la ventilation, les auxiliaires, voire les autres usages de l'électricité, cet indicateur étant le plus souvent exprimé en énergie primaire.
- La production d'énergie à partir de ressources renouvelables

Les concepts diffèrent surtout par les niveaux d'exigence de chacun d'eux vis-à-vis de ces caractéristiques. Ces niveaux d'exigence constituent des critères permettant de vérifier si les objectifs du concept sont atteints. Quelques caractéristiques secondaires peuvent s'ajouter aux précédentes, telles que :

- L'étanchéité du bâtiment à l'air
- Les performances des équipements et des matériaux mis en œuvre
- Les éléments non énergétiques, tels que la nature des matériaux (naturelle ou synthétique), le surcoût de la construction, les émissions de CO₂, le niveau de confort thermique etc.

Tous les concepts présentés dans cette partie convergent autour de quelques critères simples visant à l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment, à la valorisation des ressources énergétiques locales ou à l'intégration de préoccupations environnementales ou économiques [5].

1.2.2. Capacité thermique

La chaleur est l'énergie liée à l'agitation aléatoire des molécules constituant la matière. Cette agitation se mesure par la température, et la chaleur par l'augmentation de température obtenue dans un matériau donné. Pour chauffer une masse m [kg] d'un matériau de chaleur spécifique c [J/kg K], de la

différence de température $\Delta\theta$ [K], il faut une quantité de chaleur Q [J] donnée par l'expression ci-dessous:

$$Q = m c \Delta\theta \quad (1.1)$$

1.2.3. Physique des différents transferts d'énergie

Dans un bâtiment, les transferts d'énergie prennent principalement la forme de transferts de chaleur et de matière. Ces transferts sont pour origine la tendance naturelle de la chaleur à transiter des zones chaudes vers les zones froides, celle de l'air à se déplacer des zones de haute pression vers les zones de basse pression et celle de la vapeur d'eau à migrer des zones les plus humides vers les plus sèches, en utilisant essentiellement trois modes de transport :

1.2.3.1. Conduction

La conduction est le processus de transmission de la chaleur par diffusion dans les solides. La loi de Fourier relie flux de chaleur et gradient de température en un point. Dans une géométrie monodimensionnelle où la seule coordonnée est notée x et où l'on suppose la conductivité indépendante de la température, cette loi s'écrit :

$$\varphi(x, t) = -\lambda(x) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.2)$$

Avec φ , t , T et λ respectivement densité de flux de chaleur (W/m^2), temps (s), température (K) et conductivité thermique du matériau ($W m^{-1} K^{-1}$), au point considéré. En appliquant le premier principe de la thermodynamique à un volume solide quelconque, on obtient l'équation de la chaleur qui régit la conduction dans les solides. En géométrie monodimensionnelle l'équation s'écrit :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + p \quad (1.3)$$

Avec ρ , c et p sont respectivement la masse volumique (kg/m^3), la capacité thermique massique ($J kg^{-1} K^{-1}$), et la densité de puissance volumique de chaleur (W/m^3) dégagée au point où est exprimée l'équation de la chaleur.

1.2.3.2. Convection

La convection est le phénomène de transport d'énergie thermique par un fluide en mouvement. Il est régi par l'équation de Navier-Stokes qui n'a pas de solution simple dans le cas général. La convection peut être due à des gradients de température dans un fluide dilatable tel que l'air (convection naturelle), par un gradient de pression imposé (convection forcée) ou par les deux à la fois (convection mixte). Le comportement du fluide (écoulement turbulent ou laminaire) est très sensible aux paramètres thermiques et mécaniques. On aura souvent recours à des modèles plus simples. Ainsi, l'aspect convectif des échanges entre parois et air des ambiances peut être représenté par un coefficient h_c qui relie la densité surfacique φ de flux de chaleur échangé entre solide et fluide et l'écart de température entre la surface de la paroi T_{paroi} et la température moyenne (au loin) du fluide dite température de référence T_{fluide} :

$$\varphi(x, t) = h_c (T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}}) \quad (1.4)$$

La valeur de ce coefficient d'échange convectif h_c ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) peut être tirée d'un groupement adimensionnel caractéristique des échanges convectifs solide/fluide, le nombre de Nusselt Nu tel que :

$$Nu = \frac{h_c L}{\lambda} \quad (1.5)$$

Avec λ conductivité thermique du fluide et L longueur caractéristique définissant l'échelle de la configuration. Pour un certain nombre de configurations (paroi plane, verticale, barre, etc.), des relations empiriques expriment les valeurs prises par le nombre de Nusselt en fonction de celles prises par d'autres groupements adimensionnels décrivant le problème ; parmi ces groupements peut figurer l'écart de température paroi/fluide, h_c n'est alors plus constant et la relation ci-dessus donnant la densité de flux n'est plus linéaire [6].

1.2.3.3. Rayonnement

Le rayonnement est un échange d'énergie à distance. On peut distinguer deux grandes familles de phénomènes radiatifs dans les bâtiments. Les premiers

ont pour origine le soleil ou les appareils d'éclairage; ce sont des sources de "rayonnement visible". Les seconds proviennent des écarts de température entre les surfaces des solides et ont lieu dans le domaine du "rayonnement infrarouge". Dans les deux cas, le rayonnement subit des réflexions, des transmissions et des absorptions. Chaque surface solide susceptible de recevoir du rayonnement est caractérisée par des facteurs de réflexion, de transmission et d'absorption qui dépendent de la nature du matériau et de l'état de surface. Des valeurs distinctes caractérisent le comportement de la surface vis-à-vis du rayonnement visible ou infrarouge, ainsi que pour le rayonnement direct ou diffus. Les caractéristiques d'un matériau pour le rayonnement diffus sont obtenues par intégration des caractéristiques spéculaires pour toutes les incidences possibles. On admet couramment que ces mêmes caractéristiques sont indépendantes de la fréquence du rayonnement dans chacune des bandes infrarouge et visible [6].

1.2.3.4. Humidité

L'eau est en effet présente de manière normale, sous forme vapeur ou liquide, à l'intérieur d'un bâtiment. L'eau en phase liquide est notamment amenée par la pluie ou les remontées capillaires. La sollicitation de l'enveloppe par la vapeur d'eau est inéluctable. Elle est présente dans l'atmosphère extérieure. Dans les ambiances intérieures, les occupants, via leur respiration ou leurs activités, contribuent à sa production. L'ensemble d'un bâtiment existant repose donc sur un équilibre hygrothermique stable. La présence de l'humidité dans le bâtiment peut provoquer l'apparition de pathologies. Quelques études [6] ont proposé un lien entre la modélisation des bâtiments et les "pathologies" liées à l'humidité. Dans ce cas de figure, ils sont qualifiés de travaux pathogènes.

L'humidité intérieure est la cause principale des polluants intérieurs qui dégradent la qualité de l'air intérieur des bâtiments et influent directement sur la santé de l'homme. Cinq types de polluants sont identifiés : bactérie, virus, composé organique volatil "COV", poussière d'acarien et champignons. Un état de l'art sur la relation entre l'humidité et les virus peut être consulté dans la référence [8]. L'humidité peut aussi interagir avec les gaz présents dans l'air, tels

que l'ozone, en modifiant leurs concentrations. A ce jour, l'interaction entre l'humidité et les différents polluants est complexe à modéliser. La définition d'une plage optimale d'humidité relative intérieure pour satisfaire la qualité de l'air est problématique. Des auteurs parlent du paradigme de la qualité de l'air intérieur et proposent que l'air ne soit ni sec ni humide. Cette plage est synthétisée sur la figure 1.2. Nous constatons que des valeurs extrêmes d'humidité relative dégradent la qualité de l'air. L'indicateur de pathologies proposé est pragmatique et prendra comme facteur clé l'humidité relative intérieure de chacune des zones du bâtiment. Les problèmes de qualité de l'air apparaissent lorsque nous sommes en dehors de la plage de 40% - 60%.

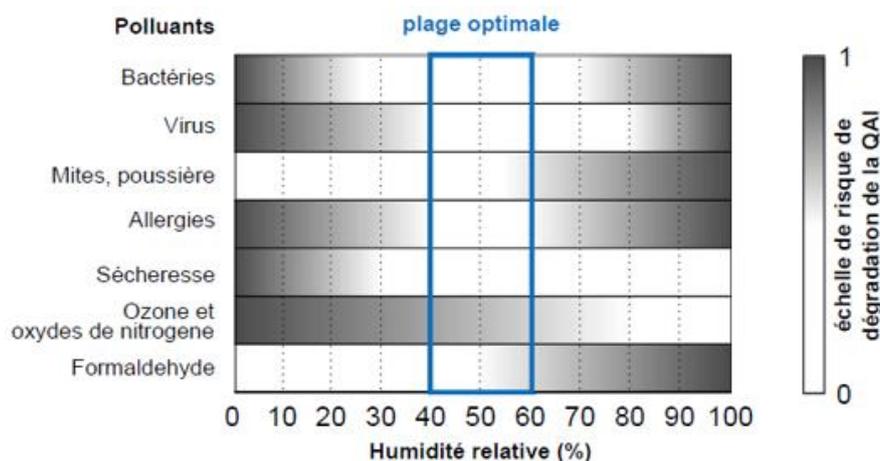


Figure 1.2. Domaine de variation de l'humidité relative optimal pour maintenir une qualité de l'air intérieure satisfaisante [4]

Dans le cadre de rénovations énergétiques, la problématique de l'humidité dans les bâtiments existants nécessite donc une attention particulière pour ne pas compromettre leur durabilité. Des publications pratiques sont disponibles dans la littérature. Leur but est d'aider les acteurs de la construction à concevoir des travaux de rénovation durables [7]. Sous les pressions et aux températures courantes dans les bâtiments, l'humidité de l'air est très variable et les phénomènes de condensation ou d'évaporation mettent en jeu des quantités d'énergie (chaleur latente) qui sont loin d'être négligeables et qui ont des conséquences importantes sur le fonctionnement du bâtiment. Supposer la teneur en eau constante et ne pas tenir compte de ces phénomènes peut être

acceptable lorsque les dégagements de vapeur sont faibles et si seuls nous intéressent des dimensionnements ou consommations d'appareils de chauffage. Par contre, le conditionnement d'air ou l'étude du confort des occupants ne peuvent se permettre de les ignorer.

L'état d'un volume d'air humide est décrit par deux variables à choisir parmi la température, la teneur en eau, l'humidité relative, la pression partielle de vapeur, l'enthalpie massique ou la masse volumique de vapeur. Nous retiendrons les deux dernières grandeurs qui permettent de retrouver la température, la teneur en eau et l'humidité relative [6].

Le transfert de chaleur implique un flux de chaleur (en Watt) qui exprime la quantité d'énergie passant chaque seconde au travers d'une surface quelconque, ou, localement, une densité de flux de chaleur (en W/m^2) qui exprime la quantité d'énergie transmise chaque seconde au travers d'une surface unité.

Les modèles mathématiques utilisés pour décrire le transfert de chaleur dans le bâtiment sont décrits dans les chapitres où ils sont utilisés.

1.3. Consommation énergétique

En Algérie, la consommation de gaz naturel représente un taux de 37% par rapport à l'énergie totale consommée, au moment où la consommation d'électricité est de 28%, et celle du pétrole estimée à 25%. Ces chiffres indiquent que le classement de l'Algérie est parmi les premiers pays consommateurs d'énergie au monde.

En Algérie, le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore. Sa consommation représente plus de 42 % de la consommation finale. L'Algérie doit faire face à un problème énergétique croissant lié à l'évolution de sa démographie. Les raisons qui ont conduit à l'augmentation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel sont l'augmentation substantielle de la population, du nombre de logements, des prix bas de l'énergie conventionnelle, de l'augmentation du nombre d'équipements électriques dans chaque foyer, de l'utilisation des équipements électriques non économiques telles que les lampes à incandescence et de l'absence de la sensibilisation sur la maîtrise et l'efficacité

énergétique [9]. L'absence d'application de réglementation thermique alliée à des contraintes économiques de coût de construction et des pratiques architecturales importées a longtemps favorisé la réalisation de bâtiments totalement inadaptés aux climats [10].

Les relations entre les constructions et leurs environnements climatiques, en termes d'échanges thermiques, ont été négligées en Algérie [9, 11]. Mais, en raison de la crise de l'énergie, elles sont devenues un des principaux sujets de préoccupation des chercheurs dans ce domaine. Il faudra aussi inciter la population, dans son ensemble, à utiliser des équipements énergétiquement performants et, surtout, veiller à la bonne étude et réalisation des bâtiments selon les normes [9]. A cet effet, un programme a été installé par l'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie "APRUE", qui a pour but de redéfinir le modèle national de consommation d'énergie et a pour missions : le recensement de la consommation d'énergie et son analyse, secteur par secteur tant à l'heure actuelle que dans leurs perspectives d'évolution, l'identification des foyers de gaspillages d'énergie, l'évaluation des gains possibles à réaliser dans chaque secteur et les financements nécessaires, la définition des moyens pratiques pour la rationalisation de l'utilisation de l'énergie, l'élaboration d'un plan de communication et la mise en œuvre d'actions de sensibilisation [9, 12].

1.3.1. Le contexte énergétique

La raréfaction de l'énergie fossile est aujourd'hui plus que jamais d'actualité, mais à ce phénomène il faut ajouter les changements climatiques de ces dernières décennies alarmant la communauté scientifique qui appelle à une modification des comportements de la population. De ce fait, le prix du kWh électrique ne cesse de s'accroître en Algérie et dans d'autres pays du monde, parallèlement les besoins en climatisation augmentent. Récemment, beaucoup de pays à travers le monde ont décidé de mener une lutte pour la réduction de la consommation excessive de l'énergie due à la climatisation et au chauffage. Dans la plupart des pays, la tendance est la même. Les frais de consommation

électrique dus à la climatisation ne sont plus supportables ni par les sociétés ni par les Etats. C'est la raison pour laquelle un effort doit être fait dans la conception des bâtiments dans le but de réduire leur facture énergétique. On n'arrive à cet objectif que par une bonne conception du bâtiment pour atteindre le confort thermique à moindre coût par une optimisation des puissances de climatisation [13].

En l'espace d'un siècle, la population mondiale a été multipliée par six. Le nombre de ruraux est resté relativement stable, alors que la totalité de l'accroissement s'est concentrée dans des villes de plus en plus tentaculaires. Cette urbanisation des sols détermine des modes de vie, de production et de consommation spécifiques. Les légitimes exigences du plus grand nombre, en matière de confort et de santé, entraînent d'ores et déjà des niveaux de besoins en énergies et en matières premières, incompatibles avec le développement durable. Il faudrait "plusieurs terres" pour assurer le bien-être d'une population toujours plus nombreuse. Comment concevoir, édifier et aménager le bâtiment et le territoire en n'hypothéquant pas l'avenir de nos enfants ? Quelles architectures et quels urbanismes seront capables de répondre à nos besoins et à ceux des générations futures ? [13]

1.3.2. Notion d'économie d'énergie

Dans les pays en développement, l'énergie est un des facteurs déterminants pour la survie des populations : elle est nécessaire à toute activité humaine et indispensable à la satisfaction des besoins quotidiens mais également pour assurer un minimum de développement économique et social. La crise de l'énergie, à un certain temps, a fait passer au premier plan la réduction des coûts énergétiques. La gravité des problèmes environnementaux est maintenant patente et il n'est plus raisonnable d'ignorer les conséquences environnementales des décisions que nous prenons. Le secteur du bâtiment contribue de manière importante à ces problèmes. Il est donc nécessaire de recourir, autant que possible, aux outils d'aide à la décision et aux technologies qui permettent de réduire les impacts environnementaux des bâtiments [9].

1.3.3. Indice de dépense d'énergie IDE

C'est un indice souvent utilisé pour comparer la consommation d'énergie des bâtiments. On obtient cet indice en divisant la consommation annuelle d'énergie totale (de tous les agents énergétiques) exprimée en MJ (ou en kWh) par la surface brute de plancher chauffé (murs inclus). La figure 1.3 indique les normes de cet indice de bâtiments (norme suisse). On note la large dispersion des valeurs, allant de presque zéro à plusieurs milliers de mégajoules par mètre carré pour certains bâtiments.

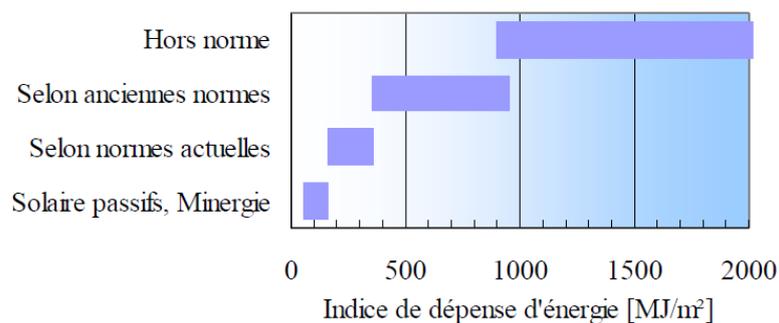


Figure 1.3. Gammes d'indices de dépense d'énergie des bâtiments (normes suisses) [4]

De nombreux exemples montrent qu'une forte consommation d'énergie ne va pas forcément de pair avec un confort élevé. Au contraire, la plupart des bâtiments à forte consommation sont inconfortables, et de nombreux bâtiments à basse consommation offrent un environnement intérieur de très bonne qualité.

La consommation annuelle d'un bâtiment résidentiel moyen suisse est d'environ 700 MJ par mètre carré de plancher chauffé, ce qui équivaut à environ 20 litres de mazout. On peut comparer ce chiffre à la consommation d'une grosse voiture américaine pour 100 km. Les bâtiments bien isolés, construits selon les nouvelles normes, présentent une consommation annuelle moyenne réduite à moins de la moitié, soit 325 MJ/m² ou 10 litres de mazout, chiffre comparable à la consommation d'une voiture européenne moyenne pour 100 km [4].

1.3.4. Applications de l'énergétique du bâtiment

Pour limiter la consommation d'énergie à des valeurs raisonnables, il est nécessaire de savoir où agir. Il faut donc pouvoir prédire les flux d'énergie dans

le bâtiment, afin d'agir là où les mesures d'économie d'énergie seront les plus efficaces et les mieux à même d'offrir un confort élevé. La connaissance des flux d'énergie au travers d'un bâtiment est nécessaire à la prise de décisions ou à la planification de travaux, notamment pour les tâches suivantes :

- Tenir compte de tous les critères voulus dans le choix de stratégies possibles lors de rénovation ou de construction d'ensemble d'immeubles. Parmi les critères à envisager, il y a non seulement le coût, l'esthétique ou l'habitabilité, mais aussi la consommation d'énergie.
- Dimensionner correctement les installations énergétiques, en calculant la puissance de pointe minimum nécessaire;
- Prévoir la consommation annuelle et la minimiser en choisissant la variante la plus économique globalement, tout en tenant compte du confort et des contraintes architecturales.

Diminuer la consommation d'énergie primaire en minimisant tous ces flux, en les faisant passer aux bons endroits et en captant au mieux la chaleur de l'environnement (énergie solaire, pompes à chaleur) est un problème où la physique a déjà apporté des solutions et qui continue à être étudié. Les solutions à ce problème particulier peuvent entraîner des problèmes ailleurs, et en tous cas ont une influence sur les diverses caractéristiques du bâtiment [4].

1.3.5. Les besoins de l'occupant

Le premier rôle d'un bâtiment est de protéger ses occupants des rigueurs du climat extérieur. Un bâtiment confortable assure à ses habitants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La gestion optimale de l'énergie, quoique très importante du point de vue de son impact sur l'environnement, intervient en deuxième priorité, lorsque les conditions de confort sont satisfaites. Les exigences actuelles peuvent être classées en plusieurs catégories, qui interagissent entre elles : exigences de confort thermique, exigences de qualité d'air, besoins en éclairage, protection acoustique et exigences en termes de consommation d'énergie.

Il doit être clair que les besoins des occupants passent avant les exigences énergétiques. Le bâtiment est d'abord construit pour assurer le bien-être de l'occupant, et non pour économiser de l'énergie. Dans le cas contraire, on économiserait un maximum d'énergie en ne construisant pas le bâtiment, ou en ne le chauffant pas en hiver. Il n'est toutefois pas correct de gaspiller l'énergie, notamment parce que la pollution qui en résulte est nuisible à l'occupant. Il faut toutefois insister sur le fait qu'un bon confort n'implique pas automatiquement une grande consommation d'énergie. Par une planification intelligente et intégrée, il est parfaitement possible d'assurer une excellente qualité d'environnement intérieur avec une très faible consommation d'énergie.

1.3.6. Refroidissement passif

Le refroidissement passif consiste à mettre à profit tout phénomène abaissant la température intérieure et ne consommant pas d'énergie. Il permet d'assurer sous nos climats, un excellent confort estival tout en évitant l'installation de coûteux systèmes de conditionnement d'air. En premier lieu, on cherche à réduire les gains de chaleur solaires et internes, en installant des protections solaires efficaces (donc extérieures et mobiles) et en évitant d'utiliser des appareils à faible rendement. Dans la mesure où le climat le permet, on évacue l'excédent de chaleur en ventilant fortement. Cette technique d'usage général est applicable dans tout type de bâtiment (lourd ou léger), mais ne fonctionne que lorsque la température extérieure est plus basse que la température de confort. Si ce n'est pas le cas, on peut appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle, de manière à permettre à cette structure d'accumuler la chaleur générée dans le bâtiment pendant la journée. Il comprend donc deux périodes : la période de refroidissement et la période de protection.

1.3.6.1. Période de refroidissement

Tant que la température extérieure est inférieure à la température intérieure, (en général pendant la nuit) des ouvertures sont pratiquées dans le bâtiment de manière à permettre à l'air chauffé par la structure du bâtiment de

s'échapper, et à l'air frais extérieur de s'infiltrer. Le bâtiment est ainsi aéré et refroidi pendant cette période.

1.3.6.2. Période de protection

Tant que la température de l'air extérieur est plus élevée que celle de l'air intérieur, la ventilation est réduite au minimum nécessaire pour assurer une bonne qualité de l'air. Les gains de chaleur résiduels chauffent le bâtiment mais, la structure étant froide et massive, ce réchauffage est relativement lent. Dans de bonnes conditions, on évite de dépasser les limites d'un bon confort thermique.

1.4. Confort

Le confort est un état de bien être général. Il est mesuré a contrario par le taux d'insatisfaction des occupants. Indépendamment des conditions propres à l'individu (métabolisme, activité, habillement), il est reconnu que les paramètres suivants interviennent dans le confort, en plus des paramètres qui caractérisent l'individu lui-même (taux d'activité, habillement, etc.):

- Conditions thermiques : Température de l'air
 - Sources de rayonnement (radiateurs, poêles, soleil)
 - Température des surfaces environnantes
 - Thermique des surfaces en contact avec le corps
- Qualité de l'air :
 - Vitesse relative de l'air
 - Humidité relative de l'air
 - Pureté ou pollution de l'air, odeurs
- Acoustique:
 - Niveau de bruit, nuisance acoustique
 - Temps de réverbération (durée d'écho)
- Visuel:
 - Éclairage naturel et artificiel
 - Couleurs
 - Volumes intérieur et distribution des volumes
- Autres influences:
 - Degré d'occupation des locaux
 - "Ambiance"
 - etc.

Nous nous limiterons ici essentiellement aux conditions thermiques et aérauliques.

Le confort dépend également des comportements qui sont initiés consciemment ou inconsciemment et guidés par des sensations thermiques et d'humidité pour réduire l'inconfort. Certains exemples ont une relation avec les vêtements, la nature de l'activité, le changement de posture ou d'emplacement, une modification de réglage d'un thermostat, l'ouverture d'une fenêtre...etc. Étonnamment, bien que les climats, les conditions de vie et les cultures diffèrent largement à travers le monde, la température que les gens choisissent pour le confort dans des conditions similaires d'habillement, d'activité, d'humidité et de mouvement de l'air se révèle très semblable. Le domaine de recherche sur le confort thermique est partagé entre deux approches. La première étudie le confort thermique d'une façon analytique. Elle n'est pas restreinte aux bâtiments. La deuxième approche, basée sur l'incapacité de l'approche analytique à représenter la réalité du confort thermique dans les bâtiments, est l'approche adaptative [15, 16].

Généralement, il existe sept facteurs principaux qui affectent directement le confort, peuvent être regroupés en deux catégories : les facteurs personnels (caractéristiques des occupants) et les facteurs environnementaux (les conditions de l'environnement thermique). Les premiers sont le taux métabolique et le niveau de vêtements, les seconds sont la température de l'air, la température radiante moyenne, la vitesse de l'air et l'humidité [17].

1.4.1. Métabolisme

Une personne grande et mince a un rapport surface / volume plus grand, peut dissiper la chaleur plus facilement et peut tolérer des températures plus élevées qu'une personne ayant une forme de corps arrondie [17].

1.4.2. Isolation des vêtements

Généralement, plus le vêtement est épais, plus la capacité d'isolation est grande. Selon le type de matériau dont est fait le vêtement, le mouvement de l'air et l'humidité relative peuvent diminuer la capacité d'isolation du matériau [17].

1.4.3. Température de l'air

La température de l'air est la température moyenne de l'air entourant l'occupant. La température radiative moyenne dépend des températures et des émissivités des surfaces environnantes ainsi que du facteur de vue ou de la quantité de surface "vue" par l'objet. Ainsi, la température radiative moyenne ressentie par une personne dans une pièce où la lumière du soleil coule varie en fonction de la quantité de son corps exposée au soleil.

La température opérative tente de combiner les effets de l'air et les températures radiatives moyennes en une seule mesure. Elle est souvent estimée comme la moyenne de la température du thermomètre sec et de la température radiative moyenne à l'endroit donné dans une pièce. Dans les bâtiments à faible masse thermique, la température opérative est parfois considérée comme étant simplement la température de l'air.

1.4.4. Humidité relative

L'humidité relative est le rapport de la quantité de vapeur d'eau dans l'air à la quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir à la température et à la pression spécifique. D'autre part, les milieux très secs ($HR < 20-30\%$) sont également inconfortables en raison de leur effet sur les muqueuses. Le niveau recommandé d'humidité intérieure est de l'ordre de 30-60% dans les bâtiments climatisés mais de nouvelles normes telles que le modèle adaptatif permettent des humidités plus basses et plus élevées, en fonction des autres facteurs de confort thermique [18].

1.4.5. L'approche analytique

Le modèle PMV/PPD a été développé par P.O. Fanger en utilisant des équations d'équilibre thermique et des études empiriques sur la température de la peau pour définir le confort. Les enquêtes standard de confort thermique interrogent les sujets sur leur sensation thermique sur une échelle de sept points allant du froid (-3) au chaud (+3). Les équations de Fanger sont utilisées pour calculer le Vote Prévu Moyen (PMV) d'un grand groupe de sujets pour une combinaison particulière de température de l'air, de température radiative

moyenne, d'humidité relative, de vitesse de l'air, de taux métabolique et d'isolation des vêtements. Zéro est la valeur idéale représentant la neutralité thermique, et la zone de confort est définie par les combinaisons des six paramètres pour lesquels le PMV est dans la limite recommandée ($-0,5 < \text{PMV} < +0,5$). Bien que la prédiction de la sensation thermique d'une population soit une étape importante pour déterminer quelles conditions sont à l'aise, il est plus utile de se demander si les gens seront satisfaits. Fanger a développé une autre équation pour relier le PMV au Pourcentage Prévu de Dissuadés (PPD). Cette relation est basée sur des études à travers l'interrogation des sujets dans une chambre où les conditions intérieures peuvent être contrôlées avec précision. Cette méthode traite tous les occupants de la même façon et ne tient pas compte de l'emplacement et de l'adaptation à l'environnement thermique. Elle stipule essentiellement que la température intérieure ne devrait pas changer au fil des saisons [19].

1.4.6. L'approche adaptative

Le modèle adaptatif est basé sur l'idée que le climat extérieur influence le confort intérieur parce que les humains peuvent s'adapter à différentes températures pendant différentes périodes de l'année. De nombreux chercheurs ont mené des études sur le terrain dans le monde entier dans le cadre desquelles ils ont interrogé les occupants des bâtiments sur leur confort thermique tout en prenant des mesures environnementales simultanées.

Ensuite, il a été établi le modèle dynamique qui permet de prévoir les variables physiologiques sous des conditions instationnaires à travers le calcul d'un indice représentant la température équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative. En 1970, Humphrey, est arrivé à déterminer une expression mathématique de la température neutre basée sur la température extérieure moyenne mensuelle dont la formule est:

$$T_n = 11.09 + 0.534 T_0 \quad (1.6)$$

Où T_n est la température neutre ($^{\circ}\text{C}$).

T_0 : la température extérieure moyenne pour un mois en question ($^{\circ}\text{C}$) [15].

Une autre fonction de corrélation empirique a été réalisée par Auliciemes est:

$$T_n = 17.6 + 0.314 T_0 \quad (1.7)$$

1.5. Méthodes de modélisation énergétique

1.5.1. Introduction

Même si un modèle est une représentation simplifiée de la physique du système réel, sa construction reste une tâche délicate. Dans ce sens, de nombreux auteurs, Karnopp [20] par exemple, se sont penchés sur la question de modélisation globale de l'énergétique du bâtiment, l'enjeu étant de choisir la méthode la mieux adaptée. En fonction de la finalité des modèles et de la complexité du calcul, différentes méthodes de modélisation ont été employées. Ces méthodes ont des degrés variables de finesse, de flexibilité et de réutilisabilité.

Dans ce qui suit, nous menons une étude bibliographique comparative des méthodes de modélisation applicables dans l'étude de l'énergétique du bâtiment.

1.5.2. Modèle de Givoni

La méthode de modélisation de Krüger et Givoni consiste à prédire la température intérieure du bâtiment à partir des données météorologiques sans tenir compte des propriétés thermo-physiques de l'enveloppe [21]. Des corrélations ont donc été développées afin de prédire le niveau du confort thermique. En 1993, Givoni [22] a proposé un modèle pouvant estimer la température intérieure maximale journalière des maisons individuelles inoccupées. La température intérieure journalière est fonction seulement de la température moyenne extérieure dépendant de la saison. Un bon accord entre les résultats de calcul et les mesures a été constaté [23].

Afin d'étendre cette méthode de modélisation pour des maisons occupées, Krüger et Givoni [21] ont conduit une étude expérimentale et numérique sur trois maisons individuelles occupées situées à Curitiba (Brésil). Les essais

expérimentaux ont été effectués pendant une période estivale (septembre) et une période hivernale (décembre). Les corrélations, donnant les températures intérieures minimales, maximale et moyenne, ont montré une bonne approximation avec les résultats de simulation issus de l'outil de simulation de la thermique du bâtiment COMFIE Pleiade [23].

La méthode de Givoni a été suivie par plusieurs auteurs : Freire et al. [24], Fernández-González et al. [25] et Singh et al. [26]. Il a été démontré que lorsque les mesures expérimentales sont disponibles, la méthode de Givoni est la plus adaptée pour prédire la performance thermique d'un bâtiment spécifique. Bien que la méthode de Givoni soit simple et précise, elle n'est applicable que lorsqu'une étude expérimentale est réalisée, et qui fera l'objet d'une analyse de régression. Cette démarche nécessite du temps, des moyens de mesure importants et de la précision. De plus, elle n'est valable qu'aux bâtiments sur lesquels les mesures ont été effectuées. Différentes questions se posent : sur quelle base les corrélations ont été obtenues ? Est-ce à partir d'un raisonnement physique, ou la concordance des résultats suffit pour juger l'adaptation de la méthode ?

L'inconvénient principal est que ce type de modèles est assez limité du fait qu'il ne fournit que peu d'informations sur le comportement thermique du bâtiment (température intérieure journalière uniquement). Alors que le profil horaire de la température et la puissance nécessaire du chauffage sont des données importantes pour évaluer la consommation énergétique du bâtiment.

1.5.3. Modèle de plan d'expériences

Cette méthode de modélisation présente un grand intérêt pour des études paramétriques en énergétique du bâtiment et plus précisément pour des études d'optimisation. Un plan d'expériences est une suite de simulations numériques organisées à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses. Ceci conduit à un modèle mathématique comportant les variables les plus influentes du système. Cette méthode est applicable à partir du moment où l'on recherche le lien entre une réponse Y , et des variables X_i , qui peuvent

influencer la valeur de Y . Ce lien se traduit en général par un polynôme de la forme $Y = f(X_i)$ [27-28].

Les plans d'expériences ont leur propre terminologie [27-28]. Plusieurs études d'évaluation de la performance énergétique des bâtiments, utilisant les plans d'expériences comme outil de modélisation, ont été réalisées. Flifli [29] a mené une étude d'optimisation énergétique du bâtiment. Un modèle polynomial, basé sur les plans d'expériences, a été développé. L'objectif est de déterminer les meilleures combinaisons de solutions techniques existantes ou émergentes permettant une réduction de la facture énergétique. L'étude a été menée sur deux secteurs principaux des bâtiments tertiaires : bâtiments de bureaux et bâtiments de santé. Flifli a mis en évidence l'efficacité de cette méthode à travers la détermination de la répercussion de chaque paramètre (isolation de l'enveloppe, équipements énergétiques, etc.) sur la consommation énergétique. Une étude d'optimisation a été également conduite. Ses constatations ont été rapportées par Jaffal et al [30].

1.5.4. Modèles de connaissance

La modélisation la plus fiable consiste à diviser la zone étudiée en un très grand nombre de mailles dont le but est de calculer de manière efficace l'évolution des écoulements aérauliques, la température et l'humidité intérieure du bâtiment. Suivant le niveau de discrétisation, on peut en distinguer quatre catégories :

- Les modèles monozones
- Les modèles multizones
- Les modèles zonaux et
- Les modèles de codes de champs (CFD)

1.5.4.1. Modèles monozones

Les modèles monozones sont des modèles simples. On considère le bâtiment comme une seule zone ayant des propriétés physiques uniformes. Ils nécessitent très peu d'informations liées à l'enveloppe ou aux systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de ventilation. Par conséquent, ils permettent pour estimer

rapidement les consommations énergétiques des bâtiments. Néanmoins, ils ne sont pas adaptés aux évaluations du confort. De plus, ils s'avèrent très insuffisants si des écarts importants de température existent entre les différentes parties du bâtiment ou si une information plus locale est demandée [3, 23].

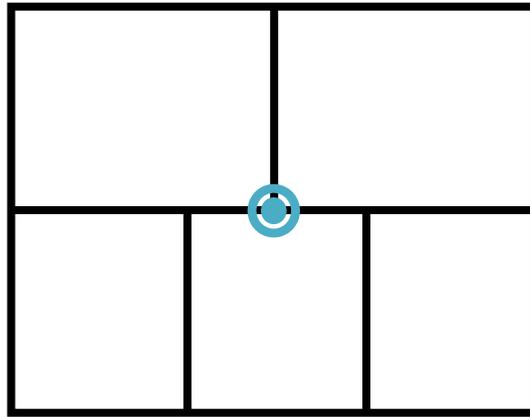


Figure 1.4. Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'une approche monozone

1.5.4.2. Modèles multizones

Ces modèles sont particulièrement adaptés pour la simulation des mouvements d'air et la distribution des espèces (polluants divers, vapeur d'eau...). Ces modèles traitent le bâtiment comme un ensemble de zones parfaitement et instantanément mélangées. Ils prédisent le comportement thermique et aéraulique du bâtiment grâce à une application des équations de conservation de la masse, de l'énergie et des espèces. Ces modèles ont été utilisés pour le dimensionnement des systèmes de ventilation, l'étude et l'analyse des mouvements de l'air intérieur et la simulation aéraulique des fumées en cas d'incendie [3, 23].

Cependant, à l'instar des modèles monozone, de fortes hypothèses, relatives à l'homogénéisation de l'air intérieur, ont été adoptées. En effet, ces modèles rencontrent des limites dans le cas d'une forte hétérogénéité de l'air à l'intérieur de la zone notamment pour les bâtiments ayant des espaces internes volumineux [31].

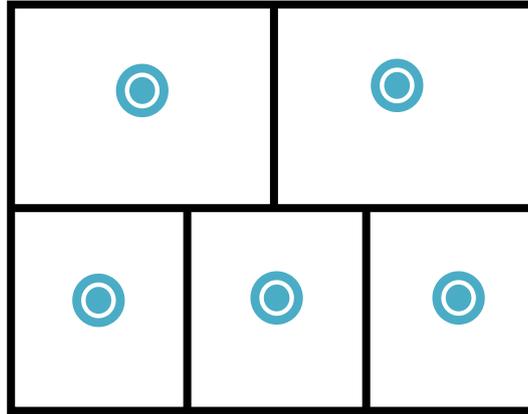


Figure 1.5. Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'une approche multizone

1.5.4.3. Modèles zonaux

L'hypothèse d'homogénéisation des propriétés physiques utilisée par les modèles monozones et multizones n'est pas valide pour les bâtiments ayant des grands espaces intérieurs où une stratification de l'air est engendrée. Pour pallier à ce problème, la méthode zonale est utilisée.

Cette méthode consiste à décomposer la zone elle-même en un petit nombre de volumes (généralement inférieure à 1000 cellules) sous forme cubique ou parallélépipédique. Ainsi, elle permet de décrire le comportement énergétique au sein du bâtiment d'un niveau plus détaillé que celui des deux catégories précédentes. Une résolution des équations de conservation de la masse et de l'énergie, appliquées sur chaque cellule, est réalisée pour déterminer les propriétés de l'air intérieur [31].

Plusieurs auteurs [3, 32-35] ont montré la performance de cette méthode pour la prédiction du comportement thermique du bâtiment avec un bon niveau de précision.

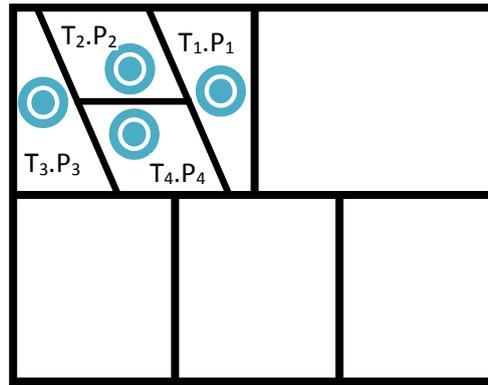


Figure 1.6. Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'un modèle zonal

1.5.4.4. Modèles de code de champ "CFD"

Parmi les modèles de connaissance déjà cités, aucun n'offre la possibilité de détailler la physique du bâtiment avec un niveau de précision aussi élevé que celui des modèles de code de champs (CFD : Computational Fluid Dynamics). Les modèles CFD se basent sur une résolution numérique des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces, permettant de suivre en détail l'évolution des mouvements d'air, de température intérieure, de la pression et de l'humidité relative. Les modèles CFD ont été largement utilisés pour étudier le comportement thermique et aéraulique des bâtiments (tertiaires et résidentiels).

On trouve dans la littérature que certains auteurs [33, 36-37] ont recensé et répertorié un nombre de travaux important utilisant les modèles CFD. La contrainte majeure est le temps de calcul important d'où la nécessité de machines de calcul puissantes.

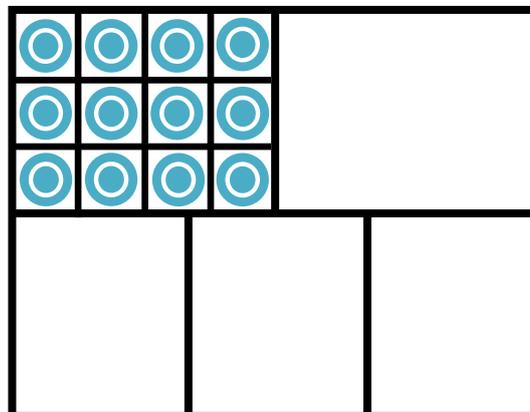


Figure 1.7. Niveaux de discrétisation d'un bâtiment, cas d'un modèle de code de champ "CFD"

1.5.5. Le modèle aéraulique

Les phénomènes moteurs généralement retenus pour modéliser les transferts aérauliques en bâtiment sont : le vent ; le tirage thermique induit par les gradients de masse volumique de l'air et les systèmes de ventilation mécanique. Ces trois phénomènes génèrent des flux d'air indissociables : notamment, tous les trois ont un effet sur les différences de pression de part et d'autre des défauts d'étanchéité de l'enveloppe et donc sur les flux d'air parasites [38].

La détermination des débits aérauliques est d'une grande importance pour les logiciels de simulation détaillée, ces débits assurant le plus souvent un couplage thermique important entre le bâtiment et l'extérieur d'une part et entre les zones thermiques d'autre part. C'est ainsi que le renouvellement d'air constitue environ 30 % des déperditions énergétiques d'un immeuble collectif en période de chauffe. Par ailleurs, entre deux zones séparées par une porte standard, une différence de 0.1 K se traduit par un débit échangé de l'ordre de 120 m³/h. Ces débits jouent aussi un rôle majeur dans la migration de l'humidité dans le bâtiment (confort, risques de condensation locale, ...) [39].

1.5.5.1. L'aération

Le but de l'aération est d'assurer un environnement intérieur confortable, maintenant les occupants en bonne santé. Un air sans cesse renouvelé à l'intérieur des bâtiments est nécessaire, non pour assurer l'apport d'oxygène indispensable à la vie, mais surtout pour éliminer au fur et à mesure les divers polluants générés dans le bâtiment et qui rendent l'atmosphère malodorante et toxique.

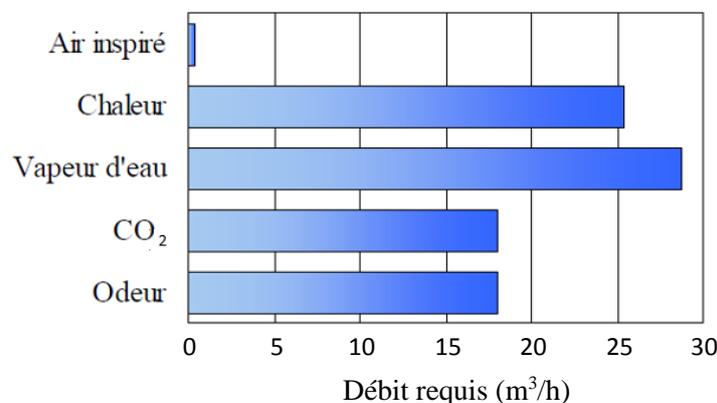


Figure 1.8. Débit d'air requis pour évacuer les divers polluants produits par une personne assise ayant une activité de bureau [4]

Les trois conditions principales à remplir pour assurer une bonne qualité de l'air intérieur tout en limitant la consommation d'énergie sont :

- Limiter l'intensité des sources de polluants
- Contrôler les débits d'air
- Réduire la perméabilité à l'air de l'enveloppe

1.5.5.2. Modélisation de l'aération

La consommation d'énergie pour le conditionnement de l'air est directement proportionnelle au débit d'air, qui est donc une donnée essentielle au calcul du bilan. Cette donnée n'est cependant pas facile à estimer. Suivant l'objectif du calcul du bilan et la qualité du bâtiment (notamment l'étanchéité de son enveloppe), on utilisera soit des valeurs conventionnelles données par des normes, soit le débit nécessaire à assurer la qualité de l'air, soit le débit d'air qui traverse le bâtiment. Ce dernier peut dans certains cas largement dépasser le débit minimum nécessaire, et est estimé à l'aide d'un modèle mathématique. Les masses d'air traversant le bâtiment sont mues par trois types de forces :

- Le vent, ayant pour effet d'augmenter la pression sur la façade au vent, et d'abaisser la pression sur les autres façades et sur le toit,
- la différence entre les densités d'air intérieur et extérieur, qui cause un tirage (effet de cheminée) faisant monter l'air chaud et humide et descendre l'air froid et/ou sec,
- les ventilateurs des installations aérauliques, si elles existent.

Ces forces créent des différences de pressions entre les différents volumes du bâtiment et l'extérieur, et induisent des débits au travers des ouvertures, des canalisations et des fissures.

Un modèle de ventilation comprend donc des modèles donnant la différence de pression résultant de chaque force, et un modèle de bâtiment et d'installation, qui décrit les relations entre les débits d'air et les différences de pression. Ce modèle est complété par une équation de conservation : la masse d'air entrant dans le bâtiment est égale à la masse d'air qui en sort.

Les modèles peuvent être classés en deux grandes catégories : les modèles numériques et les modèles nodaux. Les modèles numériques résolvant les équations de dynamique des fluides (Navier-Stokes) dans le volume étudié. Pour ce faire le volume étudié est découpé en éléments homogènes. Une équation de conservation est écrite pour chaque élément, et toutes ces équations sont liées entre elles par des lois de conservation. Elles sont d'autre part soumises à des conditions aux limites décrivant l'effet des parois, des ouvertures, des bouches de ventilation et des grilles d'extraction. Cette technique requiert des ordinateurs puissants, et un investissement en travail important pour décrire le problème posé en détail. Les modèles nodaux, dans lesquels le bâtiment est représenté par un ensemble de zones homogènes, symbolisées par un nœud (figure 1.9). Ces nœuds sont liés par des conductances qui modélisent les différents passages que l'air peut emprunter. Les nœuds extérieurs sont soumis à des pressions dues au vent et aux différences de densité [3].

