

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

Université Ibn Khaldoun –Tiaret



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

THESE DE DOCTORAT LMD

Spécialité : Génie électrique
Option : Énergies renouvelables

Présentée par :

BENKHELIFA Abdelaziz

Sujet de la thèse

***Thermo-aéraulique d'un bâtiment multizone et
influence de la compacité par rapport à la taille des
murs à forme constante***

Soutenue publiquement le 08 juin 2024, devant le jury composé de :

SMAILI Atallah	Professeur	Université Tiaret	Président
BEKKOUCHE S.M.A	Directeur de Recherche	URAER-Ghardaïa	Directeur de thèse
ALLAOUI Tayeb	Professeur	Université Tiaret	Co-directeur de thèse
TOUAFEK Khaled	Directeur de recherche	URAER-Ghardaïa	Examineur
HADJI Lazreg	Professeur	Université Tiaret	Examineur
NEGADI Karim	Professeur	Université Tiaret	Examineur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

L'aboutissement d'un travail de doctorat mené sur plusieurs années est la source d'une grande joie et d'une immense satisfaction. Il est l'occasion de remémorer les différentes difficultés qu'il a fallu surmonter mais surtout les personnes qui m'ont permis d'en atteindre ce résultat.

Je tiens donc à exprimer ma vive reconnaissance et ma profonde gratitude à mon Directeur de thèse le Docteur **BEKKOUCHE Sidi Mohamed El-Amine**, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, pour son aide très précieuse qu'il m'a apporté tout au long de ce travail de recherche ainsi que pour sa patience et sa rigueur durant la préparation de cette thèse.

J'exprime aussi toute ma reconnaissance au Docteur **ALLAOUI Tayeb**, Professeur à l'Université de Tiaret mon Codirecteur de thèse pour son soutien et pour sa disponibilité.

Je remercie également Monsieur **SMAILI Atallah**, Professeur à l'Université de Tiaret de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Je voudrais également remercier chaleureusement les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail :

- Monsieur **TOUAFEK Khaled**, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa.
- Monsieur **HADJI Lazreg**, Professeur à l'Université de Tiaret.
- Monsieur **NEGADI Karim**, Professeur à l'Université de Tiaret.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes amis et collègues de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables.

Sommaire

Sommaire.....	01
Résumé (en français, anglais et arabe).....	05
Nomenclature.....	06
Table des figures.....	12
Liste des tableaux.....	15

Introduction générale

Chapitre I : Principaux paramètres du confort thermique

I.1. Introduction.....	22
I.2. Contexte énergétique national.....	23
I.3. La consommation énergétique nationale.....	23
I.4. La transition énergétique.....	25
I.5. Le confort thermique.....	25
I.5.1. Contexte historique.....	25
I.5.2. Définition.....	27
I.5.3. Facteurs du confort thermique.....	28
I.5.3.1. Facteurs environnementaux.....	28
Vitesse de l'air.....	28
Humidité relative.....	28
Température de l'air.....	29
Température radiante moyenne.....	29
I.5.3.2. Facteurs individuels.....	30
Vêtements.....	30
Activité.....	31
I.5.3.3. Autres facteurs.....	31
I.5.4. Interaction du corps humain avec l'environnement.....	32
I.5.4.1. Température corporelle interne.....	32

1.5.4.2.	Thermorégulation.....	32
1.5.4.3.	Évaporation.....	33
1.5.4.4.	Transpiration.....	33
1.5.5.	La gamme du confort efficace.....	33
1.5.5.1.	Exigence du confort thermique.....	34
1.5.5.2.	Zone du confort.....	34
1.5.6.	Evaluation du confort thermique.....	35
1.6.	Interactions thermiques entre l'homme et son environnement.....	37
1.7.	Propriétés et interactions thermiques entre l'habitat et son environnement	38
1.7.1.	Les échanges thermiques.....	39
1.7.1.1.	La convection thermique.....	39
1.7.1.2.	La conduction thermique.....	40
1.7.1.3.	Le rayonnement thermique.....	40
1.7.2.	Propriétés et compréhension des mécanismes thermo-physiques du bâtiment	41
1.7.3.	La puissance solaire thermique.....	42
1.8.	Conclusion.....	44

Chapitre II : La méthode retenue pour l'évaluation du confort thermique

II.1.	Introduction.....	46
II.2.	Approches de modélisation.....	47
II.2.1.	Introduction.....	47
II.2.2.	Les modèles monozone.....	48
II.2.3.	Les modèles multizones.....	49
II.2.4.	Les modèles zonaux.....	50
II.2.5.	Les modèles CFD.....	50
II.3.	Différents types de simulation.....	52
II.3.1.	La modélisation énergétique.....	52
II.3.2.	La modélisation aéraulique.....	53
II.3.3.	La modélisation thermo-aéraulique.....	53

II.3.4.	La modélisation hygro-thermo-aéraulique.....	54
II.4.	Le modèle thermique retenu.....	54
II.4.1.	Hypothèses simplificatrices.....	55
II.4.2.	Bilan enthalpique.....	55
II.4.3.	Bilan massique.....	57
II.4.4.	Bilan sensible.....	58
II.4.5.	Bilan latent.....	59
II.4.6.	Modèle de conduction & Couplage avec les échanges superficiels	60
II.5.	L'humidité relative.....	62
II.6.	La conformité avec les résultats expérimentaux.....	63
II.7.	Conclusion.....	65

Chapitre III : L'influence de la hauteur du bâtiment sur le confort thermique

III.1.	Introduction.....	67
III.2.	Une revue rapide de la littérature.....	67
III.3.	Le climat à Ghardaïa.....	69
III.4.	Description et structure nodale approuvée aux bureaux de travail.....	71
III.5.	Compacité : Analyse comparative du confort thermique.....	73
III.6.	Conclusion.....	88

Chapitre IV : Le compromis hauteur/compacité, Est-il un facteur d'économies important ?

IV.1.	Introduction.....	90
IV.2.	La compacité.....	90
IV.3.	L'isolation thermique.....	96
IV.4.	Contexte de la problématique.....	96
IV.5.	Méthode d'évaluation de l'efficacité énergétique.....	97
IV.5.1.	Consommation énergétique liée à l'enveloppe.....	98
IV.5.2.	Besoins énergétiques liés au chauffage d'eau.....	101
IV.5.3.	Apport de chaleur interne dû aux occupants.....	102

IV.5.4.	Apports de chaleur dus à l'éclairage et aux équipements internes	103
IV.5.5.	Consommation d'énergie due à la charge électrique.....	104
IV.5.6.	Apports solaires passifs.....	105
IV.6.	Nombre de degrés jour (site de Ghardaïa).....	107
IV.7.	Cas d'études & Description de la bâtisse.....	108
IV.8.	Analyse comparative des besoins énergétiques en fonction des hauteurs	111
IV.8.1.	Sans isolation thermique.....	112
IV.8.2.	Avec isolation thermique.....	114
IV.8.3.	Retour sur investissement.....	117
IV.9.	L'influence de la compacité sur les besoins de chauffage et de refroidissement	119
IV.10.	Conclusion.....	121

Conclusion générale

Références

Résumé

Les travaux entrepris dans cette thèse font paraître les avantages de la compacité qui se veut une réponse aux problèmes engendrés par le confort, l'efficacité énergétique et l'étalement urbain. L'influence de la hauteur des façades d'une construction sur sa performance énergétique, sur le confort des occupants et sur sa consommation énergétique a été rigoureusement abordée. A l'issue des résultats, la compacité n'est pas le facteur d'économies d'énergie le plus important, mais c'est un paramètre qui permet de réduire les besoins d'énergie tout en réduisant les coûts d'investissement. Agrandir la surface habitable conduit à une amélioration de la compacité parce que la surface des parois augmente généralement moins vite que la surface habitable. La compacité peut légèrement améliorer le confort thermique et réguler les fluctuations des températures intérieures. Ce concept diminue et répond également aux besoins en énergie selon la forme du cadre bâti et selon les sources des déperditions thermiques et le niveau d'isolation en question. Néanmoins, il est plus souhaitable de chercher un autre indicateur géométrique convenable et plus fiable pour prendre en considération la variation de la taille des façades dans le cas d'un immeuble mitoyen avec deux façades exposées. Le facteur de compacité adapté à l'architecture peut présenter une meilleure alternative.

Mots clés : Compacité, hauteur des murs, température, confort thermique, efficacité énergétique, besoins énergétiques, bâtiment.

Abstract

In this thesis, the work undertaken reveals the compactness advantages as a response to the problems caused by comfort, energy efficiency and urban sprawl. The influence of the building facades height on its energy performance, occupants' comfort and on its energy consumption has been rigorously addressed. Following the analysis outcome, compactness is not the most important factor in energy savings, but it is a parameter that reduces energy needs while reducing investment costs. Enlarging the living area leads to an improvement in compactness because the wall's surface generally increases less quickly than the living area. Compactness can slightly improve thermal comfort and regulate fluctuations in indoor temperatures. This building concept decreases and also meets the energy needs according to the form, the thermal losses sources and to the thermal insulation level. Nevertheless, it is more desirable to find another suitable and more reliable geometric indicator to take into account the variation in the facades size in the case of an adjoining building with two exposed facades. The compactness index adapted to the building architecture may present a better alternative.

Key words: Compactness, height of walls, temperature, thermal comfort, energy efficiency, energy needs, building.

ملخص

يسلط العمل المنجز في هذه الأطروحة الضوء على مزايا الاكتناز، والذي يهدف إلى أن يكون استجابة للمشاكل الناجمة عن الراحة وكفاءة الطاقة والزحف العمراني. تمت معالجة تأثير ارتفاع واجهات المبنى على أداء الطاقة، وعلى راحة شاغليه وعلى استهلاكه للطاقة بشكل دقيق بما فيه الكفاية. بعد نتائج التحليل، لا يعد الاكتناز العامل الأكثر أهمية في توفير الطاقة، ولكنه عامل يقلل من احتياجات الطاقة مع تقليل تكاليف الاستثمار. يؤدي توسيع منطقة المعيشة إلى تحسين الاكتناز لأن سطح الجدار يزداد عمومًا بسرعة أقل من مساحة المعيشة. يمكن أن يؤدي الاكتناز إلى تحسين خفيف في الراحة الحرارية وتنظيم التقلبات في درجات الحرارة الداخلية. كما أن هذا المفهوم يقلل ويلبي احتياجات الطاقة

اعتماداً على شكل البيئة المبنية ومصادر فقدان الحرارة ومستوى العزل. ولكن من الأفضل البحث عن مؤشر هندسي آخر مناسب وأكثر موثوقية لمراعاة التباين في حجم الواجهات في حالة المبنى المجاور ذو الواجهتين المكشوفتين. قد يقدم عامل الاكتناز المتكيف مع البنية بديلاً أفضل.