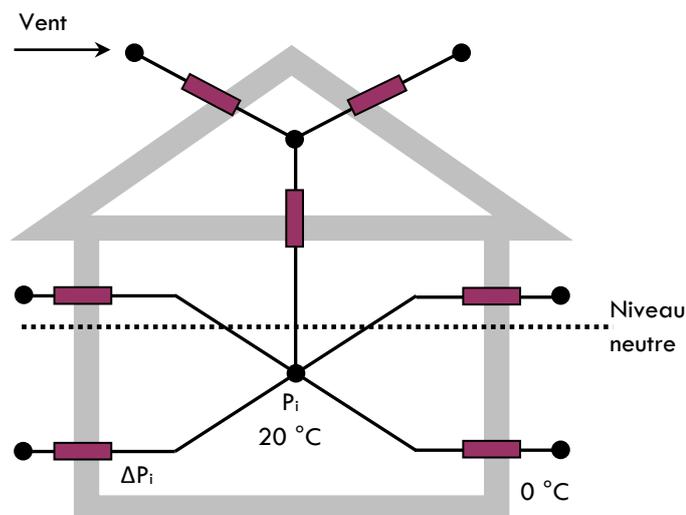


Figure 1.9. Modélisation nodale d'un bâtiment à deux zones.

Le vent exerce à la côte z une pression aérodynamique sur un obstacle, une pression donnée par la formule suivante :

$$P(z) = \frac{1}{2} \rho C_p v(z)^2 \quad (1.8)$$

$P(z)$: Pression aérodynamique moyenne [Pa]

C_p : Coefficient de pression moyen

$V(z)$: vitesse moyenne du vent [m/s]

Le coefficient de pression moyen dépend de la direction du vent, traduit une pression exercée si le coefficient est positif, et une dépression dans l'autre cas. La valeur de ces coefficients est issue d'études expérimentales faites en soufflerie ou de simulations numériques [39].

Walton propose un modèle simplifié par rapport au précédent, à l'aide de la formulation suivante [39]:

$$C_p = 0.75 - 1.05^{\alpha/90} \quad 0 > \alpha > 90^\circ \quad (1.9)$$

$$C_p = -0.75 - 1.05^{\alpha/90} \quad 90^\circ > \alpha > 180^\circ \quad (1.10)$$

α est l'angle d'incidence du vent [degrés]

La différence de pression due à la différence de densité de l'air entre l'intérieur et l'extérieur, ΔP résulte des différences de température et d'humidité. Elle se calcule par:

$$\Delta P(z) = (\rho_i - \rho_e) g z \quad (1.11)$$

ρ : est la masse volumique de l'air [kg/m³]

g : est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

z : est la hauteur [m] au-dessus de celle du niveau neutre défini par le niveau auquel la différence de pression est nulle.

Les indices i et e représentent respectivement l'intérieur et l'extérieur, et le niveau neutre est le niveau auquel la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est nulle. Ces deux différences de pression s'ajoutent algébriquement en chaque endroit de l'enveloppe du bâtiment et poussent l'air au travers des ouvertures de ventilation et des nombreuses fissures existant dans l'enveloppe du bâtiment [3].

1.5.5.3. L'équation de débit

Pour une ouverture, il est possible de relier simplement le débit et l'écart de pression à l'aide de la relation suivante [39]:

$$\dot{Q} = C_d S (\Delta P)^n \quad (1.12)$$

Cd : coefficient de débit

n : exposant de l'écoulement

n = 1 pour l'écoulement laminaire

n = 0.5 pour l'écoulement turbulent

n = 0.67 pour les différentes valeurs de pression rencontrées dans l'habitat et pour de petites ouvertures classiques.

Le coefficient de décharge est issu de mesures expérimentales. Il varie beaucoup avec la géométrie de l'ouverture et ses valeurs courantes sont disponibles dans des catalogues. Pour globaliser ce coefficient et la surface de l'ouverture, leur produit a la dimension d'une perméabilité. La relation précédente devient alors

$$\dot{Q} = K S (\Delta P)^n \quad (1.13)$$

K : le débit massique traversant l'ouverture pour un écart de pression de 1 Pa [3]. Le tableau suivant fournit quelques valeurs-guides à titre d'exemple pour les fissures.

Type d'ouverture	K en (Kg/s)	n
Nouvelle fenêtre	$\leq 3.33 \cdot 10^{-5}$	
Ancienne fenêtre	$6.67 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	0.6
Porte extérieure	$10^{-4} - 10^{-3}$	
Porte intérieure	$1.3 \cdot 10^{-3} - 2.4 \cdot 10^{-3}$	

Tableau 1.1. Valeurs de débit massique pour les fissures [3]

1.5.5.4. Effet de cheminée

L'effet de cheminée, ou tirage, contribue de manière importante à l'aération des bâtiments. L'air situé dans le bâtiment (ou les gaz de combustion) a en général une température et une humidité différente de l'air extérieur, et la densité de l'air dépend de sa température et de sa composition. La masse volumique de ce gaz peut aussi se déterminer à partir de la loi des gaz parfaits. La loi des gaz parfaits relie la pression P et le volume V occupé par n moles de gaz à température T:

$$P V = n R T \quad (1.14)$$

Où $R = 8.31396 \text{ J/ (mole K)}$ est la constante des gaz parfaits.

Cette loi signifie que tout gaz parfait occupe un volume ne dépendant que du nombre de moles, de la pression et de la température, et indépendant de la nature du gaz. La masse volumique ρ de ce gaz peut aussi se déterminer à partir de la loi des gaz parfaits. Si M est la masse molaire du gaz considéré :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M n}{V} = \frac{M P}{R T} \quad (1.15)$$

La densité de l'air est inversement proportionnelle à la température absolue, et diminue avec la teneur en eau, car la masse molaire de l'eau est de 18 g/mole alors que la masse molaire moyenne de l'air est d'environ 29 g/mole. Le poids d'une colonne d'air intérieur est donc différent du poids de la même colonne d'air extérieur. Il en résulte une différence de pression de part et d'autre des parois de l'enveloppe du bâtiment ou de la cheminée. En hiver, ou la nuit en été, ainsi que dans les cheminées, l'intérieur est plus chaud que l'extérieur. L'air entre dans le volume considéré par le bas et en sort par le haut. La quantité d'air qui entre dans le volume est égale à celle qui en sort, car le bâtiment ou le fourneau ne se gonfle ni se dégonfle. Les pressions sur l'enveloppe s'ajustent donc de manière à équilibrer les débits entrant et sortant. Le niveau auquel la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur est nulle est le niveau neutre.

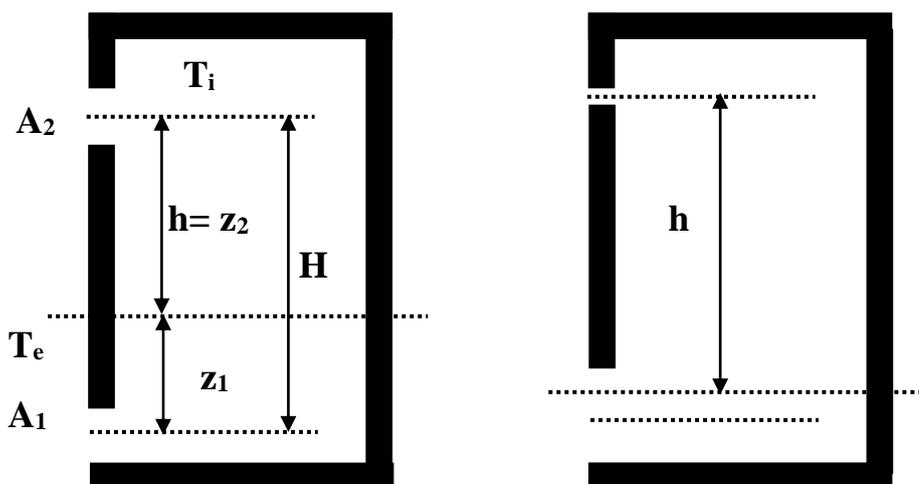


Figure 1.10. Détermination du niveau neutre dans le cas de deux ouvertures.

La position du niveau neutre dépend de la position et de la taille des ouvertures. Elle se détermine en écrivant le bilan des débits d'air. Dans le cas d'un espace ventilé par une ouverture haute et une ouverture basse (figure 1.10), l'équilibre des débits s'écrit :

$$A_1 u_{d_1} \rho_e = A_2 u_{d_2} \rho_i \quad (1.16)$$

Où u_d représente la vitesse débitante de l'air dans l'ouverture considérée. L'équation de Bernoulli exprime que dans un fluide non visqueux où les lignes de courant proviennent toutes de la même origine, l'énergie totale est constante. Il s'ensuit que, en deux endroits différents d'une ligne de courant :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_1 u_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_2 u_2^2 = Cts \quad (1.17)$$

Considérons un courant passant au travers d'une ouverture, et la ligne de courant qui passe au centre de cette ouverture. Très loin de cette ouverture, la vitesse du fluide, u_∞ , est nulle, alors qu'elle vaut u au centre de l'ouverture. On a donc :

$$P_\infty = P + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad \text{Soit} \quad u = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (1.18)$$

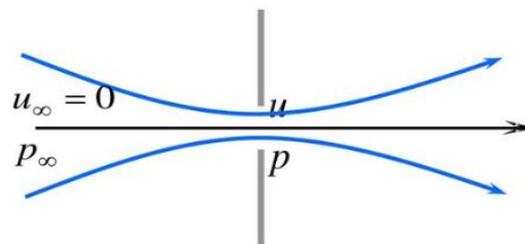


Figure 1.11. Courant passant au travers d'une ouverture

Où $\Delta P = P_\infty - P$. En pratique toutefois, on est plus intéressé par la relation entre le débit et la différence de pression de part et d'autre de l'ouverture, $P_1 - P_2$. La pression dans l'ouverture est en général inconnue. Pour déterminer le débit à partir de $\Delta P = P_1 - P_2$, on garde la forme de la relation 1.18, mais l'on inclut un coefficient correcteur pour tenir compte du changement de pression de référence et du rapport entre la vitesse au centre et la vitesse débitante.

Le débit massique au travers d'une ouverture d'aire A vaut alors :

$$\dot{m} = \rho Q = \rho C_d A u = \rho C_d A \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (1.19)$$

Où C_d est le coefficient de décharge, qui tient compte des corrections mentionnées ainsi que de la déformation des lignes de courant au travers de l'ouverture et des effets de la turbulence et de la viscosité. Ce coefficient, déterminé expérimentalement, vaut 0.6 pour les ouvertures à bords francs.

Si le niveau neutre se trouve en dehors des ouvertures (pas de double flux dans celles-ci) on peut calculer facilement le rapport entre les hauteurs séparant les ouvertures du niveau neutre. En remplaçant ΔP par sa valeur donnée dans l'équation (1.18) et en utilisant l'équation de conservation (1.16), on trouve :

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\rho_i}{\rho_e} \left(A_2 / A_1 \right)^2 = \frac{T_e}{T_i} \left(A_2 / A_1 \right)^2 \quad (1.20)$$

Enfin, si $H = z_1 + z_2$ est la distance entre les ouvertures et h la distance entre le niveau neutre et le centre de l'ouverture haute, on obtient, en tenant compte de la variation de la densité avec la température:

$$h = \frac{H}{1 + \frac{T_e}{T_i} \left(A_1 / A_2 \right)^2} \quad (1.21)$$

On remarque que cette hauteur dépend du rapport des aires des ouvertures. Le niveau neutre tend à se rapprocher de l'ouverture la plus grande. A la limite, si l'une des ouvertures est nettement plus grande que l'autre, le niveau neutre se situera dans l'ouverture la plus grande. Dans ce cas, cette ouverture sera traversée par un double flux d'air. Par exemple, l'air frais entrera par le bas et sortira par le haut. La hauteur du niveau neutre étant connue, et l'on obtient le débit d'air dans un volume ventilé par deux ouvertures, en particulier dans une cheminée dont les pertes de charges seraient négligeables :

$$\dot{m} = \rho_i A_2 C_d \sqrt{\frac{2 g H \left(\bar{T}_i - T_e \right)}{T_i + T_e \left(A_1 / A_2 \right)^2}} \quad (1.22)$$

Où l'on a admis que les deux ouvertures présentant le même coefficient de décharge. Ici, T_i est la température de l'air sortant du volume et T_e est la température moyenne dans le volume. Si la ventilation a lieu au travers d'une ouverture unique (figure 1.12), le niveau neutre se situe approximativement à mi-hauteur de cette ouverture. Si H est la hauteur de l'ouverture et W sa largeur, le débit massique se calcule par :

$$\dot{m} = \frac{1}{3} \rho_{\text{ext}} H W C_d \sqrt{\frac{g H (T_i - T_e)}{T_e}} \quad (1.23)$$

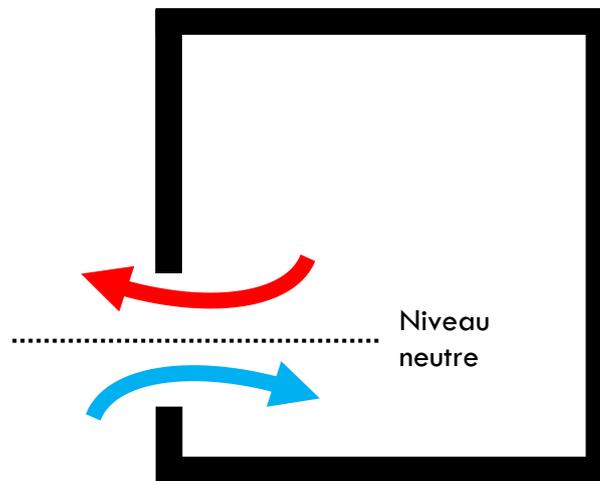


Figure 1.12. Entrée d'air unique.

1.6. Conclusions

Cette étude bibliographique nous a permis de faire comprendre certains aspects aux concepteurs pour mieux gérer et favoriser une ambiance thermique adéquate. On s'est intéressé à la physique du bâtiment tout en visant les questions attrayantes du climat intérieur. Comprendre les concepts physiques de base qui permettent le contrôle de l'ambiance et du confort va permettre aux propriétaires d'accroître l'efficacité énergétique des constructions, maîtriser les espaces de vie intérieurs, l'hygiène, et les effets de la chaleur et d'humidité.

En Algérie, la consommation énergétique d'un logement représente une dépense annuelle étonnante. Le chauffage et la climatisation constituent les foyers de dépenses les plus importants. Faisant suite à cette recherche bibliographique et selon le contexte énergétique, il nous semble qu'il faudra

utiliser des méthodes fiables pour maîtriser la consommation énergétique, grâce à des équipements moins gourmands en énergie, mais aussi grâce à des habitudes plus responsables. Les énergies renouvelables doivent être au cœur du processus de transition énergétique.

La modélisation des transferts thermiques et aérauliques nécessite la prise en considération de tous les paramètres structuraux et physiques qui influent sur le comportement thermique de la bâtisse. Dans un premier temps, ce chapitre aborde les méthodes de modélisation énergétique, ceci afin d'exposer les fondements théoriques dans la modélisation et de bien assimiler les hypothèses qui en découlent. Nous donnerons une importance particulière aux modèles thermiques dans les prochains chapitres.

Références

1. Christoph, Z., Thomas, F., Physique du bâtiment construction et énergie, 4ème édition de l'ouvrage en allemand : ISBN 978-3-7281-3445-5. 1ère édition en 2014.
2. Nicol, F., Hacker, J., Spires, B., Davies, H., Suggestion for new approach to overheating diagnostics, Proceedings of conference: Air conditioning and the low carbon cooling challenge, Network for comfort and energy use in buildings, Windsor, UK, 2008.
3. Barbason, M., La simulation thermo-aéraulique du bâtiment validation et développement d'une approche couplée CFD-Multizone pour l'étude de la modélisation du phénomène de surchauffe estivale en Belgique, Doctorat en Sciences de l'Ingénieur Université de Liège, Liège, Belgique Année académique 2014-2015.
4. Nicolas, M., Edgard, G., Architectural et construit énergétique du bâtiment, nouvelle édition du cours, Section de Génie Civil, 4ème/5ème année, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, faculté d'environnement naturel, architectural et construit, Septembre 2008.
5. Thiers, S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2008.
6. Lefebvre, G., Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse, Doctorat en physique, Université Pierre et Marie Curie, Groupe Informatique et Systèmes Énergétiques (GISE), Unité de recherche commune à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, École des Mines de Paris-CENERG, 1994.
7. Berger, J., Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments: Application des méthodes de réduction de modèle, Doctorat en Génie Civil et Sciences de l'Habitat, Université de Grenoble, Décembre 2014

8. Hersoug, L., G., Viruses as the causative agent related to dampness and the missing link between allergen exposure and onset of allergic disease. *Indoor air*, 15 (5): 363–366.
9. Saïfi, N., Contribution à la conception des bâtiments a faible consommation d'énergie dans les zones arides, Thèse de Doctorat, Département de Génie des Procédés, Université Kasdi Merbah Ouargla, Janvier 2015.
10. Djelloul, A., Draoui, B., Moumami, N., Simulation du comportement énergétique des bâtiments résidentiels au sud algérien, *Courrier du Savoir* N° 17, Université Mohamed Khider de Biskra, pp.113-119, Décembre 2013.
11. Foura, S., Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie, Thèse de Doctorat, Université de Mentouri, Constantine 2007.
12. APRUE, Agence nationale pour la promotion et rationalisation de l'utilisation de l'énergie, Consommation énergétique finale de l'Algérie, 2012.
13. Abderamane, C., Bioclimatisation et confort thermique: analyse de la conception du bâtiment à partir du logiciel Comfie + Pleiades, p. 10, 2011.
14. Alain Liébard, A., D., H., *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*, 2006.
15. Benhalilou, K., Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment cas du climat semi-aride, Université de Mentouri Constantine, 2008.
16. Cherier, M., K., L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat En Sciences, Spécialité : Énergies Renouvelables, Université de Tlemcen, Juin 2018.
17. Thermal comfort, 2015, https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_comfort.
18. Wolkoff, P., Kjærgaard, S., K., The dichotomy of relative humidity on indoor air quality, *Environ. Int.*, vol. 33, no. 6, pp. 850–857, 2007.
19. Enescu, D., A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. May, pp. 1353–1379, 2017.
20. Karnopp, D., C., Margolis, D., L., Rosenberg, R., C., *System Dynamics: Modeling and simulation of mechatronic systems*, 4^{eme} edition, Wiley, 2005.
21. Krüger, E., Givoni, B., Predicting thermal performance in occupied dwellings, *Energy and Buildings*; 36 (2004) 301- 307.
22. Givoni, B., Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures, Part I: 1993 experimental periods, *Energy and Buildings*; 28 (1998) 25–32.
23. Merabtine, A., Modélisation Bond Graphs en vue de l'Efficacité Énergétique du Bâtiment, Thèse pour obtenir le grade de Doctorat d'Université Discipline : Génie des Procédés et des Produits, Université de Lorraine Faculté des sciences et Technologies, École Doctorale (sciences et ingénierie) Ressources, Procédés, Produits et Environnements (RP2E), Nancy le 19 Novembre 2012.

24. Freire, R., Z., Oliviera, G., H., C., Mendes, N., Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings, *Energy and Buildings*; 40 (2008) 810-820.
25. Fernández-González, A., Kako, I., K., Empirically derived formulas to predict indoor maximum, average and minimum temperatures in roof pond buildings using minimum climatic information, *The Solar 2010 conference proceedings*.
26. Singh, M., K., Muhapatra, S., Atreya, S., K., Givoni, B., Thermal monitoring and indoor temperature modelling in vernacular buildings of North-East India. *Energy and Buildings* 42 (2010) 1610-1618.
27. Chlela, F., Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie. Thèse de Doctorat : Université de La Rochelle 2008.
28. Goupy J. Les plans d'expériences. *Revue MODULAD* 2006.
29. Filfli, S., Optimisation Bâtiment : Système pour minimiser les consommations dues à la climatisation, Thèse de Doctorat : École des mines de Paris, 2006.
30. Jaffal, I., Inard, C., Ghiaus, C., Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments. *Energy and Buildings*; 41(2009) 669-677.
31. Wang, L., Chen, Q., Theoretical and numerical studies of coupling multizone and CFD models for building air distribution simulations, *Indoor Air* 17(5) (2007) 348-61.
32. Song, F., Zhao, B., Yang, X., Jiang, Y., Gopal, V., Dobbs, G., Sahm, M., A new approach on zonal modeling of indoor environment with mechanical ventilation, *Building and Environment*; 43(3) (2008) 278-86.
33. Chen, Q., Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications, *Building and Environment*; 44(4) (2009) 848-58.
34. Wurtz, E., Mora, L., Inard, C., An equation based simulation to investigate fast building simulation, *Building and Environment*; 41 (2006) 1571-1583.
35. Jiru, T., E., Haghghat, F., Modeling ventilated double skin façade, a zonal approach, *Energy and Buildings*; 40 (8) (2008) 1567-1576.
36. Norton, T., Sun, D., W., Computational fluid dynamics (CFD), an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review, *Trends in Food Science and Technology*; 17(2006) 600-20.
37. Norton, T., Sun, D., W., Grant, J., Fallon, R., Dodd, V., Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review, *Bio-resource Technology*; 98 (12) (2007) 2386-2414.
38. Guyot, G., Carrié, F., R., Modélisation des transferts aérauliques en situation de confinement, *Bases théoriques et éléments de validation*, CETE de Lyon, 2011.
39. Boyer, H., Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones, proposition d'un outil à choix multiple des modèles, Doctorat en Génie Civil et Sciences de la Conception, l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Décembre 1993.

Modélisation thermo-aéraulique des bâtiments & Etude de cas

Chapitre 2 : Modélisation thermo-aéraulique des bâtiments & Etude de cas

2.1. Introduction

Dans les structures bâties, la majorité des phénomènes physiques semblent simples en apparence, mais ils sont réellement très complexes. Ces phénomènes sont couramment liés à l'humidité, à la température et/ou aux mouvements d'air. Cependant, un modèle thermo-aéraulique fiable peut nous donner la possibilité de les étudier. Le modèle qui va être proposé nous permet de prédire les résultats en utilisant un bilan sensible et un bilan latent.

De nos jours, de nombreux modèles existent pour appréhender le comportement des bâtiments. Certains sont mis à profit pour des applications technologiques ou pour aider les concepteurs à respecter des standards réglementaires. D'autres sont utilisés à des fins plus fondamentales d'amélioration des connaissances [1]. Les modèles décrivant le comportement thermique dynamique des bâtiments permettent de mieux comprendre et concevoir l'enveloppe passive "c'est-à-dire : avant l'équipement avec une installation de climatisation" en vue d'obtenir de moindres consommations énergétiques et un plus grand confort, de prédire la réponse du bâtiment à des situations extrêmes afin de dimensionner les installations et, enfin, d'aider à mettre au point de nouveaux systèmes (composants) ou stratégies de contrôle (chauffage intermittent, commande optimale, etc.) [2].

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. Leur utilisation dépend principalement des étapes de la conception du projet. Cette modélisation va nous décrire l'évolution des principaux paramètres du confort (température et humidité) dans l'espace habitable en été et en hiver.

En fait, il est légitime de disposer des méthodes numériques permettant de calculer très rapidement ces grandeurs. 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.

Dans un bâtiment, les transferts d'énergie prennent principalement la forme de transferts de chaleur et de matière. Ces transferts ont pour origine la tendance naturelle de la chaleur à transiter des zones chaudes vers les zones froides. L'air va se déplacer donc des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Par ailleurs, la vapeur d'eau va migrer des zones les plus humides vers les plus sèches. Les modes de transfert de chaleur dite sensible sont classiquement la conduction, la convection et le rayonnement. La chaleur dite latente est mise en jeu au cours des changements de phases d'un corps, l'eau et sa vapeur pour ce qui concerne le bâtiment.

2.2. Les hypothèses

Les modèles existants diffèrent les uns des autres par l'approche de modélisation et l'importance des hypothèses. D'ailleurs dans la littérature, certains modèles sont plus ou moins raffinés et reposent tous sur des hypothèses plus ou moins fortes. Le présent chapitre aborde les phénomènes de transferts thermo-aérauliques à l'intérieur d'un espace habitable. L'objectif est d'exposer et comprendre les fondements théoriques des formulations mathématiques utilisées et de bien assimiler les hypothèses qui en découlent. Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- Le transfert de chaleur est unidirectionnel et perpendiculaire aux parois opaques
- L'air est considéré comme gaz transparent parfait
- Le transfert convectif de l'air est naturel
- Les propriétés thermo-physiques des matériaux de construction sont constantes et indépendantes des conditions météorologiques.

- La température de l'air à l'intérieur des zones est supposée uniforme (utilisation de la méthode nodale)
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour les radiations de grandes longueurs d'ondes.
- La contribution de l'apport énergétique interne dû à l'occupant et/ou d'autres gains internes est négligeable

Notre modèle s'affranchit de quelques hypothèses simplificatrices établies par d'autres modèles de la littérature.

Ces modèles (de la littérature), bien qu'ils reposent sur différentes approches, un nombre important considère tous les régimes de transfert quasi-stationnaires et néglige dans l'ensemble l'effet des transferts hydriques sur la prédiction du comportement thermique [3].

2.3. Bilan enthalpique

En supposant qu'une zone i est en contact avec $N+1$ autres zones, $N=0$ indique la zone extérieure. La variation d'enthalpie par unité de temps pour la zone i est donnée comme suit [4-8] :

$$\frac{dH(i)}{dt} = \frac{dH^{entr}(i)}{dt} - \frac{dH^{sort}(i)}{dt} + Q_{ij} + P_L + P_S + CI_L + CI_S \quad (2.1)$$

$H^{entr}(i)$: Enthalpie de la masse d'air humide entrant dans la zone i (J),

$H^{sort}(i)$: Enthalpie de la masse d'air humide quittant le zone i (J),

P_S, P_L : Puissances sensibles et latentes, fournies par la climatisation (W),

CI_S, CI_L : Puissances sensibles et latentes internes dues aux appareils, aux occupants, à l'éclairage...etc. (W). Selon les hypothèses, elles sont nulles.

$$H^{entr}(i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n,i) (T_{air}(n) C_{mas} + r_s(n)) (L_v + C_v T_{air}(n)) \quad (2.2)$$

$Q_{mas}^{trans}(n,i)$: Débit massique de transition de l'air de la zone n à la zone i (kg/s),

$T_{air}(n)$: Température de l'air de la zone n = température de l'air entrant dans la zone i (K),

C_{mas} : Capacité calorifique de la masse d'air ($J Kg^{-1} K^{-1}$),

$r_s(n)$: Humidité spécifique ou teneur en eau de l'air de la zone n = humidité de l'air entrant dans la zone i : par définition la masse de vapeur d'eau contenue dans l'unité de masse d'air sec ($\text{kg}_{\text{vap}}/\text{kg}_{\text{mas}}$ ou en %),

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J Kg^{-1}),

C_v : La capacité thermique à volume constant ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

$$H^{\text{sort}}(i) = \sum_{n=0}^N Q_{\text{mas}}^{\text{trans}}(i, n) (T_{\text{air}}(i) C_{\text{mas}} + r_s(i)) (L_v + C_v T_{\text{air}}(i)) \quad (2.3)$$

$Q_{\text{mas}}^{\text{trans}}(i, n)$: Débit massique de transition de l'air de la zone i à la zone n (kg/s),

Q_{ij} : Expression des flux convectifs échangés entre les surfaces j de température

$T_{s_{ij}}$ de la zone i et l'air de cette zone de température T_{air} (W).

$$Q_{ij} = \sum_{j=1}^{j=m} S_j h_{cij} (T_{\text{air}}(i) - T_{s_{ij}}(i)) \quad (2.4)$$

$T_{s_{ij}}(i)$: Température de surface j dans la zone i (K), elle peut être calculée en établissant le bilan thermique des murs.

S_j : Surface incluses dans la zone i (m^2),

m : Nombre total des surfaces intérieures (murs, portes et fenêtres) dans la zone i . Les coefficients de transfert convectif utilisés dus aux échanges thermiques entre l'air ambiant et les parois intérieures sont donnés comme suit:

- Pour une paroi verticale [4, 9]

Si le régime d'écoulement est laminaire, c'est à dire $10^4 < Gr Pr < 10^9$

$$h_{\text{Conv}} = 1.42 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (2.5)$$

En cas d'un régime turbulent : $Gr Pr > 10^9$,

$$h_{\text{Conv}} = 1.31 (\Delta T/L)^{1/3} \quad (2.6)$$

- Pour une surface supérieure d'une plaque horizontale chaude ou une surface inférieure d'une plaque froide [8, 9]

Si le régime d'écoulement est laminaire, c'est à dire $10^4 < Gr Pr < 10^9$

$$h_{\text{Conv}} = 1.32 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (2.7)$$

En cas d'un régime turbulent : $Gr Pr > 10^9$,

$$h_{Conv} = 1.52 (\Delta T/L)^{1/3} \quad (2.8)$$

- Pour une surface inférieure d'une plaque chaude ou une surface supérieure d'une plaque froide et pour les deux régimes d'écoulement [8, 9]

$$h_{Conv} = 1.59 (\Delta T/L)^{1/4} \quad (2.9)$$

2.4. Bilan massique

En thermique du bâtiment, les variations de la masse d'air dm_{as}/dt représentent des quantités faibles, ce qui nous permet de simplifier l'équation de conservation de la masse d'air dans la zone i selon la relation suivante:

$$\sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n,i) - Q_{mas}^{trans}(i,n) = \frac{dm_{as}}{dt} \approx 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(n,i) = \sum_{n=0}^N Q_{mas}^{trans}(i,n) \quad (2.10)$$

La somme des débits massiques d'air sec entrant dans la zone i égale à la somme des débits sortant de la zone i . Cette équation permet de simplifier les bilans enthalpiques [10, 11].

L'équation du bilan enthalpique s'écrit par l'équation 2.11:

$$H(i) = H_{Sens}(i) + H_{Lat}(i) = m_{as} C_{as} T_{air}(i) + m_{as} r_s(i) (L_v + C_v T_{air}(i)) \quad (2.11)$$

Le terme $m_{as} r_s(i) C_v T_{air}(i)$ est très faible par rapport à la quantité $m_{as} r_s(i) L_v$, $L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ et $C_v = 1.96 \text{ kJ/kg K}$, ceci dit que les expressions des enthalpies sensible et latente vont être rapprochées par respectivement les équations 2.12 et 2.13:

$$H_{Sens}(i) \approx m_{as} C_{as} T_{air}(i) \quad (2.12)$$

$$H_{Lat}(i) \approx m_{as} r_s(i) L_v \quad (2.13)$$

2.5. Bilan sensible

Faisant suite à ces approches, la variation d'enthalpie peut donc être assimilée à une variation des températures [10, 11]:

$$\frac{dH_{Sens}(i)}{dt} = \frac{d(m_{as} C_{as} T_{air}(i))}{dt} = C_{as} \frac{dm_{as}}{dt} T_{air}(i) + C_{as} \frac{dT_{air}(i)}{dt} m_{as} \quad (2.14)$$

$$\frac{dH_{Sens}(i)}{dt} = \frac{dH_{Sens}^{entr}(i)}{dt} - \frac{dH_{Sens}^{sort}(i)}{dt} + Q_{ij} + P_S + CI_S \quad (2.15)$$

$$\rho_{as} C_{as} V(i) \frac{dT_{air}(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) C_{as} (T_{air}(n) - T_{air}(i))] + Q_{ij} + P_S + CI_S \quad (2.16)$$

Les températures de l'air dans toutes les zones peuvent être déduites de l'équation 2.16. Les températures de surface T_{sij} peuvent être obtenues en établissant le bilan thermique des murs. Le système d'équations différentielles ordinaires obtenu sera en interaction directe avec le modèle de conduction décrit en détail dans la section 2.6.

2.6. Bilan latent

En négligeant le terme dm_{as}/dt , et à l'aide de l'équation de conservation simplifiée de la masse d'air sec, nous obtenons l'équation 2.17 suivante [10, 11]:

$$\frac{H_L(i)}{dt} = \frac{dH_L^{entr}(i)}{dt} - \frac{dH_L^{sort}(i)}{dt} + P_L + CI_L \quad (2.17)$$

Sachant que :

$$m_{as}(i) = \frac{V(i)}{v_s(i)} \quad (2.18)$$

$V(i)$: Volume de la zone i (m^3)

$v_s(i)$: Volume spécifique de l'air humide dans la zone i (m^3)

On peut par la suite avoir l'expression suivante :

$$\frac{dH_L(i)}{dt} = \frac{d(m_{as} r_s(i) L_v)}{dt} = L_v \frac{dm_{as}}{dt} r_s(i) + L_v \frac{dr_s(i)}{dt} m_{as} \quad (2.19)$$

En faisant une concordance entre les équations 2.1 et 2.19, nous obtenons l'équation suivante:

$$m_{as}(i) \frac{dr_s(i)}{dt} = \sum_{i=0}^N [Q_{mas}^{trans}(i, n) (r_s(n) - r_s(i))] + \frac{P_L}{L_v} + \frac{CI_L}{L_v} \quad (2.20)$$

Comme pour le bilan sensible, nous obtenons un système de N équations avec N inconnus, chaque équation représente les humidités spécifiques de l'air de chaque zone. Par ailleurs, il est à noter que la formule empirique de Nadeau et Puiggali [9-11] permettra de définir la relation entre l'humidité spécifique (la teneur en eau ou l'humidité absolue) et l'humidité relative:

$$r_s = \frac{0.622 P_{sat}(T) H_r}{101325 - P_{sat}(T) H_r} \quad (2.21)$$

H_r : Humidité relative (%)

P_{sat} : Pression de vapeur saturante (Pa)

2.7. Modèle de conduction

Le modèle est basé sur une approche qui permet de représenter le système multicouche par un modèle proposé par Rumianowski et al [8, 13] en 1989 et repris par Con et al en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud à l'intérieur d'un mur. La figure suivante est une illustration du principe de décomposition.

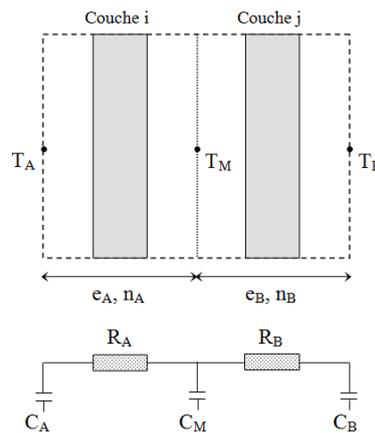


Figure 2.1. Modèle de conduction pour une paroi opaque

Les résistances équivalentes sont calculées par les formules suivantes [8, 13]:

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (2.22)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (2.23)$$

$$n = n_A + n_B \quad (2.24)$$

e : Epaisseur (m)

n : Nombre de nœud

λ : Conductivité thermique ($W K^{-1} m^{-1}$)

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit [8, 13]:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad (2.25)$$

$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j \delta_j \quad (2.26)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (2.27)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \quad (2.28)$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \quad (2.29)$$

C_p : Chaleur spécifique ($J kg^{-1} K^{-1}$)

ρ : Densité volumique ($kg m^{-3}$)

Le bilan énergétique correspondant des murs est représenté par les équations suivantes [8, 13]:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{Surf-i} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{conv} (T_{air} - T_A) \quad (2.30)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{\text{Sol_ext}}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{\text{ciel}}^4 - T_B^4) + S h_{\text{cv_amb}} (T_{\text{amb}} - T_B) \quad (2.31)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = - \frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (2.32)$$

σ : Constante de Stefan-Boltzmann égale à $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$,

G : Eclairage global incident sur les différentes surfaces en contact avec l'ambiance extérieure (W m^{-2}),

α : Coefficient d'absorption,

ε : Émissivité thermique,

$F_{\text{Surf-i}}$: Facteur de forme entre les surfaces d'échange à l'intérieur de la zone thermique,

h_{conv} : Coefficient de transfert convectif entre les surfaces d'échange et l'air ambiant à l'intérieur de la zone thermique ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$),

$h_{\text{cv-amb}}$: Coefficient de transfert convectif entre les surfaces d'échange et l'air ambiant à l'extérieur ($\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$).

Nous utilisons les formules définies ci-dessous pour déterminer la température du ciel (équation 2.33) et le coefficient de transfert convectif entre les surfaces d'échange et l'air ambiant à l'extérieur (équation 2.34) :

$$h_{\text{cv-amb}} = 2.8 + 3.3 V_{\text{vent}} \quad (2.33)$$

$$T_{\text{Ciel}} = 0.0552 T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (2.34)$$

V_{vent} : Vitesse du vent (m s^{-1})

T_{amb} : température de l'air ambiant extérieur (K)

2.8. L'humidité relative et l'humidex

A l'extérieur, l'humidité est extrêmement variable dans le temps et dans l'espace car elle dépend de phénomènes très aléatoires comme les précipitations, les vents, les évaporations... Un vent océanique peut transporter une masse importante d'humidité qui sera balayée quelques heures plus tard par

un vent continental sec... A l'intérieur, la présence d'humidité est plus constante. Elle est produite par la respiration, la transpiration humaine, diffusée par les plantes, le linge qui sèche... L'humidité est simplement formée par les molécules d'eau présentes dans l'air qui parfois, lorsque l'air se refroidit s'agglutine, se condense pour former des brouillards, des nuages, des gouttes d'eau... L'air ne peut contenir qu'une certaine quantité d'eau à une température donnée, après quoi il y a saturation.

L'humidité est toujours relative à ce taux de saturation car la capacité de l'air à contenir de l'eau varie en fonction de sa température, plus l'air est chaud, plus il est agité et plus il peut contenir de vapeur d'eau, si l'air se rafraîchit, l'eau se condense en précipitations, ou bien en gouttelettes sur une surface plus froide. A 0 °C, 1 m³ d'air saturé (100% d'humidité) contient 7.7g d'eau, 15g à 10 °C, 28g à 20 °C, 50g à 30 °C, soit environ 3.5 % de la masse d'air. L'humidité relative varie de 0 à 100%. L'air est sec quand l'humidité relative est inférieure à 35%. L'air est moyennement humide entre 35 et 65%, et l'air est humide à plus de 65% d'humidité relative. À l'intérieur d'un même espace, l'humidité relative varie en fonction des changements de température : elle augmente si la température baisse et diminue si elle s'élève [14-15].

Pour avoir un ordre d'idée, dans la zone de confort (soit environ 20 degrés, 50 % d'humidité), une augmentation de un degré va provoquer une baisse de 2 à 3 % du taux d'humidité relative et inversement. Ce n'est qu'un ordre d'idée car les relations dans les diagrammes d'humidité sont faites de courbes [16].

A ne pas négliger que l'humidité ambiante provoque une augmentation de la consommation d'énergie et donc des coûts de chauffage. En effet, l'humidité présente dans l'air absorbe la chaleur et le chauffage doit fonctionner davantage pour compenser cette perte. Les dégâts provoqués par l'humidité peuvent diminuer la durée de vie du bâtiment et sa valeur. Si les choses vont trop loin, en plus des dégâts esthétiques, des dégâts structurels peuvent survenir. L'humidité peut jouer un rôle positif lorsqu'elle influence les microclimats intérieurs, elle accentue la sensation de fraîcheur et de chaleur de l'air : un air froid et

humide paraît beaucoup plus froid qu'un air froid et sec, un air chaud et humide plus chaud qu'un air chaud et sec. L'eau ayant une très bonne capacité de stockage énergétique sous forme de chaleur latente, la teneur en eau de l'air intérieur agit sur les sensations et le confort au sein d'une construction, un flux d'air humide peut par exemple apparaître rafraîchissant car il capte la chaleur sur son passage.

L'humidex est un indice qui est élaboré à partir de la combinaison de l'humidité et de la température. L'humidex permet d'évaluer l'intensité des conditions météorologiques supportées par les gens [17]. Un indice humidex de :

- Moins de 15, correspond à une sensation de fraîcheur ou de froid
- De 15 à 19, peu de gens sont incommodés
- De 20 à 29, sensation de bien-être
- De 30 à 34, sensation de malaise plus ou moins grande
- De 35 à 39, sensation de malaise assez grande. Prudence. Ralentir certaines activités en plein air
- De 40 à 45, Sensation de malaise généralisée. Danger. Éviter les efforts
- De 46 à 53, Danger extrême. Arrêt de travail dans de nombreux domaines
- Au-dessus de 54, Coup de chaleur imminent (danger de mort)

La formule actuelle de l'indice humidex a été développée au Canada en 1979 par J. M. Masterton et F. A. Richardson [18]. Son calcul est assez compliqué :

$$H = T + h \quad (2.35)$$

T : température relevée sous abri normalisé (°C)

$$h = 0.55 (e - 10) \quad (2.36)$$

e : tension de vapeur saturante telle que

$$e = 6.11 e^{(5417.7530((1/273.16) - (1/T_r)))} \quad (2.37)$$

Tr : température du point de rosée (°C)

Le point de rosée est une donnée thermodynamique caractérisant l'humidité dans un gaz. Le point de rosée de l'air est la température à laquelle la pression

partielle de vapeur d'eau est égale à sa pression de vapeur saturante. Il s'agit donc de la température à laquelle il faut refroidir un volume d'air, à pression et humidité constantes, pour qu'il devienne saturé. Pour calculer la température T_r , nous utilisons la formule d'Heinrich Gustav Magnus-Tetens [19]:

Domaine de validité :

T , température mesurée : $0\text{ °C} < T < 60\text{ °C}$

H_r , humidité relative : $1\% < R_H < 100\%$

T_r , point de rosée : $0\text{ °C} < T_r < 50\text{ °C}$

$$T_r = \frac{b \alpha(T, H_r)}{a - \alpha(T, H_r)} \quad (2.38)$$

Avec

$$\alpha(T, H_r) = \frac{aT}{b+T} + \ln(H_r) \quad (2.39)$$

$a = 17.27$ et $b = 237.7$ (°C).

2.9. Simulation et concordance avec les données expérimentales

2.9.1. Plan descriptif et propriétés de l'enveloppe

Afin de tester le modèle établi, notre étude s'est basée sur un espace bureau, avec une toiture terrasse d'une superficie qui se rapproche de 16 m^2 (figure 2.2) et une hauteur des murs de 3.5 m . La façade sud est vitrée à environ 8.12% , alors que la surface de la porte représente presque 13.75% de la façade nord. Le système constructif est un système poteaux poutres, les caractéristiques utilisées sont indiquées sur le tableau 2.1.

Cette partie va se consacrer à une étude expérimentale qui va nous permettre de décrire l'évolution des paramètres du confort à savoir : la température intérieure, l'humidité relative et l'humidex.

Dans un volume d'air, une pièce par exemple, l'air ne se répartie pas uniformément du sol au plafond. Il se superpose en strates selon la température intérieure. L'air chaud s'accumule naturellement vers le haut tandis que l'air plus froid stagne vers le sol. Pour notre cas, selon les mesures effectuées, la différence

de température peut atteindre 1 °C par 2 mètres de hauteur. Contrairement aux températures relevées sur un axe horizontal, la différence reste globalement faible, elle va atteindre extrêmement 0.2 °C. C'est pourquoi, pour tenir en compte le phénomène de stratification de l'air, l'obtention des données mesurées s'est achevée en utilisant quatre stations météorologiques calibrées de haute précision (figure 2.3) placées à différentes hauteurs. Les valeurs retenues correspondent aux moyennes de grandeurs mesurées. La collecte des données de l'environnement extérieure s'est effectuée par transmission.

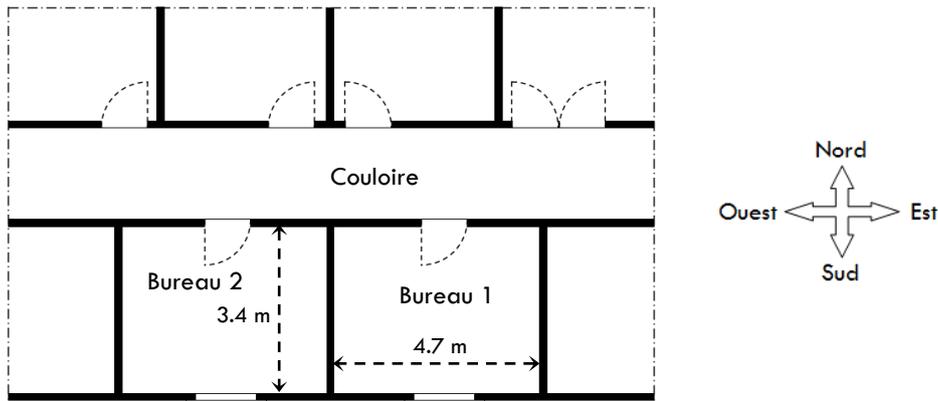


Figure 2.2. Plan descriptif de l'espace à étudier

	Matériaux et composition des murs	L (m)	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	Cp (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Murs extérieurs	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
Murs intérieurs	Mortier de ciment	0,015	1,41	1800	1000
	Plâtre argile	0,01	0,45	1200	840
	Pierre	0,15	2,3	2000	1000
	Plâtre argile	0,01	0,45	1200	1000
	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000
Sol	Carrelages	0,025	6,14	2300	875
	Ciment	0,02	1,4	1800	1000
	Béton dense	0,2	2,4	2400	800
Toiture	Plâtre	0,015	0,56	1400	1000
	Béton léger	0,12	0,33	800	719
	Mortier de ciment	0,015	1,4	1800	1000

Tableau 2.1. Propriétés et caractéristiques générales de l'enveloppe

2.9.2. Sollicitations climatiques extérieures

En fait, il est à noter que plusieurs auteurs, comme Liu et Jordan (1960) [20], Erbs et al. [21] ou Muneer (1990) [22] ou plus récemment Ruiz-Arias et al.

(2010) [23], ont proposé des méthodes pour décomposer le rayonnement global en composantes directe et diffuse. Ces dernières ont été établies empiriquement dans un nombre limité de stations sur des périodes de temps relativement restreintes [24].



Figure 2.3. Photos prises pour les stations météorologiques : anémomètre et Consoles

Pour le site de Ghardaïa, et en vue d'estimer les éclairagements solaires incidents sur les différentes surfaces, nous avons utilisé le modèle de Perrin Brichambaut qui est fréquemment favorable pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur un capteur horizontal [25]. Pour connaître à quelle heure et avec quelle intensité le soleil apparaîtra sur les parois planes de l'enveloppe du bureau, on s'est intéressé à l'évaluation des éclairagements solaires instantanés. Les courbes tracées sur les figures 2.4 et 2.5 sont respectivement relatives aux journées claires du 01 Janvier et 13 Juin 2015.

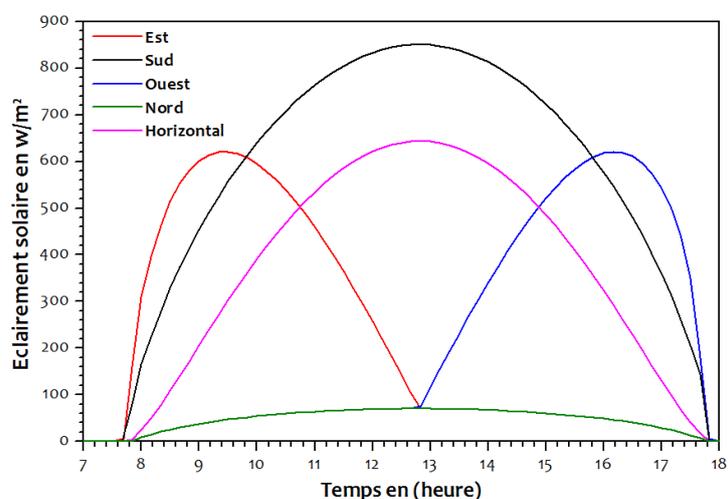


Figure 2.4. Eclairement solaire incident sur les parois planes, Ghardaïa le 01 Janvier

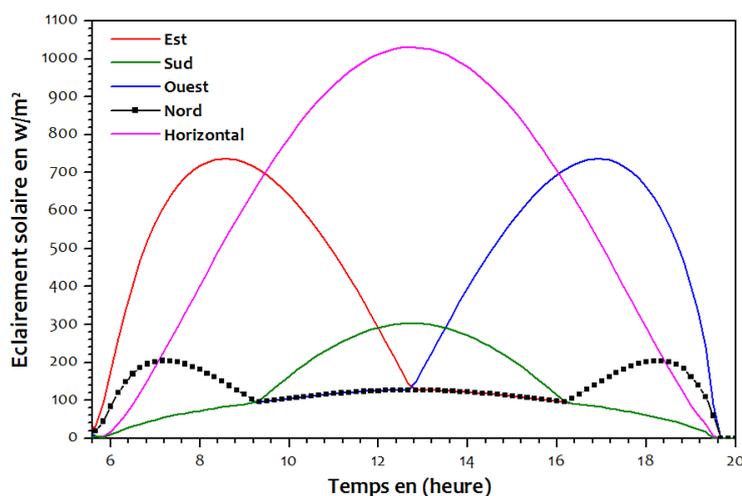


Figure 2.5. Eclairement solaire incident sur les parois planes, Ghardaïa le 13 Juin

D'après les figures, on a pu constater qu'en hiver, la façade nord ne reçoit que du rayonnement diffus, en plus en raison de la faible hauteur du soleil, la façade sud reçoit le plus d'énergie car la surface plane du mur est plus proche du plan normal à l'angle d'incidence du rayonnement solaire. En été, un capteur horizontal reçoit le plus du soleil par rapport à une façade sud, alors que la façade nord reçoit, en plus du diffus, quelques rayonnements directs.

En effet, il est connu que les paramètres du confort sont en fonction de la température ambiante extérieure, de l'humidité de l'air et des conditions de vent. Pour cela, il est crucial de prendre en considération les conditions extérieures de l'édifice. Le choix s'est fixé sur deux périodes (estivale et hivernale), huit jours dans chacune. Les températures extérieures représentées en figures 2.6 et 2.7 ont montré qu'une influence importante peut s'achever sur le climat intérieur en raison des fortes amplitudes.

Le vent est aussi un des éléments les plus caractéristiques du climat. La vitesse du vent décrite pour ces journées est exprimée en kilomètre par heure (km/h). Les figures 2.8 et 2.9 indiquent sa force le long de ces deux périodes. Les figures indiquent que la vitesse du vent subit un comportement plus au moins compliqué, elle est parfois notable et parfois faible. 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

de l'air, comme de la grande roue, est circulaire. C'est un mouvement perpétuel : l'air monte et descend, il se réchauffe et se refroidit.

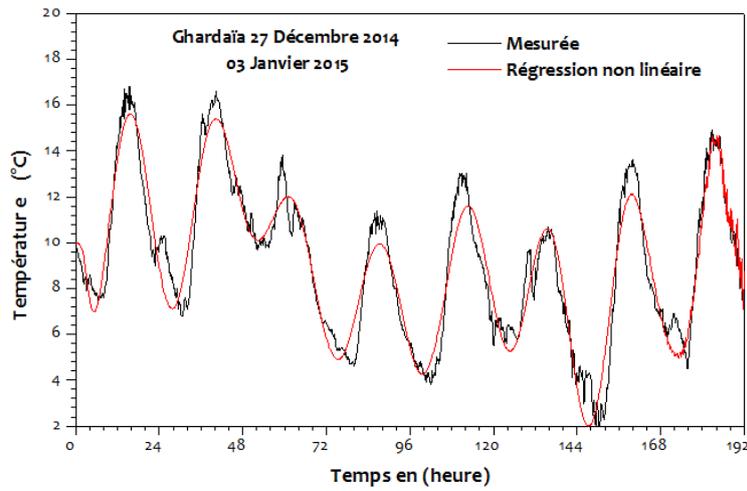


Figure 2.6. Température ambiante extérieure, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

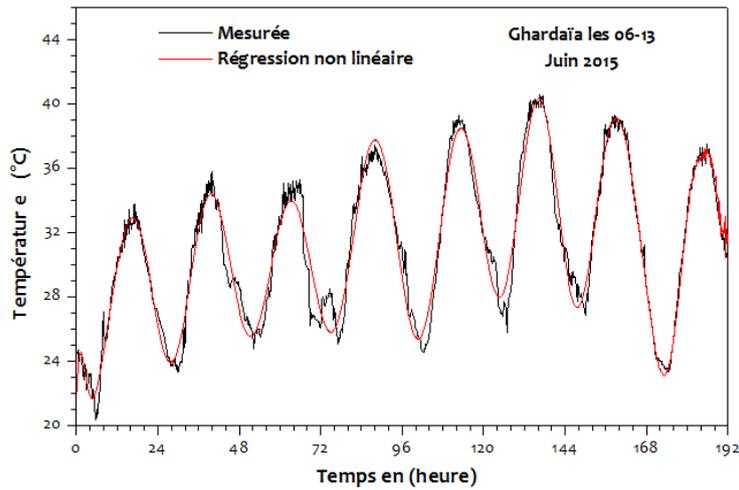


Figure 2.7. Température ambiante extérieure, 06 - 13 Juin 2015

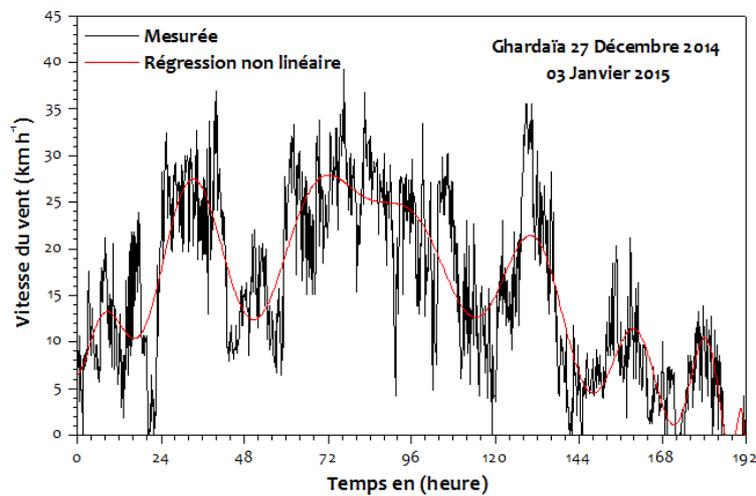


Figure 2.8. Vitesse du vent, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

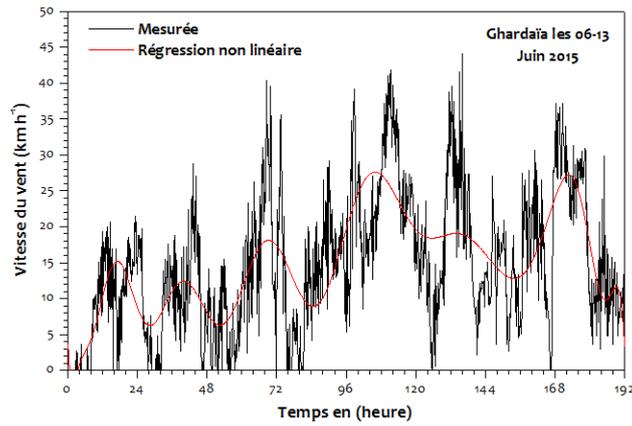


Figure 2.9. Vitesse du vent, 06 - 13 Juin 2015

Le degré hygrométrique de l'air ambiant extérieur est par définition la capacité de l'air à contenir de l'eau qui varie en fonction de sa température. L'humidité relative de l'air extérieur est un facteur du confort à ne pas négliger surtout au moment d'une ventilation. Les figures 2.10 et 2.11 donnent un aperçu sur le comportement de ces courbes.

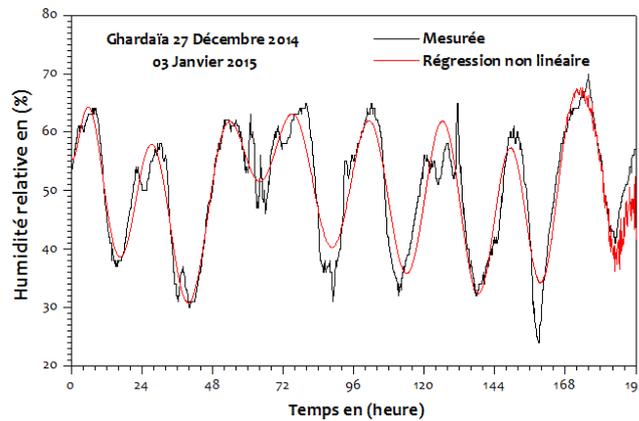


Figure 2.10. Humidité relative, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

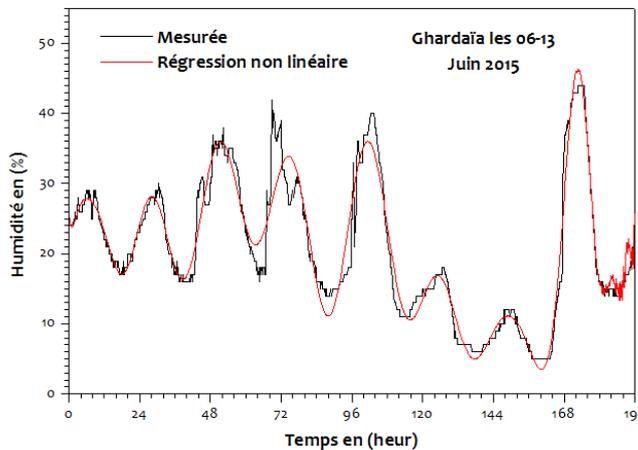


Figure 2.11. Humidité relative, 06 - 13 Juin 2015

On peut tirer de ces courbes que l'humidité relative ambiante est inversement proportionnelle par rapport à la température extérieure. Les valeurs varient de 5 à 45% pour les jours chauds et elles sont entre 25 à 70% pour les trois journées du mois de décembre.

2.9.3. Etude comparative et évaluation des paramètres du confort

Sauf exceptions, chaque bâtiment est un prototype unique pour lequel l'étude expérimentale de sa conception est irréalisable en pratique. Par conséquent, l'évaluation de ses performances thermo-aérauliques doit être assistée par la modélisation des phénomènes physiques. La modélisation et la simulation sont devenues des outils très utilisés pour répondre à des besoins de dimensionnement de l'enveloppe en terme d'efficacité énergétique d'un bâtiment ainsi pour guider les stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-aéraulique des bâtiments multizones [26].

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 [27]. L'objectif de ce travail est donc de comparer nos résultats avec les valeurs réelles mesurées. En priorité, nous voulons tester notre proposition afin d'aboutir à un outil d'aide fiable, permettant d'analyser la propagation du flux de chaleur et de l'humidité à l'intérieur d'un espace bureau. La crédibilité numérique de cet outil intégré doit également être assurée afin de permettre son utilisation pratique. Nous avons choisi le logiciel MATLAB car il présente l'avantage de posséder une bibliothèque intéressante.

Les courbes des figures 2.12 et 2.13 apportent des précisions sur les températures à l'intérieur des bureaux, qui peuvent donner des analyses qualitatives fines. Le comportement général de la température intérieure de l'air du bureau indique que cette dernière n'est pas formellement différente de celle mesurée. Il nous apparaît que les modèles reproduisent de manière acceptable la réalité physique des phénomènes. Un mur épais en pierre lourde ralentit, par son inertie, le transfert de chaleur.

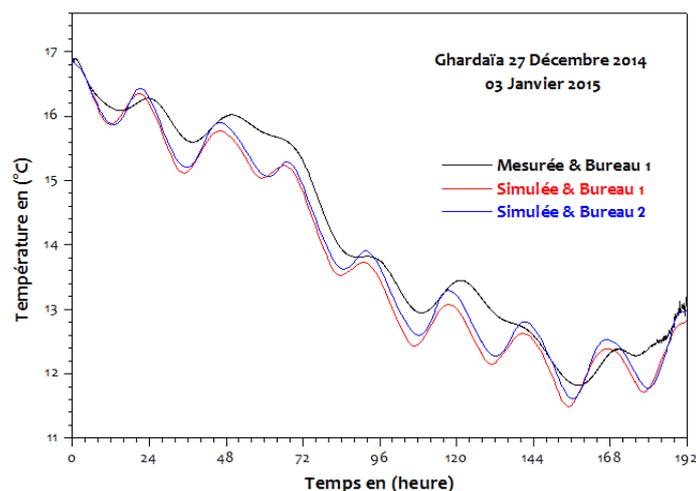


Figure 2.12. Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

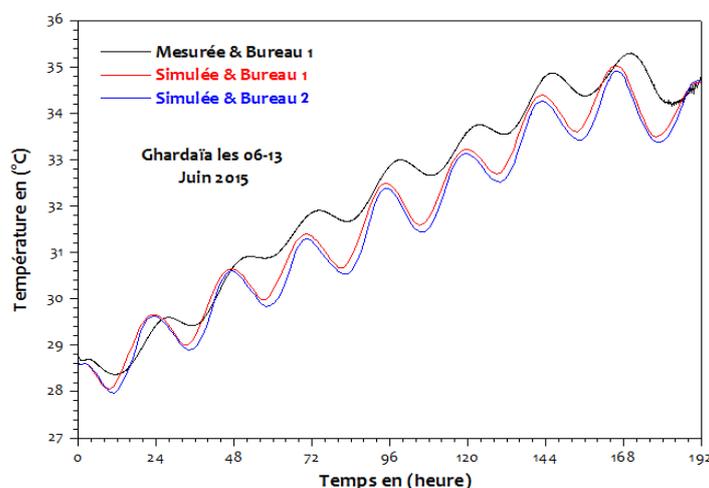


Figure 2.13. Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015

Ces murs engendrent un déphasage qui permet aux fluctuations des températures de s'introduire la nuit puis se restituer la journée. L'inertie thermique est le potentiel de stockage thermique d'un local ou d'une maison. Le déphasage est considéré parfois comme un atout pour le confort estival car il retarde le transfert de chaleur à travers les murs dans la journée. Plus un matériau est isolant plus il déphase, c'est logique car la chaleur se déplace lentement dans celui-ci. Dans les deux cas, les simulations montrent des surchauffes et une baisse des températures persistantes dues à l'absence d'une isolation thermique performante de l'ensemble des éléments de construction. Il est bon de rappeler que l'investissement le plus rentable sera toujours l'isolation thermique. Mais quelles devront être les avantages de l'isolation ? Cette question sera traitée en

détail dans le chapitre 4. Nous allons arborer l'apport de cette technique sur le confort et donc sur les besoins énergétiques des habitations.

La variation de l'humidité relative est représentée sur les figures 2.14 et 2.15. Il apparaît que cette semaine froide correspond à une humidité intérieure maximale de l'ordre de 39%. D'autre part, sa valeur ne dépasse pas 26% durant la semaine du mois de juin. Ces valeurs faibles se justifient par l'absence des apports internes durant ces deux périodes. Donc les apports internes latents dus à l'occupant sont complètement absents en raison de l'absence de l'occupant de ce bureau durant ces deux périodes (congé). La diffusion de la chaleur latente alors n'existe pas, même le débit massique de l'air extérieur entrant dû aux infiltrations est faible (estimé à 10^{-3} Kg/s) par rapport au débit requis, ceci ne résulte pas un changement sensible de l'humidité relative intérieure en froid.

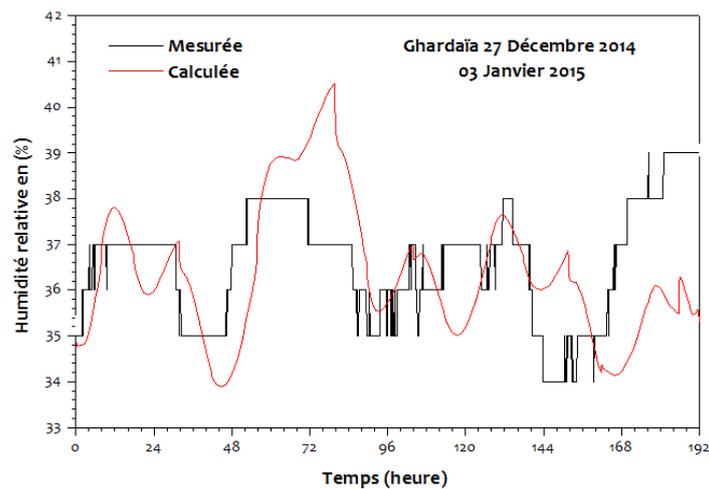


Figure 2.14. Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

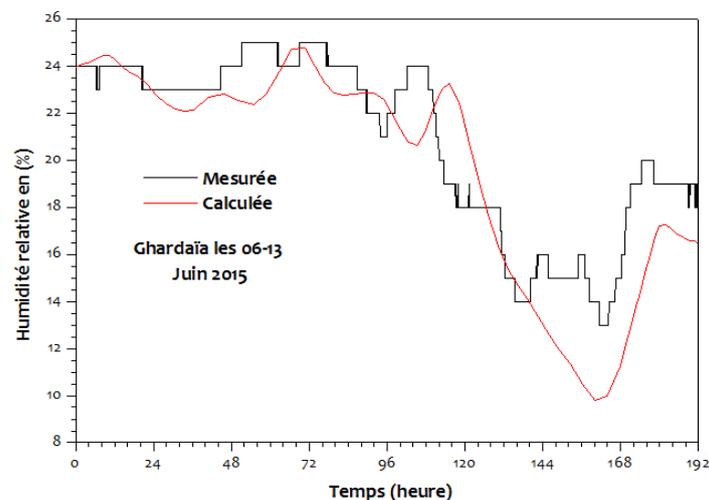


Figure 2.15. Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015

En effet, on peut déduire d'après les résultats que l'humidité relative intérieure est inversement proportionnelle par rapport à la température intérieure en période froide. Ceci est indiqué par la figure 2.16 qui dresse un exemple indicatif correspondant à la journée du 28 décembre 2014. On peut donc retenir que la teneur en eau de l'air ne subit pas une nette variation, la linéarité semble plus apparente pour d'autres journées. Contrairement à cette période, la variation de la teneur en eau de l'air durant la semaine du mois de juin est plus considérable, on peut la constater à travers la figure 2.16. Nous obtenons cette fois-ci un nuage de points pour la journée du 07 juin 2015. Ceci se justifie par le fait que le débit massique (estimé à 10^{-3} Kg/s) suffit pour influencer l'hygrométrie intérieure vu que les apports internes dus à la chaleur latente (des occupants et autres) sont nuls.

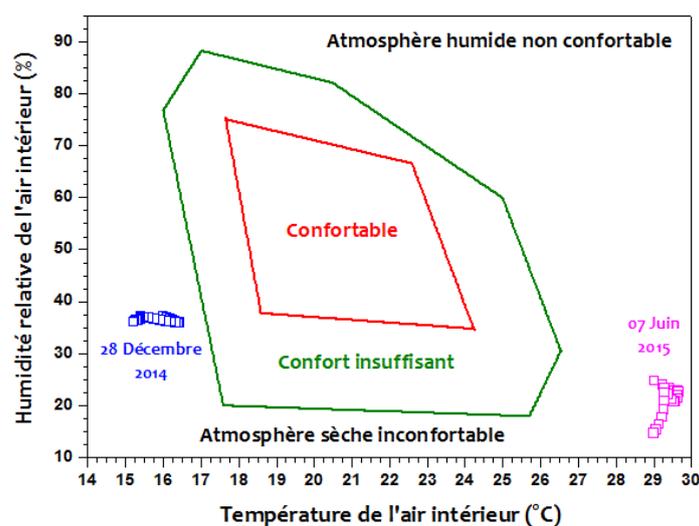


Figure 2.16. Plage du confort hygrothermique selon la norme DIN 1946-4:2008-12 [28]

En générale, il est connu que si la teneur en eau de l'air est fixe, nous obtenons une droite qui exprime la variation de la température en fonction de l'humidité relative, la linéarité est en conséquence totale. Dans le cas inverse, nous obtenons un nuage de points.

On peut par la suite envisager un calcul d'erreur pour évaluer les incertitudes $|\Delta T|$ et $|\Delta Hr|$ sur les grandeurs mesurées. Les incertitudes sur ces grandeurs mesurées sont petites par rapport aux grandeurs elles-mêmes

particulièrement pour la période hivernale. L'illustration de ces erreurs est indiquée en traçant les courbes des figures 2.17-2.18.

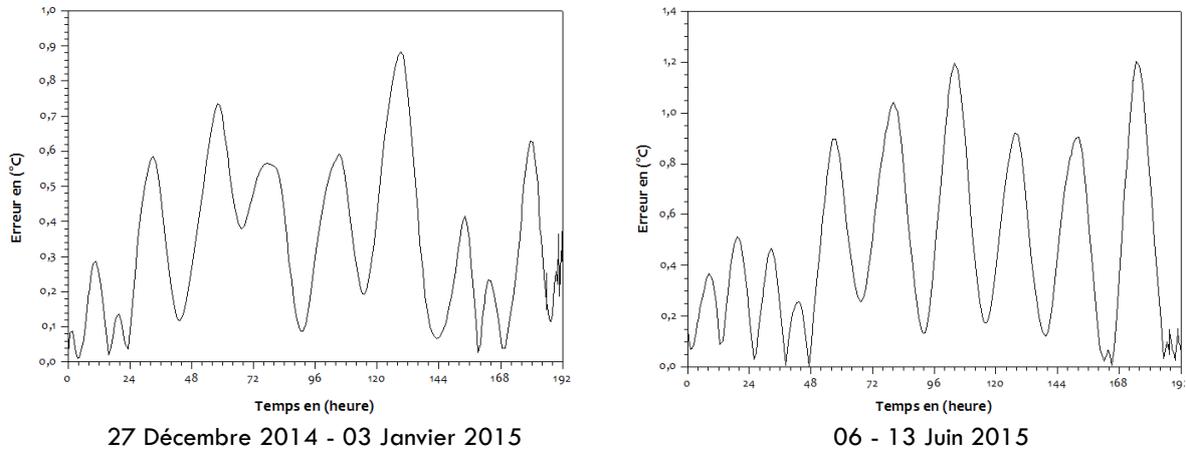


Figure 2.17. Erreur absolue $|\Delta T|$ commise sur la température de l'air

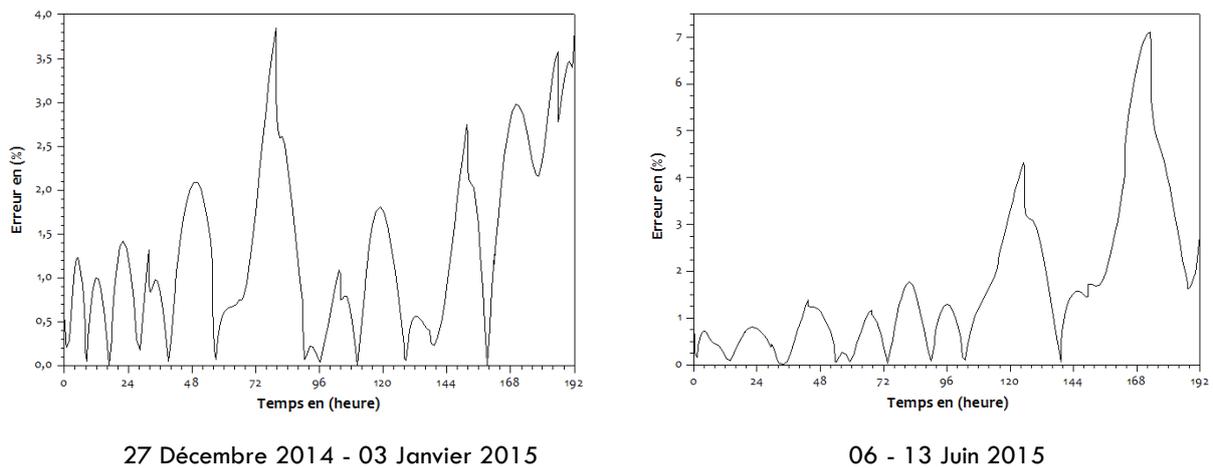


Figure 2.18. Erreur absolue $|\Delta Hr|$ commise sur l'humidité relative de l'air

En statistique, si la valeur de l'écart type est petite, ça signifie que la plupart des données sont plus proches à la valeur de la moyenne arithmétique, par contre, si les valeurs de l'écart type sont grandes, les valeurs sont divergentes puisqu'on parle ici du pourcentage d'humidité et de degré de température.

Nous remarquons d'après les données obtenues mentionnées sur le tableau 2.2 que les valeurs de l'écart type (σ) que se soit en été où en hiver sont applicables au premier cas et par la suite nous montrons que le modèle choisi pour calculer la variation de la température et de l'humidité est un modèle convainquant.

	Moy_Abs	Max_Abs	Min_Abs	Médiane	Ecart-Type (σ)
T-estivale ($^{\circ}\text{C}$)	0.4630	1.2035	7.245910^{-5}	0.3520	0.3446
T-hivernale ($^{\circ}\text{C}$)	0.3474	0.8839	0.0103	0.3211	0.2197
Hr-estivale (%)	1.7083	7.1067	0.0136	1.1833	1.6390
Hr-Hivernale (%)	1.3657	3.8448	0.0045	1.0670	1.0234

Tableau 2.2. Calcul d'erreurs sur les températures et l'humidité relative

Les courbes de la figure 2.19 décrivent la variation de l'indice humidex correspondant aux deux cas précédents.

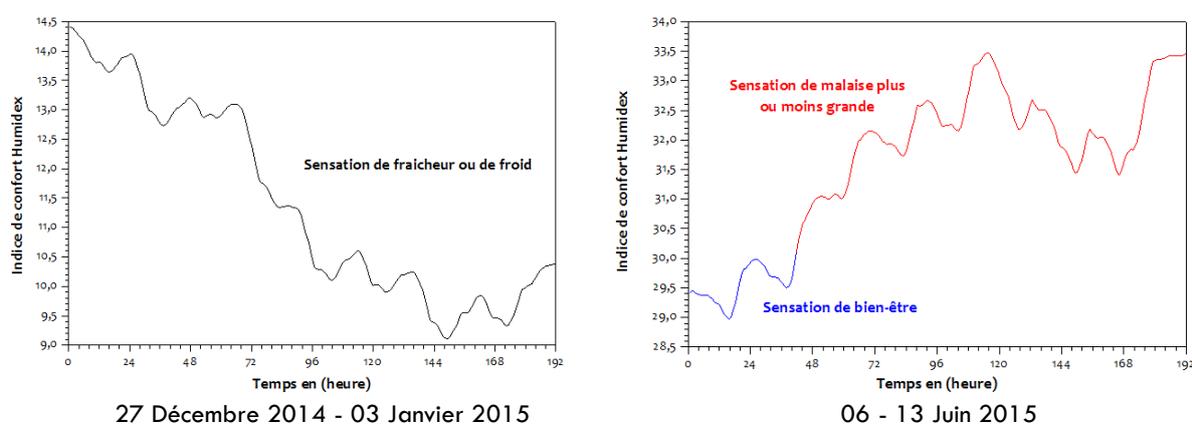


Figure 2.19. L'indice humidex à l'intérieur du bureau

Selon les résultats, il est remarqué qu'un certain inconfort en période chaude apparaît à partir du deuxième jour lorsque les valeurs de l'humidex dépassent 30. En période froide les valeurs sont en dessous de 15, ceci correspond à une sensation de fraîcheur ou de froid.

2.10. Conclusion

Une approche de modélisation de bâtiments multizones en climat saharien a été introduite dans ce travail. La méthode nodale a été utilisée pour déterminer le comportement thermo-aéraulique de l'air soumis aux sollicitations climatiques extérieures. La prédiction de l'humidité et la température de l'air est un pas en avant qui permet aux utilisateurs une bonne compréhension des paramètres du confort, avoir des solutions pour l'amélioration des performances de l'enveloppe du bâtiment et une correcte estimation des différents niveaux du confort.

Les bilans sensible et latent intègrent les phénomènes dans la modélisation thermo-aéraulique en régime transitoire. Le comportement thermo-aéraulique est très complexe du fait que les transferts se produisant simultanément avec la variation compliquée mathématiquement des conditions climatiques. Malgré ces situations, la concordance pour cet exemple semble satisfaisante. Ces méthodes permettent, grâce à des simulations de plus en plus détaillées, de prédire le comportement de ces systèmes complexes. Nous prouvons que le modèle numérique est devenu un laboratoire virtuel dans lequel on peut tester les hypothèses imposées. Les écarts qui existent sont dus probablement aux différentes approches, aux erreurs de mesures et aux hypothèses imposées.

Références

1. Berger, J., Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat, Décembre 2014.
2. Lefebvre, G., Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse. Doctorat en physique, Université Pierre et Marie Curie, École Nationale des Ponts et Chaussées, École des Mines de Paris-CENERG.
3. Djedjig, R., Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain, Doctorat en Génie Civil, Université de La Rochelle, Décembre 2013.
4. Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M. K., Yaiche, M. R., Benamrane, N., Modelling and experiment of buildings thermo-aeraulic behaviour according to the level-compactness in Saharan climate conditions, *Engineering Structures and Technologies*, Taylor & Francis, 2016 8(3): 117–130.
5. Haddam, M. A. C., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M. K., Benamran, N., Integration of eaves and shading devices for improving the thermal comfort in a multi-zone building, *Thermal Science*, Year 2015, Vol. 19, Suppl 2, pp. S615-S624.
6. Hamdani, M., Bekkouche, S. M. A., Benouaz, Cherier, M. K., A new modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate, *Thermal Science*, Year 2015, Vol. 19, Suppl 2, pp. S591-S601.
7. Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M. K., Yaiche, M. R., Benamrane, N., Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate, *Journal of Building Engineering*, 01 (2015) 42–52.
8. Kaoulal épouse Boussem, R., Contribution à l'étude des systèmes solaires intégrés aux bâtiments, Thèse de doctorat de l'Université Tahri Mohammed Béchar Spécialité : Physique énergétique, 2017.
9. Jannot, Y., Transferts thermiques, école des mines, Nancy, 2012.

10. J.J Roux, comportement thermique des bâtiments, Institut National des Sciences Appliquées, département de génie civil, 2000, INSA de Lyon.
11. Haddam, M. A. C., Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Mars 2015.
12. Nadeau, J. P., Puiggali, J. R., Séchage: des processus physiques aux procédés industriels, Tec & Doc-Lavoisier, 1995 (ISBN 2-7430-0018-X).
13. Rumianowski, P., Brau, J., Roux, J. J., 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.
14. <http://www.ecologs.org/air/humidite-de-l-air.html>
15. <http://www.ccq.gouv.qc.ca/index.php?id=171#c533>
16. https://fr.wikipedia.org/wiki/Humidit%C3%A9_relative
17. <http://www.meteo-mussidan.fr/hum.php>.
18. https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_humidex
19. Bendara, S., Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., L'influence de la compacité sur le confort et les épaisseurs énergétiques et financières de l'isolation thermique, Le 5^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa 24 - 25 Octobre 2018.
20. Liu, B., Jordan, R., the interrelationship and characteristic distributions of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy 4:1-19, 1960.
21. Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A., Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly daily and monthly average global radiation. Solar Energy, 28:293-302, 1982.
22. Muneer, T., Solar radiation model for Europe. Building Serv. Eng. Res. Technol., 11:153-163, 1990.
23. Ruiz-Arias, J.A., Modelization of the Terrain's morphology Influence on the Solar Radiation Field at the Earth's surface. Doctoral Thesis (PhD) eq. 4.34, University of Jaen, April 2009, 202 p.
24. Zhipeng. QU., Doctorat en Energétique et Procédés, La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol, École nationale supérieure des mines de Paris, Octobre 2013.
25. Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Cherier, M. K., Hamdani, M., Yaiche, M. R., Benamrane, (2013), Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), International Scientific Journal, Thermal Science, 2013, Vol. 17, N°. 2, pp. 349-364.
26. Mora, L., Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Université de la Rochelle UFR sciences fondamentales et sciences pour l'ingénieur, Septembre 2003.

27. André, P., C. MH. Demers., MArch, M. C. Dubois, Le chauffage solaire passif comme stratégie bioclimatique, Université Laval, Esquisses, Le bulletin d'information de l'ordre des architectes du Québec 2004, Volume 15, Numéro 1.
28. Norme DIN 1946-4:2008-12. Raumluftechnik – Teil 4: Raumluftechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens (Ventilation and air conditioning - Part 4: Ventilation in buildings and rooms of health care), Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Etude de quelques concepts architecturaux passifs

Chapitre 3 : Etude de quelques concepts architecturaux passifs

3.1. Introduction

L'architecture bioclimatique d'une habitation passive se base sur des concepts interdépendants:

- Bio : qui s'inscrit au cœur du développement durable et se focalise sur la vie quotidienne; le biorythme des occupants de la maison,
- Climatique : l'habitat doit être conçu en harmonie avec son environnement.

Une maison passive est une construction si performante qu'il est possible d'y vivre en situation de confort avec peu d'énergie utilisée pour demeurer confortable.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à l'application des principaux concepts pour pouvoir répondre à une architecture assez simple et efficace d'un point de vue énergétique.

3.2. L'isolation thermique

Plusieurs travaux sur l'isolation ont été menés afin de créer des perspectives d'application. Al-Houmoud [1] et Okba [2] ont montré que dans les climats chauds, l'isolation de la toiture doit être en priorité par rapport à celle des murs et des planchers. Cette technique a permis aux constructeurs de :

- Limiter les déperditions de chaleur durant la saison de chauffe en limitant les surfaces déperditives,
- Profiter des apports solaires en hiver en limitant l'ombrage des fenêtres et des ouvertures en général,
- Limiter les apports solaires en été en favorisant l'ombrage des fenêtres et des ouvertures.

L'isolation d'un bâtiment permet de diminuer les échanges de chaleur entre l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur, et ainsi diminuer les besoins de chauffage et, le cas échéant, de climatisation. Cette isolation doit être pensée en fonction des contraintes climatiques du lieu où se situe le bâtiment. Elle emprisonne la chaleur à l'intérieur en hiver et garde la maison fraîche en été. La lutte contre le gaspillage d'énergie passe par l'isolation thermique des bâtiments

chauffés, c'est aussi un moyen efficace de réduire les dépenses de chauffage et de climatisation tout en améliorant le confort [3].

Il existe 4 grandes familles d'isolants :

- Les matériaux d'origine minérale : laine de verre, laine de roche, argile expansée, vermiculites...
- Les matériaux de synthèse : polystyrène, polyuréthanes, PVC...
- Les matériaux recyclés : ouate de cellulose, verre cellulaire...
- Les matériaux d'origine végétale ou animale : fibre de bois, chanvre, laine de coton, laine de mouton...

L'isolation thermique est donc intéressante en termes de confort et d'économies financières, ainsi en termes de protection de l'environnement qui contribue donc à limiter les pollutions induites par le système de chauffage. C'est pour cela qu'il convient d'opter pour une isolation optimale. Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments, doivent donc posséder les qualités thermiques qui les feront réagir d'une façon satisfaisante à différentes sollicitations. Ces sollicitations varient constamment en intensité et en durée, elles entraînent des échanges d'énergie entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments [4]. Dans le bâtiment, l'appellation "isolant thermique" est réservée aux produits dont la résistance thermique est au moins égale à $0.5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, et dont le rapport de l'épaisseur par sa résistance thermique (conductivité thermique) est au plus égal à 0.065 W/(m K) (référence à la norme NF P 75-101) [5].

Comme information, il faut 10.5 m de granit, 4.2 m de béton plein et seulement 0.09 m d'un isolant en λ de 0.030 W/(m K) pour assurer une résistance thermique $R = 3 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ [6]. Le tableau 3.1 donne une comparaison entre les différents types d'isolants qui permettront un même niveau d'isolation qu'un mur en béton de près de 90 centimètres [7].

Les points propices aux déperditions d'énergie dans les bâtiments sont les murs extérieurs, le plafond, le plancher, les ponts thermiques, les portes et les fenêtres. A cet égard, deux méthodes s'imposent:

	L'épaisseur en cm	Type d'isolant
	01.5	Polystyrène extrudé
	02.0	Panneaux cellulose
	02.0	liège
	02.0	Laine minérale
Pour obtenir	02.0	Polystyrène expansé
la même	02.3	Ouate de cellulose
isolation	02.4	Chanvre en vrac
qu'un mur en	06.5	Béton de chanvre
béton de	07.5	Bois résineux
près de 90	08.0	Béton cellulaire
centimètres il	17.5	Brique creuse alvéolaire
faut :	28.0	Brique pleine
	39.0	Pisé
	42.5	Adobe (terre crue)
	45.0	Pierre calcaire
	52.5	Parpaing creux
	87.5	Béton plein

Tableau 3.1. Comparaison entre les différents types d'isolants par rapport 90 cm de béton

- L'isolation des murs par l'extérieur : la meilleure lorsque les enduits sont défectueux, elle permet de traiter à la fois l'isolation et le ravalement. Elle a quatre grands avantages : elle traite un grand nombre de ponts thermiques, elle ne modifie pas les surfaces habitables, elle protège les murs des variations climatiques et elle ne demande pas de déménager les pièces à isoler
- L'isolation des murs par l'intérieur est intéressante surtout lorsque le ravalement extérieur est en bon état. Elle reste plus abordable mais entraîne une réduction de la surface des pièces et ne permet pas de traiter tous les types de ponts thermiques.

3.3. La compacité

La compacité est l'une des principaux points à mettre en œuvre en vue d'une conception énergétiquement efficace. Elle est généralement une règle en architecture bioclimatique car elle permet de limiter les surfaces déperditives ou soumises à un éclairage solaire important [8]. Les études sur la compacité des bâtiments résultent non seulement de la recherche d'économie d'énergie à long terme mais également de la limitation simultanée des investissements grâce à la diminution des surfaces des parois d'échange extérieures. La compacité résulte de notions de géométrie utilisées pour maximiser le volume intérieur d'un

contenant en fonction de sa forme. La notion de volume ou de masse du contenu correspond à des besoins alors que la forme du contenant ne résulte que de choix subjectifs, techniques ou économiques. La notion d'économie implique que pour un contenu de volume fixé, V , la surface du matériau constituant les parois du contenant, S_p , soit la plus petite possible [9]. La forme d'un bâtiment a un impact direct sur les déperditions thermiques, qui sont proportionnelles à la surface d'échange avec l'extérieur. Par exemple un bâtiment à forme cubique perd moins à isolation égale qu'un bâtiment rectangulaire. Ainsi, une conception bioclimatique est une conception qui recherche la compacité des formes bâties. A ce titre, il convient de :

- Opter pour des formes qui minimisent les surfaces en contact avec l'extérieur,
- Profiter des contacts entre les bâtiments lorsque cela est possible : agréger les unités à bâtir chaque fois que possible ;
- Établir une rupture thermique entre les espaces chauffés et les prolongements extérieurs que représentent les balcons par exemple.

Toutefois, plusieurs travaux récents [10-11], dont certains ont été effectués par l'Equipe Architecture Solaire et Bioclimatique de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, ont permis de prouver que la géométrie la plus favorable en terme de confort thermique est celle qui correspond au plus faible indice. Le confort est inversement proportionnel par rapport à l'indice de compacité. Le tableau 3.2 donne les volumes et les surfaces de quelques formes géométriques pour voir la variation de compacité en fonction de la forme, la taille et la surface de contact.

L'étude des formes géométriques montre l'intérêt des formes sphériques pour limiter les surfaces d'échange entre le milieu intérieur et le milieu extérieur du bâtiment et, par conséquent, minimiser l'énergie perdue par le bâtiment, il faut rappeler qu'un bâtiment échange d'autant plus d'énergie avec son environnement que sa surface extérieure est grande et que l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur est important [12]. Elle permet aussi d'économiser les matériaux de construction, par exemple la surface extérieure

d'un bâtiment à 64 m^3 sous forme cubique est égale à 80 m^2 , par contre la surface d'un bâtiment au même volume sous forme cylindrique est égale à 73.81 m^2 et pour le bâtiment de la forme demi-sphère égale à 61.41 m^2 . Donc les concepteurs des bâtiments vont utiliser ces formes pour construire des dômes, des demi-sphères, ou des structures polygonales. Le tableau 3.3 indique les compacités calculées avec ce facteur pour différentes formes et des volumes croissants.

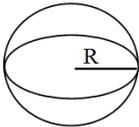
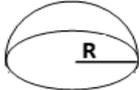
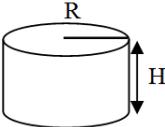
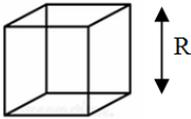
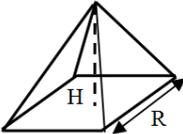
Forme géométrique	Volume	R	Surface totale	Surface sans surface de base
Sphère 	$V = 4 \pi R^3 / 3$	$R = (3 V / 4 \pi)^{1/3}$	$S = 4 \pi R^2$	-
Demi-sphère 	$V = 2 \pi R^3 / 3$	$R = (3 V / 2 \pi)^{1/3}$	$S = 3 \pi R^2$	$S = 2 \pi R^2$
Cylindre fermé 	$V = \pi R^2 H$ $H = 2 R$	$R = (V / 2 \pi)^{1/3}$	$S = 6 \pi R^2$	$S = 5 \pi R^2$
Cube 	$V = R^3$	$R = V^{1/3}$	$S = 6 R^2$	$S = 5 R^2$
Pyramide à base carrée 	$V = R^2 H / 3,$ $H = R$	$R = (3V)^{1/3}$	$S = (1 + 5^{1/2}) R^2$	$S = 5^{1/2} R^2$

Tableau 3.2. Volume et surface de quelques formes géométriques

Le mode de contact, entre les volumes, influe aussi sur la compacité. Une maison isolée présente un coefficient de compacité plus grand qu'une maison mitoyenne. En effet, le mur mitoyen entre les deux pavillons n'est plus en contact avec l'extérieur ce qui limite les déperditions par cette paroi. L'habitat collectif (rangées de maisons mitoyennes ou immeuble collectif) est plus performant qu'un habitat composé de maisons individuelles dispersées [13].