كلمات مفتاحية: الاكتناز، ارتفاع الجدران، درجة الحرارة، الراحة الحرارية، النجاعة الطاقوية، الاحتياجات الطاقوية، المبنى.

Nomenclature

Chapitre 1

T_{Neutre}	: Température neutre ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{Amb-Ext-Moy}}$: Température moyenne de l'air ambiant extérieur ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{Amb-Ext}}$: Température de l'air ambiant extérieur ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{Rad-Moy}}$: Température radiante moyenne émise par l'environnement intérieure ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{Amb-Int}}$: Température ambiante de l'air intérieur ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{Amb-Ext-Men-Moy}}$: La moyenne mensuelle de la température ambiante de l'air extérieur ($^{\circ}\text{C}$)
h_{Conv}	: Coefficient d'échange convectif ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
T_{Paroi}	: Température de la surface de la paroi (K)
T_{Fluide}	: Température du fluide dans la masse (K)
S	: L'aire de la surface de contact solide-fluide (m^2)
ρ	: Masse volumique exprimée (kg/m^3)
c	: Capacité thermique massique de la paroi exprimée ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$)
λ	: Conductivité thermique du matériau exprimée ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$)
e	: Epaisseur de la paroi (m)
a	: Diffusivité de la paroi (m^2/s)
T_L	: Facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair
T_0	: Le trouble dû à l'absorption gazeuse
T_1	: Le trouble correspondant à l'absorption par les gaz atmosphérique ($\text{O}_2, \text{CO}_2, \dots$) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh
T_2	: Le terme relatif à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption, qui dépend à la fois de la nature, des dimensions et de la quantité des aérosols.
Z	: L'altitude de lieu (km)

h	: L'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil
ma	: Masse atmosphérique
α_{aw}	: Coefficient d'extinction après absorption par la vapeur d'eau
j	: Nombre de jour de l'année
φ	: L'altitude de lieu ($^{\circ}$)

Chapitre 2

$H_i^{Entrant}$: L'enthalpie de l'air humide entrant dans la zone i (Joule)
$H_i^{Sortant}$: L'enthalpie de l'air humide sortant de la zone i (Joule)
P_{Sens_Clim}	: Puissance sensible due à la climatisation (Watt)
P_{Lat_Clim}	: Puissance latente émise due à la climatisation (Watt)
P_{Sens_AOE}	: Puissance sensible émise due aux appareils, aux occupants, à l'éclairage...etc.
P_{Lat_AOE}	: Puissance latente émise due aux appareils, aux occupants, à l'éclairage...etc.
Débit (n,i)	: Débit massique de l'air provenant de la zone n vers la zone i (kg/s)
$T_{Air}(n)$: Température de l'air provenant de la zone n , elle est supposée la même à celle de l'air entrant dans la zone i (K)
C_{mas}	: Chaleur massique de l'air ($J\ Kg^{-1}\ K^{-1}$)
$Hum_{Spéc}(n)$: Définie la masse de vapeur d'eau contenue dans une unité de masse d'air sec (kg_{vap}/kg_{mas} ou en %). C'est la teneur en eau de l'air dans la zone n , correspondant à l'humidité spécifique entrant à la zone i
L_v	: Chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J\ Kg^{-1}$)
C_v	: Capacité thermique à volume constant ($J\ Kg^{-1}\ K^{-1}$)
Débit (i,n)	: Débit massique de l'air provenant de la zone i vers la zone n (kg/s)

$Q_{CV_{ij}}$: Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air de la zone i et les surfaces des parois de température $T_j(i)$ appartenant à la même zone (W)
$T_j(i)$: Température surfacique de la paroi j dans la zone i (K)
$S_j(i)$: Surface d'échange convectif entre le mur j et l'air de la zone i (m^2)
m	: Nombre de parois opaques et transparentes intérieures (murs, portes, fenêtres...etc.) dans la zone i
$V_S(i)$: Volume spécifique de l'air humide, il définit le volume d'air humide contenant un kilogramme d'air sec à une pression et une température donnée
$V_{Air}(i)$: Volume de la zone i (m^3)
$H_{Relative}$: Humidité relative (%)
P_{Sat}	: Pression de vapeur saturante (Pa)
e	: L'épaisseur (m)
n	: Nombre de nœuds
λ	: Conductivité thermique (W/m K)
C_p	: La chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
ρ	: La densité volumique ($kg\ m^{-3}$)
σ	: Constante de Stefan-Boltzmann, sa valeur est de $5.67\ 10^{-8}\ W/m^2\ K^4$
G	: L'éclairement solaire global incident sur les parois extérieures W/m^2
α	: Coefficient d'absorption solaire
ε	: Émissivité thermique
F_{Surf-i}	: Facteur de forme ; c'est un facteur purement géométrique, il caractérise la disposition d'une surface par rapport à une autre, il identifie les échanges de chaleur entre ces différentes parois dans une même zone thermique i

$h_{\text{Conv-A}}$: Coefficient du transfert de chaleur par convection entre les surfaces d'échange et l'air ambiant intérieur ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
$h_{\text{Conv-amb}}$: Coefficient du transfert de chaleur par convection entre les surfaces d'échange et l'air ambiant extérieur ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
V_{vent}	: La vitesse du vent (m/s)
T_{amb}	: La température de l'air ambiant extérieur (K)

Chapitre 4

$\text{Dép}_{\text{Enveloppe}}$: Déperditions thermiques totales (W/K)
D_j	: Nombre de degrés-jours
$A_{\text{Parois-i}}$: Surface des parois (m^2)
$b_{\text{Parois-i}}$: Coefficient de réduction des déperditions thermiques des parois
$\sum_{k=1}^{k=m} R_{\text{Couche-k-paroi i}}$: Somme des résistances thermiques des différentes couches intérieures de matériaux constituant la paroi ($\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$)
$e_{\text{Couche k-paroi i}}$: Épaisseur de la couche du matériau (m)
$\lambda_{\text{Couche k-paroi i}}$: Conductivité thermique du matériau (W/mK)
R_{Voilages}	: Résistance thermique additionnelle des voilages, elle est fixée à $0.025 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$
R_{Rideaux}	: Résistance thermique additionnelle des rideaux, la valeur retenue est de $0.030 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$
$R_{\text{Occultations}}$: Résistance thermique additionnelle des occultations, elle est retenue à $0.17 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$ si elles existent
$\text{Débit}_{\text{éq}}$: Débit équivalent de l'air entrant (m^3/h)
0.34	: Capacité thermique volumique de l'air ($\text{Wh}/\text{m}^3 \text{K}$)
$\text{Débit}_{\text{Hyg}}$: Débit d'air d'aération naturelle, considéré comme système de ventilation d'hygiène (m^3/h)
$\text{Débit}_{\text{Ad}_f}$: Débit additionnel, l'ouverture des fenêtres vient en complément (m^3/h)

$\text{Débit}_{\text{Comb}}$: Débit additionnel des appareils à combustion dans les pièces chauffées
$\text{Débit}_{\text{VMC}}$: Débit d'air extrait par la ventilation mécanique
$\text{Débit}_{\text{Perm}}$: Débit de fuite de l'enveloppe
$\text{Débit}_{\text{Cond}}$: Débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel
Con_{ECS}	: Besoins énergétiques journaliers à la demande de l'utilisateur (Wh)
ρ	: Densité volumique de l'eau, sa valeur retenue est fixée à 1 kg/litre
V_{ECS}	: Quantité (par litres) d'eau chaude demandée par l'utilisateur
T_{ECS}	: Température de l'eau chaude d'utilisation ($^{\circ}\text{C}$)
T_{EF}	: Température moyenne de l'eau froide à l'entrée du système de chauffage ($^{\circ}\text{C}$)
Nb_{Occup}	: Nombre d'occupants
C_{Ir}	: Chaleur irradiée par chaque occupant (W/occupant)
$\text{Dur}_{\text{Près/Jour}}$: Durée de présence de chaque occupant par jour (heure)
Nb_{Jour}	: Nombre de jours à chauffer/climatiser (jours par mois)
$\text{Dur}_{\text{Fonctionnement}}$: La durée du fonctionnement de l'équipement (heure par jour)
$P_{\text{Irradiée}}$: La puissance irradiée par l'équipement (W)
$P_{\text{éq}}$: Puissance électrique de l'équipement (W)
Dur_{Util}	: Nombre d'heures d'utilisation (heure)
$\text{Nb}_{\text{Jour-Util}}$: Nombre de jours d'utilisation
n	: Nombre de surfaces de captation
I_j	: Densité du rayonnement solaire incident sur une surface unitaire d'orientation j (W/m^2)
A_{nj}	: Surface réceptrice équivalente ayant une orientation j , elle permet de déterminer la capacité du bâtiment à capter les apports solaires

A	: Surface d'ouverture (m^2)
S	: Facteur solaire des fenêtres
$I_{s,er}$: Densité du rayonnement solaire total reçu par la surface ouvrante avec un ombrage permanent (W/m^2)
I_s	: Densité du rayonnement solaire total qui aurait été reçu sans ombre (W/m^2)
F_h	: Facteur de correction pour l'horizon
U	: Coefficient de transmission thermique ($W/m^2 K$)