Volume en m ³	Sphère	Cylindre	Demi-sphère	Cube	Pyramide
1	4.836	5.5358	5.7575	6	6.7313
2	3.8383	4.3938	4.5697	4.7622	5.3426
3	3.3531	3.8383	3.992	4.1602	4.6672
4	3.0465	3.4873	3.627	3.7798	4.2404
5	2.8281	3.2374	3.367	3.5088	3.9365
6	2.6613	3.0465	3.1685	3.3019	3.7044
7	2.528	2.8939	3.0098	3.1365	3.5188
8	2.418	2.7679	2.8787	3	3.3656
9	2.3249	2.6613	2.7679	2.8845	3.2361
10	2.2447	2.5695	2.6724	2.785	3.1244
20	1.7816	2.0394	2.1211	2.2104	2.4798
30	1.5564	1.7816	1.8529	1.931	2.1663
40	1.414	1.6187	1.6835	1.7544	1.9682
50	1.3127	1.5027	1.5628	1.6287	1.8272
60	1.2353	1.414	1.4707	1.5326	1.7194
70	1.1734	1.3432	1.397	1.4559	1.6333
80	1.1223	1.2847	1.3362	1.3925	1.5622
90	1.0791	1.2353	1.2847	1.3389	1.502
100	1.0419	1.1927	1.2404	1.2927	1.4502

Tableau 3.3. Indice de compacité Sp/V

Les valeurs calculées montrent que :

1. La compacité s'améliore avec la taille puisque le rapport Sp/V diminue et tend vers 1 quelle que soit la forme.
2. Les différences de compacité sont d'autant plus importantes que les tailles sont petites. Ce rapport est beaucoup plus important pour une boîte de conserve que pour un logement ou un immeuble.
3. La taille a une influence proportionnellement plus grande que la forme.
4. L'influence de la forme a tendance à disparaître avec l'augmentation de la taille.

3.4. Simulation numérique : Compacité / Isolation performante

Le travail pour cette section a pour objectif d'évaluer les paramètres du confort thermique en faisant une analyse sur son niveau. La compacité et l'isolation sont des principaux concepts à mettre en œuvre en vue d'une conception énergétiquement efficace. La compacité est généralement une règle en architecture bioclimatique car elle permet de limiter les surfaces déperditives

ou soumises à un éclairage solaire important [13]. C'est une notion géométrique utilisée pour maximiser le volume intérieur d'un contenant en fonction de sa forme, plus précisément le rapport entre la surface de l'enveloppe en contact avec l'extérieur et le volume du bâtiment [14]. L'isolation permet en même temps d'accroître le confort et réduire les consommations d'énergie de chauffage et / ou de climatisation. L'isolation est aussi bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes de confort, d'économies financières et de protection de l'environnement [15-16].

L'objectif à atteindre est d'étudier l'influence de la compacité sur l'évolution de la température, l'humidité relative et l'humidex, et ceci en fonction du niveau d'isolation thermique. Nous voulons s'approcher le maximum de la forme optimale de l'enveloppe. Dans tous les cas qui vont être confrontés, on intègre une couche complémentaire de 8 cm de polystyrène pour deux conditions climatiques radicalement distinctes. Les caractéristiques de l'enveloppe seront supposées les mêmes et coïncident avec le tableau 2.1 du chapitre 2. Les journées retenues pour l'étude sont également les mêmes du chapitre précédent.

3.4.1. Variation de la forme géométrique du bâti à volume constant

Pour réaliser cette étude, on s'est concentré sur trois zones thermiques de même volume (27 m^3) de différentes formes géométriques.

- Les dimensions du premier parallélépipède est de $2\text{m} \times 3\text{m} \times 4.5\text{m}$, c'est-à-dire $S_p/V = 1.61$,
- La deuxième forme correspond à un cube de 3 m de longueur, ce qui fait que $S_p/V = 1.66$.
- Les dimensions du deuxième parallélépipède est de $4.5\text{m} \times 3\text{m} \times 2\text{m}$, donc $S_p/V = 1.88$.

Les propriétés géométriques de ces zones thermiques pour ces trois cas seront résumées selon le tableau ci-dessous.

Cas	Forme géométrique	Profondeur (m)	Largeur (m)	Longueur (m)	Volume (m ³)	Surface exposée (m ²)	Indice de compacité Sp/V
1 ^{er} cas	Parallélépipède	2	3	4.5	27	43.5	1.61
2 ^{eme} cas	Cube	3	3	3	27	45	1.66
3 ^{eme} cas	Parallélépipède	4.5	2	3	27	51	1.88

Tableau 3.4. Dimensions et caractéristiques des différentes formes

Dans les calculs, nous avons estimé la valeur du débit massique en utilisant la formule classique pour caractériser l'écoulement de l'air à travers les infiltrations. Nous devons donc étaler la vitesse de l'air entrant qui s'écoule. Le débit massique est par définition la multiplication de trois paramètres : la masse volumique de l'air, la vitesse de l'air entrant et la section efficace des infiltrations et des fissures. Pour notre cas, la vitesse est supposée égale à la vitesse du vent de l'air extérieur, la section est estimée à $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$.

Les figures 3.1-3.3 donne un aperçu sur les courbes de la température, de l'humidité relative et de l'humidex. Elles permettent donc d'éclaircir et d'illustrer leurs évolutions instantanées. On garde les mêmes journées consécutives avec des températures minimales très froides.

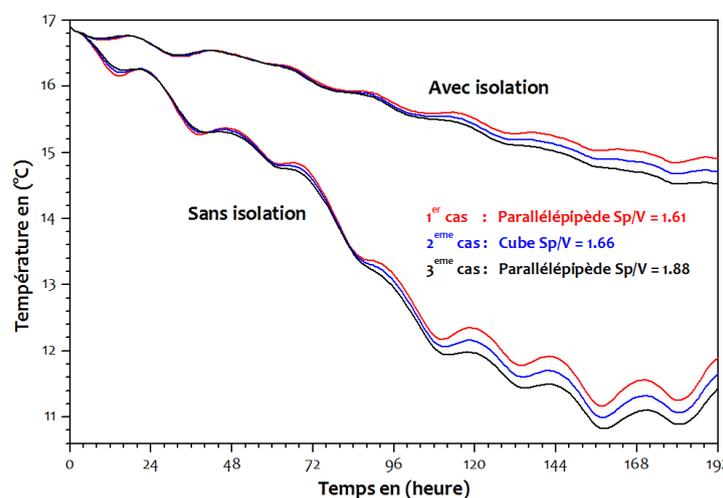


Figure 3.1. Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

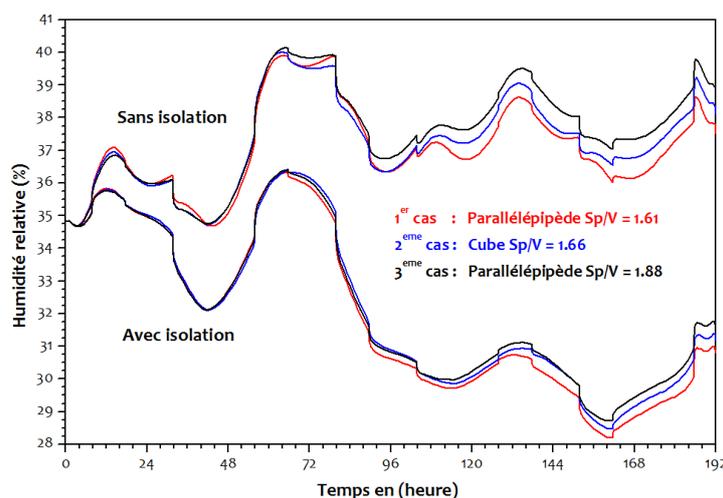


Figure 3.2. Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

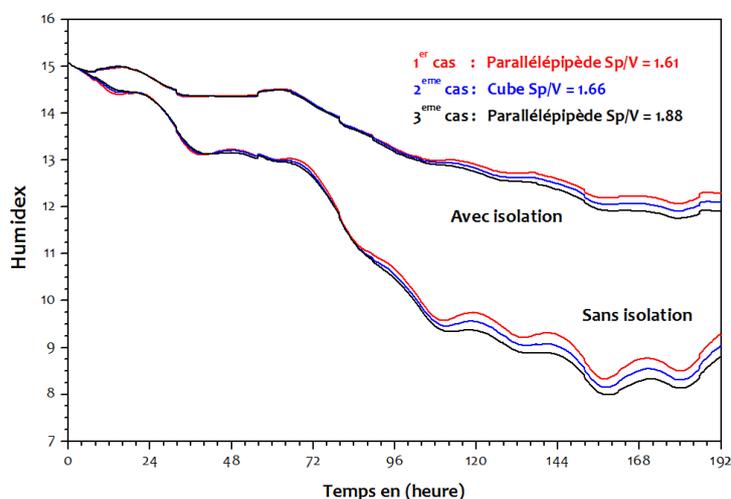


Figure 3.3. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

Les mêmes démarches ont été adoptées pour décrire les profils des paramètres du confort (température, humidité relative et humidex) pour les journées de surchauffes (voir les figures 3.4-3.6). Comme en période froide, le choix était toujours focalisé sur une période de transition (journées plus au moins fraîches vers des journées chaudes).

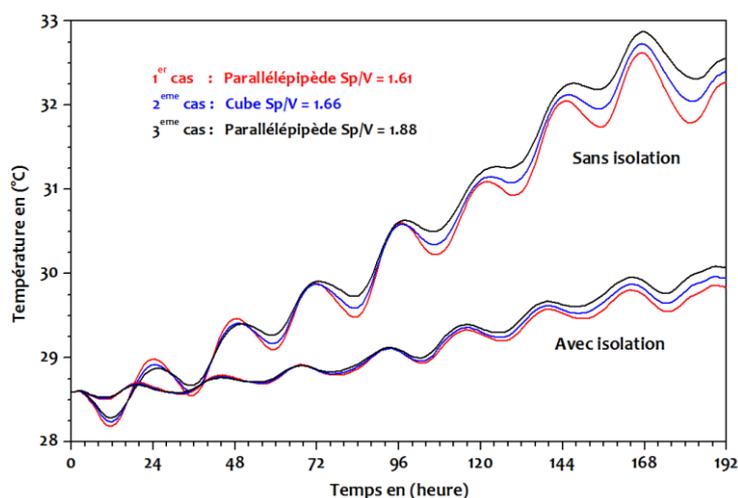


Figure 3.4. Température de l'air, 06 - 13 Jun 2015

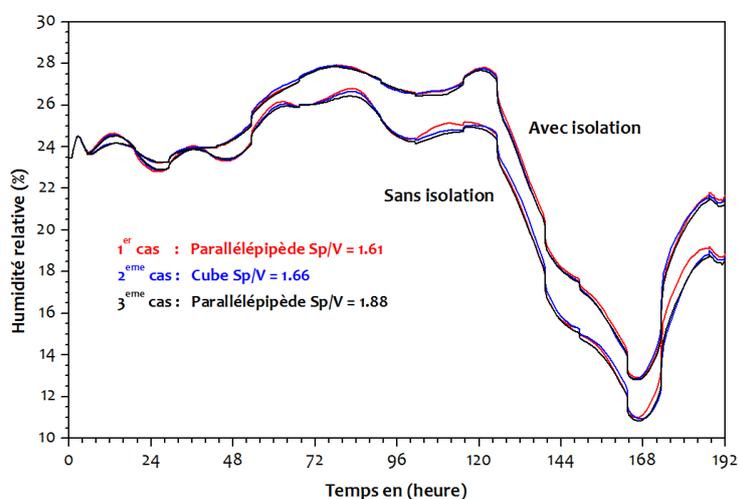


Figure 3.5. Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Jun 2015

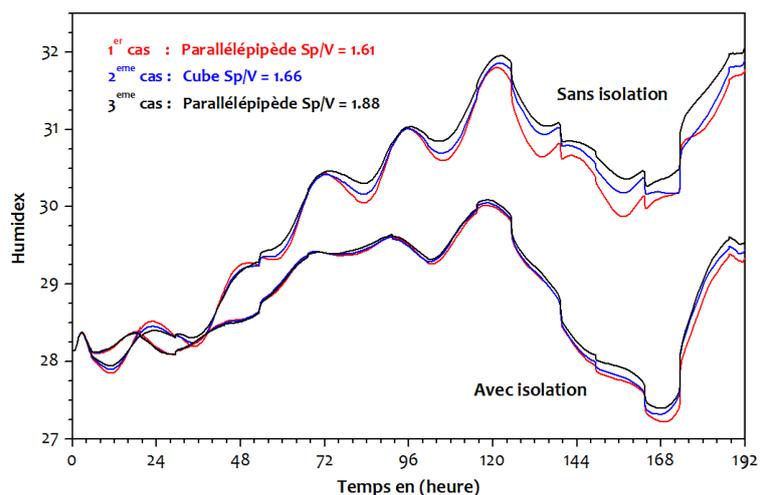


Figure 3.6. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Jun 2015

Faisant suite à ces résultats, il est noté que dans l'ensemble, la température et l'humidité relative sont inversement proportionnelle, ceci peut être justifié par le

fait que la variation de la teneur en eau de l'air est globalement faible en raison premièrement de l'absence des apports thermiques intérieurs. Deuxièmement, ce paramètre (la teneur en eau de l'air) dépend plus particulièrement de l'humidité relative de l'air extérieur qui va entrer dans la zone thermique, alors, il est relié aussi à la section et à la vitesse du vent. En conséquence, puisque la variation de l'humidité et de la température est couramment inversement proportionnelle, nous pouvons déduire que dans ces circonstances bien définies, la section et la vitesse du vent "à la fois" ne favorisent pas une quantité suffisante de l'air entrant pour faire varier sensiblement la teneur en eau de l'air de la zone en question. Dans le cas inverse, on peut avoir un net changement entre la température et l'humidité relative de l'air intérieur.

D'autre part, en absence d'une isolation performante, on peut déduire que la compacité influe un petit plus sur la température intérieure de l'enveloppe en la comparant avec le cas d'une isolation et ceci au cours des deux périodes estivale et hivernale. Par ailleurs, on obtient un meilleur confort pour une meilleure compacité, c'est-à-dire, dans tous les cas, un meilleur confort correspond à un faible indice de compacité. Conformément à l'indice du confort humidex, l'exemple du premier cas favorise donc les meilleures conditions du confort.

3.4.2. Agrandissement du bâti à forme constante

L'objectif est de comparer la variation de la compacité par rapport à la taille à forme constante. Dans notre cas, on s'intéresse à l'agrandissement du bâti en maintenant la même forme parallélépipède (premier cas du tableau 3.4). Le volume initial (pour le premier cas $S_p/V=1.61$) de l'espace habitable est de 27 m³ (2m x 3m x 4.5m). Pour l'exemple ci-dessous :

La surface est de $(2 \times 3 \text{ m}^2) \times 2 + (2 \times 4.5 \text{ m}^2) \times 2 + (4.5 \times 3 \text{ m}^2) \times 2 = 57 \text{ m}^2$

L'élargissement de la surface en la multipliant par f veut dire multiplier les dimensions par \sqrt{f} :

$(2\sqrt{f} \times 3\sqrt{f} \text{ m}^2) \times 2 + (2\sqrt{f} \times 4.5\sqrt{f} \text{ m}^2) \times 2 + (4.5\sqrt{f} \times 3\sqrt{f} \text{ m}^2) \times 2 = 57 f \text{ m}^2$

Dans cet exemple, nous allons changer les dimensions en les multipliant par 22.36 et 31.62, et plus exactement par $\sqrt{500}$ et $\sqrt{1000}$. Pour cette forme définie, une

augmentation de la taille entraîne une augmentation de la compacité (une diminution de l'indice de compacité). Les coefficients équivalents du rapport S_p/V deviennent respectivement 0.0042 et 0.0021.

Les figures 3.7-3.12 donnent une description des différentes courbes que ce soit des températures, des humidités relatives ou bien l'humidex équivalent à chaque cas.

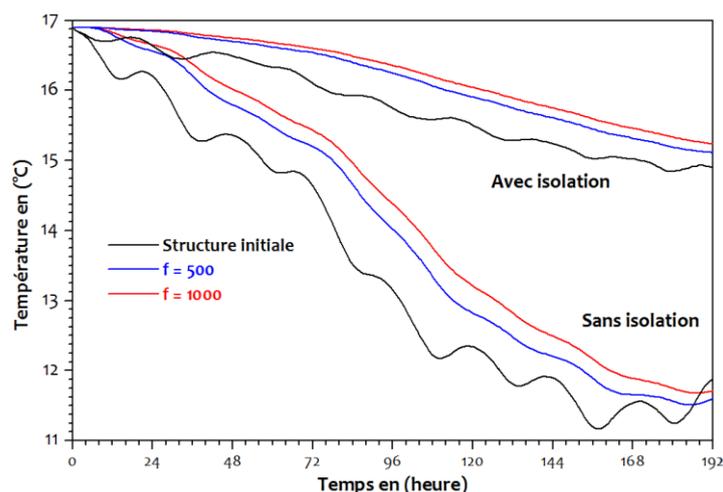


Figure 3.7. Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

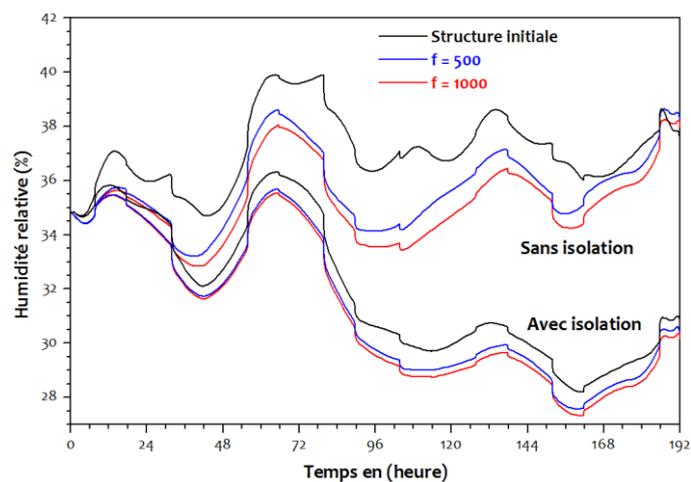


Figure 3.8. Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

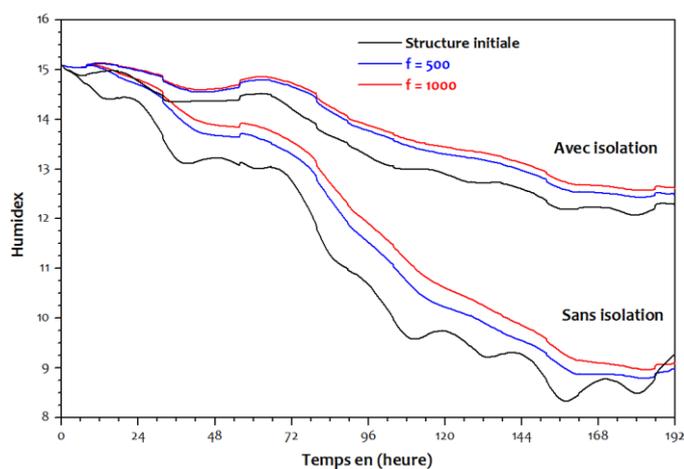


Figure 3.9. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

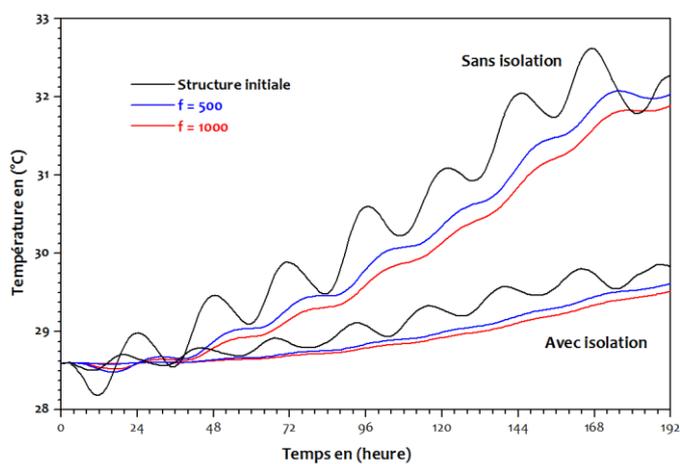


Figure 3.10. Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015

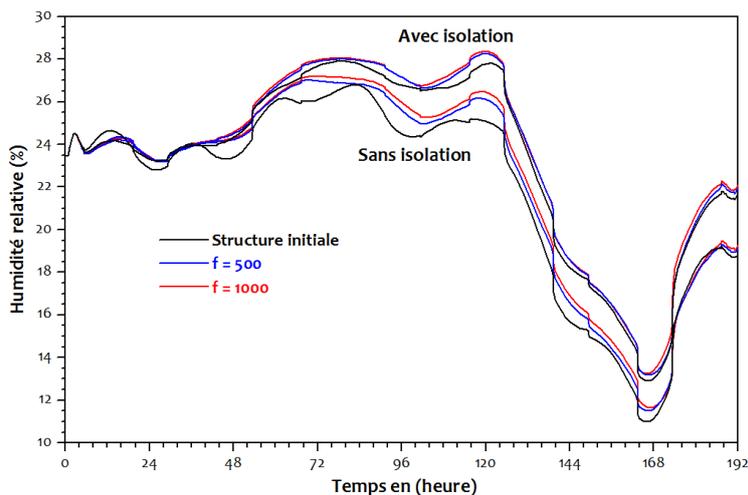


Figure 3.11. Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015

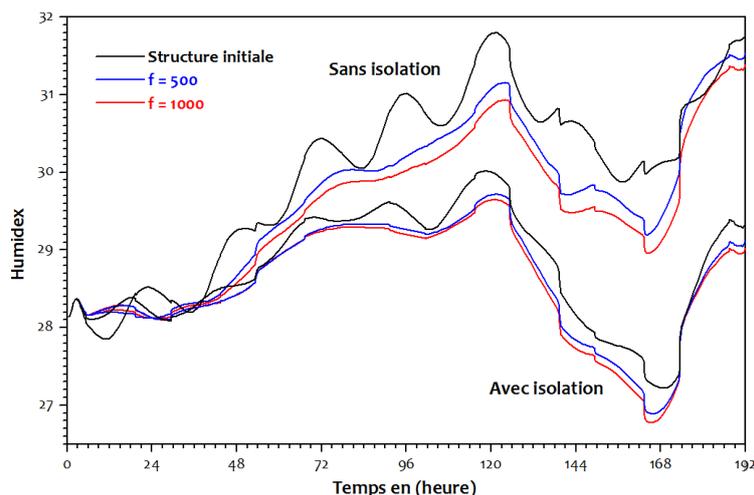


Figure 3.12. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Juin 2015

En absence d'une isolation efficace, la compacité influe plus sur la température intérieure de l'air par rapport au cas d'une isolation thermique, et ce durant les périodes estivale et hivernale. On obtient un meilleur confort pour une meilleure compacité, un agrandissement flagrant du plan descriptif d'une telle structure à forme constante engendre des meilleures conditions du confort dans toutes situations (sans et avec isolation).

3.4.3. Variation du mode de contact à forme constante

Pour une même composition de paroi et pour à la fois une forme constante et un volume constant, une variation de la compacité modifie considérablement le confort et par conséquent la demande d'énergie. Les déperditions thermiques à travers l'enveloppe auront diminuées d'autant. Les figures tracées ci-dessous (figures 3.13-3.3.18) montrent et donnent une idée générale sur les principaux paramètres du confort pour les cas suivants :

1. La construction est de forme cubique (3m x 3m x 3m) exposée à tous niveaux avec le toit : $Sp/V = (3 \times 3 \times 5) / (3 \times 3 \times 3) = 1.67$.
2. La construction est mitoyenne de même forme géométrique, les façades exposées aux sollicitations extérieures sont; le sud et le nord : $Sp/V = (3 \times 3 \times 3) / (3 \times 3 \times 3) = 1$.

3. Le dernier cas correspond à une construction de même forme géométrique, où uniquement la façade sud est exposée aux sollicitations extérieures : $S_p/V = (3 \times 3 \times 1) / (3 \times 3 \times 3) = 0.33$.

Les simulations concernent ces trois situations avec et sans isolation thermique extérieure de l'enveloppe.

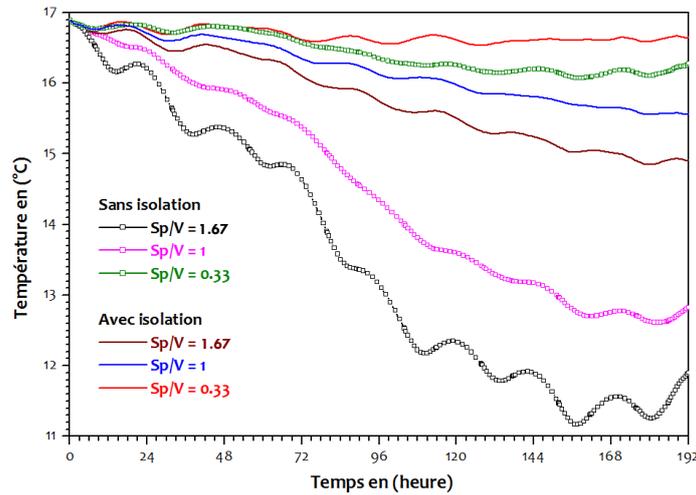


Figure 3.13. Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

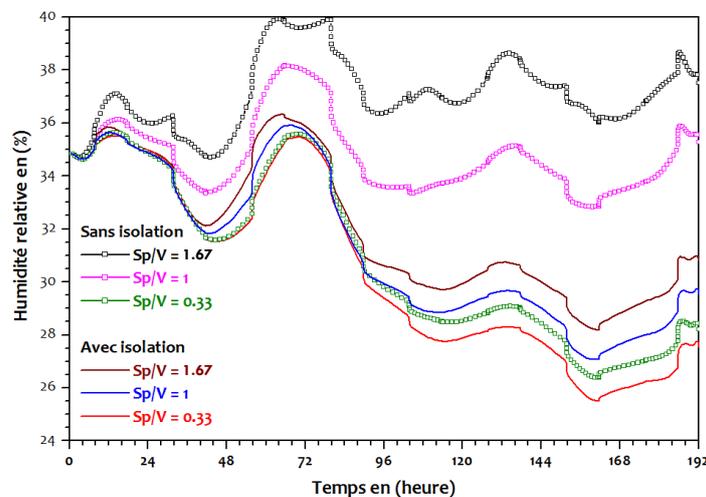


Figure 3.14. Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

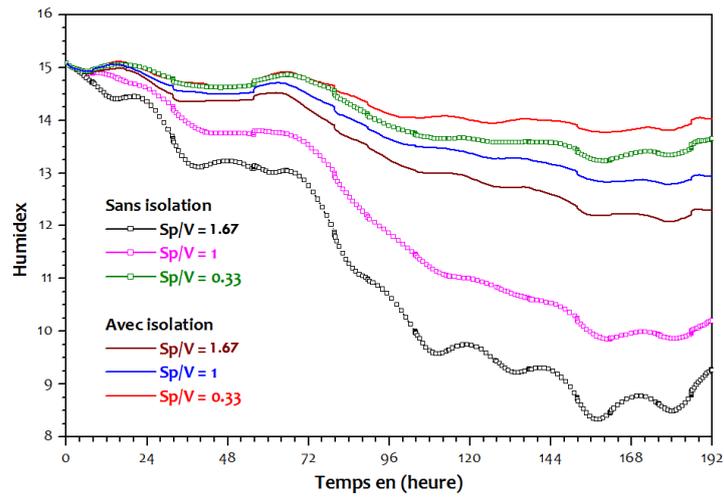


Figure 3.15. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

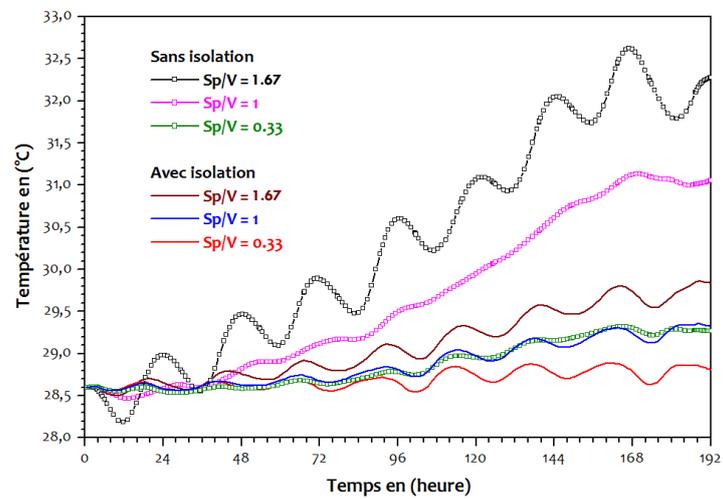


Figure 3.16. Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015

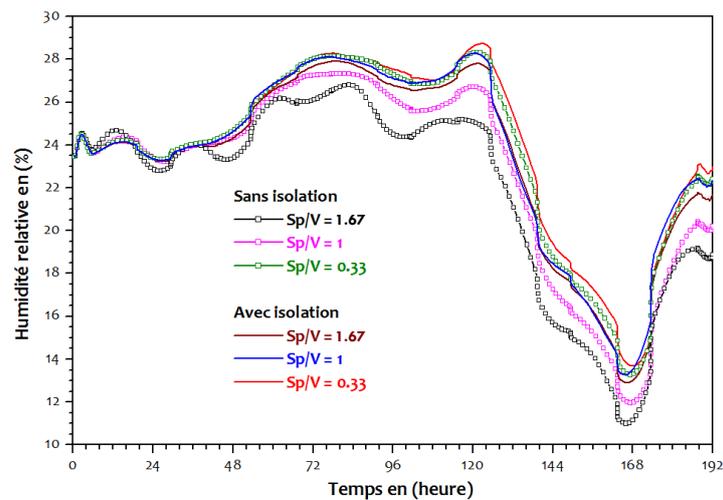


Figure 3.17. Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015

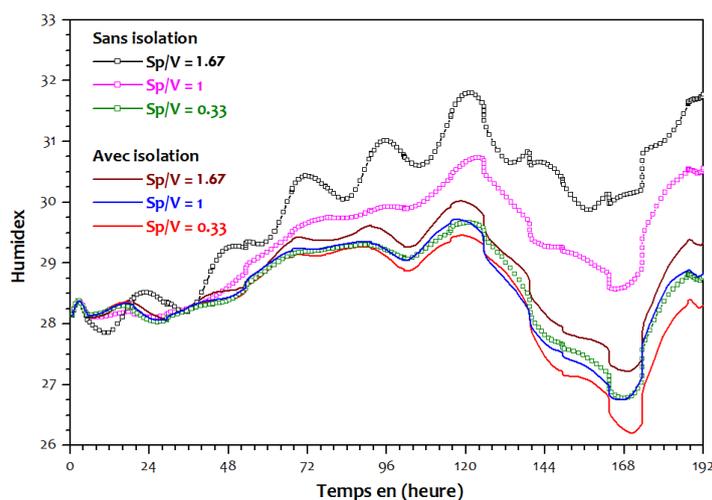


Figure 3.18. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Juin 2015

Selon les courbes tracées, nous pouvons déduire que le mode de contact joue un rôle primordial, son optimisation peut améliorer sensiblement le confort. Nous remarquons pour le deuxième cas (le cas où le toit n'est pas exposé à l'extérieure) que les valeurs affichées sont entre les deux autres cas que ce soit avec ou sans isolation. Ceci peut être justifié par le fait que l'éclairement solaire incident sur le toit fait une nette différence notamment en période estivale. Cet aspect confirme bien le rôle de la toiture sur le niveau du confort. Pour les deux phases de transition (estivale et hivernale), l'isolation apporte un meilleur compromis du confort. Par ailleurs, nous obtenons un meilleur confort pour une meilleure compacité. Le couplage isolation performante et une bonne compacité fait une amélioration considérable en termes de confort ce qui déclenche automatiquement des économies intéressantes sur les factures d'énergie.

En conséquence, selon les résultats, il est constaté que la meilleure démarche à opter pour améliorer la compacité d'une telle structure consiste à minimiser les surfaces déperditives des parois opaques. Donc avant tout, Il faudra jouer sur le mode de contact de la construction. La compacité est donc meilleure lorsque son indice est le plus faible. La compacité des bâtiments permet d'utiliser un système constructif simple et optimisé, elle peut garantir une meilleure inertie thermique de l'ensemble du tissu urbain.

3.5. Les protections solaires

La course du soleil n'est pas la même en fonction de la saison. Elle évolue entre deux extrêmes aux solstices d'été et d'hiver. L'été, on s'approche d'un 3/4 de tour avec un lever au Nord-Est et un coucher au Nord-Ouest. A son Zénith, le soleil y est très haut dans le ciel. L'hiver, la course solaire se fait sur un quart de tour avec un angle zénithal très bas dans l'horizon.

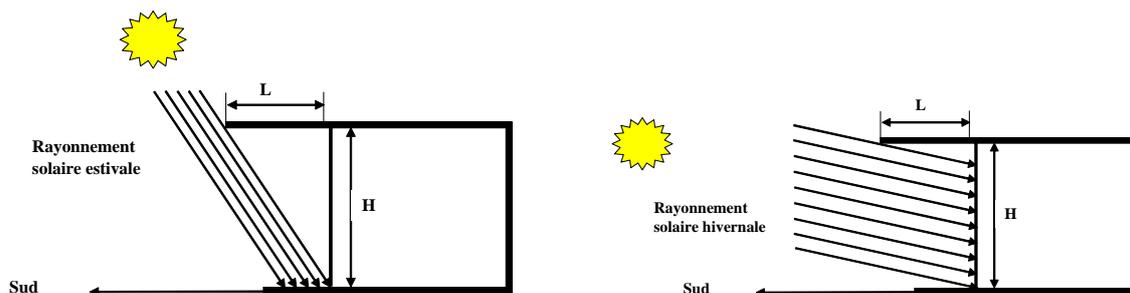


Figure 3.19. Irradiation solaire estivale et hivernale

Selon les orientations, on a donc [17] :

- Un rayonnement quasi vertical l'été, mais proche de l'horizontale l'hiver sur les façades sud
- Un soleil globalement bas l'été, et très bas l'hiver rayonnant sur les façades est et ouest. L'atmosphère est cependant beaucoup plus réchauffée lorsque les rayons viennent de l'ouest.
- L'été, les façades sud-est et sud-ouest reçoivent à la fois les rayons du soleil bas d'est et d'ouest, et du soleil haut du sud.

Les protections horizontales projettent une ombre verticale sur les parois devant lesquelles elles se déploient. Plus le soleil est haut dans le ciel, plus l'ombre couvrira une surface importante de la façade. On les retrouvera donc idéalement sur les orientations sud, et proches de l'axe sud à plus ou moins 30°. En effet, l'été, une avancée relativement faible permet de protéger les façades sur une hauteur importante, tout en permettant un réchauffement passif l'hiver.

Plus on se rapproche des orientations est et ouest, plus leur longueur doit être importante. Il devient alors impossible de les dimensionner de manière à s'adapter aux contraintes de chaque saison. Dans ces cas de figure, elles devront

impérativement être complétées par des écrans verticaux. Fixe, il s'agira d'une casquette, d'un balcon, d'une brise soleil ou d'un débord de toit. Mobile, on pourra choisir un store. Saisonnière, la protection pourra être réalisée sous forme de treille végétale... [17]

En ce qui concerne les protections verticales, l'idéale à l'Est et à l'Ouest, elles permettent de stopper un rayonnement de soleil bas dans l'horizon. Elles protègent notamment les façades l'après-midi, du sud-ouest au nord-ouest. Au sud, elles complètent une protection horizontale à la mi-saison, le soleil étant encore bas à son zénith mais déjà, ou encore, source potentielle de surchauffes à l'intérieur.

Pour tracer les lignes d'ombre d'une avancée horizontale, il faut déterminer les angles a, b et c. L'angle "a" représente un ombrage complet de l'écran (100 %), l'angle "b" pour un demi-ombrage de l'écran (50 %) et l'angle "c" pour un ombrage nul (0%) [18].

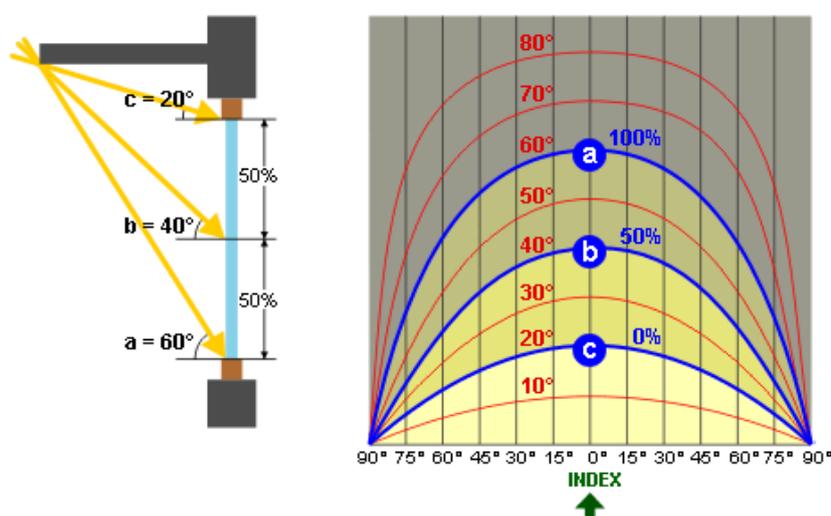


Figure 3.20. Profil d'ombre d'un écran horizontal

La même chose pour l'écran vertical, en vue de tracer les lignes d'ombre d'une avancée verticale, il faut déterminer dans chaque côté de l'écran les angles "a" et "b" qui correspondent à l'ombrage total de l'écran, les angles "c" et "d" qui représentent le demi-ombrage et les angles "e" et "f" pour un ombrage nulle [18].

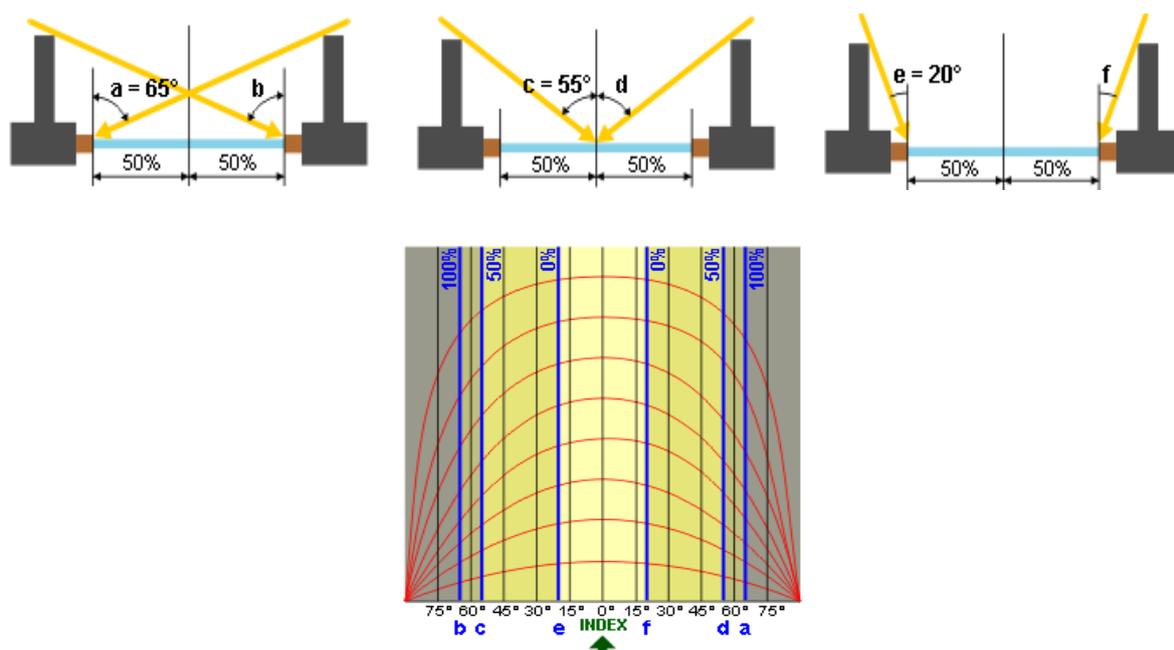


Figure 3.21. Profil d'ombre d'un écran vertical

Finalement, avec la même échelle, la superposition entre le diagramme solaire et le profil d'ombre permet de connaître les périodes durant lesquelles la protection sera efficace.

3.6. Effet de l'orientation

L'orientation est l'un des facteurs passifs qui influe sur les conditions de confort thermique et les besoins en énergie. L'orientation optimale d'une maison subite de quelques facteurs importants tel que la forme géométrique du bâtiment et leur indice de compacité, les types des matériaux de construction utilisés, la qualité d'isolation thermique, la situation géographique du bâtiment, les radiations solaires (positions du soleil en été et hiver) et les variations climatiques de la région étudiée.

De nombreuses études recommandent une orientation principale nord-sud du bâtiment en vue de maximiser les apports solaires en hiver et les minimiser en été. Cependant, l'orientation théorique nord-sud du bâtiment ne doit pas constituer un postulat dans tous les cas. Par exemple, dans la ville de Constantine, l'orientation nord-est assure un confort diurne et nocturne en été grâce à l'absence des radiations solaires intenses. Dans la ville de Biskra, l'orientation

optimale en été se situe entre 165° Est et 195° Ouest. Les orientations est et ouest dérivent des apports énergétiques importants. En hiver les orientations s'étendent d'un angle de 150° à un autre de 195° ouest [19]. Dans d'autres articles, il était mentionné que le concepteur doit assurer l'abri et le confort de l'utilisateur. Dans l'hémisphère nord, le sud est la meilleure orientation : le soleil est présent toute l'année et la différence de hauteur du soleil dans le ciel, entre l'hiver et l'été, fait en sorte qu'une grande partie des rayons solaires pénètre dans les locaux pendant la période hivernale. Inversement, pour limiter les surchauffes en été, il faut prévoir l'occultation des vitrages et une protection par les éléments de structure (débords de toit, balcons, paves soleil...) [20].

3.7. Simulation numérique : L'orientation en cas d'une bonne compacité

La question de l'orientation n'est pas à prendre à la légère, c'est un aspect important. Il est déjà prouvé par Hamdani [21-23] que l'application de ce concept architectural dépend des planchers, des parois opaques et transparentes extérieures, les matériaux de construction, le niveau d'isolation et l'application des règles indissociables de la conception bioclimatique. Il a été trouvé que l'orientation d'une habitation bien isolée thermiquement à faible compacité n'influe pas considérablement sur la température intérieure en absence des apports solaires directs.

En perspective de ces travaux, l'examen de l'impact de l'orientation sur le confort intérieur du bâtiment dans ce présent travail va se faire en faisant tourner l'édifice (2m x 4m x 8m) autour du centre vers l'est ou vers l'ouest selon le schéma descriptif donné par la figure 3.22, dont l'axe passant par le centre est perpendiculaire à la face la plus allongée (2m x 8m). Nous garderons les mêmes journées et les mêmes caractéristiques de l'enveloppe énoncées dans le tableau 2.1 du chapitre précédent.

Nous savons que l'intégration et la pose de fenêtres et de vitrages spéciaux au Sud permettent de profiter des apports gratuits en période froide et de se protéger des surchauffes estivales. Mais pour notre cas, nous voulons confirmer et

consolider cette théorie qui est tout à fait légitime, même en illuminant les apports solaires directs entrant à travers les surfaces transparentes.

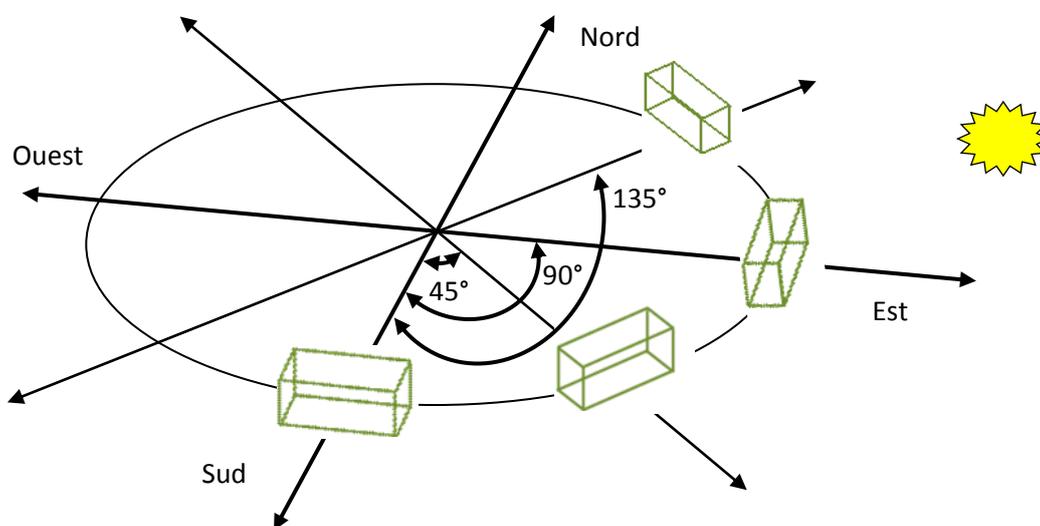


Figure 3.22. Schéma de principe pour l'étude

Nous nous intéressons à l'étude de l'orientation d'un édifice de forme parallélépipède (2m x 4m x 8m) sans aucune isolation. L'indice de compacité de cette zone thermique est de 1.25, il est par définition le rapport entre la surface totale exposée ($2m \times 8m \times 2 + 2m \times 4m \times 2 + 4m \times 8m$) et le volume de la zone ($2m \times 4m \times 8m$).