Table des figures

- Figure 1.1** : La répartition des différents produits énergétiques par a : forme d'énergie, b: secteur d'activité
- Figure 1.2** : Interactions thermiques entre l'homme et l'ambient extérieur
- Figure 1.3** : Interactions thermiques à l'intérieur d'un habitat
- Figure 2.1** : Modèle nodal du bâtiment à une zone (monozone)
- Figure 2.2** : Type de discrétisation dans un modèle nodale multizone
- Figure 2.3** : Type de discrétisation dans un modèle zonal
- Figure 2.4** : Type de discrétisation dans un modèle CFD
- Figure 2.5** : Le modèle de conduction retenu pour le calcul des températures nodales
- Figure 3.1** : Éclairement solaire horizontal correspondant au site de Ghardaïa
- Figure 3.2** : Températures ambiantes correspondantes au site de Ghardaïa
- Figure 3.3** : Plan d'aménagement 2D du bureau
- Figure 3.4** : Surfaces carrées ou rectangulaires planes et parallèles non centrées et de dimensions quelconques
- Figure 3.5** : Surfaces planes rectangulaires formant un dièdre droit
- Figure 3.6** : Variation de l'indice de compacité en fonction de la hauteur des façades
- Figure 3.7** : Variation des apports solaires journaliers (par unité de volume) incidents sur la surface extérieure de l'enveloppe
- Figure 3.8** : Température de l'air intérieur
- Figure 3.9** : Température superficielle intérieure du mur Sud
- Figure 3.10** : Température superficielle extérieure du mur Sud
- Figure 3.11** : Humidité relative de l'air intérieur
- Figure 3.12** : Niveau du confort à différentes hauteurs pour une teneur en eau fixée à $5 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{Eau}}/\text{Kg}_{\text{Air sec}}$

- Figure 3.13** : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, construction de type plain-pied, 28 Janvier 2016
- Figure 3.14** : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, construction de type plain-pied, 28 Janvier 2016
- Figure 3.15** : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, construction de type plain-pied, 28 Juin 2016
- Figure 3.16** : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, construction de type plain-pied, 28 Juin 2016
- Figure 3.17** : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Janvier 2016
- Figure 3.18** : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Janvier 2016
- Figure 3.19** : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Juin 2016
- Figure 3.20** : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Juin 2016
- Figure 4.1** : Variation des compacités géométriques en fonction des dimensions caractéristiques
- Figure 4.2** : Plans descriptifs, Modélisation 2D et 3D des bâtiments, maison plain-pied et bâtiments à plusieurs étages
- Figure 4.3** : Composition de maçonnerie et configuration d'éléments structurels
- Figure 4.4** : Besoins énergétiques en fonction de l'indice de compacité classique et la labellisation des maisons unifamiliales
- Figure 4.5** : Économies d'énergie annuelles en fonction du nombre d'étages, la maison unifamiliale plein pied est retenue comme référence
- Figure 4.6** : Besoins énergétiques en fonction de l'indice de compacité classique et la labellisation des maisons unifamiliales. Cas d'une enveloppe isolée par l'extérieur

- Figure 4.7** : Économies d'énergie annuelles en fonction du nombre d'étages, la maison unifamiliale plein pied est retenue comme référence. Cas d'une enveloppe isolée par l'extérieur
- Figure 4.8** : Diminution des besoins énergétiques due à l'isolation thermique en fonction de l'indice de compacité
- Figure 4.9** : Variation du temps de retour sur investissement en fonction du nombre d'étages
- Figure 4.10** : Besoins énergétiques mensuels dus à l'enveloppe d'un local bureau de type plain-pied d'une hauteur de 3.6m
- Figure 4.11** : Besoins énergétiques dus à l'enveloppe en fonction de la hauteur des murs

Liste des tableaux

- Tableau 1.1** : Valeurs du coefficient α en fonction de la vitesse de l'air
- Tableau 2.1** : Evaluation des facteurs de qualité en fonction de la méthode de modélisation
- Tableau 2.2** : Coefficient du transfert de chaleur convectif entre l'air ambiant et les parois
- Tableau 3.1** : Valeurs des irradiances solaires horizontales correspondantes au site de Ghardaïa
- Tableau 3.2** : Propriétés thermo-physiques et épaisseurs des parois
- Tableau 3.3** : Indices de compacité et facteurs de forme en fonction de la hauteur de la construction, les dimensions de la zone est de $4 \times 4 \times L \text{ m}^3$, cas d'un local de type plain-pied
- Tableau 3.4** : Irradiances solaires journalières, températures moyennes calculées et propriétés d'inertie thermique, les dimensions de la zone est de $4 \times 4 \times L \text{ m}^3$, cas d'un local de type plain-pied
- Tableau 4.1** : Formules mathématiques permettant de calculer le volume et la surface des différentes géométries
- Tableau 4.2** : Comparaison des indices de compacité
- Tableau 4.3** : Résistances thermiques d'échanges superficiels
- Tableau 4.4** : Coefficient de transmission thermique des portes $U \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$
- Tableau 4.5** : Coefficients $U_{\text{vitrage-nu}} \text{ (W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C)}$ des vitrages nus
- Tableau 4.6** : Estimation de la chaleur irradiée par le corps humain
- Tableau 4.7** : Densités maximales de puissance d'éclairage pour la méthode pièce par pièce, en W/m^2
- Tableau 4.8** : Densités de chaleur diffusée par éclairage, équipements et meubles internes
- Tableau 4.9** : Consommation énergétique journalière moyenne des appareils électriques
- Tableau 4.10** : Nombre de degrés jours et nombre de jours et d'heures à chauffer, confortables et à climatiser

Tableau 4.11 : Coefficient de transmission thermique U des éléments de construction ($W/m^2 K$)

Tableau 4.12 : Besoins énergétiques (kWh) en eau chaude sanitaire, Consommation d'énergie électrique et Énergie générée par les gains gratuits internes et passifs

Tableau 4.13 : Besoins énergétiques mensuels et annuels d'une maison plain-pied comparés aux besoins énergétiques mensuels et annuels moyens d'une maison située dans un immeuble de logements

Tableau 4.14 : Besoins énergétiques mensuels et annuels d'une maison plain-pied comparés aux besoins énergétiques mensuels et annuels moyens d'une maison située dans un immeuble de logements. Intégration d'un isolant thermique dans l'enveloppe

Tableau 4.15 : Nombres de degrés-jours calculés déduits de l'équation du confort 4.23 et correspondants à l'année 2015

Introduction générale

Introduction générale

Dans la vie de l'homme, le bâtiment joue un double rôle, l'héberger et le protéger contre les aléas de la nature. La croissance démographique et l'urbanisation nécessitent un nombre important de bâtiments supplémentaires, provoquant une augmentation sans précédent de la consommation d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre, de la production de déchets et de l'utilisation des ressources.

De ce fait, l'enveloppe du bâtiment est un élément clé pour répondre aux préoccupations environnementales, car elle est responsable des transferts thermiques vers l'extérieur et elle est particulièrement à l'origine d'une demande énergétique et d'émissions de carbone. Elle représente une séparation physique entre l'environnement intérieur et l'environnement extérieur, elle doit être donc conçue de telle manière qu'elle soit la barrière thermique. Une enveloppe thermique bien construite est l'un des éléments clés d'une maison confortable et économe en énergie. Ses caractéristiques dépendent de la forme, de l'orientation, de l'emplacement et des matériaux de construction composants les murs extérieurs du bâtiment.

En outre, plusieurs contributions ont fait paraître les avantages de la compacité qui se veut une réponse aux problèmes engendrés par le confort, l'efficacité énergétique et l'étalement urbain. Les indicateurs géométriques proposés permettent d'une part de décrire la compacité de l'immeuble qui peut être utiles dans la phase initiale d'une conception architecturale satisfaisante, et d'autre part, de confirmer que les textures urbaines les plus compactes et les plus denses sont plus économes en énergie que les modèles urbains plus clairsemés et moins denses. Il a été montré parallèlement que la configuration spatiale du quartier, en particulier dans les villes compactes, joue un rôle clé dans la cohésion sociale.

Une meilleure forme engendre une meilleure compacité et favorise en conséquence une économie d'énergie à long terme, mais elle engendre également une meilleure répartition des parois en contact avec l'extérieur. Une bonne économie implique que pour un volume défini, la surface des matériaux constituant les parois du contenant doit être la plus faible possible. Néanmoins, ce procédé de calcul peut donner des fois des résultats aberrants. Il ne prend pas en compte la réalité physique de la surface habitable qui est pourtant un des facteurs, si ce n'est le facteur le plus important d'un programme de construction. Ce paramètre définit fortement la taille du logement et influence largement sa forme. Le second terme ne peut être que le volume de la construction ou la surface totale des parois d'échange. La surface des parois d'échange est la somme de toutes les superficies de toutes les parois qui séparent le volume de l'ambiance extérieure, du sol et des espaces voisins qui n'appartiennent à aucun volume chauffé.

Enfin, pour aider le concepteur à qualifier une option architecturale, d'autres ratios traduisent la compacité :

- Les surfaces des façades, rapportées aux m² habitables, dont les valeurs maximales dépendent de la typologie adoptée
- La surface de vitrage des logements, également rapportée aux surfaces habitables, dont la valeur ne devrait pas excéder 15 %

Le facteur de compacité doit rester un indicateur de la qualité bioclimatique de la conception sans jamais être un obstacle à la création architecturale.

L'objectif de la compacité dans cette thèse repose sur une sélection avisée de la taille d'un bâtiment. Elle doit permettre une évaluation fiable de l'influence de la forme avec pour unique objectif d'orienter les concepteurs vers les solutions à privilégier. Cette thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré principalement au contexte énergétique et à l'identification du confort thermique. L'intérêt de la performance énergétique passe impérativement par une bonne conception qui est liée systématiquement par le niveau du confort escompté.

Compte tenu des hypothèses simplificatrices, une présentation argumentée du modèle enthalpique entrepris est exposée au second chapitre. Il a été considéré comme le plus efficace et le plus précis des méthodes à maillage fixe.

L'objectif principal du troisième chapitre est d'étudier l'influence de la hauteur des façades d'un bâtiment sur le niveau d'amélioration du confort thermique.

Dans le dernier chapitre, nous apportons une attention toute particulière aux performances thermiques de l'enveloppe pour déduire l'apport de la compacité dans les cas d'une enveloppe à faible et à forte isolation thermique.

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

Chapitre I

Principaux paramètres du confort thermique

Chapitre I :

Principaux paramètres du confort thermique

I.1. Introduction

Depuis un certain temps, la consommation d'énergie en Algérie connaît une forte croissance. Cette hausse est engendrée par les grandes mutations socio-économiques que le pays a connu ces dernières décennies. L'amélioration du niveau de vie et le confort qui en découle et la croissance des activités économiques sont les principaux facteurs qui ont contribué le plus à l'augmentation de la facture énergétique nationale. Ce constat alarmant interpelle les pouvoirs publics à réfléchir et à mettre en œuvre une nouvelle politique énergétique capable à remédier à cette situation qui pourra avoir des retombés néfastes sur l'économie nationale et sur le bien-être des citoyens.