En suivant cette logique, on peut considérer que faire tourner la zone thermique étudiée 45° ou 225° vers l'est est la même chose. Le même raisonnement restera valable pour l'orientation 90° et 270° vers l'Est et l'autre orientation 135° et 315° vers l'Est. En traçant les courbes des figures 3.23-3.28, on verra dans quelle mesure l'orientation peut contribuer à l'amélioration du confort.

Dans tous les cas étudiés, les résultats montrent que l'orientation sud est plus favorable. La différence entre les différentes températures n'est pas assez importante parce que l'édifice est en contact avec l'extérieur à tout niveau sauf le sol ($S_p/V = 1.25$). Pour les journées froides, la différence entre les différentes températures ne dépasse pas 0.3°C . Les courbes relatives aux autres orientations présentent une très grande similitude. Ces aspects se répercutent aussi sur l'humidité relative et l'humidex. En période chaude, l'influence de

l'orientation est un petit peu plus sensible, l'écart atteint parfois les 0.43 °C pour le sud.

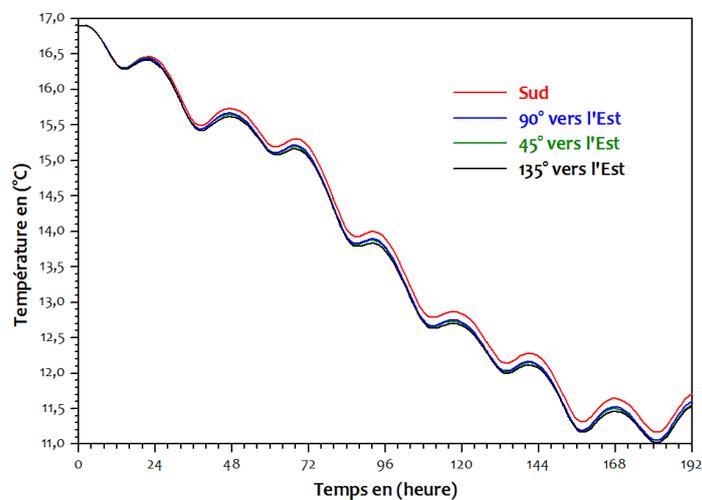


Figure 3.23. Température de l'air, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

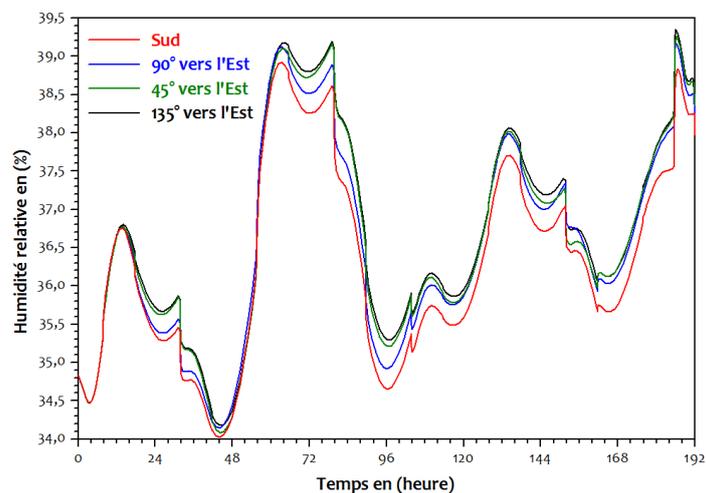


Figure 3.24. Humidité relative de l'air intérieur, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

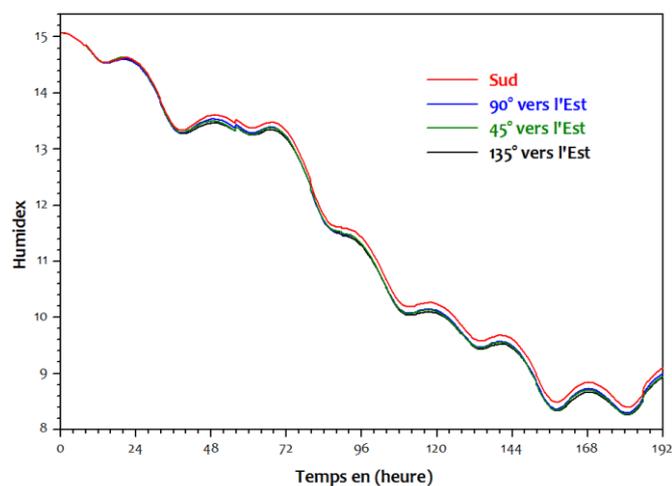


Figure 3.25. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015

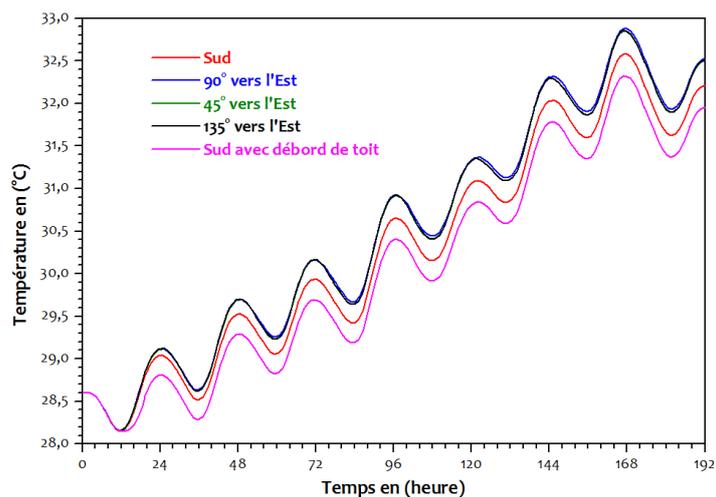


Figure 3.26. Température de l'air, 06 - 13 Juin 2015

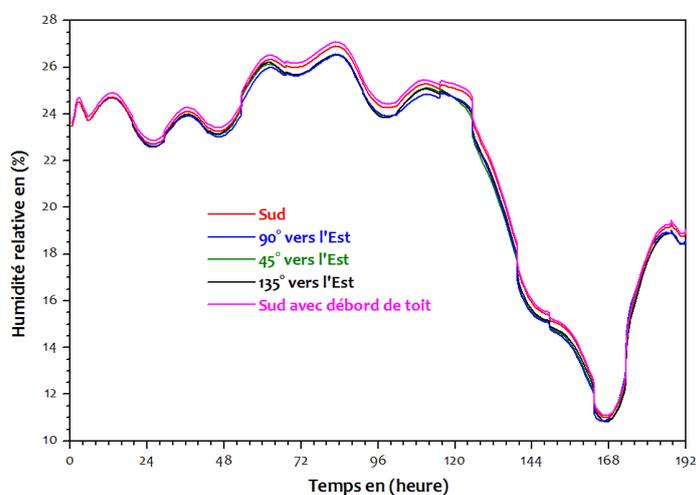


Figure 3.27. Humidité relative de l'air intérieur, 06 - 13 Juin 2015

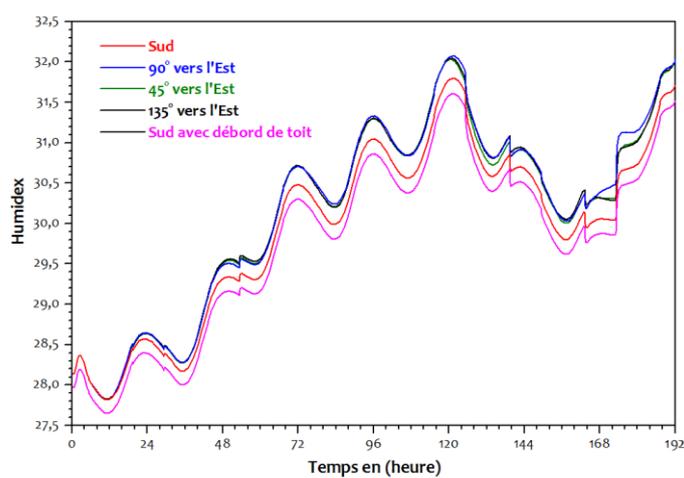


Figure 3.28. L'indice humidex à l'intérieur des zones thermiques, 06 - 13 Juin 2015

Selon des travaux de recherche menés par Mr Cherier [24], l'augmentation ou la diminution de la température de 1 °C entraîne une économie en énergie de l'ordre de 15.07 % pour une construction à haute consommation énergétique. On aura plus de détail en consultant minutieusement le tableau 3.5 qui donne un état récapitulatif des écarts produits entre les valeurs moyennes des différents paramètres durant les deux périodes.

Orientation	Valeurs moyennes et écarts entre les valeurs moyennes par rapport à l'orientation sud			
	27 Décembre 2014 - 03 Janvier 2015		06 - 13 Juin 2015	
Sud	T	13.7412 °C	T	30.4159 °C
	Hr	36.4071 %	Hr	21.6416 %
	Hu	11.4029	Hu	30.0293
45° et 225° vers l'Est	T	13.6146 °C	T	30.5981 °C
	$\Delta T/sud$	0.1266 °C	$\Delta T/sud$	0.1822 °C
	Hr	36.7087 %	Hr	21.4283 %
	$\Delta Hr/sud$	-0.3016 %	$\Delta Hr/sud$	0.2133 %
	Hu	11.2764	Hu	30.2114
	$\Delta Hu/sud$	0.1265	$\Delta Hu/sud$	-0.1821
90° et 270° vers l'Est	T	13.6519 °C	T	30.6377 °C
	$\Delta T/sud$	0.0893 °C	$\Delta T/sud$	0.2218 °C
	Hr	36.6208 %	Hr	21.3793 %
	$\Delta Hr/sud$	-0.2137 %	$\Delta Hr/sud$	0.2623 %
	Hu	11.3136	Hu	30.2510
	$\Delta Hu/sud$	0.0893	$\Delta Hu/sud$	-0.2217
135° et 315° vers l'Est	T	13.5931 °C	T	30.6068 °C
	$\Delta T/sud$	0.1481 °C	$\Delta T/sud$	0.1909 °C
	Hr	36.7640 %	Hr	21.4191 %
	$\Delta Hr/sud$	-0.3569 %	$\Delta Hr/sud$	0.2225 %
	Hu	11.2549	Hu	30.2200
	$\Delta Hu/sud$	0.1480	$\Delta Hu/sud$	-0.1907

Tableau 3.5. Etat récapitulatif sur les valeurs moyennes et les écarts entre ces valeurs moyennes par rapport à l'orientation sud

Les résultats indiquent que malgré l'absence des apports solaires, l'orientation sud est la meilleure, même si la différence entre les différentes valeurs moyennes n'est pas assez importante. Pour avoir une idée préliminaire, nous faisons une projection en termes d'économie énergétique par rapport à une structure qui se coïncide fortement avec les propriétés thermo-physiques de notre enveloppe proposée, celle prise dans les travaux de Mr Cherier [24]. Il nous apparaît que cet écart en température correspond à une réduction de l'énergie requise à environ 0.98 % en période hivernale et 1.47 % en période estivale, et ceci en effectuant une comparaison avec les cas les plus défavorables, 135° et 315° vers l'Est pour une période froide et 90° et 270° vers l'Est pour une période chaude.

Par ailleurs, il semble que le débord de toiture offre un avantage supplémentaire, il favorise une protection contre les rayonnements solaires en été. Pour notre cas, les rayonnements hauts ne tombent pas sur les murs opaques situés sous le toit. On ne s'intéresse pas au soleil entrant dans les ouvertures transparentes, il est connu que cette situation est la principale et elle va générer sans doute la solution la plus efficace pour l'amélioration du confort et pour aussi l'application de cette notion de conception passive. On rappelle encore une fois qu'on veut avoir l'apport de l'orientation optimale sur les paramètres du confort sans tenir compte des apports solaires directs. Nous déduisons que cette technique peut être considérée comme solution complémentaire en période de surchauffe. En respectant les démarches énergétiques retenues, on peut aboutir à une réduction qui se rapproche de 2.7 %.

3.8. Conclusion

L'isolation d'un bâtiment en général est obligatoire pour assurer une bonne qualité de chauffage où climatisation, éviter les grandes déperditions de l'énergie et faire réaliser de réelles économies sur la facture d'électricité équivalente. Il est possible aujourd'hui de bien isoler les logements grâce à des matériaux légers tout en offrant l'effet attendu.

La compacité n'est pas le facteur de performance le plus important mais c'est l'un des concepts qui permet en complément une réduction en énergie consommée. La compacité est donc meilleure lorsque son indice est le plus faible. La meilleure méthode consiste à minimiser tout d'abord les surfaces déperditives des parois opaques. Donc avant tout, il faudra jouer sur le mode de contact de la construction. Il faut par conséquent encourager certaines typologies urbaines comme les rangées de maisons mitoyennes et les immeubles collectifs. En plus, le niveau d'isolation globale requis va baisser pour une bonne compacité. La compacité des bâtiments permet d'utiliser un système constructif simple et optimisé, elle peut garantir une meilleure inertie thermique de l'ensemble du tissu urbain.

L'orientation sud est dans l'ensemble la plus judicieuse, elle nous permet d'intégrer convenablement les concepts architecturaux connus, y compris les protections solaires qui peuvent aussi améliorer le confort intérieur du bâtiment.

Références

1. Al-Homoud, M.S., Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials, *Building and Environment*, Volume 40, Issue 3, March 2005, Pages 353-366.
2. Okba, E.M., Building envelope design as a passive cooling technique, International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece.
3. <http://blog.meurant-sas.com/?p=1632>
4. http://jpblandine.lesdigales.org/isolation_thermique.html
5. Thermique du Bâtiment – RT2000 – Doc CSTB – Guide Technique – Isolation Thermique, Performances énergétiques des éléments
6. <http://www.toutsurlisolation.com/Votre-projet-de-A-a-Z/L-isolation-en-renovation/L-isolation-des-murs-en-renovation/Isolation-des-murs-d-une-maison-ancienne>
7. <https://www.consommerdurable.com/wp-content/uploads/2010/04/tableau-isolants1.jpg>
8. Nicolas, M., Edgard, G., *Energétique du bâtiment*, Section de Génie Civil, 4^{ème}/5^{ème} année, Ecole Polytechnique, Fédérale de Lausanne, Faculté d'Environnement Naturel, Septembre 2008.
9. <http://passivact.com/Infos/InfosConcepts/files/CompaciteBatiment-Consequences.html>

10. Bekkouche, S.M.A., Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique Electronique et Modélisation, Université de Tlemcen, Mai 2009.
11. Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Cheknane, A., A modelling approach of thermal insulation applied to a Saharan building, Thermal Science, Vol 13 (2009), N° 4, pp. 233-244.
12. Chaumeix, F., Proposition d'expérimentations, Enveloppe et qualité d'air intérieur, Arts et Lettres Architecture, Fondation EFB, Octobre 2010.
13. Thiers, S., Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 252 p, 2008.
14. Roulet, C.A., Énergétique du bâtiment I et II. Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes, Lausanne, 1987.
15. Cherier, M.K., Etude théorique et expérimentale de l'isolation thermique intérieure d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa, Mémoire de Magister Spécialité Énergies Renouvelables.
16. Belarbi, R., AGROBAT Incidence des toitures végétalisées sur la performance énergétique des bâtiments selon une approche pluridisciplinaire, Programme HABISOL édition 2009.
17. www.caue-mp.fr/uploads/protectionsolaire2.pdf
18. <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11151>
19. Belkacem, B., Daniel, F., Danielle, M., Simulation du confort thermique intérieur pour l'orientation d'un bâtiment collectif à Biskra, Algérie, Canada's building performance simulation conference - eSim 2014, Ottawa, Canada.
20. Chaumeix, F., Enveloppe et qualité d'air intérieur, Centre de formation sur les bâtiments à haute performance énergétique, Fondation EFB, Octobre 2010
21. Hamdani, M., Etude et effet de l'orientation de deux pièces d'un habitat en pierre situé à Ghardaïa, Magister spécialité, Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, 2011.
22. Hamdani, M., Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Cherier, M.K., Study and effect of orientation of two rooms of buildings located in Ghardaïa, Algeria, Energy Procedia, Volume 18, 2012, Pages 632-639
23. Hamdani, M., Choix de l'orientation et des matériaux de construction en vue d'améliorer les performances thermiques des bâtiments, Doctorat spécialité, Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, 2011.
24. Cherier, M.K., L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Juin 2018.

**Efficacité énergétique d'un
studio**

&

**Intégration des principaux
concepts passifs**

Chapitre 4 : Efficacité énergétique d'un studio & Intégration des principaux concepts passifs

4.1. Introduction

Le confort thermique est un effet combiné résultant de certains paramètres environnementaux et individuels. Les indices de confort thermique ont été mis au point par divers chercheurs travaillant sur ce sujet. Une revue de la littérature sur les bâtiments individuels et collectifs a montré que l'isolation thermique et une compacité optimale peuvent réduire la consommation énergétique et augmenter en même temps la durée de vie de la construction. Plusieurs travaux de recherche offrent une grande opportunité pour que ces concepts passifs se dirigent vers l'énergie durable. Les températures des bâtiments sont influencées par la forme géométrique de la structure, son niveau de compacité, son isolation d'enveloppe et ses gains de chaleur internes [1]. En termes d'isolation, les toits verts ont un impact significatif sur la réduction des déperditions thermiques de l'enveloppe du bâtiment au cours d'une saison froide et sur la conservation de la fraîcheur en période chaude [2]. Ce genre de situations s'effectuent grâce à l'absorption solaire et à l'isolation accrue de la toiture [3-4]. Dans ce cas, le transfert de chaleur est affecté par deux facteurs importants; la réflectivité et l'émissivité des toitures. Les toits sombres des bâtiments entraînent une augmentation de la demande de refroidissement. Pour les toits moins absorbants, la différence entre les températures de surface et de l'air ambiant est d'environ 10 °C. Les économies d'énergie (refroidissement et chauffage) varient en fonction du niveau d'isolation des toits et du climat local. Pour les climats chauds, tels que le Sahara algérien, une diminution de l'émissivité (une augmentation de l'absorption solaire) du toit de 0.9 à 0.25 peut entraîner une augmentation de 10% de la facture annuelle [5].

Les approches adoptées par les chercheurs ont prouvé que les méthodes d'économie d'énergie devaient être développées. Peu de recherches sur l'isolation dynamique (remontant aux années 70) des structures lourdes se sont

avérées efficaces pour offrir un lien éco-énergétique à l'isolation classique des bâtiments [6-10]. Récemment, certains travaux effectués par Bahria et al. [11] ont porté sur des études de simulation dynamique sur trois sites de différentes zones climatiques (Alger, Djelfa et Tamanrasset). En intégrant une isolation thermique améliorée, sans utiliser les systèmes de chauffage et de refroidissement solaire, la consommation énergétique due au chauffage a diminué de 58%, 72% et 12% respectivement sur les sites d'Alger, Djelfa et Tamanrasset. En Suisse, une étude d'analyse portant sur 216 nouveaux bâtiments actifs et isolés a montré que la demande de chauffage est nettement inférieure à celle de la norme MINERGIE-A [12]. Cependant, dans un climat chaud, un grand nombre de bâtiments consomment plus d'énergie pour le refroidissement en été que pour le chauffage en hiver. Pour une ventilation régulée, une construction bien isolée peut être maintenue plus froide en été qu'une construction mal isolée. Dans ces circonstances, il a été prouvé que l'isolation thermique constituait le facteur clé de la réduction de la consommation d'énergie et des pertes de chaleur des bâtiments [13]. Dans un autre contexte, certaines contributions [14-16] ont été consacrées à la recherche des propriétés écologiques des matériaux de construction susceptibles de réduire la charge de chauffage et de climatisation. La typologie architecturale des bâtiments de la vallée du M'zab en Algérie nous permet d'inspirer plusieurs concepts architecturaux, telle que la compacité des bâtiments. Ce sujet est directement lié à la durabilité, qui peut permettre une performance intérieure efficace et des économies d'énergie [17]. Cette technique architecturale utilisée par les Mozabites permet de préserver l'énergie utilisée pour le refroidissement et le chauffage des bâtiments. Saeed Almumar [18] a conclu que les bâtiments acquièrent une compacité importante sur des sites présentant une différence notable entre les températures de confort intérieur et extérieur à des intensités de rayonnement solaire élevées. Les indices de compacité les plus courants dans la littérature sont ceux qui définissent le rapport entre la surface de l'enveloppe et le volume (S/V) du bâtiment ou sa valeur inverse [19-21]. De plus, leurs conclusions étaient parfois exprimées par le

rapport entre l'enveloppe thermique du bâtiment et les surfaces chauffées [22]. Ourghi et al. [23] ont développé une méthode de corrélation entre la consommation annuelle d'énergie et la compacité relative des immeubles de bureaux de forme rectangulaire et en forme de L. Après quelques années, Adnan et al. [24] ont étendu l'idée en incluant d'autres formes géométriques. En 2003, Pessenlehner et Mahdavi [25] ont utilisé un indicateur de forme non dimensionné appelé compacité relative, défini comme le rapport entre un facteur de forme de modèle de construction de référence (forme cubique ou rectangulaire) et le facteur de forme réel du bâtiment.

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier l'impact de certaines solutions passives sur l'utilisation de l'énergie de chauffage et de refroidissement, pour réduire les besoins en énergie et puis déterminer les économies potentielles sous un climat saharien. Le polystyrène est utilisé comme matériau isolant, l'épaisseur d'isolation la plus économique adaptée au climat de Ghardaïa est basée sur les prix unitaires des matériaux d'isolation et le taux d'énergie à déterminer. Les frais supplémentaires et le temps de retour sur investissement ont été examinés. Les résultats et les discussions ont ensuite été présentés. En effet, l'obtention d'un label énergétique nécessite une collecte de données climatiques d'au moins 12 mois. En appliquant une approche de modélisation récente [26], une étiquette énergétique peut être émise en fournissant des paramètres, des scénarios d'occupation, un mode de vie et toutes les données nécessaires. Il est à noter que le nombre de travaux de recherche consacrés à ce type de climat saharien est insuffisant. La spécificité est directement liée aux conditions sévères du climat saharien. En outre, l'unicité et l'atout de cette contribution consistent à appliquer une méthode spécifique pour estimer convenablement les besoins en énergie et résoudre le problème de l'épaisseur de l'isolation thermique. La combinaison de différentes approches a fourni un nouveau modèle performant.

4.2. Etude de cas: Studio occupé par deux personnes situé à Ghardaïa

Ghardaïa (latitude 32.48° Nord, longitude 3.80° Est) a un climat chaud et sec, la région est marquée par de grands écarts en température et par un indice

de clarté estimé à 0.8. Le taux d'insolation est très important (75% en moyenne) et le rayonnement solaire global annuel enregistré sur une surface horizontale dépasse les 20 (MJ/m²). La température moyenne annuelle est d'environ 22.61 °C. La température moyenne minimale (5.5 °C) est enregistrée dans le mois le plus froid (Janvier), tandis que la température moyenne maximale est enregistrée le mois de Juillet avec une valeur qui s'est fixée à 41.7 °C. L'humidité relative est très basse, elle est à environ 21.60% en Juillet, son niveau maximum est de 55.80% signalé en Janvier, cependant la moyenne annuelle est environ 38.33% [26].

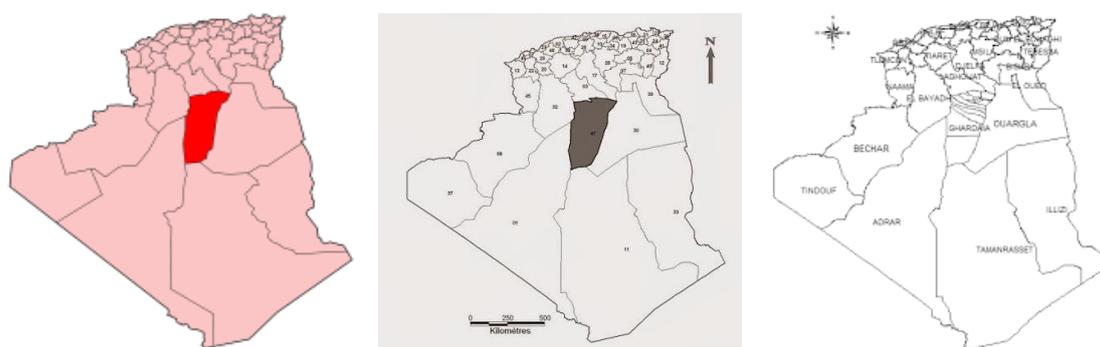
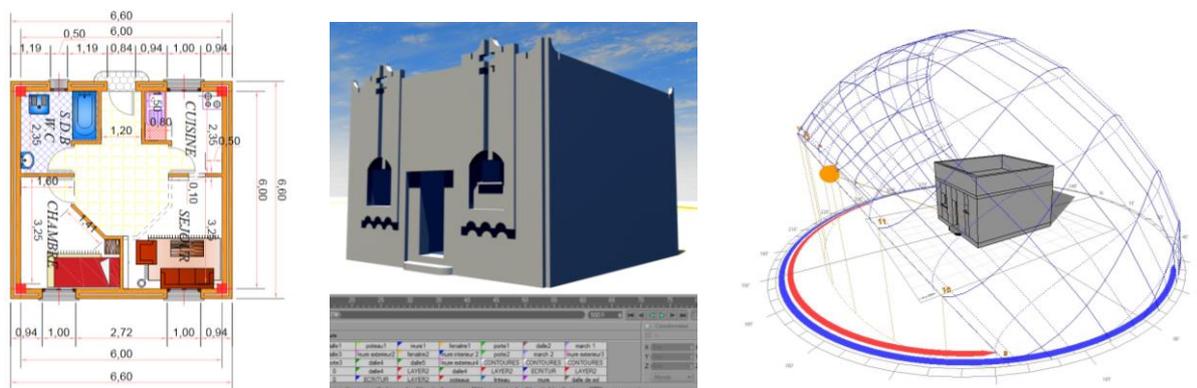


Figure 4.1. Carte de situation géographique de la wilaya de Ghardaïa

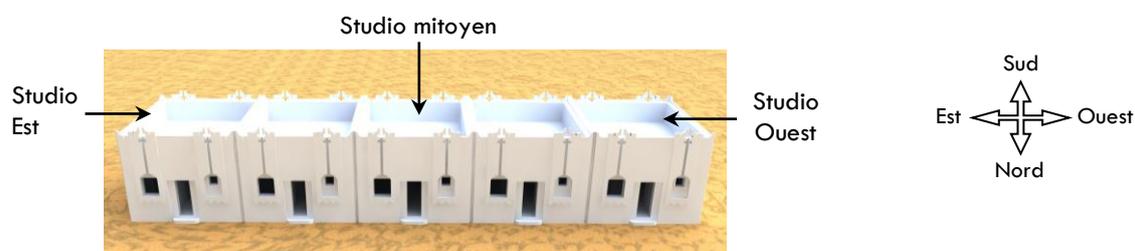
La surface totale du studio est d'environ 43.56 m² (6.6m x 6.6m), la hauteur des murs est de 3 m. le schéma descriptif de la structure est représenté par la figure 4.2. Les caractéristiques et les propriétés thermo-physiques de l'enveloppe sont celles utilisées dans le chapitre 2.

Le choix de cette conception était principalement basé sur l'opportunité d'avoir différents indices de compacité en faisant varier le mode de contact de ce studio.

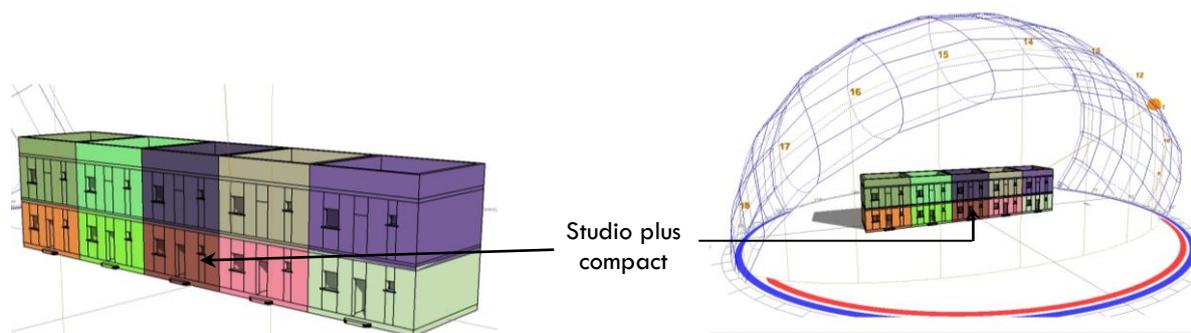
Zone thermique	Surface (m ²)
Salon	7.75
Cuisine	4.90
Bloc sanitaire	4.90
Espace de dégagement lié au hall	8.80
Chambre	7.75



(a): Studio avec exposition totale



(b): Studio avec exposition partielle



(c): Studio avec exposition partielle et une meilleure compacité

Figure 4.2. Plans descriptifs 2D et 3D du studio pour différents types d'exposition (totale, mitoyenne et partielle)

4.3. Bilan énergétique global d'un bâtiment & Méthode d'évaluation

L'objectif de la méthode proposée est d'être capable d'évaluer les besoins d'énergie pour le chauffage, le refroidissement, l'eau chaude sanitaire et les différents appareils électriques. L'efficacité énergétique d'un bâtiment est

influencée par divers facteurs : orientation, forme, qualité de l'isolation thermique, choix des fenêtres, ...

Les besoins en chauffage et/ou en refroidissement calculés pour un bâtiment, exprimés en kilowattheures (kWh) sont donnés en général par les équations ci-dessous [26-28]:

$$Q_{Tot} = \left| Q_{Enveloppe} \pm (Q_{Occup} + Q_{Elec}) \right| + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (4.1)$$

Pour la période de chauffage, l'équation 4.1 deviendra :

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} - Q_{Solaire} \quad (4.2)$$

Pour le refroidissement, l'équation générale se transforme en:

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} + (Q_{Occup} + Q_{Elec}) + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} + Q_{Solaire} \quad (4.3)$$

En intersaisons, si la chaleur diffusée par les apports internes, comme la lumière, les occupants et leurs activités, est supérieure par rapport à la consommation d'énergie due à l'enveloppe, les besoins énergétiques seront calculés comme suit:

$$Q_{Tot} = \left| Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) \right| + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (4.4)$$

Toujours en intersaisons et si la chaleur diffusée cette fois-ci est inférieure à la consommation d'énergie due à l'enveloppe, l'équation générale se simplifie comme suit :

$$Q_{Tot} = Q_{Enveloppe} - (Q_{Occup} + Q_{Elec}) + Q_{ECS} + Q_{Cons_Elc} \pm Q_{Solaire} \quad (4.5)$$

4.3.1. Besoins énergétiques dus à l'enveloppe

Les besoins énergétiques calculés pour une construction quelconque par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur sont exprimés en kilowatts-heure par la formule suivante [26-28]:

$$Q_{Enveloppe} = 24 DP_{Enveloppe} Dj \quad (4.6)$$

$DP_{\text{Enveloppe}}$: Somme des déperditions thermiques dues aux murs, fenêtres, portes, plafonds, ponts thermiques, sol, planchers et à la ventilation, (W/K).

D_j : Nombre de degrés-jours de chauffage et de refroidissement.

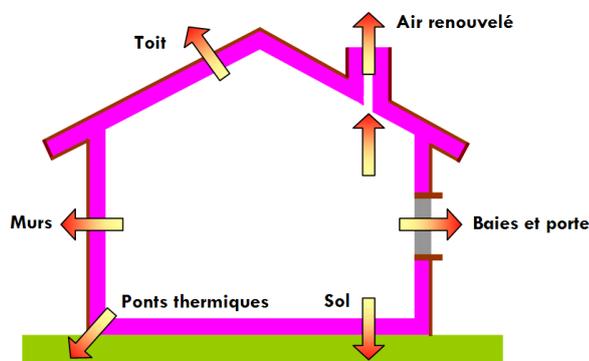


Figure 4.3. Sources principales de déperditions

$$DP_{\text{Enveloppe}} = DP_{\text{plafonds}} + DP_{\text{murs}} + DP_{\text{sols}} + DP_{\text{portes}} + DP_{\text{fenêtres}} + DP_{\text{ponts}} + DP_{\text{ventil}} \quad (4.7)$$

Chaque terme est calculé par l'une des équations suivantes [26-28]:

$$DP_{\text{plafonds}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{plafond}_i} S_{\text{plafond}_i} U_{\text{plafond}_i} \quad (4.8)$$

$$DP_{\text{murs}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{mur}_i} S_{\text{mur}_i} U_{\text{mur}_i} \quad (4.9)$$

$$DP_{\text{sols}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{sol}_i} S_{\text{sol}_i} U_{\text{sol}_i} \quad (4.10)$$

$$DP_{\text{portes}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{porte}_i} S_{\text{porte}_i} U_{\text{porte}_i} \quad (4.11)$$

$$DP_{\text{fenêtres}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{fenêtre}_i} S_{\text{fenêtre}_i} U_{\text{fenêtre}_i} \quad (4.12)$$

S_i : la surface (m^2).

b_i : le coefficient de réduction des déperditions thermiques.

U_i : le coefficient de transmission thermique par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur ($W/m^2 K$).

La résistance thermique R mesure l'aptitude d'un matériau à résister au passage d'un flux de chaleur. Ainsi, les valeurs des coefficients de transmission thermique U seront calculées comme suit:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^{i=n} R_i + R_{se}} \quad (4.13)$$

R_{si} : la résistance d'échange thermique superficielle intérieure ($m^2 K/W$)

R_i : les résistances thermiques de chaque couche de construction ($m^2 K/W$)

R_{se} : la résistance d'échange thermique superficielle extérieure ($m^2 K/W$)

Pour les surfaces planes, les valeurs des résistances thermiques qui seront retenues sont données par le tableau 4.1.

	Direction du flux de chaleur		
	Ascendant	Horizontal	Vers le bas
R_{si} ($m^2 K/W$)	0.10	0.13	0.17
R_{se} ($m^2 K/W$)	0.04	0.04	0.04

Tableau 4.1. Valeurs des résistances thermiques superficielles

Pour le calcul du coefficient de réduction, il faut distinguer :

- Les surfaces des parois séparant l'espace non chauffé de la zone chauffée
- Les surfaces des parois séparant la zone non chauffée de l'extérieur, du plancher ou d'un autre espace non chauffé
- Le type de l'espace non chauffé
- L'état de l'isolation thermique des parois adjacentes à l'espace non chauffé
- L'état de l'isolation thermique de l'espace non chauffé

Pour un mur en contact avec l'extérieur, $b = 1$.

Pour un mur enterré ou un plancher sur vide sanitaire, $b = 0.8$.

Les valeurs du coefficient de réduction des déperditions thermiques doivent être données en fonction d'un rapport de surface et d'un coefficient équivalent U des différentes parois.

Pour les bâtiments adjacents autres que d'habitation, $b = 0.2$.

Dans les autres cas, les valeurs du coefficient de réduction des pertes de chaleur doivent être données dans les tableaux ci-dessous en fonction du rapport de surface A_{iu} / A_{ue} et le coefficient équivalent U .

R = A _{iu} /A _{ue}	U _{v,ue} (W/m ² K)			
	0.0	0.3	3.0	9.0
R ≤ 0.25	0.80	0.85	0.90	0.95
0.25 < R ≤ 0.50	0.65	0.75	0.80	0.90
0.50 < R ≤ 0.75	0.55	0.65	0.75	0.85
0.75 < R ≤ 1.00	0.50	0.55	0.70	0.80
1.00 < R ≤ 1.25	0.45	0.50	0.65	0.80
1.25 < R ≤ 2.00	0.35	0.40	0.50	0.70
2.00 < R ≤ 2.50	0.30	0.35	0.45	0.65
2.50 < R ≤ 3.00	0.25	0.30	0.40	0.60
3.00 < R ≤ 3.50	0.20	0.30	0.40	0.55
3.50 < R ≤ 4.00	0.20	0.25	0.35	0.50
4.00 < R ≤ 6.00	0.15	0.20	0.25	0.40
6.00 < R ≤ 8.00	0.10	0.15	0.20	0.35
8.00 < R ≤ 10.00	0.10	0.10	0.20	0.30
10.00 < R ≤ 25.00	0.05	0.10	0.15	0.25
25.00 < R ≤ 50.00	0.05	0.05	0.05	0.15
R > 50.00	0.00	0.00	0.05	0.05



Tableau 4.2 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue} [27]

R = A _{iu} /A _{ue}	U _{v,ue} (W/m ² K)			
	0.0	0.3	3.0	9.0
R ≤ 0.25	0.35	0.50	0.85	0.95
0.25 < R ≤ 0.50	0.20	0.35	0.70	0.90
0.50 < R ≤ 0.75	0.15	0.25	0.65	0.85
0.75 < R ≤ 1.00	0.15	0.20	0.55	0.80
1.00 < R ≤ 1.25	0.10	0.15	0.50	0.75
1.25 < R ≤ 2.00	0.05	0.10	0.40	0.65
2.00 < R ≤ 2.50	0.05	0.10	0.35	0.60
2.50 < R ≤ 3.00	0.05	0.10	0.30	0.55
3.00 < R ≤ 3.50	0.05	0.05	0.25	0.50
3.50 < R ≤ 4.00	0.05	0.05	0.25	0.45
4.00 < R ≤ 6.00	0.00	0.05	0.20	0.35
6.00 < R ≤ 8.00	0.00	0.05	0.15	0.30
8.00 < R ≤ 10.00	0.00	0.05	0.10	0.25
10.00 < R ≤ 25.00	0.00	0.00	0.10	0.20
25.00 < R ≤ 50.00	0.00	0.00	0.05	0.10
R > 50.00	0.00	0.00	0.00	0.05

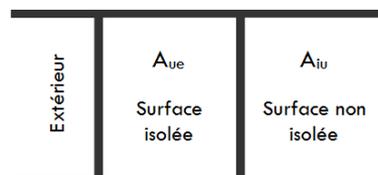


Tableau 4.3 : Coefficient de réduction des pertes de chaleur en fonction du coefficient de transmission thermique surfacique et du rapport de surface A_{iu} / A_{ue} [27]

Les déperditions thermiques dues aux ponts thermiques sont données par l'équation suivante [26-28]:

$$\begin{aligned}
 DP_{\text{ponts thermiques}} = & \sum_{i,j} b_{pb_i/m_j} k_{pb_i/m_j} l_{pb_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{pi_i/m_j} k_{pi_i/m_j} l_{pi_i/m_j} \\
 + & \sum_{i,j} b_{ph_i/m_j} k_{ph_i/m_j} l_{ph_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{rf_i/m_j} k_{rf_i/m_j} l_{rf_i/m_j} + \sum_{i,j} b_{men_i/m_j} k_{men_i/m_j} l_{men_i/m_j}
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

l_{pb_i/m_j} : longueur du pont thermique, plancher bas i - mur j

l_{pi_i/m_j} : longueur du pont thermique, étage intermédiaire i - mur j

l_{ph_i/m_j} : longueur du pont thermique, étage supérieur i - mur j

l_{rf_i/m_j} : longueur du pont thermique, mur de cisaillement i- mur j.

$$l_{rf_i/m_i} = 2 h_{Moy_Plaf} (N_{appart} - N_{niv}) \quad (4.15)$$

h_{Moy_Plaf} : la hauteur moyenne du plafond

N_{appart} : nombre d'appartements

N_{niv} : nombre de niveaux.

l_{men_i/m_j} : la longueur du pont thermique, charpenterie i - mur j

k : conductivité thermique (W/m K)

Pour calculer les déperditions thermiques dues à la ventilation, nous devons se baser sur les données suivantes:

- Menuiserie : avec ou sans joint
- Surface adjacente avec l'extérieur à l'exception du plancher bas
- Surface habitable
- Type de ventilation

La ventilation des locaux est obligatoire, pour ce faire, un débit minimal doit être assuré afin d'éviter les inconforts. Afin de réduire les dépenses énergétiques, un soin tout particulier doit être apporté au choix et à la mise en œuvre des composants. L'étanchéité doit être réalisée le mieux possible car les fuites dans les parties chauffées augmentent les débits entrants et donc les déperditions. Le défaut d'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment (perméabilité) joue aussi un grand rôle dans les déperditions thermiques. Ces défauts d'étanchéité sont multiples:

- Joints des ouvrants de mauvaise qualité
- Linéiques des ouvrants non rendus étanches par application de mousse expansive ou tout autre procédé.
- Appuis de fenêtres scellés sur les côtés mais non par le dessous
- Murs extérieurs en maçonnerie courante, briques ou parpaings, maçonnés avec trop de jeu...etc.

$$DP_{Ventil} = 0.34 qv_{en} \quad (4.16)$$

DP_{Ventil} : déperditions thermiques dues au système de ventilation par degré de différence en température entre l'intérieur et l'extérieur (W/K)

qv_{en} : est le débit d'air équivalent transitant dans le logement

0.34 : est la capacité thermique volumique de l'air en Wh/m³K

$$qv_{en} = qv_{Fen_H} + qv_{Fen_S} + qv_{Comb} + qv_{vmc} + qv_{perm} + qv_{condext} \quad (4.17)$$

Si un ou plusieurs des débits ne sont pas utilisés, ils ont pour valeur 0

qv_{Fen_H} : est le débit d'air d'aération quand les fenêtres sont utilisées comme système de ventilation d'hygiène.

$$qv_{Fen_H} = 1,8 D_{Hyg} \quad (4.18)$$

D_{Hyg} est le débit d'hygiène

qv_{Fen_S} : est le débit supplémentaire dans le cas où l'ouverture des fenêtres vient en complément du système spécifique (aspect comportemental de l'occupant)

$$qv_{Fen_S} = 1800 (0.01 Sp) F_{ouv} v_{fen} \quad (4.19)$$

Sp est la surface de la pièce

$$F_{ouv} = 0.6 \text{ Max} (0, (T_{ext}/25)+0.2) \quad (4.20)$$

$$v_{fen} = 0.5 (0.026 + 0.00525 \Delta T) \quad (4.21)$$

qv_{Comb} : est le débit supplémentaire extrait lié au fonctionnement des appareils à combustion quand ils se trouvent dans les pièces chauffées.

$$qv_{comb} = \begin{cases} 0.002 P_{Chauf} & \text{pour les VMC gaz} \\ 0.003 P_{Chauf} & \text{pour les autres} \end{cases} \quad (4.22)$$

P_{Chauf} : est la puissance fournie par le système de chauffage

$$P_{Chauf} = 1.2 (U_T + U_V) \Delta T \quad (4.23)$$

U_T : est le coefficient de déperdition par transmission. Afin de simplifier, il est possible d'utiliser la formule utilisant le coefficient $U_{bât}$

Ce coefficient est par définition la déperdition théorique d'un bâtiment par transmission à travers les murs, il est exprimé en (W/m² K). Cette méthode de

calcul est la plus utilisée, mais sa valeur rationnelle est de 0 à 2, sachant que 0 est une excellente isolation et 2 une isolation inexistante [29].

- Construction non isolée et fenêtres simples vitrage : $U_T = 1.80$
- Construction entre 1974 et 1982 : $U_T = 1.40$
- Construction entre 1983 et 1989 : $U_T = 1.15$
- Construction entre 1990 et 2000 : $U_T = 0.95$
- Construction norme RT 2000 entre 2001 et 2006 : $U_T = 0.80$
- Construction norme RT 2005 entre 2007 et 2012 : $U_T = 0.75$
- Construction nouvelle avec très bonne isolation : $U_T = 0.40$
- Construction dernière génération avec excellente isolation : $U_T = 0.30$

H_v : est le coefficient de déperdition par renouvellement d'air. Il est possible d'utiliser les débits d'hygiène majorés de 30 % pour tenir compte des autres déperditions.

ΔT : est la différence entre la température de la pièce et celle de base ($^{\circ}\text{C}$)

$q_{v_{vmc}}$: est le débit d'air extrait par la ventilation mécanique. Le débit $q_{v_{vmc}}$ est corrigé par les coefficients C_d et C_{fr} .

$$q_{v_{vmc}} = D_{Hyg} C_d C_{fr} \quad (4.24)$$

Le coefficient de dépassement C_d est un facteur multiplicatif des débits d'hygiène visant à prendre en compte les contraintes de dimensionnement de l'installation de ventilation et la dispersion des caractéristiques de composants. $C_d = 1.15$ dans le cas où le matériel est certifié, 1.30 dans les autres cas.

Le coefficient de fuite du réseau C_{fr} est une valeur par défaut, 0.833 en basse pression ($< 20 \text{ Pa}$) ou 2.5 dans les autres cas.

$q_{v_{perm}}$: est le débit de fuite de l'enveloppe.

$$q_{v_{perm}} = A_T C_{perm} \quad (4.25)$$

La perméabilité de l'enveloppe est représentée par le débit de fuite (en m^3/h) sous une dépression de 4 pascals par m^2 de surface de l'enveloppe. La surface de l'enveloppe considérée est la surface des parois déperditives A_T .

A_T : est la surface intérieure totale des parois qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés, en m^2 , dont on exclut les planchers

bas. La valeur par défaut de la perméabilité de l'enveloppe (en m³/h m² sous 4 Pa) est calculée en multipliant la surface d'enveloppe (A_T) par la valeur de perméabilité donnée dans le tableau suivant:

Usage	C _{perm}
Logements individuels	1.3
Logements collectifs	1.7
Autres usages	3

Tableau 4.4 : Valeur de la perméabilité

q_{Vcondext} : est le débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel. Pour connaître le débit, il faut connaître les différentes pertes de charge, perte de charge linéique du conduit ΔP_{cond}, perte de charge singulière des coudes ΔP_{coude}, perte de charge singulière de la bouche ΔP_{bouche}, ainsi que la force motrice due à la différence de densité entre l'air chaud du logement et l'air extérieur ΔP_{mot}.

$$M_{\text{Air_froid}} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + T_{\text{ext}}) \quad (4.26)$$

$$M_{\text{Air_chaud}} = 1.293 \cdot 273.15 / (273.15 + T_{\text{int}}) \quad (4.27)$$

M : la masse d'air (kg)

T_{ext} et T_{int} étant respectivement la température extérieure et intérieure (en °C)

Exemple [28]: T_{int} = 20 °C et T_{ext} = 0 °C

Soit,

$$M_{\text{Air_froid}} = 1.293 \times 273.15 / (273.15 + 0) = 1.293 \text{ kg/m}^3$$

$$M_{\text{Air_chaud}} = 1.293 \times 273.15 / (273.15 + 20) = 1.204786 \text{ kg/m}^3$$

La dépression motrice est donc égale à

$$\Delta P_{\text{mot}} = (1.293 - 1.204786) \cdot h \cdot g,$$

h : est la hauteur en m du conduit de ventilation de l'axe de la bouche au haut du conduit.

g : l'accélération de la pesanteur égale à 9.81 m/s².

Ceci nous donne un coefficient de (1.293 - 1.204786) x 9.81 = 0.865 Pa/m.

Comme les valeurs par défaut sont $T_{\text{int}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T_{\text{ext}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, il suffit de multiplier 0.865 par la hauteur du conduit pour obtenir la dépression motrice ΔP_{mot} .

Si le conduit est de forme rectangulaire ou carré, son diamètre équivalent D_{equiv} doit être utilisé

$D_{\text{equiv}} = 4 A / P$, où A est la section en m^2 du conduit et P le périmètre en m

Pour obtenir les différentes pertes de charge, il a fallu utiliser les formules suivantes :

$$\Delta P_{\text{cond}} = 1.5 \cdot 0.05 (L / D_{\text{equiv}}) (M_{\text{Air_chaud}} / 2) v^2,$$

v : est la vitesse en m/s

L : la longueur du conduit

$$\Delta P_{\text{coude}} = 1.15 (M_{\text{Air_chaud}} / 2) v^2 N_{\text{coude}},$$

N_{coude} : est le nombre de coudes

$$\Delta P_{\text{bouche}} = 2.5 (M_{\text{Air_chaud}} / 2) v^2$$

Pour connaître le débit en m^3/h , il est nécessaire de connaître la vitesse en m/s. Comme les pertes de charge sont fonction de la vitesse de l'air dans le conduit, une vitesse limite ne peut être dépassée. Ce qui veut dire que la perte de charge totale ne pourra excéder la dépression = à ΔP_{mot} . Il va donc falloir procéder par itération pour trouver la vitesse du fluide sans pour autant dépasser la dépression motrice. Pour cet exercice, un outil informatique est conseillé. Une fois la vitesse connue, il suffit d'utiliser la formule suivante pour connaître le débit en m^3/h .

$$\text{Débit} = v \cdot S \cdot 3600$$

Exemple [28]: $h = 7 \text{ m}$, $L = 8 \text{ m}$, $A = 0.2 \times 0.2 = 0.04 \text{ m}^2$, $N_{\text{coude}} = 2$

$$P_{\text{mot}} = 0.865 \times 7 = 6.05 \text{ Pa}$$

$$P = 0.2 \times 4 = 0.8 \text{ m}$$

$$D_{\text{equiv}} = 4 \times 0.04 / 0.8 = 0.2 \text{ m}$$

À l'aide d'un tableur, la vitesse obtenue par itérations successives pour une perte de charge totale n'excédant pas 6.05 Pa (6.0577 Pa) est de 1.135 m/s, ce qui donne comme pertes de charge pour chaque poste :

$$\Delta P_{\text{cond}} = 1.5 \times 0.05 \times (L / 0.2) \times (1.204786 / 2) \times v^2 = 2.33$$

$$\Delta P_{\text{coude}} = 1.15 \times (1.204786 / 2) \times v^2 \times 2 = 1.78$$

$$\Delta P_{\text{bouche}} = 2.5 \times (1.204786 / 2) \times v^2 = 1.94$$

Ceci donne une perte de charge totale de $2.33 + 1.78 + 1.94 = 6.05$ Pa qui est égale à la dépression motrice.

Le débit en m³/h est donc de $q_{V_{\text{condext}}} = 1.135 \times 0.04 \times 3600 = 163.44$ m³/h

4.3.2. Besoins en eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire (ECS) désigne, en termes de plomberie, l'eau réchauffée utilisée à des fins domestiques. La production d'eau chaude est consommatrice en énergie. Dans les pays occidentaux, la consommation d'eau chaude sanitaire est, en moyenne, d'environ 50 litres à 40 °C par personne et par jour, cuisine comprise. En 1999, environ 76 % de la consommation d'énergie domestique revient au chauffage, 12 % au chauffage de l'eau chaude sanitaire, le reste se répartit entre l'énergie mécanique, l'éclairage, ...etc. [29]

Il est assez difficile de cerner avec suffisamment de précision les besoins en eau chaude sanitaire car ils sont fonction du standing, du nombre d'occupants, de leurs âges, de leurs professions, de leurs modes de vie, du jour (ouvrable, week-end ou férié), de la saison, et bien d'autres circonstances encore. L'expérience a montré que les besoins raisonnables se situaient entre 25 et 60 litres d'eau chaude à 50 °C par jour et par personne [26, 28]. Le calcul des besoins en eau chaude sanitaire doit être fait par jour puis on multiplie par le nombre de jours du mois considéré. Si le volume est différent les jours de la semaine et le Week-end, une moyenne journalière peut être faite puis on multiplie par le nombre de jours du mois considéré. La formule qui donne l'énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire est donnée par [26, 28]:

$$Q_{\text{ECS}} = p \cdot 1.1628 \cdot V_{\text{ECS}} \cdot (T_{\text{ECS}} - T_{\text{ef}}) \quad (4.28)$$

Q_{ECS} : est l'énergie nécessaire à la production de l'eau chaude sanitaire pour la journée, en Wh.

p : est la masse volumique de l'eau en fonction de sa température (en Kg/litre)

p : elle peut être prise égale à 1 Kg/litre.

V_{ECS} : est le volume d'eau (m^3),

$$V_{ECS} = 50 N_{Pers} \quad (4.29)$$

N_{Pers} : est le nombre de personnes occupant le logement

T_{ECS} : est la température de l'eau chaude au point de soutirage, en °C.

T_{ef} : est la température moyenne de l'eau froide du mois considéré entrant dans le ballon ou le serpentín de production d'eau chaude sanitaire (production instantanée), en °C.

4.3.3. Apports internes dus aux occupants

L'être humain diffuse de la chaleur pour maintenir ses fonctions corporelles. Cette chaleur résulte de la combustion des aliments ingérés avec l'oxygène respiré. Le tableau 4.5 donne une estimation sur la diffusion de chaleur en fonction de l'activité pratiquée par l'individu. Lors de l'exécution d'activités simples de bureau, un être humain de résistance et de taille moyennes diffuse une chaleur moyenne d'environ 120 watts et pour des travaux simples à la maison, au bureau ou dans un atelier une chaleur d'environ 150 watts; celle-ci peut s'élever pour des tâches moyennes à difficiles à plus de 200 watts. Les apports internes dus aux occupants sont donnés par l'équation 4.30 [26, 28]:

$$Q_{Occup} = C_p N_{Pers} D_{pres/jour} N_{Jch} \quad (4.30)$$

C_p : la chaleur dégagée par occupant (W/occupant)

N_{Pers} : le nombre d'occupant

$D_{pres/jour}$: la durée de présence par jour (h/jour)

N_{Jch} : le nombre de jours chauffés (jours/an)

Niveau d'activité	Exemples d'activité	Diffusion de chaleur par personne (sensible et latente)
1	Activité statique assise (lire et écrire par exemple)	120 W
2	Travaux simples assis ou debout, travail en laboratoire, machine à écrire	150 W
3	Activités corporelles légères	190 W
4	Activités corporelles moyennes à difficiles	Plus de 200 W

Tableau 4.5 : Diffusion de chaleur par personne [26, 28]

4.3.4. Apports internes dus à l'éclairage et aux équipements électriques

Les machines électriques, en raison de leur fonctionnement, émettent une certaine quantité de chaleur dans l'ambiance. Pour les appareils électriques, il n'existe pas une méthode de calcul universelle qui puisse être appliquée pour calculer les apports, ni la répartition sensible / latente de cette chaleur. Dans certaines références, il a été proposé quelques valeurs de gains en chaleur pour différents appareils électroménagers.

Type d'équipement	Durée (heure) et modes de puissance de fonctionnement (Watts)				Energie (KWh)
	Mode 1	heure	Mode 2	heure	
Téléviseur + Démo	20	19	78	5	0.770
Réfrigérateur	12	22	145	2	0.554
Eclairage	75	6			0.450
Ordinateur	32	2	186	4	0.808
Divers					1
Total par jour					3.5820

Tableau 4.6. Diffusion de chaleur par l'éclairage et équipements électriques (cas de notre étude) [26, 28, 31]

4.3.5. Charges énergétiques dues aux appareils électriques et à l'éclairage

Le calcul de la consommation électrique se fera en fonction des données suivantes:

- La puissance de l'appareil électrique exprimée en watts
- Le nombre d'heures par jour pendant lesquelles l'appareil fonctionne
- Le nombre de jours par an pendant lesquels l'appareil fonctionne.

Le calcul se fera donc en effectuant le produit entre le nombre d'heures d'utilisation, le nombre de jours d'utilisation et la puissance de l'appareil en watts. Le résultant sera divisé par 1000 pour convertir le nombre de watts en kilowatts.

Type d'équipement	Puissance (W)		Durée d'utilisation par jour	Consommation moyenne par jour (Wh)	
	Valeurs de fonctionnement	Valeur choisie pour les calculs			
TV LCD avec Démo intégré	en service	90 à 250	140	5 h	757.00
	en veille	3	/	19 h	
Réfrigérateur (250 litres)		150 à 200	/	En continu	551.00
Eclairage : 4 lampes économiques		15 à 25	20	6 h (Séjour)	220.00
				3 h (Cuisine)	
				1 h (SDB)	
				1 h (Chambre)	
Ordinateur à écran plat	en service	70 à 80	75	4 h	306.00
	en veille	3	/	2 h	
Chargeur de GSM		5	/	1 h	0.50
Fer à repasser		750 à 1100	925	15 min	231.25
Aspirateur		650 à 800	720	12 min	144.00
Radio-réveil		3 à 6 W	4.5	en continu	108.00
Rasoir électrique		8 à 12 W	10	3 min	0.50
Sèche-cheveux		300 à 600 W	450	5 min	37.50
				Total par jour (Wh)	2355.75/jour

Tableau 4.7. Consommation moyenne des appareils électriques par jour (cas de notre étude) [26, 28, 31]

4.3.6. Les apports solaires

Les apports solaires dépendent de l'ensoleillement normalement présent sur le site concerné et des surfaces réceptrices équivalentes sur les différentes orientations. Pour une période de calcul donnée, les apports solaires se calculent comme suit :

$$Q_{\text{Solaire}} = \sum_j I_{Sj} \sum_n A_{Snj} \quad (4.31)$$

La première somme s'effectue sur toutes les orientations j , (horizontal, nord, sud, est, ouest, Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est, Sud-Ouest ...etc.).

La seconde somme s'effectue sur toutes les surfaces n d'orientation j qui captent le rayonnement solaire

I_{Sj} : est l'irradiation solaire sur une surface unitaire ayant l'orientation j

A_{Snj} : est l'aire réceptrice équivalente de la surface ayant l'orientation j . Elle est calculée comme suit:

$$A_S = A F_{Omb} F_{Red} g \quad (4.32)$$

A : est l'aire de la baie (m²)

F_{Red} : est le facteur de réduction pour les encadrements des vitrages, égal au rapport de l'aire de la surface transparente à l'aire totale de la menuiserie vitrée;

F_{Omb} : est le facteur d'ombre, il est défini par l'utilisateur pour des raisons simplificatrices, et peut être calculé par :

$$F_{Omb} = F_{Omb_R} F_{Omb_S} \quad (4.33)$$

F_{Omb_R} : est le facteur d'ombre des rideaux;

F_{Omb_S} : est le facteur d'ombre de la surface qui peut être calculé par :

$$F_{Omb_S} = F_{Cor_h} F_{Cor_Sur} F_{Cor_Ecr} \quad (4.34)$$

F_{Cor_h} : est le facteur de correction pour l'horizon

F_{Cor_Sur} : est le facteur de correction pour les surplombs

F_{Cor_Ecr} : est le facteur de correction pour les écrans latéraux

g : est le facteur solaire de la baie

Le facteur solaire utilisé dans cette formule est en principe la moyenne dans le temps du rapport de l'énergie traversant l'élément exposé à l'énergie incidente sur celui-ci, en l'absence d'ombrage. Certaines valeurs figurent dans le tableau 4.8. Ces valeurs correspondent à l'incidence normale, avec une surface propre.

Type de vitrage	g
Vitrage simple	0.85
Double vitrage clair	0.75

Tableau 4.8. Facteurs solaires pour les deux types de vitrages les plus courants

4.4. Contribution des gains solaires passifs

Dans cette partie, le tableau 4.10 récapitule les besoins mensuels en chauffage et / ou en climatisation en 2016. Cette demande en énergie servait à assurer un confort permanent pour toutes les zones du studio. Les résultats affichés concernent le premier cas qui correspond à un studio avec une exposition totale (figure 4.2 -a-). Les paramètres d'entrée sélectionnés sont les suivants: la

température de l'eau froide T_{CW} varie en fonction du mois, $T_{ECS} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $C_p = 150 \text{ W}$, $N_{Pers} = 2$, $D_{pres/jour} = 14 \text{ h}$, la surface du vitrage est environ 95% de la surface totale de la fenêtre, $F_{Omb} = 0.7$ pour l'orientation sud, $F_{Red} = 0.8$ et $g = 0.8$. La température donnée par l'équation d'Auliciems a été considérée comme la température du confort désirée.

$$T_{Conf} = 17.8 + 0.31 T_{ext} \quad (4.35)$$

T_{ext} : la température extérieure de l'air ambiant ($^{\circ}\text{C}$)

Dans cette étude, seuls les gains solaires d'hiver seront pris en considération pour évaluer l'efficacité énergétique du studio. Les valeurs données par le tableau 4.9 sont mesurées et collectées à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable URAER de Ghardaïa.

Mois	100 - Taux de couverture du nuage (en %)	Valeurs pour le plan vertical sud, avec nuages (en KWh)
Janvier	95.931	6.489
Février	93.765	6.166
Mars	96.791	5.316
Avril	93.343	3.667
Mai	92.719	2.499
Juin	97.130	2.091
Juillet	96.580	2.270
Août	97.021	3.103
Septembre	90.912	4.064
Octobre	96.281	5.439
Novembre	95.425	6.024
Décembre	88.402	5.727
Valeur moyenne annuelle	94.525	4.405

Tableau 4.9. Valeurs annuelles et mensuelles des gains solaires journaliers moyens Q_{Solar} par unité de surface (KWh / m^2)

Mois	T _{ext}	T _{Conf}	T _{ECS}	D _j	Q _{enveloppe}	Q _{solaire}	Apports internes		Besoin en eau chaude Q _{ECS} à T _{ECS} = 50 °C En KWh	Q _{cons_Elc}	Q _{Tot}
	En °C	En °C	En °C		En KWh	En KWh	Q _{occup} En KWh	Q _{Elc} En KWh		En KWh	En KWh
Janvier	13.9323	22.1190	09.00	253.7881	3094.9899	183.8432	130.2000	111.0420	147.7919	73.0282	2869.0962
Février	14.7552	22.3741	09.00	213.3301	2600.8979	176.3496	117.6000	100.2960	133.4894	65.9610	2406.1027
Mars	17.1516	23.1170	11.50	184.9270	2252.3946	168.3292	130.2000	111.0420	138.7802	73.0282	2054.6318
Avril	22.7367	24.8484	13.20	63.3510	768.8811	/	126.0000	107.4600	128.3731	70.6725	734.4667
Mai	27.2742	26.2550	15.80	31.5950	383.2349	/	130.2000	111.0420	123.2801	73.0282	820.7852
Juin	31.8233	27.6652	18.50	124.7430	1523.7859	/	126.0000	107.4600	109.8846	70.6725	1937.8030
Juillet	34.3759	28.4565	19.30	183.4997	2251.5015	/	130.2000	111.0420	110.6637	73.0282	2676.4355
Août	32.9968	28.0290	19.10	154.0010	1884.9596	/	130.2000	111.0420	111.3846	73.0282	2310.6145
Septembre	29.4333	26.9243	18.00	75.2700	915.9228	/	126.0000	107.4600	111.6288	70.6725	1331.6841
Octobre	24.9839	25.5450	15.80	17.3950	210.7126	/	130.2000	111.0420	123.2801	73.0282	226.8377
Novembre	16.5433	22.9284	12.30	191.553	2333.7582	184.5946	126.0000	107.4600	131.5127	70.6725	2117.8888
Décembre	12.3000	21.6130	09.00	288.7030	3522.2566	181.3434	130.2000	111.0420	147.7919	73.0282	3320.4914
Total (KWh)					21743.2956				1517.8611	859.8484	22806.8376

Tableau 4.10. Consommation énergétique mensuelle et annuelle requise pour maintenir une température du confort T_{Conf}

Les valeurs affichées indiquent que ce studio est énergivore, les besoins énergétiques annuels se sont fixés à 523.57 KWh/m²/an. Cela veut dire que, maintenir une température à T_{Conf} dans toutes les zones, y compris la cuisine, la salle de bain, les toilettes et le hall, sans aucune rupture, veut dire assurer une consommation qui s'est fixée à 22806.84 kWh/an. Toutefois, conformément à cette température retenue, l'estimation financière pour l'ensemble du volume habitable est estimée à 145924.20 DA/an [32]. L'Algérie est l'un des rares pays au monde où le prix du kilowattheure est moins cher en le comparant à d'autres pays. Le prix réel du KWh est de 10.54 DZD [33]. Cependant, le prix réel de la facture énergétique sans compter la subvention de l'état est de 240384.07 DA/an. Il est également conclu que le processus de chauffage est obligatoire pour la période allant du mois de Novembre au mois de Mars, tandis que le refroidissement est requis entre Mai et Septembre. Les mois d'Octobre et d'Avril appartiennent à la période d'intersaison.

Le gain solaire net pour le chauffage est de 894.46 KWh/an, c'est une petite part des besoins totaux car la construction est à forte consommation énergétique. Ce gain d'énergie solaire contribue à une diminution de 3.78%.

Les résultats vont être changés si la compacité et l'isolation thermique sont renforcées. Pour effectuer ce travail, des couches supplémentaires d'un matériau isolant (0.04 W/mK, 10 kg/m³) vont être ajoutées aux murs extérieurs (10 cm), au toit (10 cm) et au sol (4 cm). L'étude de l'efficacité énergétique sera consacrée aux suivantes situations:

- Premier cas : Studio avec exposition totale (figure 2.4 -a-), l'indice de compacité est de 1.27
- Deuxième cas: Studio Est ou Ouest (figure 2.4 -b-), l'indice de compacité est de 1.12
- Troisième cas: Studio mitoyen (figure 2.4 -b-), l'indice de compacité est 0.97
- Quatrième cas : Studio plus compact (figure 2.4 -c-), l'indice de compacité est de 0.64

Les résultats obtenus dans les figures suivantes ont été déduits en respectant les mêmes démarches suivies pour avoir les résultats du tableau 4.10. La figure 4.4 donne une idée sur l'impact des apports solaires passifs sur les besoins énergétiques requis en fonction de la compacité et de l'isolation thermique.

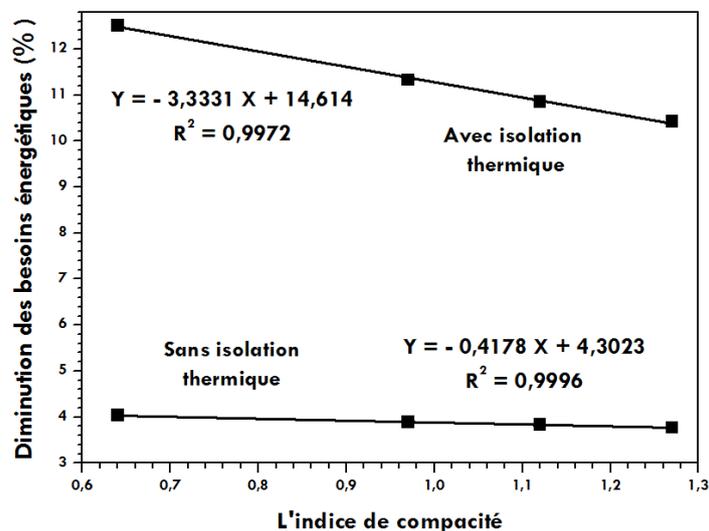


Figure 4.4. Diminution des besoins énergétiques due aux apports solaires passifs

Une régression linéaire peut être projetée pour attribuer un modèle général qui exprime l'économie en énergie due aux apports solaires passifs. Selon cette figure, une meilleure rentabilité des gains solaires est observée pour une meilleure isolation. Le taux de diminution proportionnel par rapport au niveau d'isolation thermique. Pour les mêmes paramètres utilisés dans le tableau 4.10, il est possible de réaliser une réduction de l'ordre de 10.43% si l'enveloppe de cette construction est recouverte par un isolant extérieur. La même chose pour la compacité, une compacité élevée (un faible indice de compacité) entraîne une meilleure diminution des besoins énergétiques. Cependant, le coût de l'énergie varie linéairement avec la consommation d'énergie, c'est pourquoi la réduction des factures d'énergie due au gain solaire passif est similaire aux besoins en énergie.

4.5. Epaisseur économique d'isolation

Faisant suite à l'étude précédente, l'importance croissante de la compacité et de l'isolation thermique apparaît clairement sur les besoins en énergie et la facture énergétique correspondante. Sur la figure 4.5, la variation des charges

énergétiques est exprimée en KWh/m²/an. En effet, il convient par la suite d'associer un modèle de prévision général en utilisant la méthode de régression pour déterminer le type de variation des besoins en énergie en fonction de la compacité du bâtiment.

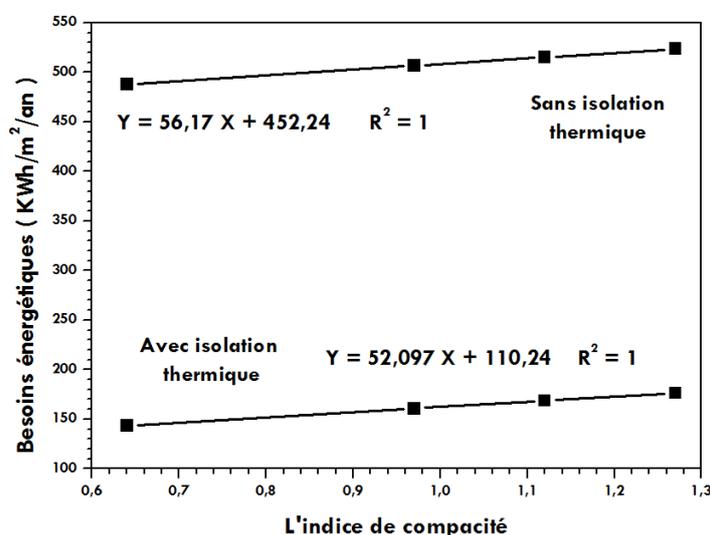


Figure 4.5. L'influence du mode de contact sur les besoins énergétiques (en incluant les apports solaires passifs)

Sur la base des résultats observés, on en déduit que, comme dans le cas des gains solaires passifs, les économies d'énergie sont plus rentables si la construction est bien isolée. Ces circonstances seront donc ensuite projetées sur les factures d'énergie. Dans tous les cas, l'énergie utilisée est inversement proportionnelle à la compacité du bâtiment et elle varie linéairement avec les indices de compacité.

En intégrant une bonne isolation, il est possible de déterminer le niveau d'économie d'énergie obtenu selon le concept de compacité (figure 4.6).

Les résultats obtenus montrent que la situation la plus favorable correspond au quatrième cas qui se caractérise par une meilleure compacité. Il est à noter que près de 4.28% est économisé en sélectionnant ce cas et en le comparant au premier cas (studio avec exposition totale).

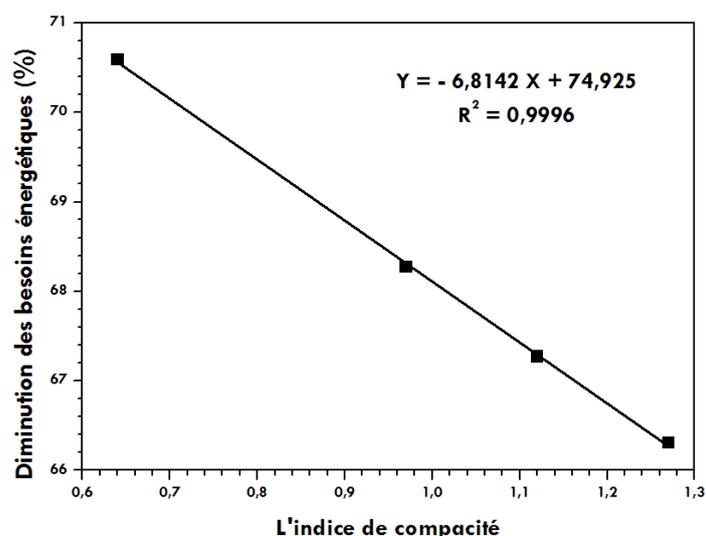


Figure 4.6. Le niveau d'économie d'énergie atteint en cas d'une bonne isolation

Dans un autre contexte, en consultant la littérature, on remarque qu'un grand nombre d'auteurs utilisent le terme épaisseur optimale, cette épaisseur correspond au prix minimum comme dans le cas de la référence [34]. Cette épaisseur correspond à des charges financières permettant de garantir un retour d'investissement nul. En réalité, il s'agit donc d'une épaisseur économique et non optimale. L'épaisseur de l'isolation peut être augmentée, ce qui résulte une réduction significative de la consommation d'énergie, et ceci entraîne par la suite un retour d'investissement.

L'objectif de cette seconde partie est de déterminer l'épaisseur économique du matériau isolant en ajoutant le coût de la procédure d'isolation. Le coût total est défini comme étant la somme du prix du polystyrène qui varie linéairement avec son épaisseur, le coût de tous les travaux d'isolation qui s'élèvent à 498960 DZD (3000 DZD/m²) et la facture énergétique annuelle. Cette épaisseur est nécessaire pour éviter tout investissement dans le futur. Les épaisseurs sont supposées être identiques dans tous les murs. Les résultats prendront en compte l'indice de compacité et les gains solaires. La méthode adoptée est basée sur l'estimation du coût total en fonction de l'épaisseur de la couche isolante. Le prix retenu d'une plaque de polystyrène (couche de 5 cm d'épaisseur et 2 m² de surface) est fixé à 600 DZD. Comme le montre la figure 4.7, le coût total relatif varie avec l'épaisseur du polystyrène.

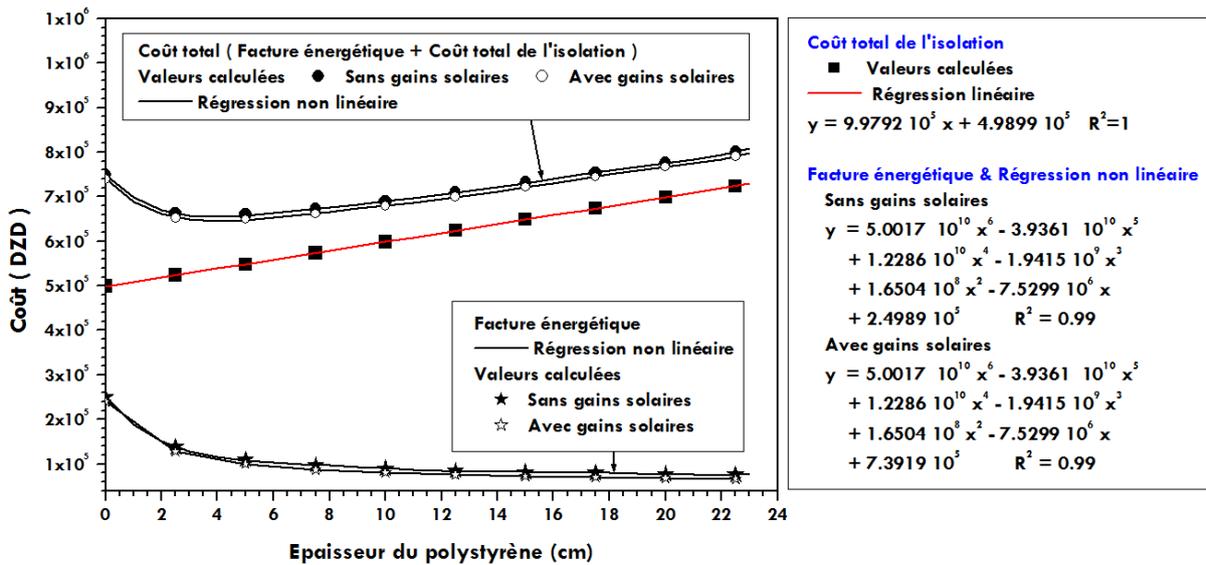


Figure 4.7. Variation du coût total en fonction de l'épaisseur d'isolation

Si le propriétaire de cette construction souhaite payer une facture annuelle minimale sans aucun investissement au cours des prochaines années (c.-à-d. le temps de retour sur investissement est nul), nous devons donc se référer à l'épaisseur la plus économique. Pour notre cas, l'épaisseur économique qui correspond à un coût minimale est indépendante des gains solaires, elle s'est fixée à 3.95 cm. Cette valeur est légitimement obtenue en annulant la dérivée première des fonctions de régressions non linéaires décrites sur la figure 4.7.

Par ailleurs, nous pouvons prouver que cette épaisseur varie en fonction du prix de la plaque isolante. Cette modification subit une variation non linéaire telle que décrite dans la figure 4.8. D'autre part, le prix de la facture énergétique a une influence primordiale sur l'épaisseur économique et il est également compétitif par rapport au prix du polystyrène. C'est pour cette raison qu'on a eu une petite épaisseur économique. D'ailleurs, le prix du kilowattheure en Algérie n'est pas cher en le comparant aux prix à l'échelle internationale. Le prix unitaire converge vers le tiers du prix moyen européen (18.64 € / kWh) [35]. Par exemple, en multipliant la facture d'énergie par 2, l'épaisseur économique requise sera de l'ordre de 5.34 cm. La figure 4.9 apporte quelques éclaircissements sur cette épaisseur économique en fonction de l'augmentation du prix de la facture énergétique.

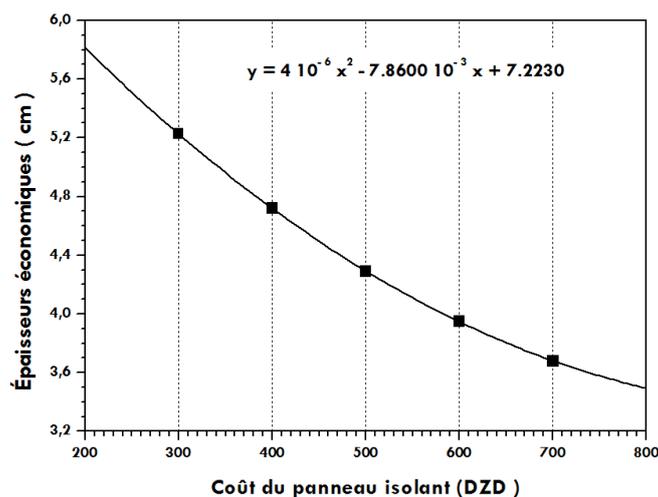


Figure 4.8. Épaisseur économique d'isolation en fonction du coût du panneau isolant

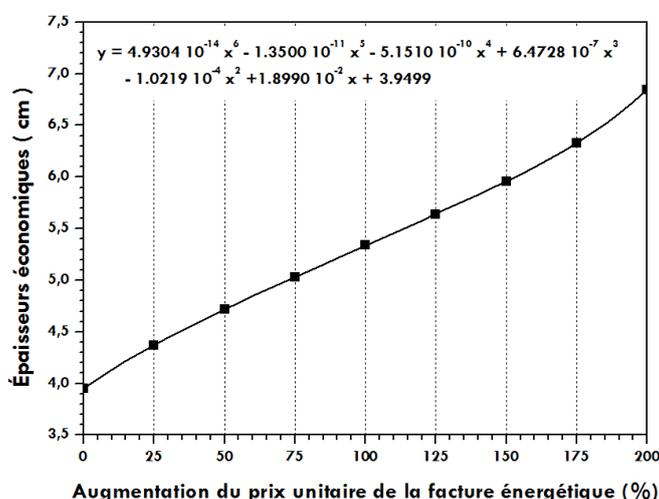


Figure 4.9. Épaisseur économique d'isolation en fonction de l'augmentation du prix unitaire de la facture énergétique

En revanche, il est possible d'investir dans ce système d'isolation, le temps de retour sur investissement varie en fonction de la couche isolante investie. Cette couche est par définition la couche supplémentaire aux épaisseurs d'isolation économique (3.95 cm). En se focalisant sur les résultats présentés sur la figure 4.10, on peut avoir la variation du temps de retour d'investissement correspondant à toute épaisseur au-delà de l'épaisseur économique.

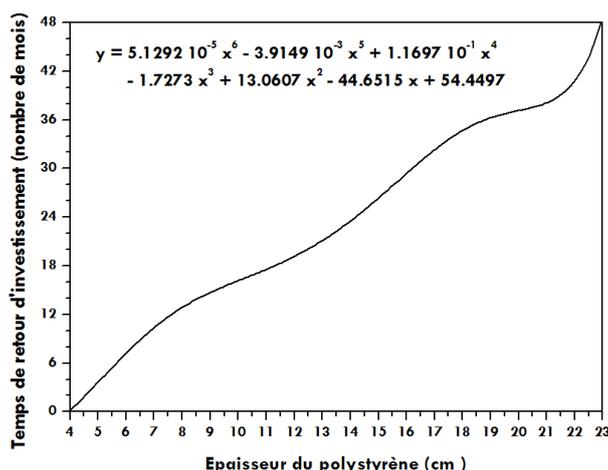


Figure 4.10. Temps de retour d'investissement en fonction de l'épaisseur de la couche isolante ajoutée à l'épaisseur économique

Pour isoler le sol et introduire une isolation extérieure en polystyrène d'une épaisseur de 10 cm, il a fallu presque 16 mois pour récupérer le surcoût résultant de cette technique. Ce paramètre indicatif important augmente parallèlement avec l'épaisseur de l'isolant. Le modèle de régression non linéaire ($R^2 = 0.99$) peut être présenté par la fonction polynomiale illustrée sur la figure ci-dessus.

Dans ce qui suit, l'objectif principal à atteindre est de voir si la compacité pourra changer à la fois l'épaisseur économique et le temps de retour d'investissement. La figure 4.11 donne une représentation graphique du coût total relatif à tous les cas.

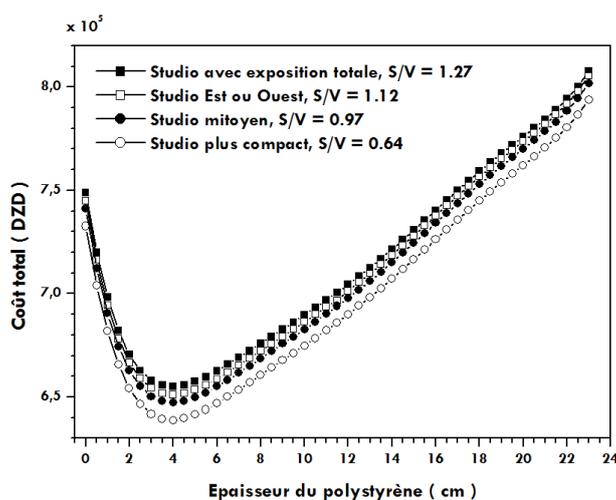


Figure 4.11. Variation du coût total en fonction de l'épaisseur de l'isolant pour différents indices de compacité

Dans le cas d'une habitation isolée thermiquement et si on ne veut pas investir dans le futur en ajoutant quelques centimètres à l'épaisseur minimale requise, les

résultats obtenus indiquent que cette épaisseur (économique) ne varie pas dans ce cas en fonction de la compacité. Sa valeur est toujours autour de 3.95 cm.

Il est également confirmé qu'une meilleure compacité (quatrième cas) permettra d'économiser en moyenne 7.29% de la facture totale initiale (du premier cas). Cette valeur deviendra maximale (10.41%) si l'épaisseur choisie est proche de 3.95 cm.

Parallèlement à ces observations et comme indiqué dans la figure 4.12, une meilleure compacité (un faible indice de compacité) d'une structure isolée par l'extérieur entraîne une légère augmentation du temps de retour d'investissement du fait que la réduction de la facture énergétique devient plus intéressante. La compacité d'une maison isolée est donc proportionnelle au temps de retour sur investissement. Rappelons qu'il a fallu 16 mois pour récupérer le surcoût résultant d'une isolation de 10 cm de polystyrène pour le premier cas. Cette durée peut être légèrement prolongée jusqu'à 16 mois et 26 jours, 17 mois et 4 jours et 17 mois et 3 semaines en améliorant la compacité (diminution de l'indice de compacité) pour respectivement le deuxième, le troisième et le quatrième cas.

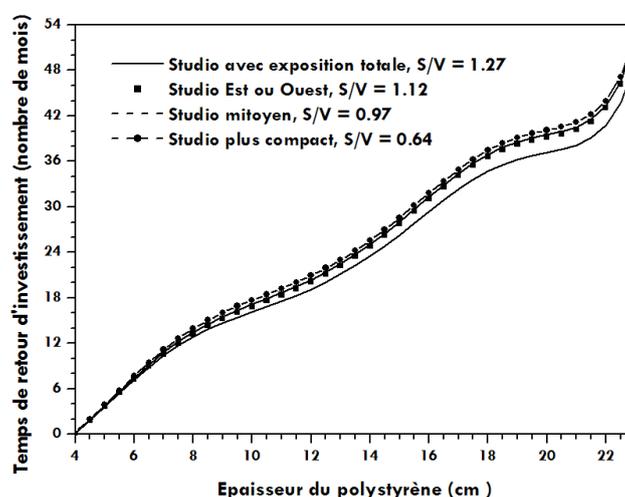


Figure 4.12. Temps de retour d'investissement en fonction de l'épaisseur de la couche isolante

4.6. Épaisseur d'isolation optimale

Le terme "épaisseur optimale" n'est pas précis. On trouve fréquemment deux termes dans la littérature: épaisseur optimale énergétique et épaisseur optimale financière. Ces deux grandeurs dépendent principalement de la

conductivité thermique, de la résistance thermique initiale de l'élément de bâtiment sans isolation, du nombre de degrés-jours pour le climat considéré et de la durée de vie du bâtiment [36]. Les formules correspondant aux épaisseurs optimales peuvent être introduites.

Pour minimiser le coût total et la quantité énergétique utilisée au cours d'une durée de vie fixe, il serait souhaitable d'utiliser la formule suivante qui calcule le coût énergétique C_{ener} . L'épaisseur énergétique optimale correspond à la valeur inférieure du coût énergétique. Mathématiquement, il est donc équivalent à la valeur nulle de la première dérivée du coût énergétique.

$$C_{ener} = E_i e + \frac{D_v D_j 86400}{\eta_{ch} (R_i + e/\lambda)} \quad (4.36)$$

Par conséquent

$$e_{ener_opt} = \sqrt{\frac{D_v D_j 86400 \lambda}{\eta_{ch} E_i}} - R_i \lambda \quad (4.37)$$

La même approche sera adoptée pour calculer l'épaisseur financière optimale. La formule correspondant au coût financier est donnée par l'équation suivante:

$$C_{fin} = P_i e + \frac{D_v D_j 86400 P}{\eta_{ch} (R_i + e/\lambda)} \quad (4.38)$$

Par conséquent

$$e_{fin_opt} = \sqrt{\frac{D_v D_j 86400 \lambda P}{\eta_{ch} P_i}} - R_i \lambda \quad (4.39)$$

e : épaisseur de l'isolant (m)

E_i : Coût énergétique de 1 m³ de matériau isolant (pour le polystyrène, la valeur retenue est de 25 10⁸ J / m³)

P_i : Prix unitaire du matériau isolant (DZD/m³)

P : Prix de l'énergie (DZD/J = DZD/Kwh/3.6 10⁶)

λ : Conductivité thermique du matériau isolant (0.04 W/mK)

R_i : Résistance initiale de l'élément de construction (sans isolation) (m²K/W)

D_v : Durée de vie de l'immeuble (années)

η_{ch} : Efficacité de la production de chaleur

En conséquence, les épaisseurs optimales (énergétiques et financières) dépendent de plusieurs facteurs, principalement la durée de vie du bâtiment et l'efficacité de la production de chaleur, il est possible de les tracer sur les figures ci-dessous.

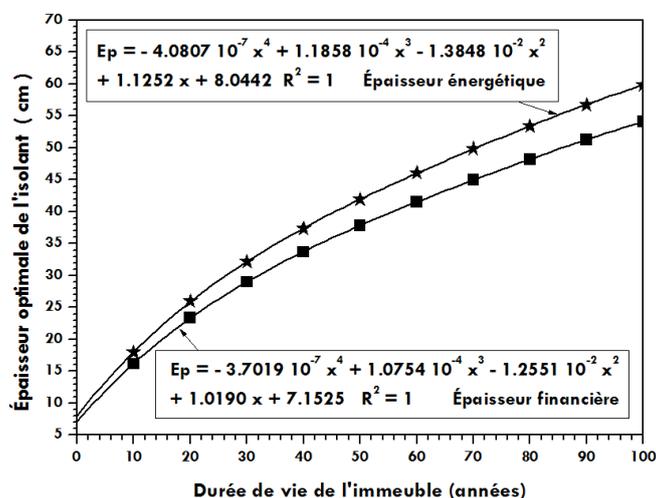


Figure 4.13. Epaisseur optimale de l'isolant en fonction de la durée de vie du studio, efficacité de la production de chaleur = 0.8

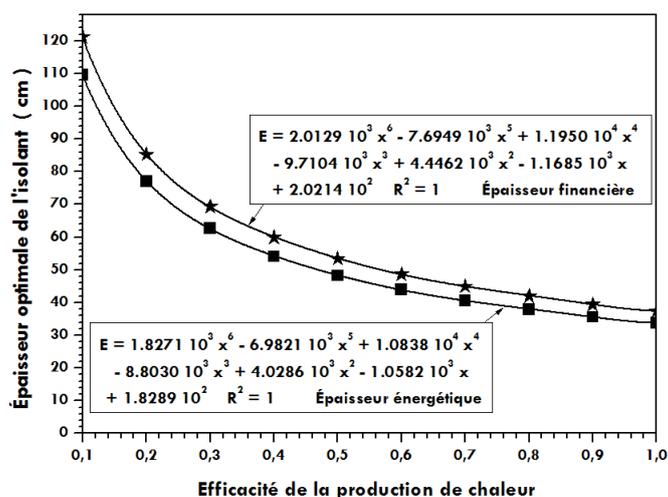


Figure 4.14. Epaisseur optimale de l'isolant en fonction de l'efficacité de la production de chaleur, durée de vie du studio = 50 ans

En utilisant les calculs, nous trouvons que les épaisseurs optimales sont proportionnelles à la durée de vie du bâtiment conformément à un modèle de prédiction non linéaire. Réciproquement, elles diminuent avec l'amélioration de l'efficacité de la production de chaleur selon un modèle polynomial fiable de degrés 6. En effet, il a été noté que les épaisseurs optimales sont nettement

supérieures par rapport aux épaisseurs couramment utilisées. Ceci confirme qu'il est rentable d'élever les épaisseurs d'isolation.