Considérée dérisoire jusqu'à un passé pas très lointain, la consommation énergétique nationale a enregistré une nette évolution. En effet, tout le monde se souvient de l'été 2003 et des sérieuses perturbations en alimentation en électricité qu'ont connu plusieurs régions du pays à cause de la surconsommation enregistrée en énergie électrique. Durant ces dernières années, on remarque que concernant la consommation de l'électricité en Algérie et notamment dans le secteur résidentiel, la tendance est à la hausse 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.

Sous l'effet d'une pression incessante sur l'habitat en Algérie et pour faire face aux demandes accrues de logements, les services en charge du secteur ont particulièrement négligé la relation entre le bâtiment et son environnement climatique, surtout l'impact des échanges thermiques. Mais, en raison de la crise de l'énergie, elle est devenue l'un des principaux sujets de préoccupation des chercheurs dans le domaine de la construction.

L'objectif de ce premier chapitre est de clarifier les paramètres clés du confort thermique juste après la présentation du contexte énergétique. Nous voulons montrer que la performance énergétique et la réduction de la consommation d'énergie dans le bâtiment passe impérativement par la conception d'une bonne enveloppe qui est liée directement par le niveau du confort souhaité.

I.2. Contexte énergétique national

Le contexte énergétique se caractérise majoritairement par une dépendance aux hydrocarbures qui occupent une place centrale dans l'économie algérienne. Les revenus des exportations (pétrole et gaz) constituent près de 98% des recettes. En plus, la demande énergétique locale est en perpétuelle croissance. Cette situation engendrent parallèlement des problèmes dus au réchauffement climatique et des risques d'épuisement de nos ressources. Pour faire face à cette situation, il faudra privilégier un modèle de consommation durable issu d'une transition énergétique.

La sobriété et la rationalisation énergétique seront des démarches à conseiller pour réduire les dépenses liées aux différents services. L'efficacité énergétique se présente donc comme une piste incontournable qui favorise une réduction significative de la consommation énergétique pour un même service rendu. L'investissement dans la recherche, promouvoir l'utilisation des ressources d'énergie propres non polluantes et le développement des solutions durables et renouvelables seront tout aussi indispensables pour assurer le déploiement de la trilogie : sobriété, efficacité, énergies renouvelables.

I.3. La consommation énergétique nationale

L'augmentation de la population d'année en année et la progression du niveau de vie engendrent une croissance régulière de la demande nationale d'énergie. En 2005, la consommation d'énergie était de 17 millions Tep (par définition, c'est la tonne d'équivalent pétrole qui représente la quantité d'énergie contenue dans une tonne de pétrole brut, soit 41.868 Giga Joules), soit 0.51 Tep

par habitant par an sachant que le nombre total est de 33 millions d'habitants algériens. En 2015, cette consommation a atteint les 58 millions Tep pour 40 millions d'habitants, équivalant à 1.45 Tep par habitant par an. En suivant cette cadence, en 2030, elle devrait passer à 2 Tep par habitant par an qui couvrira systématiquement 100 millions de Tep pour 50 millions d'habitants [1].

La répartition des 58 millions de Tep des différents produits énergétiques consommés au cours de l'année 2015 est comme suit (**figure 1.1**):

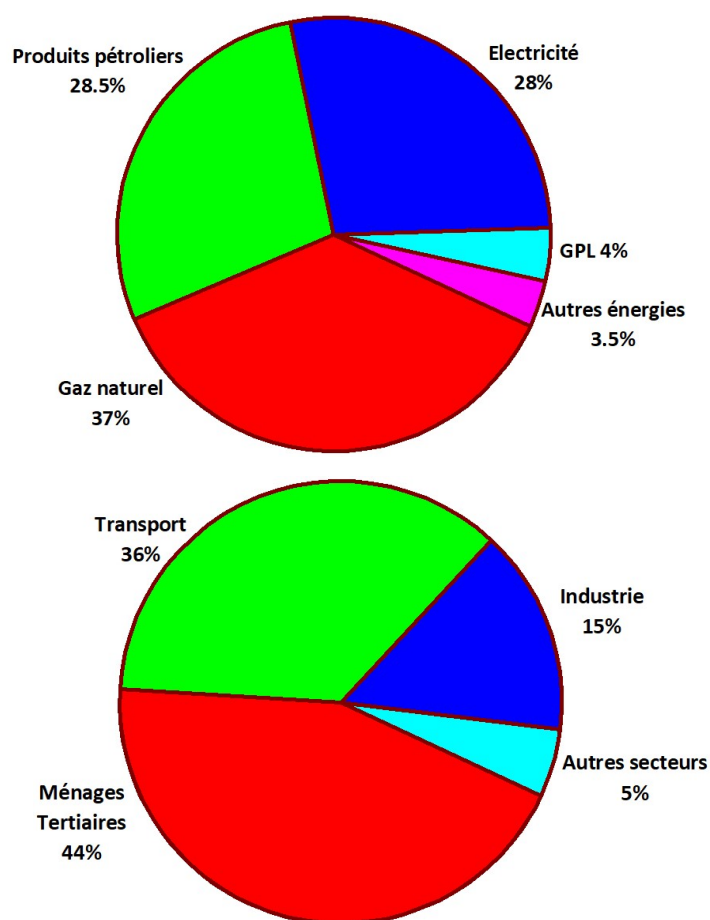


Figure 1.1 : La répartition des différents produits énergétiques par a : forme d'énergie, b: secteur d'activité [1]

En Algérie, 98% des sources énergétiques sont produites à partir du gaz naturel, sachant que plus de 60% de l'énergie consommée liée aux ménages est sous forme de l'électricité.

La consommation nationale du gaz naturel dépasse les 35% qui est une valeur élevée par rapport à la moyenne mondiale (22%).

I.4. La transition énergétique

Dans le contexte énergétique national actuel et face aux défis énergétiques auxquels fait face notre pays, la transition énergétique est une urgence et plus que nécessaire. Le but est de satisfaire les besoins énergétiques futurs en forte croissance tout en évitant les impacts sur l'environnement (gaz à effet de serre). L'ambition est d'être efficace grâce à la maîtrise, la sobriété, l'efficacité énergétique et la diversification du mix énergétique vers les énergies propres et renouvelables.

Le modèle énergétique national est inefficace et il est globalement non créateur de richesse vu qu'il est basé sur la consommation des ressources épuisables. A travers un programme d'énergies renouvelables prometteur, l'Algérie ambitionne de diversifier sa production électrique à partir de plusieurs filières: le photovoltaïque, l'éolienne, le solaire thermique, la biomasse, l'hydrogène vert et renouvelable, la cogénération et la géothermie. L'engagement de notre pays dans cette politique va nous conduire vers la sobriété et l'utilisation des énergies inépuisables et renouvelables.

Cependant, la dépendance de nos exportations des hydrocarbures représente un risque majeur pour l'économie de notre pays. C'est pourquoi, une transition énergétique qui vise à instaurer un modèle de consommation robuste et préparer l'économie de l'Algérie après le pétrole est plus qu'obligatoire.

I.5. Le confort thermique

I.5.1. Contexte historique

Socrate, vers 400 av. J.-C., avait quelques réflexions sur la pertinence climatique des maisons, sur la façon de construire pour assurer le confort thermique. Vitruve (1er siècle av. J.-C) a également écrit sur la nécessité de tenir compte du climat dans la conception des bâtiments, par raisons de santé et de confort. Cela a cependant eu très peu d'influence sur la pratique de l'architecture. Jusqu'à la révolution industrielle, le confort thermique n'était pas un problème pratique, car il y avait très peu d'outils à notre disposition pour

l'influencer. Quand c'était froid, un feu a été allumé pour améliorer les conditions. Quand il faisait chaud, l'utilisation des ventilateurs portatifs était le seul soulagement, ou peut-être des ventilateurs plus grands exploités par serviteurs obéissants. La capacité de stockage de chaleur des grottes était parfois utilisée pour le refroidissement. Dans certaines cultures, les tunnels artificiels et la ventilation à tours ont été utilisés à des fins similaires [2].

La technologie de chauffage s'est améliorée à partir de la fin du 18^{ème} siècle et le refroidissement mécanique est devenu une possibilité au début du 20^{ème} siècle. Bien que Heberden (début du 19^{ème} siècle) a reconnu que la température de l'air n'est pas la seule cause de sensation thermique, que l'humidité est un facteur contributif, la première étude sérieuse sur le confort (notamment l'effet des températures élevées) a été réalisée par Haldane en Angleterre (1905). L'élan du confort et les recherches sont venues d'ingénieurs : il était désormais possible de surchauffer ou trop refroidir les bâtiments, il était donc nécessaire d'établir des températures de conception [2].

Au début des années 1920, Houghten et Yagloglou (1923) de l'ASHVE (American Society of Heating and Ventilating Engineers) ont tenté de définir la "zone de confort". En Angleterre, la motivation est venue de l'industrie hygiène : les limites des conditions environnementales pour le travail. Veron et Warner (1932) et plus tard Bedford (1936) ont mené des études empiriques à l'ensemble d'ouvriers des usines. Les travaux analytiques ont commencé aux États-Unis au milieu des années 1930, où Winslow, Herrington et Gagge (1937) ont fait une importante contribution [2].

Pendant et après la Seconde Guerre mondiale, les activités de recherche ont augmenté et nombreuses disciplines se sont impliquées. Nous citons à titre indicatif : l'ingénierie, l'architecture, la physiologie, la médecine, la géographie et la climatologie. En architecture, Victor Olgyay (1963) a été le premier à rassembler les résultats des différentes disciplines et les interpréter à des fines pratiques (architecturales). Avant cela, il y avait deux approches extrêmes de la conception :

- L'architecture considérée comme étant facteurs thermiques (au mieux) en termes qualitatifs seulement.
- La conception technique des installations mécaniques était basée sur les températures afin d'établir la capacité requise face aux pires conditions.

Après la crise énergétique des années 1970, les attitudes peuvent être mieux reflétées par une conversation entre deux professionnels :

L'ingénieur :

Je ne peux pas comprendre pourquoi vous, architectes, vous essayez d'exproprier les problèmes énergétiques dans le bâtiment ; après tout, ce sont nos équipements qui utilisent l'énergie.

L'architecte :

Oui, mais si je fais un bon immeuble, je n'aurais pas besoin de votre équipement !

La première étape de la conception thermique doit consister à établir ce que les conditions nécessaires seraient : les limites du confort thermique [2].