4.7. Étude comparative et analyse prédictive des charges de chauffage et de refroidissement

Cette partie vise à fournir une comparaison des besoins énergétiques entre deux studios. L'un est à forte consommation (figure 4.2 -a-), tandis que le second est défini comme étant une construction à faible consommation, reposant sur trois concepts passifs:

- Isolation thermique des murs, des sols et des toits opaques (10 cm)
- Suppression des ponts thermiques (isolation extérieure)
- Compacité par rapport au mode de contact avec l'environnement extérieur
- Chauffage passif à partir de l'énergie solaire.

En traçant la figure 4.15, il est possible d'annoncer plusieurs informations avérées et utiles sur l'efficacité de ces concepts passifs, tout en introduisant leurs impacts financiers sur la facture énergétique globale.

Les valeurs obtenues indiquent que les besoins énergétiques totaux atteindront 6254 KWh par an, ce qui correspond à 143.57 KWh/m²/an. La facture énergétique résultante correspondra à un taux de réduction de 73.64% par rapport à la facture initiale globale et aux besoins énergétiques. Cette technique de conception passive semble plus rentable dans la saison froide, le taux de diminution est proche de 82.17%, tandis que cette minimisation s'élève à 59.87% en période de surchauffe. En intersaisons (Octobre et Avril), au mois d'Octobre, la température mensuelle moyenne de l'air ambiant extérieur est de 24.98 °C, ce qui attribue une température de confort équivalente à 25.54 °C. Ces deux valeurs indiquent qu'une petite quantité d'énergie est nécessaire pour chauffer le bâtiment. La consommation d'énergie mensuelle correspondante due à l'enveloppe Q_{Envelop} correspond à 210.71 KWh. Ce manque peut être facilement compensé par le gain de chaleur interne ($Q_{\text{Occup}} = 130.20$ KWh, $Q_{\text{Elc}} = 111.04$ KWh). Il y aura donc par la suite un excès qui sera ajouté à la consommation d'énergie requise pour la production de l'eau chaude sanitaire Q_{DHW} et l'éclairage d'appareils électriques $Q_{\text{Elc_consum}}$. Pour un bâtiment isolé, le seul

paramètre qui pourra varier est la consommation mensuelle d'énergie due à l'enveloppe $Q_{Envelop}$.

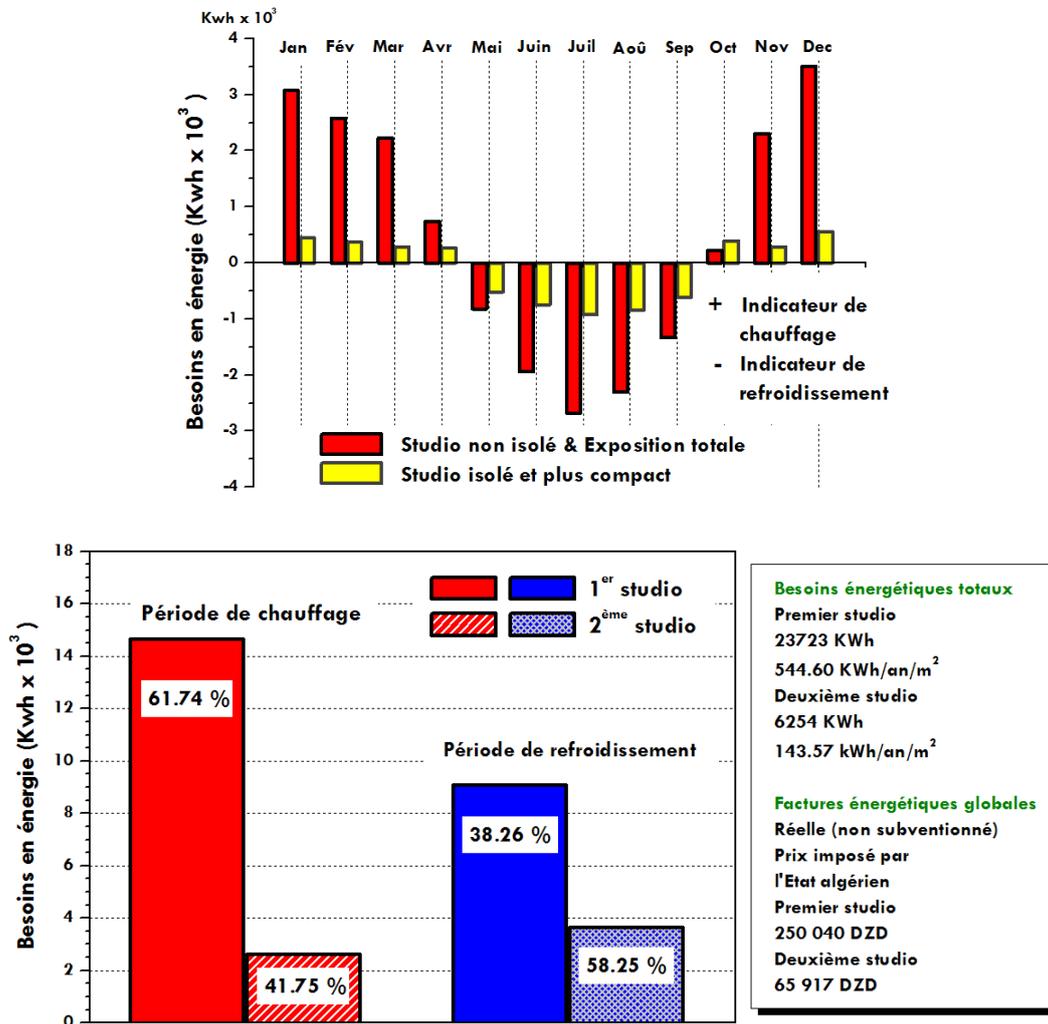


Figure 4.15. Consommation énergétique mensuelle, annuelle et saisonnière en se référant à l'équation de base d'Auliciens

Dans ce cas, les déperditions thermiques dues à l'enveloppe diminueront, mais le terme $|Q_{Envelop} - (Q_{Occup} + Q_{Elc})|$ va augmenter car la somme $Q_{Occup} + Q_{Elc}$ restera constante. La consommation globale Q_{Tot} va donc légèrement augmenter. Ce type de situation est généralement rencontré en mi-saison.

En résumé, l'enveloppe du bâtiment est la principale cause de cette consommation accrue. L'isolation et les stratégies de conception passive passives doivent être prises en considération.

L'intégration de certains éléments de conception passifs peut économiser une grande partie de l'énergie consommée. L'inclusion de gains solaires en hiver et

l'introduction d'une isolation thermique efficace (10 cm) dans l'enveloppe du bâtiment permettront de meilleures économies en termes de charges de chauffage et de climatisation.

Un simple calcul nous a permis de déduire les avantages concrets de ces approches architecturales. Au début, la facture énergétique était estimée à 250040 DZD. Avec des dépenses financières en faveur de certaines techniques passives, et avec un accent particulier sur la technique d'isolation thermique, il est possible de réduire cette facture à un montant équivalent à 65917 DZD. En outre, l'investissement financier couvre le prix de l'isolation (99792 DZD) et le coût des travaux d'isolation thermique. En Europe, le coût de ces travaux est effrayant et lourd (entre 40 et 120 € par m²), mais le retour d'investissement sera formellement intéressant [37]. Au contraire, en Algérie, les prix des travaux d'isolation thermique sont moins chers par rapport aux pays européens. C'est dans cette ligne que nous nous intéressons à l'étude du retour sur investissement en fonction du coût des travaux d'isolation thermique. La variation de ce paramètre, exprimée par le nombre de mois, est le rapport entre le surcoût multiplié par 12 et le gain financier annuel issu des techniques conceptuelles antérieures.

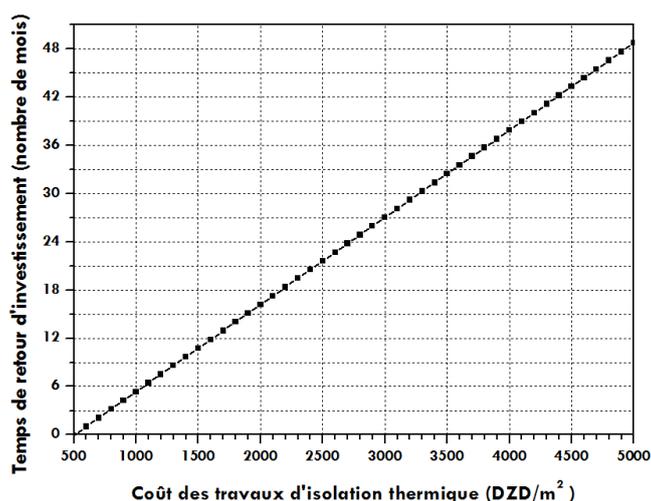


Figure 4.16. Temps de retour d'investissement en fonction du coût des travaux d'isolation thermique

Selon les données obtenues, le retour sur investissement subit un changement linéaire pour compenser le surcoût, même si les prix des travaux d'isolation sont

évidents. Par exemple, pour des travaux qui coûtent 3000 DZD/m², un temps de retour d'investissement estimé à 27 mois est attendu.

4.8. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode d'évaluation précise et utile pour déterminer l'efficacité énergétique de tous les bâtiments. L'enveloppe est la principale source des déperditions thermiques et joue un rôle essentiel dans l'adaptation du confort thermique des occupants. C'est tout simplement le principal facteur qui nous permet de déterminer les charges de chauffage et de climatisation. Les résultats obtenus ont été testés pour réduire les besoins en énergie et déterminer par conséquent les économies potentielles dans un climat saharien. Le chauffage et le refroidissement efficaces des bâtiments constituent la meilleure opportunité d'améliorer l'efficacité énergétique.

Pour faire face au coût croissant de l'énergie, il sera essentiel de prévoir et avoir une fiable planification pour assurer la sécurité et garantir une meilleure efficacité énergétique.

En effet, l'utilisation d'une isolation thermique est considérée comme solution efficace et fiable. Cependant, une bonne compacité contribue positivement à l'amélioration de l'efficacité énergétique, en particulier lorsque le bâtiment est doté d'une isolation thermique améliorée. Dans les bâtiments de même architecture, forme et volume, les déperditions thermiques qui en résultent peuvent être très différentes. C'est la compacité par rapport au mode de contact qui fait la différence, une meilleure compacité est importante pour maintenir une efficacité énergétique plus améliorée. Ce facteur bioclimatique devrait être analysé par les architectes dès la phase de conception initiale. Une meilleure compacité permettra d'économiser en moyenne 7.29% de la facture totale et d'entraîner une légère augmentation du temps de retour d'investissement (en se référant à l'épaisseur minimale du matériau isolant), en raison de la réduction de la facture énergétique qui devient plus attrayante. En combinant les concepts passifs mentionnés auparavant, il a été constaté que les charges énergétiques totales correspondent à une diminution de 73.64%. Ces mesures semblent plus

rentables au cours de la saison froide, la diminution résultante a atteint les 82.17%, tandis que la réduction des montants en périodes de surchauffe était d'environ 59.87%.

L'attribution d'étiquettes énergétiques pour les bâtiments peut représenter un progrès, en particulier pour les régions sahariennes caractérisées par un climat sec, chaud et désertique. Avant de s'engager dans la construction d'un immeuble résidentiel, il sera possible d'émettre une étiquette énergétique, en tenant compte des scénarios d'occupation, du mode de vie et de toutes les données nécessaires. En intégrant les mesures de conception passive déjà indiquées précédemment, comme la compacité, l'isolation thermique et le chauffage solaire passif, ce type de bâtiment rejoindra les constructions ayant un label énergétique de "type C" (figure 4.17).

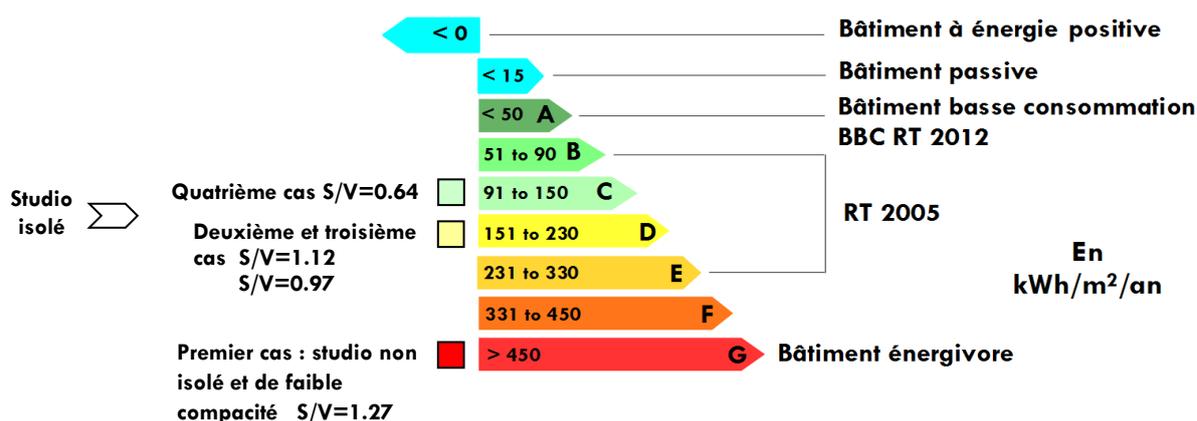


Figure 4.17. Schéma de labellisation des bâtiments

Références

1. Gratia, E., Herde, A.D., Design of low energy office buildings, Energy and Buildings, 35(5): 473-491, 2003.
2. Youngman, A., Green Roofs: A guide to their design and installation, Wiltshire, UK: Crowood Press, 7-30, 2011.
3. Dunnett, N., Kingsbury, N., Planting green roofs and living walls, Portland: Timber Press, 14-79, 2008.
4. Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., Pressnai, K., Comparative life cycle assessment of standard and green roofs, Environmental Science Technology, 40(13), 4312-4316, 2006.
5. Akbari, H., Steven, J.K., The impact of reflectivity and emissivity of roofs on building cooling and heating energy use, Proceedings of Thermal VII: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings.

6. Aya, Y., Kyosuke, H., Shinsuke, K., Junichi, T., Satoshi, N., Thermal performance evaluation of a dynamic insulation technology applied to a timber framework house in a real environment, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 14 (1), 213-218, 2015.
7. Baily, N.R., Dynamic insulation systems and energy conservation in buildings, *ASHRAE Transactions*, 93 (1), 447-466, 1987.
8. Qiu, K., Modeling the combined conduction-air infiltration through diffusive building envelop, *Energy and Buildings*, 39, 1140-1150, 2007.
9. Gan, G., Numerical evaluation of thermal comfort in rooms with dynamic insulation, *Building and Environment*, 35 (5), 445-453, 2000.
10. Imbabi, M.S., A passive-active dynamic insulation system for all climates, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1, 247–258, 2012.
11. Bahria, S., Amirat, M., Hamidat, A., El Ganaoui, M., Slimani, M., Parametric study of solar heating and cooling systems in different climates of Algeria, A comparison between conventional and high-energy-performance buildings. *Energy*, 113, 521-535, 2016.
12. Monika, H., Achim, G., Bastian, B., Two years of experience with a net zero energy balance – analysis of the Swiss MINERGIE-A® standard, *Energy Procedia*, 48, 1282–1291, 2014.
13. McMullan, R., Thermal insulation, *Environmental Science in Building*, Part of the Macmillan Building and Surveying Series book, 31-54, 1998.
14. Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., Hroudová, J., Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources, *Energy and Buildings*, 43(9), 2518-2523, 2011.
15. Bozsaky, D., Laboratory tests with liquid nano-ceramic thermal insulation coating, *Procedia Engineering*, 123, 68-75, 2015.
16. Zach, J., Hroudová, J., Brožovský, J., Krejza, Z., Gailius, A., Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems, *Procedia Engineering*, 57, 2013, 1288-1294.
17. Saeed, M.M., A Scale for architectural design compactness, a mathematical approach, *Proceeding of the Fifth International Conference on Sustainable Development and Planning: Wessex Institute of Technology. UK*, 150 (p 397).
18. Saeed Almumar, M.M., Understanding building compactness entity, definition and concept of assessment, *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 7(3), 2016.
19. Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M.K., Yaiche, M.R., Benamrane, N., Modelling and experiment of buildings thermo-aeraulic behaviour according to the level-compactness in Saharan climate conditions, *Engineering Structures and Technologies*, Taylor & Francis, 8(3), 117–130, 2016
20. Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M.K., Yaiche, M.R., Benamrane, N., Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate, *Journal of Building Engineering*, 01, 42–52, 2015.

21. Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Cherier, M.K., Hamdani, M., Yaiche, M.R., Benamrane, N., Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, *Energy and Buildings*, 66, 678–687, 2013.
22. Monika, H., Achim, G., Bastian, B., Two years of experience with a net zero energy balance – Analysis of the Swiss MINERGIE-A® standard, *Energy Procedia*, 48, 1282–1291, 2014.
23. Ourghi, R., A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings, *Energy Conversion and Management*, 48(1), 300–305, 2007.
24. Adnan, A., Donghyun, S., Moncef, K., Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait, *Energy Conversion and Management*, 50, 822–828, 2009.
25. Ouertani, K., Impact of shape on building energy use in Tunisia // “Cenergypt”, Tunisia, Polytechnic school, Tunisia, La Marsa 2078, 1–8, 2005.
26. Belgherras, S., Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Benamrane, N., Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions, *Energy and Buildings*, 145, 342–353, 2017.
27. Bekkouche, S.M.A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M.K., Yaiche, M.R., Benamrane, N., Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, *Advances in Building Energy Research*, Pages 37-51, 2016.
28. Cherier, M.K., L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa, Doctorat en Sciences Spécialité Énergies Renouvelables, Université Abou-bakr belkaïd, Tlemcen, Juin 2018.
29. <http://www.radiateur-electrique.info/deperdition-de-chaleur.php#coefficient-G>
30. https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_chaude_sanitaire
31. Boukli Hacene, M.A., Aspects énergétiques, économiques et environnementaux d'une habitation écologique, Thèse de Doctorat en physique énergétique et matériaux, Université de Tlemcen, 2013.
32. <https://www.creg.dz/facture/form.php>
33. <http://lejournaldelemploi.dz/sonelgaz-campagne-de-sensibilisation-pour-rationaliser-la-consommation-deelectricite/>
34. Al-Khawaja, M.J., Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 2601–2610.
35. <http://webnrj.com/pages/prix-du-kilowattheure-d-electricite>
36. Nicolas Morel, Edgard Gnansounou, Énergétique du Bâtiment, Cours photocopié, Section de Génie Civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Faculté d'Environnement Naturel, Architectural et Construit, Septembre 2008.
37. <https://www.calculo.fr/Subventions/Isolation-thermique/Prix>

Conclusion générale

Conclusion générale

Les stratégies de contrôle passives constituent une solution technique et architecturale permettant de maintenir un bon confort et de réduire la demande énergétique. Ce travail constitue une contribution à l'étude de l'impact de ces concepts sur la performance énergétique des bâtiments, sur le confort des occupants et sur la consommation énergétique. Dans cette thèse, une modélisation des bilans sensible et latent et une méthode de diagnostic et d'évaluation de l'efficacité énergétique ont été entreprises. La modélisation numérique repose sur le développement d'un modèle physique décrivant les mécanismes et les phénomènes complexes liés aux transferts couplés de masse et de chaleur dans une construction en générale. Il s'est avéré que le confort peut être affecté par des paramètres liés au climat, au cadre bâti et aux conditions thermiques des occupants (métabolisme, habillement...).

Les conclusions obtenues ont décelé la qualité de l'ambiance thermique intérieure. Le comportement thermo-aéraulique est très complexe du fait que les transferts se produisant simultanément avec la variation compliquée mathématiquement des conditions climatiques. Malgré ces situations, les résultats de comparaison sur les évolutions de la température, de l'humidité relative et de l'humidex ont montré des écarts peu significatifs entre les calculs et les mesures. Ces écarts sont dus probablement aux différentes approches, aux erreurs de mesures et aux hypothèses imposées.

L'isolation thermique est la propriété principale que possède un matériau de construction, elle devra favoriser une diminution des transferts de chaleur entre deux ambiances et permettre à la fois une réduction des consommations d'énergie de chauffage ou de climatisation, et l'accroissement du confort. Une bonne isolation nous permet de maintenir les températures et l'hygrométrie aux niveaux de confort d'été comme d'hiver et règle le problème de parois froides en hiver ou chaudes en été.

La compacité est l'un des concepts qui permet en complément une réduction en énergie consommée. La compacité est donc meilleure lorsque son indice est

faible. La méthode optimale consiste d'abord à minimiser tout d'abord les surfaces déperditives des parois opaques. Face à ces conclusions, il est souhaitable de privilégier certaines typologies urbaines comme les rangées de maisons mitoyennes et les immeubles collectifs. Le niveau d'isolation globale requis va logiquement abaisser pour une bonne compacité.

Dans l'hémisphère nord, l'orientation plein sud est la meilleure orientation possible pour une construction passive. Elle permettra de capter un maximum de rayonnement solaire tout-au-long d'une journée et d'intégrer convenablement les concepts architecturaux connus, y compris les protections solaires qui peuvent aussi améliorer le confort intérieur du bâtiment. Des vitres orientées au Sud permettent un gain d'énergie plus élevé par rapport aux autres orientations en hiver, et moins élevé en été.

Les démarches effectuées dans le chapitre 4 ont permis de proposer une méthode d'évaluation d'efficacité énergétique. L'enveloppe est la principale source des déperditions thermiques et joue un rôle essentiel dans l'adaptation du confort thermique des occupants. Le chauffage et le refroidissement efficaces des bâtiments constituent la meilleure opportunité d'améliorer l'efficacité énergétique.

Cependant, dans les bâtiments de même architecture, forme et volume, les déperditions thermiques qui en résultent peuvent être très différentes. Une meilleure compacité est importante pour une haute efficacité énergétique. Ce facteur bioclimatique devrait être analysé par les architectes dès la phase de conception initiale. Une meilleure compacité permettra d'économiser en moyenne 7.29% de la facture totale et d'entraîner une légère augmentation du temps de retour d'investissement. En combinant les concepts passifs mentionnés auparavant, il a été constaté que les charges énergétiques totales correspondent à une diminution de 73.64%. Ces mesures semblent plus rentables au cours de la saison froide, la diminution résultante a atteint les 82.17%, tandis que la réduction des montants en périodes de surchauffe était d'environ 59.87%.

Avant de s'engager dans la construction d'un immeuble résidentiel, il sera possible d'émettre une étiquette énergétique, en tenant compte des scénarios d'occupation, du mode de vie et de toutes les données nécessaires. En intégrant les mesures de conception passive déjà indiquées précédemment, comme la compacité, l'isolation thermique et le chauffage solaire passif, le studio étudié dans ce document peut rejoindre les constructions ayant un label énergétique de "type C".

L'ensemble des travaux réalisés dans cette thèse ouvre de nombreuses perspectives tant au niveau du développement des modèles proposés, qu'au niveau des applications dans l'étude énergétique des bâtiments. Trois axes de développement doivent être bien étudiés pour l'habitat de futur, le confort, la santé et l'énergie. On peut en citer aussi les techniques actives.

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

Production scientifique

1. S. Bendara, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, S. Belaid, M. Hamdani, M.K. Cherier, A. Boutelhig, N. Benamrane , Energy efficiency and economic insulation thickness according to the compactness measure Case of a studio apartment under Saharan weather conditions, Journal of Solar Energy Engineering, : Including Wind Energy and Building Energy Conservation, Copyright©2019 by ASME, doi:10.1115/1.4042455.
2. S.M.A. Bekkouche, N. Benamrane, M.K. Cherier, M. Hamdani, T. Benouaz, S. Belgherras, S. Bendara, H. Kadraoui, Application of some solar passive concepts to create more energy efficient studio apartment, 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Date Added to IEEE Xplore: 01 October 2018, DOI: 10.1109/IRSEC.2017.8477274
3. S. Bendara, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, Perfectionnement des conditions du confort par l'isolation et l'amélioration de la compacité volumique du bâti, ElWahat pour les Recherches et les Etudes Vol.10 n°1 (2017): 51-65.
4. S. Bendara, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, L'influence de la compacité sur le confort et les épaisseurs énergétiques et financières de l'isolation thermique, Cinquième Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables SIENR18 - Ghardaïa. 24 - 25 Octobre 2018.
5. S. Bendara, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.A.C. Haddam, Modélisation et simulation thermique d'un espace bureau soumis à des conditions Sahariennes, Quatrième Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR16 – Ghardaïa, 24 - 25 Octobre 2016.

S. Bendara

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

S. M. A. Bekkouche¹

Unité de Recherche Appliquée en Energies
Renouvelables, URAER,
Centre de Développement des Energies
Renouvelables, CDER,
Ghardaïa 47133, Algeria
e-mail: smabekkouche@gmail.com

T. Benouaz

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

S. Belaid

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

M. Hamdani

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

M. K. Cherier

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

A. Boutelhig

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

N. Benamrane

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

Energy Efficiency and Insulation Thickness According to the Compactness Index Case of a Studio Apartment Under Saharan Weather Conditions

Financial energetic problems oblige citizens to reduce the energy consumption. Accordingly, the recent research showed that major financial economies can be optimally achieved, by introducing some passive measures. The main objective of the current contribution is to investigate the impact of thermal insulation and compactness on energy efficiency. Following the assessment of the methodology, several input parameters were identified and economic insulation thicknesses were obtained. Finding revealed that the best effectiveness of solar gain has been observed for a better insulation and a good compactness, whereas a reduction of about 12.51% of energy needs can be achieved. Similar to the previous case, compactness has an attractive effect, provided that the building was well insulated. Furthermore, any variance cannot be occurred in economic insulation thickness by varying the building compactness. Unlike this remark, for a better compactness, a slight increase in the investment-return time has been noticed, following the energy bill reduction, which becomes more interesting. Hence, the comparative study averred that the previous passive concepts provide reduction in energy needs nearest 73.64%. Thus, reduction was nexus 82.17%, during cold season, and around 59.87%, in overheating period. As consequence, the studied structure type can be integrated in the buildings that have an energy label of "type C." [DOI: 10.1115/1.4042455]

Keywords: energy needs, energy bill, economic insulation thickness, compactness, solar gains

1 Introduction

Thermal comfort is a combined effect, which resulted from some environmental and individual parameters. Thermal comfort indexes were developed by various researchers focusing on this topic. Through the literature survey on individual and collective buildings, it has been shown that thermal insulation and optimum

compactness can reduce energy consumption and increase the construction life span. Several research works afford a great opportunity for these passive concepts to go toward the sustainable energy. Building temperatures are affected by the structure's geometric form, its compactness level, its envelope insulation, and its internal heat gains [1]. Regarding the insulation, green roofs have significant impact on heat loss reduction through the building envelope, during cold season, whereas it is kept cool during hot season [2]. This is achieved due to solar absorbance and increased insulation of the roofs type [3–4]. In this case, heat transfer is affected by two important factors: reflectivity and emissivity of roofs. Dark roofs of buildings will lead to an increase in

¹Corresponding author.

Contributed by the Solar Energy Division of ASME for publication in the JOURNAL OF SOLAR ENERGY ENGINEERING: INCLUDING WIND ENERGY AND BUILDING ENERGY CONSERVATION. Manuscript received March 24, 2018; final manuscript received December 25, 2018; published online February 19, 2019. Assoc. Editor: Ming Qu.

cooling demand. For less absorptive roofs, the difference between the surface and ambient air temperatures is approximately 10 °C while in the opposite case, this gap may sometimes exceed 50 °C. Saving energy (cooling and heating) varies according to both the roofs' insulation level and the local climate. In this view, reflective roofs are recommended for cold climate regions; however, they can demand more heating energy, except solar gain through transparent and nonopaque surfaces. For hot climates, such as the Algerian Sahara, decreasing the roof emissivity values from 0.9 to 0.25 can result throughout 10% increase in the annual bill [5]. The approaches adopted by researchers proved that energy-saving methods should be developed. Few researches into dynamic insulation back to the 70s have been conducted for heavyweight structures, and have proved to offer an energy-efficient nexus the building classical insulation in buildings [6–10]. Recently, relevant work has been carried out by Bahria et al. [11], who conducted dynamic simulation studies on three sites of different climate zones (Algiers, Djelfa, and Tamanrasset). By integrating an improved thermal insulation, without using solar heating and cooling systems, the energy consumption following the heating process has decreased by the rates 58%, 72%, and 12% in Algiers, Djelfa, and Tamanrasset sites, respectively. In Switzerland, an analysis survey on 216 new active and isolated buildings showed that the heating demand is noticeably below the need of the MINERGIE-A Standard [12]. However, in hot climate, large number of buildings used more energy for summer cooling than for winter heating. For regulated ventilation, a well-insulated construction can be maintained more coldly in the summer than poorly insulated construction. Under the mentioned circumstances, it has been proved that thermal insulation consists of the key factor in reducing the energy consumption and heat losses of buildings [13]. Within another context, some contributions [14–16] were focused on investigating the ecological properties of the building materials, which were able to reduce the heating and air-conditioning load. The architectural typology of buildings in the M'zab valley Algeria allows us to inspire several architectural concepts, such as the building compactness. This subject is directly related to sustainability, which may afford an efficient indoor performance and energy saving [17]. This architectural technique used by Mozabite allows preserve the used energy in cooling and heating the buildings, during hot and cold seasons, respectively. Saeed Almumar [18] concluded that buildings acquired its significant compactness on sites with noticeable difference between outdoor and indoor comfort temperatures or with high solar radiation intensities. The most common compactness indices in the literature are those which define the ratio between the envelope surface and the volume (S/V) of the building or its inverse value [19–21]. Moreover, their findings were sometimes expressed by the ratio between thermal building envelope and heated floor areas [22]. Ourghi [23] have developed one correlation method between the annual energy use and the relative compactness of office buildings of rectangular and L-shapes. After a few years, Adnan et al. [24] extended the idea by including other geometric forms. As indicated in Ref. [25], in 2003, Pessenlehner and Mahdavi used a nondimensionalized shape indicator called the relative compactness, defined as the ratio of a reference building model shape (cubical or rectangular shape) factor to the actual building shape factor.

This manuscript aims to set a new understanding of a typical studio apartment. The main objective was to investigate the impact of some passive solutions on heating and cooling energy use, therefore to use the found results in reducing energy needs and then determine the potential savings under Saharan climate. Polystyrene is used as insulating material. The most economical insulation thickness suitable to the Ghardaïa climate is based on the unit prices of insulation materials and energy rate to be determined. The extra charge and the return time on investment were examined here. Afterward, results and discussions were presented. Indeed, obtaining an energy label requires a collection of some climatic data for a building within at least 12 months. By

implementing a recent modeling approach [26], energetic label can be issued by providing parameters, occupancy scenarios, lifestyle and all necessary data. It should be noted that minor research works have been dedicated to this type of Saharan climate. The few existing works do not deal properly with the problem; specificity is directly related to the severe conditions of the Saharan climate. In addition, the uniqueness and asset of this contribution consist in applying a specific method to label any building, estimate energy needs, and solve the problem of thermal insulation thickness. The combination of different approaches provided a new performing model.

2 Case Study: Farm Studio for Double Occupancy, Dimensions, and Characteristics

Ghardaïa (latitude 32.48° N, longitude 3.80° E) has a hot, dry climate; the region is marked by large temperature differences with a clarity index of 0.8. It has a very important rate of insolation (75% on average) and the mean annual of global solar radiation exceeds 20 (MJ/m²), recorded on horizontal surface. The annual average temperature is about 22.61 °C. Minimum average temperature is recorded in the coldest month January with 5.5 °C, while maximum average temperature is recorded, during the month of July with 41.7 °C. The relative humidity is very low; about 21.60% in July, maximum level of about 55.80% is reached in January and an annual average of around 38.33% is achieved [26]. The studio apartment total surface is about 43.56 m² (6.6 × 6.6); the height of the walls is 3 m. the descriptive plan of the building structure is shown by Fig. 1. This thermal zone is situated on the ground floor; the used characteristics are given in Table 1.

The choice of this design was based mainly on the opportunity to be clearly different compactness indices by varying the contact mode of this studio.

3 Energy-Balance Model

In this section, an energy balance including the energy used for lighting, water heating, and internal heat gains (occupants, lighting, and electrical equipment) has been applied to predict the energy requirements of any dwelling. Energy needs (kWh) are commonly illustrated by the following equations [26].

In the heating season and during inter-seasons, the energy needs will be calculated as follows:

$$Q_{Needs} = |Q_{Envelop} - (Q_{Occup} + Q_{Eic}) \pm Q_{Solar}| + Q_{DHW} + Q_{tot_elec_appl} \quad (1)$$

In the cooling season, equation will be simplified into the following form:

$$Q_{Needs} = Q_{Envelop} + (Q_{Occup} + Q_{Eic}) + Q_{DHW} + Q_{tot_elec_appl} + Q_{Solar} \quad (2)$$

3.1 Energetic Needs Due to the Building Envelope and Ventilation Heat Losses. Heating or/and cooling requirements are defined by the following equation [26]:

$$Q_{Envelop} = 24 DP_{envelop} Dj \quad (3)$$

$DP_{envelop}$ is the envelope and ventilation heat losses (W/K). The basic calculations were explained in detail in the work of Bekkouche et al. [27]. Dj : numbers of degree-days, heating and/or degree days are indicators of energy consumption.

3.2 Domestic Hot Water Requirements. It is quite difficult to give an exact estimate of the domestic hot water (DHW)

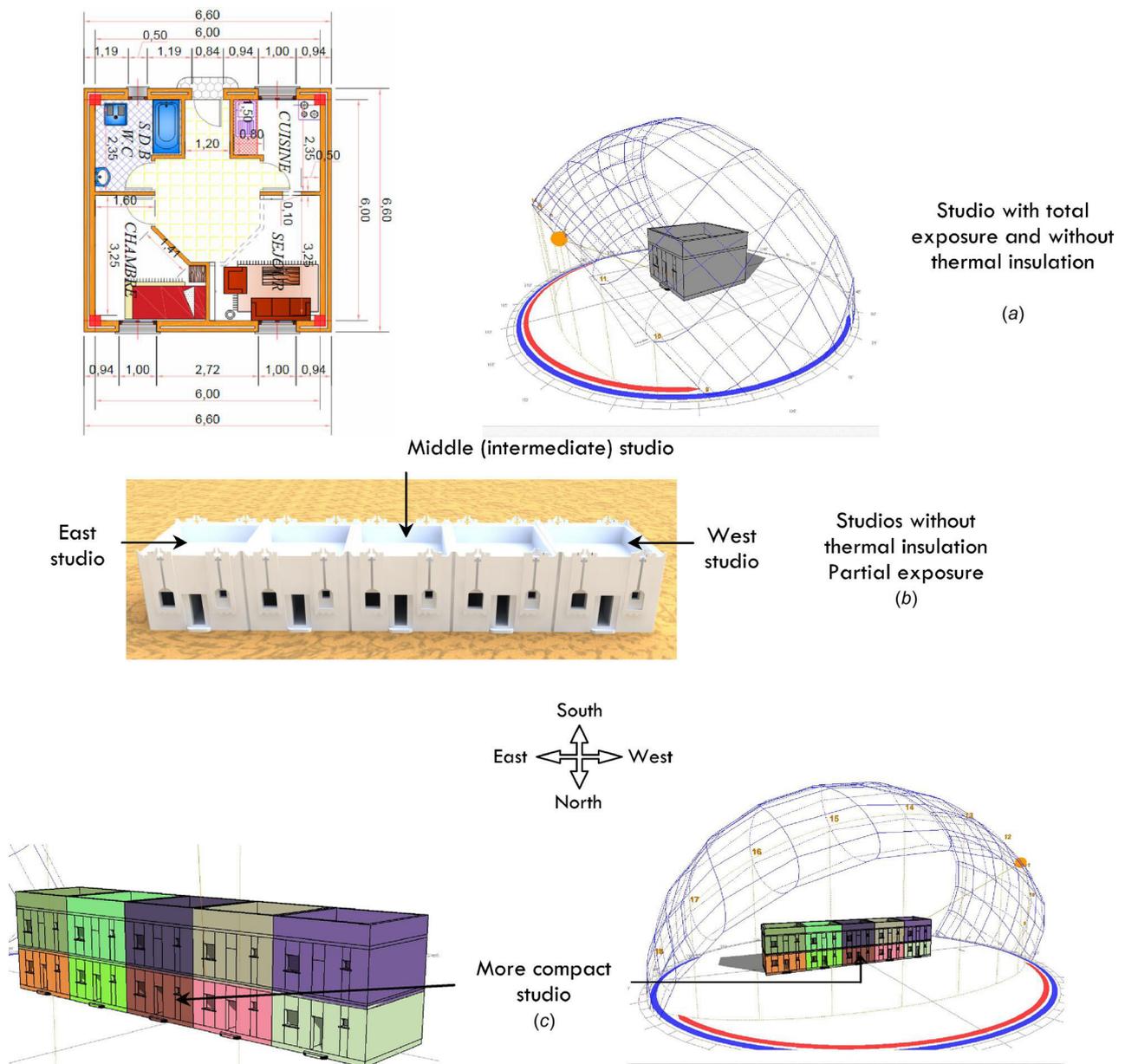


Fig. 1 Descriptive plans for all cases: middle, partial, and total exposure

Table 1 Masonry composition and building material proprieties

Masonry composition	U -values $W/m^2 K$
Exterior walls: mortar cement, heavy stone and plaster	2.53
Roofs: cement slab: hollow-core slab, mortar cement, plaster	2.29
Ground floor: tiling, screed, slab, dry sand, polyane film to prevent rising damp and stones + gravels	2.17
Single glazed windows, allowing for frames	4.50
Wooden door including the frame	3.19

requirements because they depend on the standing, the number of occupants, their ages, their professions, their lifestyle, the day (working day, weekend or public holiday), the season and many other circumstances. Experience has shown that the reasonable requirements range from 25 to 60L of hot water at 50 °C per day per person. To perform the calculations, one default value can be used, 50L per person per day. The amount of energy needed for the DHW production is given as follows [26]:

$$Q_{DHW} = 1.1628 \cdot 50 \cdot N_{b_{occup}} \cdot (T_{DHW} - T_{CW}) \quad (4)$$

Q_{DHW} is the amount of energy required to produce DHW for one day, in Wh, $N_{b_{occup}}$ is the number of persons occupying the building, T_{DHW} is the temperature of the hot water at the filling point, in °C.

We assume that the temperature of the hot water is equal to the storage temperature (or the outlet boiler temperature).

Table 2 Cp and radiated heat per person [26]

Examples of activities	Heat diffusion per person (sensible and latent)
Static sitting activity (read and write...)	120 W
Simple works that can be done either sitting or standing, laboratory work, typewriter...	150 W
Light physical activities	190 W
Medium to difficult bodily activities	More than 200 W

Table 3 Diffusion of heat by lighting and electrical equipment [26]

Type of equipment	Duration (h) and operating power modes (W)				Energy (kWh)
	Mode 1	Number of hours	Mode 2	Number of hours	
LCD TV + integrated demo	20	19	78	5	0.770
Refrigerator	12	22	145	2	0.554
Lighting	75	6			0.450
Flat screen computer	32	2	186	4	0.808
Other					1
Total energy per day					3.582
Total energy per year					1307.43

Table 4 Average energy consumption per day for electrical appliances [26]

Type of equipment		Power (W)		Duration of the use per day (h and min)	Average daily consumption (Wh)
		Operating values	Selected value		
LCD TV with integrated demo	In service	90–250	140	5 h	757.00
	Standby mode	3	/	19 h	
Refrigerator 250 L capacity		150–200	/	Continuous operation	551.00
Lighting: 4 low-cost lamps		15–25	20	6 h (sitting room)	220.00
				3 h (kitchen)	
				1 h (bathroom)	
Flat screen computer	In service	70–80	75	4 h	306.00
	Standby mode	3	/	2 h	
Cell Phone Charger		5	/	1 h	0.50
Iron		750–1100	925	15 min	231.25
Vacuum cleaner		650–800	720	12 min	144.00
Radio alarm		3–6 W	4.5	Continuous operation	108.00
Electric shaver		8–12 W	10	3 min	0.50
Hair dryer		300–600 W	450	5 min	37.50
Total time per day (Wh)					2355.75

T_{CW} is the average monthly temperature of the cold water entering the storage tank or the DHW production coil (instant production).

3.3 Internal Heat Gains and Occupants. Every human generates heat to maintain and regulate his bodily functions. This heat results from the combustion of ingested food with breathing oxygen. Table 2 shows the heat diffusion according to the practiced activity. Internal heat gains (Wh) from the occupants' activities are given by Belgherras et al. [26]:

$$Q_{Occup} = Cp \text{ Nb}_{occup} D_{pres/day} \text{ Nb}_{heated_days} \quad (5)$$

Cp is the amount of heat given off by occupant (W/occupant), $D_{pres/day}$ is the period of presence during the day (h/day), Nb_{heated_days} : Number of heated days (days/year).

3.4 Internal Heat Gains and Lighting and Electrical Equipment. Unconnected electrical machines in operating mode emit and produce an amount of residual heat in the ambient air. Gas appliances generate heat and produce moisture. For electrical

appliances, there is no universal calculation method that can be applied to calculate internal heat gains and the sensible/latent distribution of this heat. Some internal heat gain values have been proposed for various home appliances (Table 3).

3.5 Energy Consumption for Lighting Electrical Appliances. Three input data must be taken into account according to Table 4.

P_{elec_appl} is the power of electrical appliances (W), Nb_{hours} is the number of hours when the device is in an operational state during the day. Nb_{days} is the number of days when the device is in an operational state during the year. Calculation, in kilowatt-hours, shall be as follows:

$$Q_{tot_elec_appl} = \text{Nb}_{hours} \text{ Nb}_{days} \frac{P_{elec_appl}}{1000} \quad (6)$$

3.6 Passive Solar Gains. The solar gains depend on the incident solar radiation, the orientation of the receiving surfaces, and some characteristics such as shading, transmission, and absorption

Table 5 Monthly energy use required to set and maintain a fixed temperature of T_{Conf}

	T_{out}	T_{Conf}	T_{CW}	Q_{solar}	$Q_{envelop}$	Internal heat gains				Q_{Needs}
						Q_{occup}	Q_{Elec}	Q_{DHW}	Q_{Elec}	
January	13.9	22.1	09.0	183.8	3095.0	130.2	111.0	147.8	73.0	2869.1
February	14.7	22.4	09.0	176.3	2600.9	117.6	100.3	133.5	66.0	2406.1
March	17.15	23.1	11.5	168.3	2252.4	130.2	111.0	138.8	73.03	2054.6
April	22.7	24.8	13.2	/	768.9	126.0	107.5	128.4	70.67	734.5
May	27.3	26.2	15.8	/	383.2	130.2	111.0	123.3	73.0	820.8
June	31.8	27.7	18.5	/	1523.8	126.0	107.5	109.9	70.7	1937.8
July	34.4	28.5	19.30	/	2251.5	130.2	111.0	110.7	73.0	2676.4
August	33.0	28.0	19.10	/	1885.0	130.2	111.0	111.4	73.0	2310.6
September	29.4	26.9	18.0	/	915.9	126.0	107.5	111.6	70.7	1331.7
October	24.98	25.5	15.8	/	210.71	130.2	111.0	123.3	73.03	226.8
November	16.54	22.9	12.3	184.6	2333.76	126.0	107.5	131.5	70.67	2117.9
December	12.3	21.6	09.0	181.3	3522.3	130.2	111.0	147.8	73.03	3320.5
Total (kWh)					21743.29			1517.9	859.8	22806.8

coefficients. This energy gain will be calculated according to the following equation [27]:

$$Q_{Solar} = \sum_j I_{sj} \sum_n (A F_{Shad} F_{Red} g)_{nj} \quad (7)$$

The first sum is made on all orientations j ; the second is applicable on all surfaces n in different orientations “ j .” I_s is the solar irradiation per area unit (Wh/m^2). F_{Red} is the reduction factor for window frames, equal to the ratio of the transparent surface of the window to its total area; its value is set at 0.8. F_{Shad} is the shading factor; its value is set at 0.7 g is the solar factor of the bay window; its value is set at 0.8 for single-glazed windows.

4 Diagnostic Assessment of Energy Needs and Economic Analysis

An optimum compactness of the building is important for energy effectiveness. This bioclimatic factor should be analyzed by the architect as early as in the initial design stage. For different contact modes, with the same area of the plan and the same insulation quality of outer partitions, the heat loss resulting can differ significantly.

4.1 Energy Saving by Passive Solar Gains. In this part, Table 5 summarizes the monthly heating and/or cooling requirements during 2016. This energy demand used to ensure a permanent comfort for all areas in the studio apartment. The displayed results relate to the first case, which corresponds to a studio with total exposure (Fig. 1(a)). The selected input parameters are as follows: the cold water temperature T_{CW} varies according to the month, $T_{DHW} = 50^\circ C$, $C_p = 150 W$, $Nb_{occup} = 2$, $D_{pres/day} = 14 h$, the glass surface amount to about 95% of the window area, $F_{Shad} = 0.7$ for south orientation, $F_{Red} = 0.8$ and $g = 0.8$. The temperature given by the Auliciens equation was considered as the set temperature.

This studio is an energy-intensive building because energy bills are too high; the consumption demand was $523.5729 kWh/m^2/year$. By finding total energy needs, which keep temperature at T_{Conf} in all zones including the kitchen, bathroom, toilet and hall, without any rupture is estimated at $22806.8376 kWh/year$. However, in accordance with this retained temperature, the financial estimate for the entire habitable volume is found to be $145924.1999 DA/year$ [28]. Algeria is one of the few countries in the world whose the price per kilowatt-hour is cheaper by comparing it with other countries. According to the Algerian state, the real price of kWh is $10.54 DZD$ [29]. As a result, the state price of the energy bill without holding this state subsidy is $240384.0683 DA/year$. It is also concluded that heating process is mandatory for the period extending from November to March, whereas

cooling becomes required from May to September. The months of October and April belong to the mid-season. The net solar gain for heating is $894.46 kWh/year$; it is a small part because the construction is an energy-intensive building. This free solar gain contributes to a decrease of 3.7739% of total needs. These results' findings will be changed if compactness and thermal insulation will be strengthened. In this case, additional layers of an insulating material ($0.04 W/mK$, $10 kg/m^3$) on the exterior walls (10 cm), roof (10 cm), and floor (4 cm) have been added. The study of energy efficiency will be devoted to the following situations:

- First case: studio with total exposure (Fig. 1(a)), the compactness index is 1.27.
- Second case: East or West studio (Fig. 1(b)), the compactness index is 1.12.
- Third case: middle studio (Fig. 1(b)), the compactness index is 0.97.
- Fourth case: more compact studio (Fig. 1(c)), the compactness index is 0.64.

The results obtained in the following figures have been deduced following the same procedures established for the results in Table 5. Figure 2 shows the impact of the free passive solar gain on global energy needs according to compactness and thermal insulation.

A linear regression can be projected to assign a general model of decrease in energy consumption. According to this figure, the best effectiveness of the free solar gains is observed for a better insulation. The energy saving is proportional to the level of thermal insulation. For the case of Table 5, it is possible to achieve a reduction of 10.4268% if this building is covered by an external insulation. The same thing for compactness; a high compactness (a low compactness index) causes a better decrease in energy needs. However, the cost of energy varies linearly with the energy use; that is why the decrease in energy bills due to the passive solar gain is similar to energy needs.

4.2 Economic Layer Thickness. Following the previous study, the increased importance of compactness and thermal insulation clearly appear on the energy needs and the corresponding energy bill. In Fig. 3, the variation of energy loads is expressed in $kWh/m^2/year$. Indeed, it is subsequently suitable to associate a general prediction model using the regression method to determine the type of variation in energy needs according to the building compactness.

On the basis of the observed results, it is deduced that as in the case of passive solar gains, energy saving is more profitable if the construction is well insulated. These circumstances will therefore be then projected on energy bills. In all cases, the energy use is inversely proportional to the building compactness and linear with compactness indices. By combining a good insulation, it is also

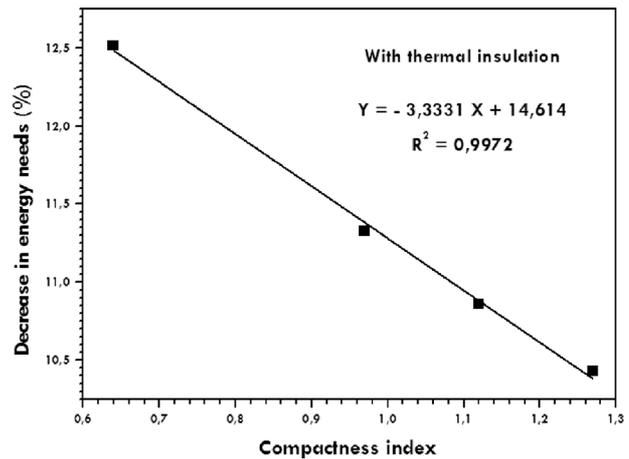
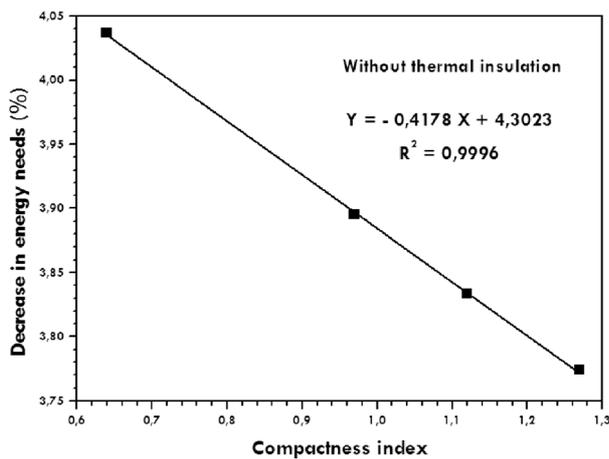


Fig. 2 Energy savings by taking advantage of passive solar gains

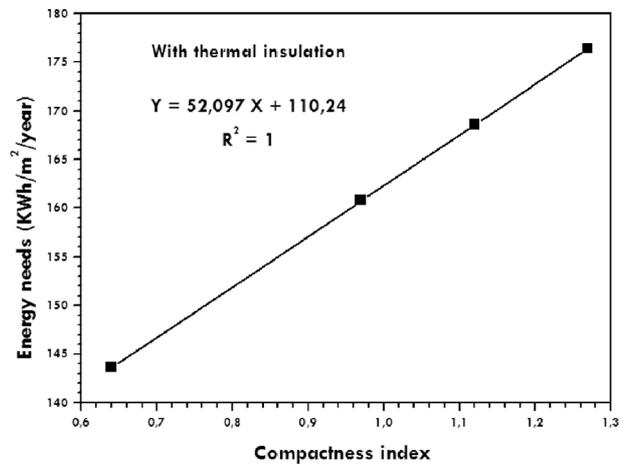
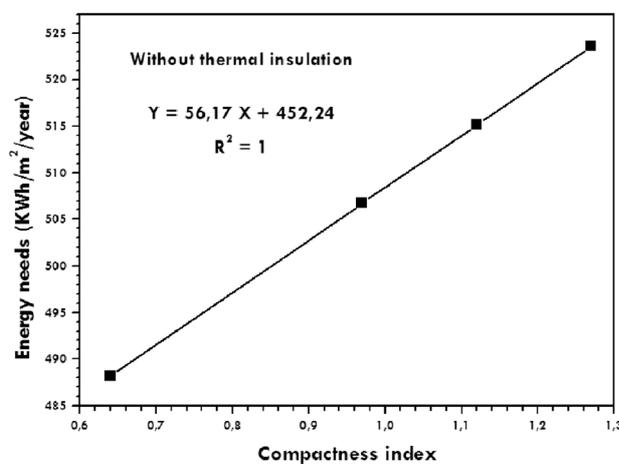


Fig. 3 Effect of the compactness contact mode on energy needs with including solar gains

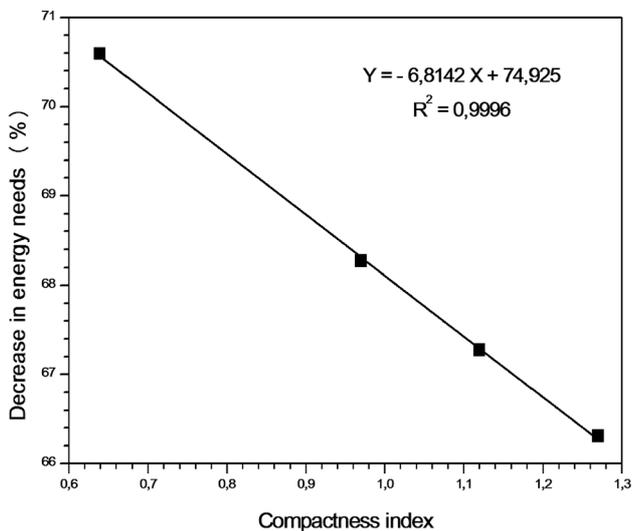


Fig. 4 The reached level of energy savings in case of a good insulation

possible to determine the level of energy saving achieved according to the compactness concept (Fig. 4).

In the obtained results, the most favorable situation corresponds to the fourth case, which is characterized by a better compactness; almost 4.2809% is saved by selecting this case and comparing it

with the first case (studio with total exposure). By consulting the literature, it is noticed that a large number of authors use the term optimal thickness; this thickness corresponds to the minimum price (as the case of Ref. [30]). This amount ensures that, by setting this thickness, it is possible to have a zero investment return. In reality, therefore, it is an economical and not an optimal thickness. The insulation thickness can be increased, which results in a significant reduction in the energy use and then there will be a return investment time. The objective in this second section part is to determine the economic thickness of the insulating material by adding the total cost of the isolation procedure (the sum of the polystyrene price, which varies linearly with its thickness and the cost of all insulation works) amounting to 498,960 DZD (3000 DZD/m²) and the annual energy bill. This thickness is required to avoid any investment in the future. Thicknesses are assumed to be identical in all walls. The results will consider the compactness index and solar gains. The adopted method is based on the estimation of the total cost according to the thickness of the insulating layer. The retained price of a polystyrene plate (5 cm thick layer and 2 m² of surface area) is fixed at 600 DZD. As shown in Fig. 5, the relative total cost varies with the thickness of the polystyrene.

If the consumer wants to pay a minimum annual bill without any investment in the next few years (i.e., the return time on investment or the financial return time is zero by referring to the most economic thickness of the insulating material), there will be an economical thickness that is independent of solar gains, fixed at 3.95 cm. From this study, it is also proved that this thickness varies according to the price of the insulating plate. This change

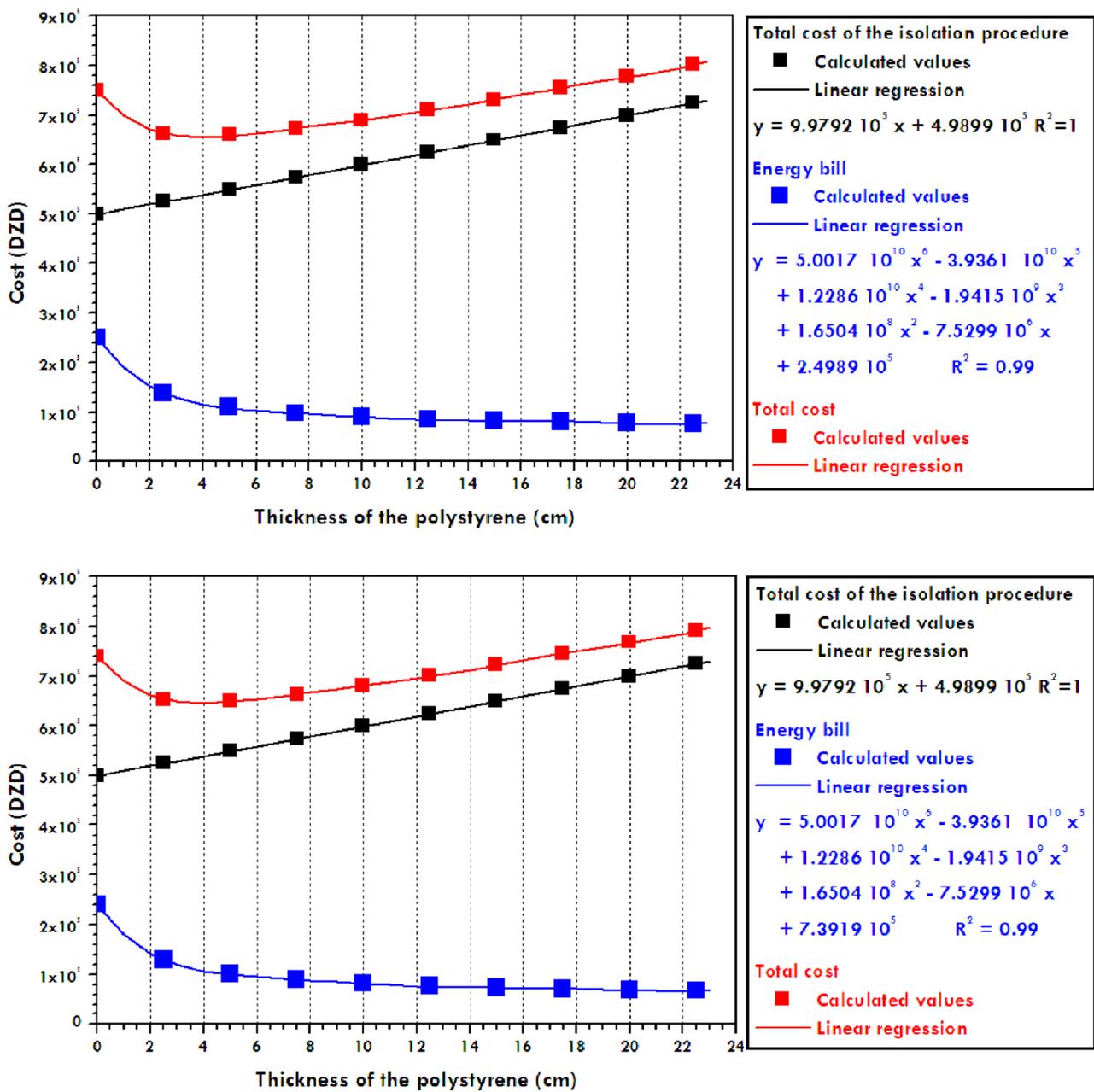


Fig. 5 Variation of total cost with increasing thickness of the insulating layer

undergoes a nonlinear variation as described in Fig. 6. On the other hand, the price of the energy bill has a decisive influence on the economical thickness and it is also competitive (price of kilowatt-hour is cheaper) compared to the price of polystyrene, which results in small economical thicknesses. The unit price in Algeria converges to the tier of the average European price (18.64 c €/ kWh) [31]. As an example, by multiplying the energy bill by 2, the economical thickness required will be of the order of 5.34 cm. Figure 6 provides some clarifications on this economical thickness according to the increase in the price of the energy bill.

In contrast, it is possible to invest in this functioning insulation system; the return time on investment varies according to the invested insulating layer. This layer is by definition the additional layer to the economic insulation thicknesses (3.95 cm). By focusing on the results presented in Fig. 7, the investment-return time corresponding to any thickness (beyond the economic thickness) can be easily obtained.

To insulate the floor and by incorporating an outer insulation with a polystyrene thickness of 10 cm, it took about 16 months to

recover the extra cost that results from this technique. This important indicative parameter increases in parallel with the insulation thickness. The regression model ($R^2 = 0.99$) can be presented by the nonlinear function shown in the figure above. In what follows, the primary objective is to see if the compactness will be able to change at the same time the economic thickness while respecting the reasoning of the previous step (without investment) and the investment-return time. Figure 8 gives graphical representations of the relative total cost for all cases shown in Fig. 1.

In the case of a thermally insulated dwelling and if one does not want to invest in the future by adding a few centimeters to the required minimum thickness, the results obtained indicate that this thickness in this case does not vary according to the compactness. Its value is always around 3.95 cm. It is also confirmed that a better compactness (fourth case) will save on average 7.29% of the total bill. This value will become maximum (10.41%) if the chosen thickness is close to 3.95 cm. In parallel with these observations and as shown in Fig. 9, a better compactness (a low compactness index) of an externally insulated structure leads to a

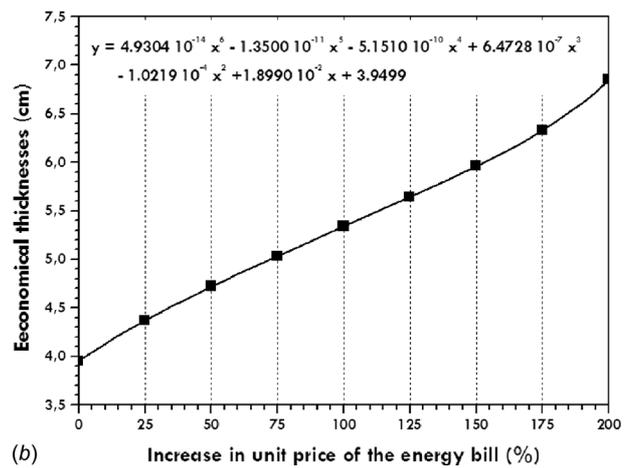
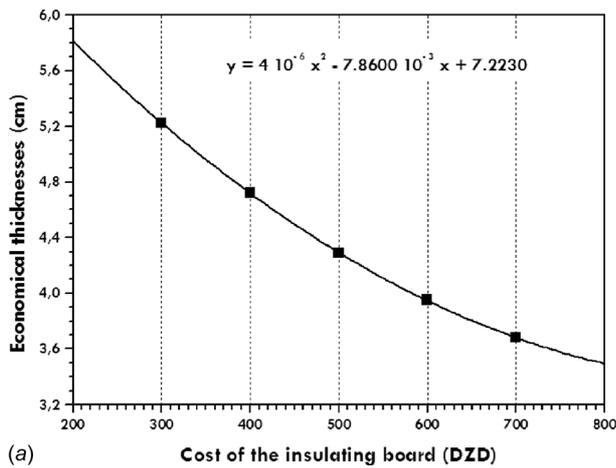


Fig. 6 Economic insulation thicknesses according to: (a) the cost of the insulating board and (b) the increase in unit price of the energy bill

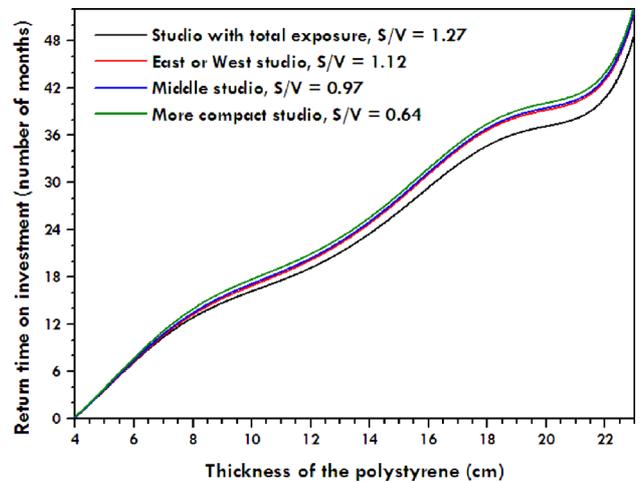
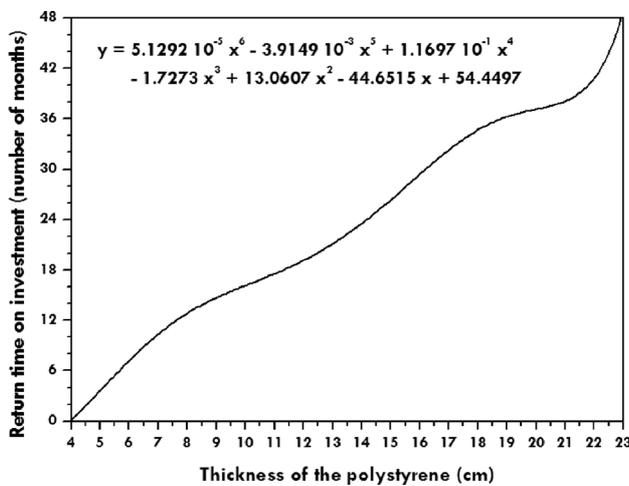


Fig. 7 Investment-return time in accordance with the layer thickness

Fig. 9 Investment-return time in accordance with the layer thickness

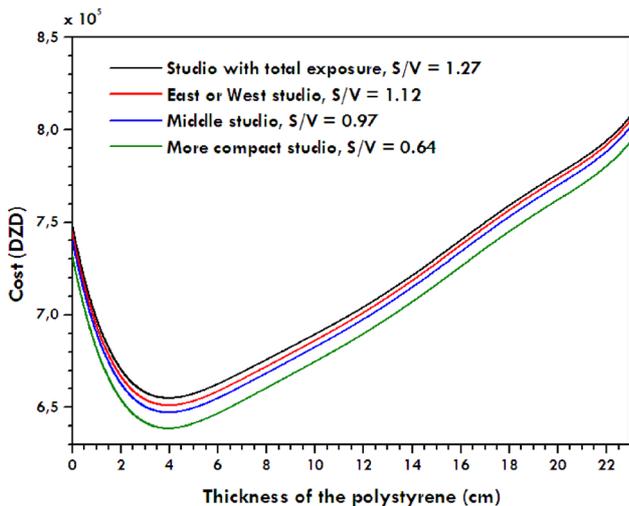


Fig. 8 Variation of total cost with increasing thickness of the insulating layer according to the compactness index

slight increase in the investment-return time due to the reduction of the energy bill which becomes more interesting. The compactness of an isolated house is therefore proportional to the investment-return time. Recalling that it took 16 months to

recover the extra cost resulting from an insulation of 10 cm of polystyrene for the first case. This duration can slightly extend to 16 months and 26 days, 17 months and 4 days and 17 months and 3 weeks by improving the compactness (decreasing the compactness index) for the second, third and fourth cases, respectively.

4.3 Optimum Insulation Thickness. “Optimum thickness” is not a precise term; for this purpose, two terms are generally found in the literature: optimum energy thickness and optimal financial thickness. These quantities depend primarily on thermal conductivity, the initial resistance of the building element without insulation, number of degree-days for the considered climate, and the life of the building [32]. The formulas corresponding to optimal thicknesses can be introduced. To minimize the total cost and the amount of the use energy over a fixed lifetime, it would be desirable to use the following formula that calculates the energy cost C_{ener} . The optimum energetic thickness corresponds to the lower value of the energy cost. Mathematically, it is therefore equivalent to the zero value of the first derivative of the energy cost

$$C_{ener} = E_i e + \frac{D_v D_j}{\eta_{ch}} \frac{86400}{(R_i + e/\lambda)} \Rightarrow e_{ener_opt} = \sqrt{\frac{D_v D_j}{\eta_{ch} E_i} \frac{86400 \lambda}{R_i}} \quad (8)$$

The same approach is adopted to calculate the optimal financial thickness. The formula corresponding to the financial cost is given by the following equation:

$$C_{\text{fin}} = P_i e + \frac{D_v D_j 86400 P}{\eta_{\text{ch}} (R_i + e/\lambda)} \Rightarrow e_{\text{fin_opt}} = \sqrt{\frac{D_v D_j 86400 \lambda P}{\eta_{\text{ch}} P_i} - R_i \lambda} \quad (9)$$

e is the thickness of the insulation (m), E_i is the energy cost of 1 m^3 of the insulating material (for polystyrene the retained value is $25 \times 10^8 \text{ J/m}^3$), P_i is the unit price of the insulating material (DZD/ m^3), P is the price of energy (DZD/J = DZD/kWh/ 3.6×10^6), λ is the thermal conductivity of the insulating material (0.04 W/mK), R_i is the initial resistance of the building element (without insulation) ($\text{m}^2\text{K/W}$), D_v is the life of the building (years), and η_{ch} is the efficiency of heat production.

As a consequence, the optimum (energetic and financial) thicknesses depends on several factors, mainly the life of the building and the efficiency of heat production; it is possible to draw them in figures below (see Figs. 10 and 11).

Using the deduced calculations, the optimal thicknesses are proportional to the life of the building in line with a nonlinear prediction model.

On the other hand, these optimal insulation thicknesses decrease with the increase of the efficiency of heat production according to a reliable polynomial model of degrees 6. However, it was noted that the optimal thicknesses are significantly higher than the commonly practiced thicknesses. This shows that it is profitable to increase the insulation thicknesses.

5 Comparative Study and Predictive Analysis of Heating and Cooling Loads

This part aims to provide an energy use comparison between two studio apartments. One is significantly with high-energy consumption (Fig. 1(a)), while the second is specified as a building with more lower-energy consumption, which is based on three passive concepts:

- Thermal insulation of opaque walls, floors, and roofs (10 cm).
- Elimination of thermal bridges (external insulation).
- Compactness in relation to the contact mode with the external environment.
- Passive heating from solar energy.

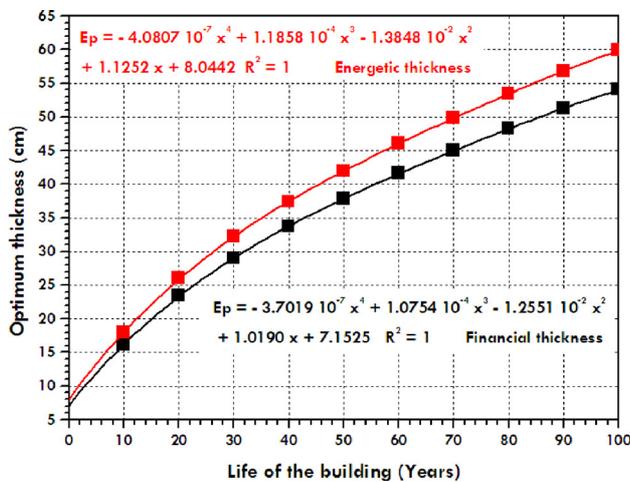


Fig. 10 Optimal insulation thickness according to the life of the studio apartment, efficiency of heat production = 0.8

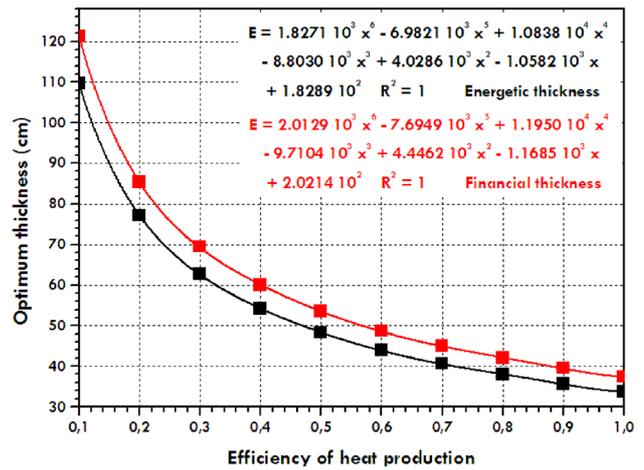


Fig. 11 Optimal insulation thickness according to the efficiency of heat production, life of the studio apartment = 50 years

Figure 12 focuses on the effectiveness of these passive aspects and their financial impact on the energy bill.

The total energy needs will become 6254 kWh per year, which is equivalent to 143.57 kWh/ m^2 /year. The resulting energy bill will correspond to a reduction rate of 73.64% compared to the overall initial bill and energy needs. This passive design technique seems more profitable during the cold season, the resulting reduction approaches 82.17% while the reduction in overheating period amounts to 59.87%. In the inter-season (October and April), more particularly the month of October, the mean monthly value of the outside ambient temperature is 24.9839 °C which gives a comfort temperature equivalent to 25.5450 °C. These two values indicate that a small amount of energy is required to heat the building. The corresponding monthly energy consumption due to the envelope Q_{Envelop} corresponds to 210.7126 kWh. This lack can be easily compensated by the internal heat gain ($Q_{\text{Occup}} = 130.2000 \text{ kWh}$, $Q_{\text{Elc}} = 111.0420 \text{ kWh}$). There will subsequently be an excess that will be added to the energy consumption required for the DHW production Q_{DHW} and for lighting electrical appliances $Q_{\text{Elc_consum}}$. For an isolated building, the only parameter that will vary is the monthly energy consumption due to the envelope Q_{Envelop} . The envelope losses in this case will decrease but the term $|Q_{\text{Envelop}} - (Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elc}})|$ will increase since $Q_{\text{Occup}} + Q_{\text{Elc}}$ will remain constant. The overall consumption Q_{Needs} therefore will increase slightly. This type of situation is usually encountered in mid-season. In summary, the main reason for this increased consumption is the building envelope. Insulation and envelope design strategies must address passive architectural concepts. Incorporating some passive design elements can save a major part of the consumed energy. The inclusion of winter solar gains and introducing an efficient thermal insulation (10 cm) within the building envelope will allow better savings in terms of heating and cooling loads. A simple calculation leads us to deduce the concrete advantages of these architectural approaches. At first, the energy bill was estimated at 250,040 DZD. With an investment spending in favor of some passive techniques reliable insulation, with particular focus on thermal insulation technique, it is possible to reduce this invoice to an amount equivalent to 65,917 DZD. Furthermore, the financial investment covers the price of insulation (99,792 DZD) and the cost of thermal insulation works. In Europe, the cost of these works is scary and heavy (between € 40 and € 120 per m^2), but the return on investment will undoubtedly be great [33]. Inversely, in Algeria, the prices of thermal insulation works are cheaper compared to the European country even in terms of investment return time; it is almost the same thing. From Fig. 13, it is possible to determine the variation of the return on investment according to the cost of the thermal insulation works.

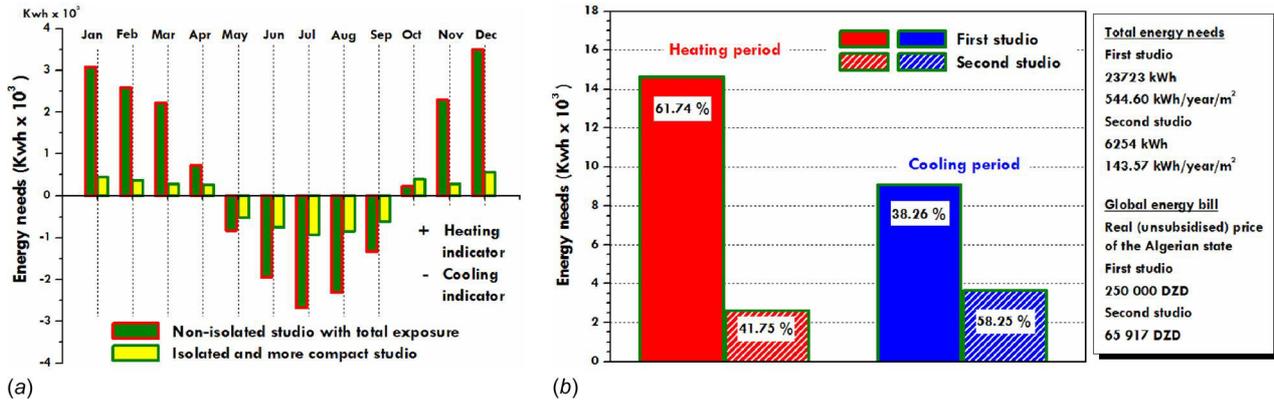


Fig. 12 Monthly, annual, and seasonal energy use with reference to Auliciens basic equation

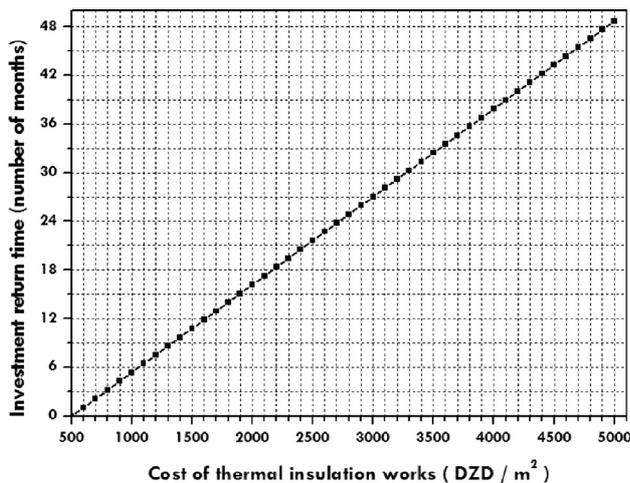


Fig. 13 Variation of the return on investment according to the cost of the thermal insulation works

The variation of this parameter, expressed by the number of months, is the ratio of the extra cost multiplied by 12 and the annual financial gain from previous conceptual techniques. According to the obtained data, return on investment undergoes a linear change to compensate the extra charge even if the prices of insulation work are obvious. As example, for works which cost 3000 DZD/m², a return time on investment of about 27 months is expected.

6 Conclusion

The building envelope is the main source of energy losses, which has a major function in adapting thermal comfort variations

for occupants, thus determining the heating and cooling loads of the building. This contribution aims to provide and understand an accurate and useful method to determine the energy efficiency of any buildings; the found results were tested in reducing energy needs and consequently determine the potential savings in a Saharan climate. Efficient heating and cooling of buildings is the best opportunity to improve the energy efficiency in buildings. With regard to the increasing cost of energy, it will be necessary to forecast and ensure security for energy efficiency guaranty.

In this paper, it is shown that this low energy-efficient residential building is not affordable to live in. The mean reason of this energy-intensive building is undoubtedly linked to the lack of thermal insulation. The use of thermal insulation can be considered as an effective and reliable solution. However, good compactness contributes positively to the improvement of energy efficiency, especially when the building has an enhanced thermal insulation. A better compactness will use save on average nearest 7.29% of the total bill and leads to a slight increase in the investment-return time (by referring to the minimum thickness of the insulating material), due to the energy bill reduction, which becomes more attracting. By combining the passive concepts mentioned in Sec. 5, it is has been found that the total energy loads correspond to a decrease of 73.64%. These measures seem more profitable during the cold season; the resulting reduction reached 82.17% while the reduction in overheating period amounts was about 59.87%.

Assigning labels for buildings involve a step forward, particularly for Saharan regions, which are characterized by a dry, hot, and desert climate. Before committing to construct a residential building, it will be possible to issue an energetic label by providing parameters, occupancy scenarios, lifestyle and all necessary data. With regard to the previous measures, such as compactness, thermal insulation, and solar passive heating, this type of building will join the constructions that have an energy label of "type C" (Fig. 14).

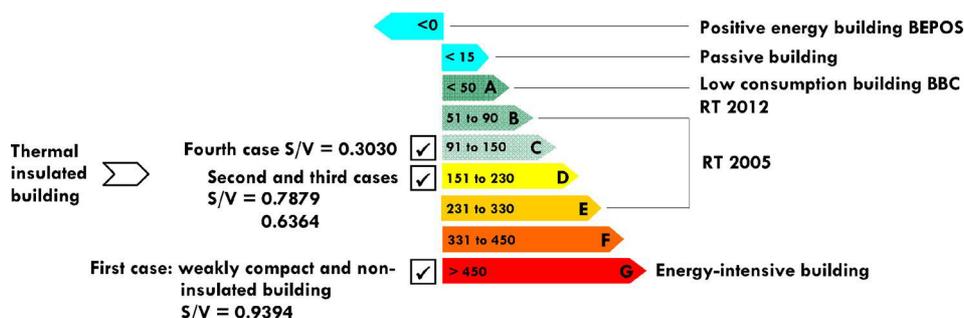


Fig. 14 Building labeling scheme (kWh/m²/year)

References

- [1] Gratia, E., and Herde, A. D., 2003, "Design of Low Energy Office Buildings," *Energy Build.*, **35**(5), pp. 473–491.
- [2] Youngman, A., 2011, *Green Roofs: A Guide to Their Design and Installation*, Crowood Press, Wiltshire, UK, pp. 7–30.
- [3] Dunnett, N., and Kingsbury, N., 2008, *Planting Green Roofs and Living Walls*, Timber Press, Portland, pp. 14–79.
- [4] Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., and Pressnai, K., 2006, "Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs," *Environ. Sci. Technol.*, **40**(13), pp. 4312–4316.
- [5] Akbari HSteven, J. K., 1998, "The Impact of Reflectivity and Emissivity of Roofs on Building Cooling and Heating Energy Use," *Thermal VII: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII*, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Clearwater Beach, FL, Dec. 7–11.
- [6] Aya, Y., Kyosuke, H., Shinsuke, K., Junichi, T., and Satoshi, N., 2015, "Thermal Performance Evaluation of a Dynamic Insulation Technology Applied to a Timber Framework House in a Real Environment," *J. Asian Arch. Build. Eng.*, **14**(1), pp. 213–218.
- [7] Baily, N. R., 1987, "Dynamic Insulation Systems and Energy Conservation in Buildings," *ASHRAE Trans.*, **93**(1), pp. 447–466.
- [8] Qiu, K., 2007, "Modeling the Combined Conduction-air Infiltration Through Diffusive Building Envelop," *Energy Build.*, **39**(11), pp. 1140–1150.
- [9] Gan, G., 2000, "Numerical Evaluation of Thermal Comfort in Rooms With Dynamic Insulation," *Build. Environ.*, **35**(5), pp. 445–453.
- [10] Imbabi, M. S., 2012, "A Passive-Active Dynamic Insulation System for All Climates," *Int. J. Sustainable Built Environ.*, **1**(2), pp. 247–258.
- [11] Bahria, S., Amirat, M., Hamidat, A., El Ganaoui, M., and Slimani, M., 2016, "Parametric Study of Solar Heating and Cooling Systems in Different Climates of Algeria—A Comparison Between Conventional and High-Energy-Performance Buildings," *Energy*, **113**, pp. 521–535.
- [12] Monika, H., Achim, G., and Bastian, B., 2014, "Two Years of Experience With a Net Zero Energy Balance—Analysis of the Swiss MINERGIE-A® Standard," *Energy Procedia*, **48**, pp. 1282–1291.
- [13] McMullan, R., 1998, *Thermal Insulation* (Environmental Science in Building, Part of the Macmillan Building and Surveying Series Book), Springer, London, pp. 31–54.
- [14] Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., and Hroudová, J., 2011, "Development and Performance Evaluation of Natural Thermal-Insulation Materials Composed of Renewable Resources," *Energy Build.*, **43**(9), pp. 2518–2523.
- [15] Bozsaky, D., 2015, "Laboratory Tests With Liquid Nano-Ceramic Thermal Insulation Coating," *Procedia Eng.*, **123**, pp. 68–75.
- [16] Zach, J., Hroudová, J., Brožovský, J., Krejza, Z., and Gailius, A., 2013, "Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems," *Procedia Eng.*, **57**, pp. 1288–1294.
- [17] Saeed, M. M., "A Scale for Architectural Design Compactness: A Mathematical Approach," *Fifth International Conference on Sustainable Development and Planning*, New Forest, UK, July 12–14, p. 397.
- [18] Saeed Almumar, M. M., 2016, "Understanding Building Compactness Entity, Definition and Concept of Assessment," *Int. Trans. J. Eng., Manage., Appl. Sci. Technol.*, **7**(3), pp. 165–175.
- [19] Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M. K., Yaiche, M. R., and Benamrane, N., 2016, "Modelling and Experiment of Buildings Thermo-Aerulic Behaviour According to the Level-Compactness in Saharan Climate Conditions," *Eng. Struct. Technol.*, **8**(3), pp. 117–130.
- [20] Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M. K., Yaiche, M. R., and Benamrane, N., 2015, "Judicious Choice of the Building Compactness to Improve Thermo-Aerulic Comfort in Hot Climate," *J. Build. Eng.*, **1**, pp. 42–52.
- [21] Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Cherier, M. K., Hamdani, M., Yaiche, M. R., and Benamrane, N., 2013, "Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate," *Energy Build.*, **66**, pp. 678–687.
- [22] Monika, H., Bastian, B., and Achim, G., 2013, "Accounting for Electricity Generation for a Net Zero Energy Balance—Experience Gained With MINERGIE-A®," *PLEA2013—29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*, Munich, Germany, Sept. 10–12.
- [23] Ourghi, R., 2007, "A Simplified Analysis Method to Predict the Impact of Shape on Annual Energy Use for Office Buildings," *Energy Convers. Manage.*, **48**(1), pp. 300–305.
- [24] Adnan, A., Donghyun, S., and Moncef, K., 2009, "Impact of Building Shape on Thermal Performance of Office Buildings in Kuwait," *Energy Convers. Manage.*, **50**(3), pp. 822–828.
- [25] Ouertani, K., 2005, "Impact of Shape on Building Energy Use in Tunisia," Tunisia Polytechnic School, La Marsa, Tunisia, pp. 1–8.
- [26] Belgherras, S., Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., and Benamrane, N., 2017, "Prospective Analysis of the Energy Efficiency in a Farm Studio Under Saharan Weather Conditions," *Energy Build.*, **145**, pp. 342–353.
- [27] Bekkouche, S. M. A., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M. K., Yaiche, M. R., and Benamrane, N., 2017, "Diagnosis and Comprehensive Quantification of Energy Needs for Existing Residential Buildings Under Sahara Weather Conditions," *Adv. Build. Energy Res.*, **11**(1), pp. 37–51.
- [28] Ministère de l'énergie, 2019, "Commission de régulation de l'électricité et du gaz CREG," CREG.
- [29] le journal de l'emploi, 2016, "SONELGAZ: Campagne de sensibilisation pour rationaliser la consommation de l'électricité," le journal de l'emploi.
- [30] Al-Khawaja, M. J., 2004, "Determination and Selecting the Optimum Thickness of Insulation for Buildings in Hot Countries by Accounting for Solar Radiation," *Appl. Therm. Eng.*, **24**(17–18), pp. 2601–2610.
- [31] WebNRJ, 2018, "Information sur l'électricité et le gaz," WebNRJ.
- [32] Morel, N., and Gansounou, E., 2008, "Energétique du Bâtiment, Cours photocopié, Section de Génie Civil," Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Faculté d'Environnement Naturel, Architectural et Construit.
- [33] Calculo, 2018, "Toiture, sol ou murs, intérieur ou extérieur: tout savoir sur le prix de l'isolation thermique," Calculo.

RESUME

Les travaux entrepris dans cette thèse ont fait le point sur les principaux concepts passifs appliqués à un habitat sous un climat sec et aride. En se basant sur deux bilans sensible et latent, on a pu confirmer que le confort ne peut être assuré que par la prise en considération des paramètres architecturaux lors de la conception et la maîtrise des éléments passifs.

En effet, l'isolation thermique est considérée comme solution efficace et fiable pour améliorer l'efficacité énergétique des habitats. Une meilleure compacité permettra d'économiser en moyenne 7.29% de la facture (énergétique ou/et financière) totale.

En combinant ces deux éléments de conceptions passives avec une orientation en pleine sud, il est possible de réduire les charges énergétiques totales à 73.64%. Ces mesures semblent plus rentables au cours de la saison froide, le taux de diminution a atteint les 82.17%, tandis que la réduction des montants en périodes de surchauffe était d'environ 59.87%.

Mots clés

Température, Humidité relative, Humidex, Confort, Besoins énergétiques, Isolation thermique, Compacité, Orientation, Gains solaires passifs.

ABSTRACT

The works undertaken in this thesis aim to evaluate the main passive concepts applied to a dry and arid climate. On the basis of two sensitive and latent balances, it has been confirmed that the comfort can be ensured by the consideration of architectural parameters during the design and the control of passive elements.

Indeed, thermal insulation is considered as an effective and reliable solution to improve the energy efficiency of buildings. A better compactness will save on average 7.29% of the total (energy and / or financial) bill.

Integration of passive design elements with a southern orientation promotes a reduction in total energy loads to 73.64%.

These measures seem more profitable during the cold season, the rate of decrease reached 82.17%, while the reduction of amounts in periods of overheating was about 59.87%.

Keywords

Temperature, Relative humidity, Humidex, Comfort, Energy needs, Thermal insulation, Compactness, Orientation, Passive solar gains.

ملخص

العمل المنجز في هذه الرسالة يعتمد على تقييم المفاهيم الأساسية السلبية المطبقة على المباني تحت تأثير مناخ جاف. استناداً إلى اثنين من الأرصاد الحساسة والكامنة، تم التأكيد على أنه لا يمكن ضمان الراحة الحرارية إلا عن طريق أخذ الإعدادات المعمارية بعين الاعتبار عند تصميم العناصر السلبية والتحكم فيها. في الواقع، يعتبر العزل الحراري بمثابة حل فعال وموثوق لتحسين كفاءة الطاقة في الموائل. يمكن للاكتناز الأفضل توفير ما معدله 7.29% من إجمالي الفاتورة الطاقوية و / أو المالية. من خلال الجمع بين هذين العنصرين التصميميين السلبيين مع مراعاة الاتجاه الجنوبي، من الممكن تقليل إجمالي متطلبات الطاقة إلى 73.64%. لقد تبين أن هذه الإجراءات أكثر فعالية خلال الموسم البارد، حيث يبلغ معدل الانخفاض حوالي 82.17%، في حين يكون مقدار هذا الانخفاض في فترات ارتفاع درجات الحرارة حوالي 59.87%.

الكلمات المفتاحية

درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، هوميدكس، الراحة الحرارية، احتياجات الطاقة، العزل الحراري، الاكتناز، المكاسب الشمسية السلبية.