I.5.2. Définition

L'architecture assure une forte relation avec le confort thermique intérieur. L'espace doit être conçu pour le bien-être de ses occupants. Le confort thermique sera défini donc par l'état d'esprit psychologique de l'utilisateur engendré par une sensation de chaleur ou de froid. En termes de sensations corporelles, le confort thermique est la sensation d'être :

- Froid,
- Frais,
- Légèrement plus frais,
- Neutre,
- Légèrement plus chaud, et
- Chaud

En physiologie, les échanges de chaleur équilibrés entre un corps et son environnement en absence de transpiration régulatrice créent un confort thermique acceptable. La norme BS EN ISO 7730 définit le confort thermique

comme "... cette condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique", c'est-à-dire la condition où quelqu'un ne se sent ni trop chaud ni trop froid [3].

Selon Fanger (1973) [4], il n'y a pas de différence statistique substantielle entre les femmes et les hommes. Lors de la surchauffe, la perte de liquide provient de la respiration latente et de la diffusion de vapeur à travers la peau. Le confort thermique est important tant sur le plan psychologique que physique. Cela peut également affecter le moral des gens. À l'intérieur, le confort thermique dépend essentiellement de la température (air et parois), le métabolisme, l'habillement, les mouvements d'air et l'hygrométrie.

I.5.3. Facteurs du confort thermique

L'adoption des conditions thermiques et de conception satisfaisantes, bien qu'elles soient des sensations individuelles par occupant, sont des éléments influents sur la conception des bâtiments.

I.5.3.1. Facteurs environnementaux

Vitesse de l'air

La majorité des personnes sont sensibles à la vitesse de l'air qui peut devenir un facteur important du confort thermique. L'air immobile ou statique peut provoquer une certaine fatigue et un inconfort des habitants. La circulation de l'air peut élever les déperditions convectives sans aucune variation de la température intérieure de l'air, bien que lorsque cette dernière est inférieure à la celle de la peau, les déperditions convectives augmentent considérablement. Cela peut se produire dans des conditions chaudes ou humides. En 2007, il a été montré que l'activité physique peut également augmenter la circulation de l'air [5]. Selon Nicol (1993) [6], la mesure de la vitesse de l'air pose un certain nombre de problèmes dus au mouvement et aux directions irrégulières de l'air.

Humidité relative

L'humidité relative est la quantité d'humidité transportée dans l'air, exprimée en pourcentage de la quantité maximale qui peut être transportée à

cette température (Parsons, 2003) [7]. Elle définie comme étant la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, exprimée en pourcentage de la quantité indispensable pour atteindre le niveau de saturation à la même température.

- L'air est sec à une humidité relative inférieure à 35%
- L'air est moyennement humide si elle est comprise entre 35 et 65%
- Il est humide pour des valeurs supérieures à 65%

Pour un même espace, à une teneur en eau fixe, l'humidité relative change en variant la température : elle augmente si la température baisse et vice-versa. Ce paramètre est un déterminant important du niveau de stress thermique, mais ne joue qu'un rôle mineur dans le confort thermique.

Température de l'air

La température de l'air est un facteur essentiel de stress thermique, globalement définie comme étant la température de l'air avoisinant le corps humain. Selon Parsons (2003) [7] et Randall (2005) [8], cette température est inégale et caractérisée par des variations qui se produisent couramment en continu. La température de l'air traversant la majorité de la surface du corps humain ne détermine pas nécessairement la limite du flux de chaleur. Elle n'est pas non plus très proche d'un corps habillé, car elle est affectée par les "conditions limites". Par exemple, même dans des environnements froids, une couche d'air plus chaud entoure le corps.

La température de l'air est considérée généralement comme l'un des facteurs climatiques le plus importants affectant le confort thermique. Cependant, un autre facteur doit également être retenu.

Température radiante moyenne

La température radiante est la chaleur transférée d'une masse à température plus élevée à une masse à température plus basse sans effet sur l'espace intermédiaire. Selon la norme ASHRAE 55-1992 [9], la température radiante moyenne est la température uniforme d'une pièce ou d'une enceinte imaginaire à laquelle le transfert de chaleur radiant du corps humain est équilibré avec le transfert de chaleur radiant environnant. La température

radiante moyenne est définie par ISO par rapport au corps humain, c'est pourquoi les thermomètres à globe sphérique utilisés pour mesurer le stress thermique donnent une approximation raisonnable de la forme du corps d'une personne assise.

Dans un espace occupé, les températures du sol, des murs et du plafond peuvent être très proches de celles de l'air. Parfois, la température radiante est la même que celle de l'air, et elle peut être constante quelque soit la direction. Par ailleurs, la température radiante moyenne dépasse la température de l'air dans des espaces contenant de planchers radiants ou munis d'un chauffage par irradiation.

I.5.3.2. Facteurs individuels

Les vêtements et l'activité sont deux facteurs individuels qui ont une corrélation significative avec le confort thermique.

Vêtements

L'homme peut contrôler les échanges de chaleur entre le corps et son environnement en modifiant les types de vêtements. Les vêtements peuvent réagir comme une barrière contre le transfert de chaleur. Conformément à la norme ASHRAE 55-1992 [9] portant sur les zones couvertes du corps, les vêtements agissent comme un isolant qui ralentit les pertes thermiques du corps, ce qui entraîne une amélioration de l'endurance et le confort à des températures plus basses. Pour connaître le niveau du confort thermique du lieu, il faut s'informer sur la résistance thermique des vêtements qui exprime le transfert de chaleur entre le corps humain et l'environnement. Le degrés du confort est traduit donc par la valeur "CLO" qui est une unité mesurant l'isolation thermique et utilisée pour les vêtements (clothes en anglais). $1 \text{ CLO} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$.

La résistance à l'évaporation, quant à elle, est une mesure de la perméabilité à l'humidité. Il affecte à la fois le transfert de chaleur latente de la peau à travers la couche de vêtements et la perte de chaleur par évaporation de la surface de la peau. Fanger (1973) [4] nous indiquent que l'interaction entre

l'activité et les aspects thermiques des vêtements peut être évaluée avec une précision raisonnable en considérant l'utilisation de la pièce occupée.

Activité

L'impact du taux métabolique sur le confort thermique est critique. Les corps humains génèrent continuellement de la chaleur par métabolisme, qui est définie, selon la norme ASHRAE (55-1992) [9], par "le taux de production d'énergie du corps", et exprimée en "MET". Le travail physique génère de la chaleur, et plus nous produisons de la chaleur, plus nous devons la perdre pour maintenir une température centrale stable et éviter la surchauffe. La production moyenne de la chaleur par corps est connue sous le nom de "taux métabolique". Le taux métabolique ($1 \text{ MET} = 58.2 \text{ W/m}^2$) prend en considération tous les processus thermiques dus aux réactions chimiques dans le corps.

I.5.3.3. Autres facteurs

En plus des facteurs humains, individuels et environnementaux, d'autres facteurs influençant le confort thermique comprennent l'acclimatation, l'alimentation, la construction corporelle et les conditions de santé. Selon Fanger (1970) [10], le rapport surface/volume a un effet sur le confort thermique. En plus, Koenigsberger et al. (1974) [11] ont rapporté que l'âge et le sexe influencent la préférence thermique. Huizenga et coll. (2006) [12] ont rapporté qu'à part d'autres facteurs affectant le confort thermique, on peut citer l'acclimatation, l'âge, le sexe, la forme corporelle, l'état de santé, la graisse stockée sous la peau, la qualité de l'activité et l'alimentation du système. Rosenlund (2000) [13] a rapporté que lors de l'adaptation au climat d'une région spécifique ou à une nouvelle saison de l'année, les changements du système métabolique et de la circulation sanguine affectent la perception du confort des gens. Dans de telles périodes, les personnes âgées s'adaptent plus lentement que les jeunes, et les taux de métabolisme diminuent pour les femmes et augmentent pour les hommes (Griefahn et al. 2001) [14].

I.5.4. Interaction du corps humain avec l'environnement

Yao et al. (2007) [15] ont montré que le confort thermique est obtenu en assurant un équilibre thermique entre la production de la chaleur métabolique à l'intérieur du corps et la dépense de la chaleur corporelle à travers les mécanismes de convection, conduction, rayonnement et évaporation. Lorsque la personne est en équilibre thermique, elle ne ressent ni très froid ni très chaud, bien que différentes personnes aient des seuils de chaleur ou de froid différents. C'est pourquoi certaines personnes peuvent se sentir à l'aise alors que d'autres se sentent mal à l'aise dans le même environnement. Pourtant, les humains réagissent généralement de la même manière à des conditions environnementales variables.

La production de la chaleur due au métabolisme dépend principalement de l'activité. Par conséquent, s'engager dans un stress physique accru entraîne une augmentation de la production de la chaleur métabolique dans le corps. La quantité de la chaleur pratiquement transférée par plusieurs mécanismes de mouvement est affectée par un certain nombre de facteurs, tels que la convection, le rayonnement, la conduction et l'évaporation. Les facteurs comportementaux, tels que le niveau d'activité et la sélection des vêtements affectent également ce processus, tout comme les facteurs environnementaux, tels que la température de l'air, la température moyenne du rayonnement, l'humidité relative et la vitesse de l'air.

I.5.4.1. Température corporelle interne

La température du corps humain est de 37 °C, mais toute valeur comprise entre 36.2 et 37.5 °C peut être considérée comme normale. Yao et coll. (2007) [15] ont considéré que 37.5 et 38 °C sont des seuils. Les températures supérieures à 38°C sont des températures de fièvre. Donc, chez l'être humain, la température corporelle est constante, mais elle peut légèrement varier suivant l'heure de la journée.

I.5.4.2. Thermorégulation

La thermorégulation est la capacité humaine traduite par l'ensemble des mécanismes qui permettent à maintenir une température corporelle souhaitée.

Selon Tanabe et al. (2002) [16] le système de thermorégulation se compose de quatre processus de contrôle qui sont la vasodilatation, la vasoconstriction, la transpiration et la production de chaleur par frissons. La thermorégulation est une réponse autonome importante avec des changements rapides de l'environnement conduisant à des réponses physiologiques immédiates (Parsons, 2003) [17]. Le système de thermorégulation du corps émet de la chaleur à travers le corps, qui à son tour réchauffe le sang. Pendant ce temps, les vêtements environnants préservent une température homéostatique. Ainsi, la température corporelle est la somme de la production de chaleur et de la perte de chaleur. L'hypothalamus situé dans le cerveau est le thermostat du corps ; il ajuste en permanence la température du corps en utilisant les voies du système nerveux pour maintenir le point de consigne d'environ 37°C.

I.5.4.3. Évaporation

Habituellement, l'être humain dégage de la chaleur par évaporation de l'eau à travers la peau à de basses températures environnantes. Selon Cena et Clark (1981) [18], la perte de chaleur par évaporation dépend de la capacité du corps à sécréter de la sueur et des propriétés physiques de l'environnement.

I.5.4.4. Transpiration

Lorsque la température corporelle augmente, la sueur est excrétée par la peau pour permettre son évaporation. Il existe deux types de glandes sudoripares. Tout d'abord, les glandes apocrines vestigiales se trouvent dans les ampoules et les régions pubiennes et sont responsables de l'odeur caractéristique de ces zones. Deuxièmement, les glandes eccrines sont réparties sur tout le corps. (Parson, 2003) [17].

I.5.5. La gamme du confort efficace

Nicol et Humphreys (2002) [19] ont rapporté que l'acclimatation au confort thermique peut potentiellement réduire la température réelle requise pour atteindre le confort à +2 °C. Dans les cas où ces possibilités d'acclimatation sont réalisables et appropriées, la zone du confort peut être beaucoup plus large.

I.5.5.1. Exigence du confort thermique

Chaque bâtiment doit répondre aux exigences du confort thermique pour l'occupation humaine. Selon Muncey (1979) [20], pour évaluer le confort humain, la température de l'air et des surfaces à l'intérieur du bâtiment doit être évaluée et l'humidité relative doit être maintenue entre 30% et 70%. Ces mesures réduisent le risque de peau désagréablement mouillée ou sèche, d'inconfort oculaire, de chaleur stable, de croissance microbienne et de maladie respiratoire. Si les conditions environnementales sont dans les limites du confort, plus de 80% des résidents trouvent les conditions thermiques acceptables. Selon Olesen et Brager (2004) [21], il existe deux méthodes d'estimation des besoins du confort : l'une implique une enquête auprès des résidents et l'autre implique des variables environnementales qui délimitent les conditions du confort.

I.5.5.2. Zone du confort

Les zones du confort signifient qu'il peut fournir un environnement thermique acceptable aux occupants portant des vêtements d'intérieur typiques et effectuant des activités quasi sédentaires. Habituellement, un environnement thermique est considéré comme acceptable pour l'occupation lorsqu'au moins 80% de l'occupation trouvent la zone thermiquement acceptable. Les êtres humains régulent leur température corporelle grâce à la circulation sanguine, à l'excrétion de sueur (transpiration), aux frissons et à d'autres manifestations physiques. La température théorique des tissus internes est de 37.2 °C (Aouf Abed Rahim Said, 2000) [3]. Cependant, si l'équilibre thermique est essentiel à la vie humaine, il est insuffisant pour le confort thermique.

Il est difficile d'établir une définition claire et précise du concept de confort thermique. Relatif finalement à un sentiment de bien-être personnel, le confort thermique fait référence à l'acclimatation d'une personne à son environnement et au maintien de l'équilibre thermique entre le corps et l'environnement tout en considérant d'autres facteurs, comme le sexe et l'âge. Il n'existe pas de méthode similaire pour réguler les vêtements ou le métabolisme d'un occupant, ce qui explique pourquoi deux personnes assises côte à côte peuvent percevoir une

différence de température significative. Néanmoins, la plupart des gens ne se sentent pas à l'aise thermiquement dans une plage de température étroite comprise entre 18 et 26 °C et avec une humidité relative comprise entre 30% et 60%. La gamme du confort thermique est une combinaison de divers facteurs. Cela inclut la température de l'air, la température du rayonnement, l'humidité relative et la vitesse de l'air à laquelle la majorité des gens ressentent un sentiment de confort et de satisfaction totale. Si une personne est incapable de déterminer que le climat est froid ou chaud, cela s'appelle le sentiment de confort thermique. Cette gamme, dite thermique neutre pour un certain groupe de personnes, dépend des éléments suivants : l'acclimatation, la qualité des vêtements et l'activité. En outre, la zone du confort thermique est contenue dans l'équilibre thermique dans les limites étroites de l'interaction des composants, qui à son tour est constituée d'éléments climatiques affectant l'échange thermique entre le climat et l'homme.

1.5.6. Evaluation du confort thermique

La sensation du confort ou d'inconfort thermique varie selon la température, l'hygrométrie de l'air ambiant, les courants d'air et le métabolisme de l'être humain qui change d'une personne à l'autre. Il a une forte relation avec l'homogénéité de la température dans les espaces.

En 1981, Auliciems [22] a proposé une nouvelle formule (après la révision de celle d'Humphrey) qui permet d'identifier la zone du confort avec une tolérance de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{Neutre}} = 17.6 + 0.31 T_{\text{Amb-Ext-Moy}} \quad (1.1)$$

T_{Neutre} : Température neutre ($^{\circ}\text{C}$).

$T_{\text{Amb-Ext-Moy}}$: Température moyenne de l'air ambiant extérieur ($^{\circ}\text{C}$).

La température opérative ou la température résultante sèche, est un indicateur du confort thermique qui prend en considération l'effet de la convection et l'influence des échanges thermiques par rayonnement. Les deux paramètres physiques retenus pour l'évaluation concernent la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante. Mathématiquement, la

température opérative (°C) est définie conformément à la norme ISO 7730 par la formule suivante :

$$T_{Op} = \alpha T_{Amb-Ext} + (1 - \alpha) T_{Rad-Moy} \quad (1.2)$$

$T_{Amb-Ext}$: Température de l'air ambiant extérieur (°C)

$T_{Rad-Moy}$: Température radiante moyenne émise par l'environnement intérieure (°C)

α : Coefficient qui dépend de la vitesse de l'air, sa valeur sera retenue comme indiqué sur le **tableau 1.1**.

Tableau 1.1: Valeurs du coefficient α en fonction de la vitesse de l'air

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

Auliciens [23] a proposé ensuite une nouvelle équation en tenant en compte les dimensions culturelles, sociales, économiques et climatiques. La finalité de cette proposition est d'éviter une certaine exagération dans la définition des besoins énergétiques (chauffage/climatisation).

$$T_{Neutre} = 9.22 + 0.48 T_{Amb-Int} + 0.31 T_{Amb-Ext-Men-Moy} \quad (1.3)$$

$T_{Amb-Int}$: Température ambiante de l'air intérieur

$T_{Amb-Ext-Men-Moy}$: La moyenne mensuelle de la température ambiante de l'air extérieur.

Dernièrement, plusieurs appellations viennent d'être mises à jour et apparaître par les experts de l'habitat. Récemment, le confort "hygrothermique" ou "thermo hygrométrique", "l'habitat sain" au Canada, la "bio construction" en Belgique, le "village solaire" en Allemagne et la "Haute Qualité Environnementale HQE " en France. Les médecins de l'habitat sain affirment que l'homme est un organisme homéotherme, où le confort hygrothermique dépend de la température de l'air et des surfaces, de l'humidité et des mouvements d'air. Ils ont pu apporter des valeurs précises pour chaque facteur :

- La température des murs : $22 + 2^{\circ}\text{C}$
- L'humidité relative : entre 40 et 60%
- La vitesse de l'air : inférieure à 0.15 m/s

- La différence de température entre deux murs d'une même pièce doit être inférieure à 10°C
- La différence de température entre le sol et le plafond doit être inférieure à 5°C
- La stratification de la chaleur est inconfortable, pas plus de 3°C de différence entre la tête et les pieds des occupants
- La température du sol entre 19 et 24°C [23]

1.6. Interactions thermiques entre l'homme et son environnement

Les transformations moléculaires et énergétiques qui se déroulent au sein des cellules de l'organisme et le métabolisme incitent une production de la chaleur échangée avec l'environnement sous différentes formes. Avec la thermorégulation, les échanges se font à l'intérieur du corps. Le couplage de plusieurs phénomènes physiques d'effectue au niveau de la peau par échanges thermiques qui peuvent se faire par rayonnement, convection, conduction et évaporation. Lors de la respiration, les échanges s'effectuent par convection et évaporation (figure 1.2).

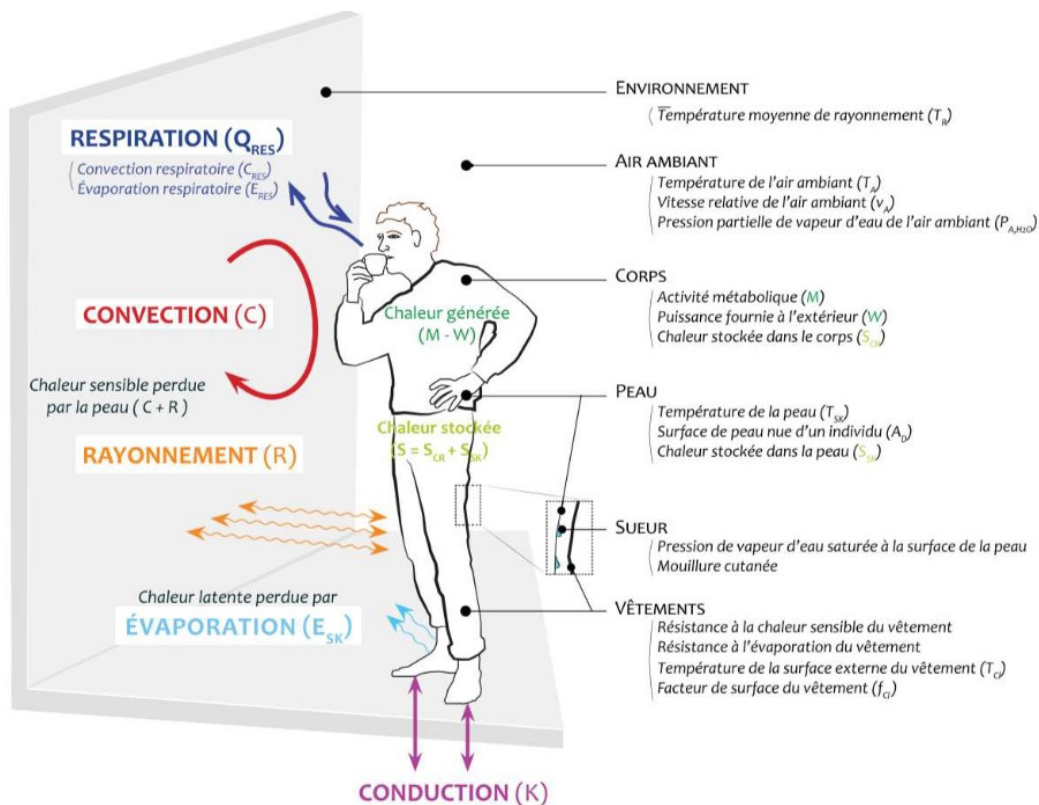


Figure 1.2 : Interactions thermiques entre l'homme et l'ambient extérieur [24]

I.7. Propriétés et interactions thermiques entre l'habitat et son environnement

Les habitats favorisent un microclimat intérieur pour nous protéger des conditions climatiques indésirables mais ils qui sont soumises à de nombreux phénomènes physiques. Le climat intérieur est également soumis aux différents modes de transferts thermiques avec le climat extérieur.

En 2012, Thellier, Monchoux et Bedrune ont pu définir deux types d'échanges :

- La puissance produite représentée par les apports internes liés à la diffusion de la chaleur de l'être humain ou aux appareils électriques et la production des systèmes du contrôle des ambiances intérieures qui ont un effet positif pour le chauffage et négatif pour la climatisation).
- Les transferts de masse et de chaleur avec l'environnement qui varient en fonction des conditions climatiques et correspondent aux transferts par l'enveloppe, aux transferts aérauliques liés au renouvellement d'air et aux apports solaires transférés à travers les vitrages.

L'ensemble de ces échanges, définis par la **figure 1.3**, varient et dépendent des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment mais également des caractéristiques météorologiques : température ambiante extérieure, vitesse de l'air, humidité relative, pression partielle de vapeur d'eau extérieure et rayonnement solaire.

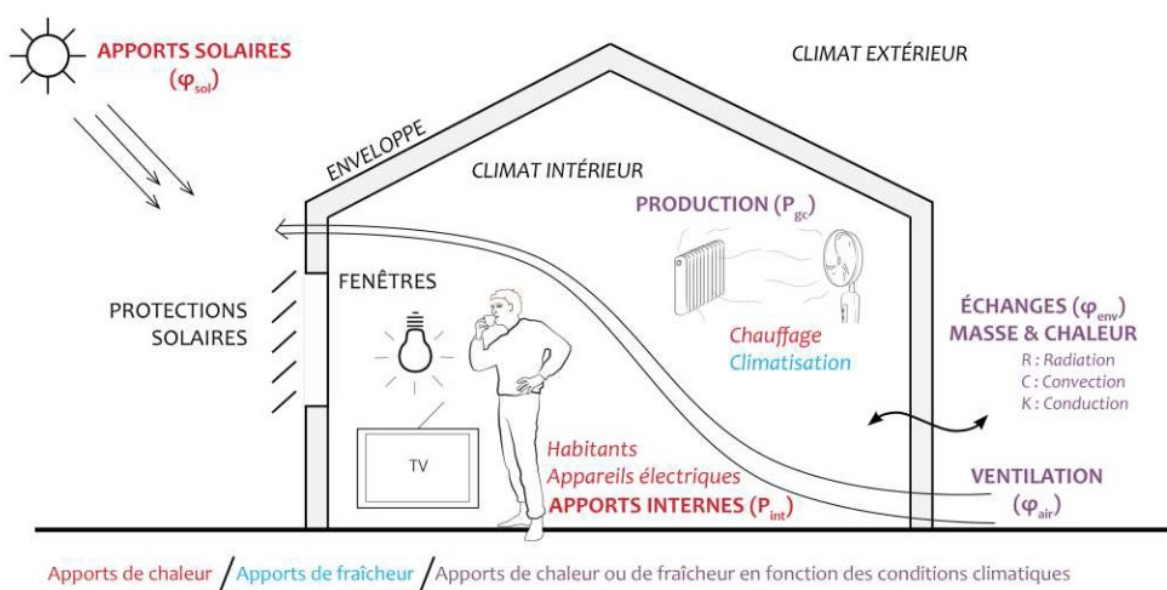


Figure 1.3 : Interactions thermiques à l'intérieur d'un habitat [24]

1.7.1. Les échanges thermiques

Physiquement, le bâtiment est une masse et un volume. La masse représente les parois opaques et transparentes. Elles constituent le lien entre le microclimat intérieur et les conditions climatiques extérieures. La morphologie, l'orientation, et la répartition des espaces caractérisent les modalités des transferts thermiques. Les transferts énergétiques sont essentiellement des transferts de masse et de chaleur.

Les transferts de masse concernent la chaleur latente mettant en jeu le changement de phase.

Le transfert de chaleur est un processus complexe issu de la combinaison des modes fondamentaux du transfert : la conduction, la convection et le rayonnement. Dans le cas où l'un de ces modes est dominant, les effets des autres sont faibles et ils peuvent être négligés.

1.7.1.1. La convection thermique

La convection est le transport d'énergie thermique par le mouvement de fluides et de gaz. Elle peut être divisée en deux types. Premièrement, la convection naturelle ou libre, c'est le processus par lequel un fluide se déplace en raison des variations de sa densité. Ces variations résultent des changements de température. Deuxièmement, la convection forcée, elle se produit lorsque le fluide est déplacé par des moyens mécaniques, tels que des pompes, des ventilateurs ou le vent. De plus, la chaleur peut être transférée par convection d'une surface vers un liquide ou un gaz environnant, ou vice versa. Si la surface extérieure est à une température plus élevée que l'air, la chaleur est transmise de la surface à l'air voisin par conduction, en raison de l'altération de la densité de l'air chauffé. Ce phénomène provoque une attraction résultant des variations de la densité des courants d'air; l'impact de cette tendance sur le mouvement de la température de l'air est beaucoup plus élevé que si l'air était complètement immobile. Le phénomène de la convection est traduit par l'équation suivante [25]:

$$\phi(x, t) = h_{\text{Conv}} (T_{\text{Paroi}} - T_{\text{Fluide}}) \quad (1.4)$$

Avec : h_{Conv} : le coefficient d'échange convectif ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

T_{Paroi} : la température de la surface de la paroi (K)

T_{Fluide} : la température du fluide dans la masse (K)

S : l'aire de la surface de contact solide-fluide (m^2)

I.7.1.2. La conduction thermique

Les échanges thermiques s'effectuent par conduction dans les solides et les fluides au repos. Les transferts de chaleur sont conduits par les propriétés thermo-physiques du matériau : la conductivité thermique, la densité volumique, la capacité calorifique. Deux types de conduction s'imposent : une conduction en régime permanent qui entraîne une température instantanée constante et une conduction en régime transitoire dans laquelle l'inertie intervient.

La conduction est traduite par le déplacement de la chaleur d'une zone chaude à une zone plus froide du même corps. La conduction se produit dans les parois opaques et transparentes. Le flux de chaleur se propage progressivement à travers la matière sans qu'il n'y ait transfert de cette dernière [25].

$$\phi(x,t) = -\lambda(x) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.5)$$

ϕ représente la densité de flux de chaleur (W/m^2), t le temps (s), T la température (K) et λ la conductivité thermique du matériau ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).

L'application du premier principe de la thermodynamique à un corps solide permet de définir l'équation de la chaleur comme suit [25] :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + p \quad (1.6)$$

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

I.7.1.3. Le rayonnement thermique

Contrairement à la convection et à la conduction, aucune matière n'est nécessaire pour le rayonnement. Le rayonnement thermique est le transfert

d'énergie par ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques transportent l'énergie à travers l'espace.

Le rayonnement thermique peut être donc à la fois un processus externe et interne. La chaleur radiante fait référence au transfert de chaleur à travers un vide d'ondes électromagnétiques. Il a été signalé les bâtiments dépendent du soleil comme principale source de chaleur. En fait, la température de l'air ne cause généralement pas d'inconfort dû à la chaleur, mais l'énergie rayonnante de la lumière directe du soleil ou indirecte entraîne de longues ondes infrarouges.

1.7.2. Propriétés et compréhension des mécanismes thermo-physiques du bâtiment

Généralement, l'unique critère retenu pour qualifier un isolant est sa conductivité thermique, c'est à dire son seul pouvoir isolant. On ne tient pas en considération la densité volumique du matériau. Pourtant un matériau plus dense aura une meilleure capacité thermique, donc une plus grande capacité à stocker la chaleur et à la restituer plus tard. Cette propriété décrit le déphasage du matériau. Un bon déphasage (10 à 12h) exige un bon isolant qui favorise un compromis de densité. La valeur du déphasage (heure) peut être exprimée fonction de l'épaisseur.

Le déphasage est par définition le rapport de l'épaisseur à la célérité [26] :

$$\text{Déphasage} = \frac{\text{Epaisseur}}{\text{Célérité}} \quad (1.7)$$

La célérité est la vitesse de la diffusion de la chaleur à travers un corps [26] :

$$\text{Célérité} = \frac{2\pi}{T\sqrt{\pi/T}} \sqrt{a} \quad (1.8)$$

T : la période d'oscillation de la température extérieure sur 24 heures.

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (1.9)$$

ρ : la masse volumique exprimée (kg/m^3)

c : la capacité thermique massique de la paroi exprimée ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$)

λ : la conductivité thermique du matériau exprimée ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$)

La nouvelle formule du déphasage est donnée [26] :

$$\text{Déphasage} = \frac{e T \sqrt{\pi/T}}{2 \pi \sqrt{a}} \quad (1.10)$$

e : l'épaisseur de la paroi (m)

Le déphasage journalier sera donc donné par l'équation suivante [26] :

$$\text{Déphasage}(T:24h) = \frac{1.38 e}{\sqrt{a}} \quad (1.11)$$

a : la diffusivité de la paroi (m²/s), elle caractérise la capacité du matériau à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau.

1.7.3. La puissance solaire thermique

Les bâtiments sont inextricablement liés à l'environnement naturel. Lorsque le rayonnement solaire tombe sur les murs, une partie est réfléchiée dans l'atmosphère environnante, l'autre partie est absorbée, augmentant la température de surface du mur extérieur. L'énergie solaire thermique est donc l'énergie du rayonnement solaire qui peut être convertie en énergie thermique. L'exposition de l'enveloppe du bâtiment aux rayonnements solaires influe sur la température de l'air intérieur. Le rayonnement solaire parvient à la terre sous forme directe, diffuse et réfléchiée. La couverture nuageuse, la pollution de l'air, la région géographique et la période de l'année sont considérés comme étant des principaux facteurs influant sur l'intensité solaire. Selon le type de ciel, le rayonnement solaire peut servir pour :

- Éclairer naturellement,
- Produire de la chaleur utile et
- Produire l'électricité d'un bâtiment.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont utilisé des relations empiriques qui lient les paramètres météorologiques aux différents paramètres radiométriques (éclairage global, diffus et direct). Le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par [26] :

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (1.4)$$

T₀ : Le trouble dû à l'absorption gazeuse

T_1 : Le trouble correspondant à l'absorption par les gaz atmosphérique (O_2 , CO_2, \dots) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh

T_2 : Le terme relatif à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption, qui dépend à la fois de la nature, des dimensions et de la quantité des aérosols.

L'éclairement dû au rayonnement direct obtenu sur plan horizontal dépend du facteur de trouble de Linke [26] :

$$I = I_0 \sin(h) e^{-T_L \left[0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^Z} \sin(h)\right]^{-1}} \quad (1.5)$$

Z : L'altitude de lieu (km).

L'éclairement dû au rayonnement diffus incident sur un plan horizontal est en fonction du facteur de trouble diffusif [26].

$$D = I_0 \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(h)) + a - \sqrt{b^2 + a^2}) \quad (1.6)$$

$$a = 1.1 \quad b = \log(T_L - T_0) - 2.80 + 1.02 (1 - \sin(h))^2$$

h : L'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil.

Avec T_0 est donné par la relation suivante [26] :

$$T_0 = \frac{9.4 + 0.9 \, m_a}{m_a} \alpha_{aw} \quad (1.7)$$

m_a : la masse atmosphérique.

α_{aw} est le coefficient d'extinction après absorption par la vapeur d'eau. La modélisation de ce paramètre a permis à Capderou de proposer l'expression ci-dessous en fonction des paramètres géo-astronomiques [26].

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 (2 + \sin(\varphi) A_{he} - 0.2 Z - (1.22 + 0.14 A_{he}) (1 - \sin(h))) \quad (1.8)$$

$$A_{he} = \sin((360/365)(j - 121)) \quad (1.9)$$

j : le nombre de jour de l'année

φ : l'altitude de lieu ($^\circ$)

T_1 égale à 1, mais si on prend en considération l'effet de l'altitude du site, il sera donné par la formule suivante [26] :

$$T_1 = 0.89^Z \quad (1.10)$$

Le trouble partiel T_2 est en fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β [26] :

$$T_2 = 16 \beta \quad (1.11)$$

A défaut de mesures du coefficient de trouble d'Angström, Capderou a adopté la formulation suivante [26] :

$$T_2 = (0.9 + 0.4 - A_{he}) (0.63)^Z \quad (1.12)$$

Les formules mathématiques des éclairagements solaires globaux, diffus et directs pour différentes inclinaisons sont données en détail dans les références [25-29].

I.8. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de mettre en exergue les concepts nécessaires pour la suite de ce travail. En premier lieu, une rétrospective sur la situation énergétique en Algérie ainsi que ses retombés sur le quotidien des individus a été présentée. Puis, nous avons donné un aperçu sur le confort thermique qui est en général l'objectif principal de tout bâtiment. Par la suite, nous avons fait quelques rappels sur la thermique du bâtiment.

Chapitre II

La méthode retenue pour l'évaluation du confort thermique

Chapitre II :

La méthode retenue pour l'évaluation du confort thermique

II.1. Introduction

Un modèle est un objet de substitution, une représentation conceptuelle d'une chose réelle. En physique, les modèles sont des modèles mathématiques, c'est-à-dire que les propriétés physiques sont représentées par des variables dans les modèles.

En fait, le modèle mathématique est un intermédiaire et une partie importante d'une ou plusieurs théories, à qui les physiciens délèguent la fonction de connaissance en présence d'un champ d'études compliqué. La finalité est de représenter la réalité de façon économique et fiable [27].

Les modèles numériques permettent d'affiner la prévision à court terme en injectant périodiquement de nouvelles valeurs de mesure. D'ailleurs souvent en physique, il faut d'abord fonctionner le modèle pour tester sa cohérence interne avant de le valider [30].

En général, les physiciens partagent plusieurs idées communes sur les modèles :

- a) un modèle est une version simplifiée d'un objet à l'étude ; un scientifique créant le modèle décide des caractéristiques à négliger,
- b) un modèle peut être descriptif ou explicatif,
- c) un modèle doit avoir un pouvoir prédictif,
- d) le pouvoir prédictif d'un modèle a des limites.

Les scientifiques utilisent souvent des modèles ou des simplifications pour décrire et expliquer les phénomènes physiques observés et de prédire les résultats de nouveaux phénomènes. L'objectif essentiel de ce chapitre est de donner une description la plus précise possible d'un modèle enthalpique déjà publié et validé par nos collègues chercheurs de l'équipe d'architecture solaire et

bioclimatique affiliée à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables de Ghardaïa.

II.2. Approches de modélisation

II.2.1. Introduction

En physique, la construction d'un modèle reste toujours une tâche ardue, bien qu'il ne soit qu'une représentation simplifiée du système réel. Dans cette optique, plusieurs contributions ayant comme objet la modélisation globale du bâtiment sont disponibles dans la littérature, à l'instar des travaux menés par Karnopp [31-33]. Le pari étant de favoriser la méthode la plus convenable. Le choix de l'utilisation d'une méthode de modélisation ou d'une autre se fait conformément à la finalité des modèles et à la complexité des calculs. Les démarches adaptées ont la particularité d'avoir des degrés de finesse variables, en tenant en compte leurs réutilisabilités et flexibilités.

Le développement de nombreux outils de simulation remonte à quelques décennies, il a permis en quelque sorte l'évaluation des charges énergétiques (chauffage et climatisation). La modélisation du comportement thermique des bâtiments a été réalisée conjointement avec les outils de calcul. En effet, les mesures expérimentales sur maquettes de bâtiments ne sont pas parfois viables compte tenu de la complexité de la structure et de la difficulté à reproduire fidèlement les conditions régnant à l'intérieur des bâtiments réels.

Les expériences à l'échelle du bâtiment sont complexes et donc très coûteuses. Cette situation est due à la taille de l'enveloppe et sa complexité géométrique d'une part, et à de nombreux facteurs aléatoires tels que les conditions climatiques et le comportement des occupants d'autre part. Dans ce cas, l'évaluation du comportement thermique du bâtiment est une tâche laborieuse car le problème étudié est souvent de nature transitoire.

Par ailleurs, un bâtiment est souvent considéré comme un système composé de nombreux sous-systèmes qui interagissent les uns avec les autres. Faisant suite à ces interactions, des échanges d'énergie entre les différents composants d'un

bâtiment (pièces, murs, fenêtres, planchers...etc.) vont se créer. Assurer une crédibilité du modèle de bâtiment exige une modélisation correcte et parfois poussée. De nombreux outils de simulation thermique et aéraulique ont été proposés ces dernières décennies.

Cependant, une comparaison exhaustive entre les principales méthodes de modélisation, applicables au domaine de l'énergétique du bâtiment, va être menée avec précision.

II.2.2. Les modèles monozone

Les modèles monozone considèrent que tout le bâtiment comme une seule zone possédant des paramètres physiques (d'état) uniformes (température, humidité, pression...etc.). L'air intérieur est ainsi supposé parfaitement mélangé. La **figure 2.1** montre que la zone est modélisée par un nœud correspondant à une seule maille équivalente au volume total du bâtiment. Ce sont des modèles simples qui nécessitent que des données générales liées à l'enveloppe (le coefficient de transmission thermique U , la capacité calorifique, la perméabilité...etc.).

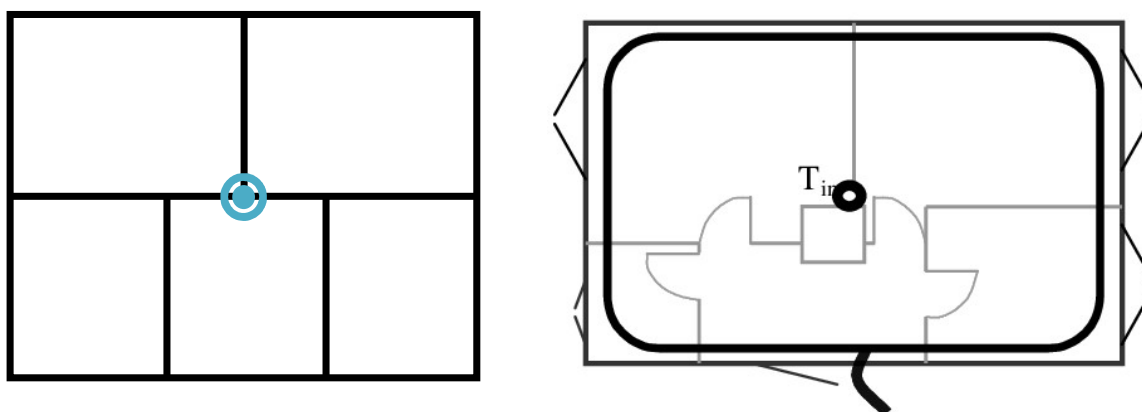


Figure 2.1 : Modèle nodal du bâtiment à une zone (monozone) [34 - 36]

Ce type de modèle favorise un accès rapide aux estimations des consommations énergétiques. Toutefois, il peut être inadéquat aux évaluations du confort thermique et il s'avère des fois limité si les écarts de température entre les différentes parties du bâtiment sont importants [34 - 36].

De ce fait, ces modèles sont le plus souvent utiles pour des bâtiments simples (maisons individuelles sans partitions intérieures et à un seul étage). Ils sont

intégralement inadéquats pour des bâtiments à répartition intérieure et à forme géométrique complexe. Ils sont également largement utilisés pour estimer les consommations énergétiques sur des périodes de temps importantes.

II.2.3. Les modèles multizones

Ce type de modélisation est basé sur la division du bâtiment en différentes zones représentées par un nœud correspondant à chaque zone ayant des paramètres thermo-physiques uniformes. Chacune de ces zones se rapporte donc à une pièce ou plusieurs pièces sous l'effet des conditions similaires. Cette division est retenue pour lever le problème de l'homogénéisation des variables d'état. Pour notre cas, décrit par la **figure 2.2**, elle doit prendre en considération la non-uniformité des températures entre les pièces et conjuguer la modélisation thermo-aéraulique avec les mouvements d'air inter-zones [34 - 36].

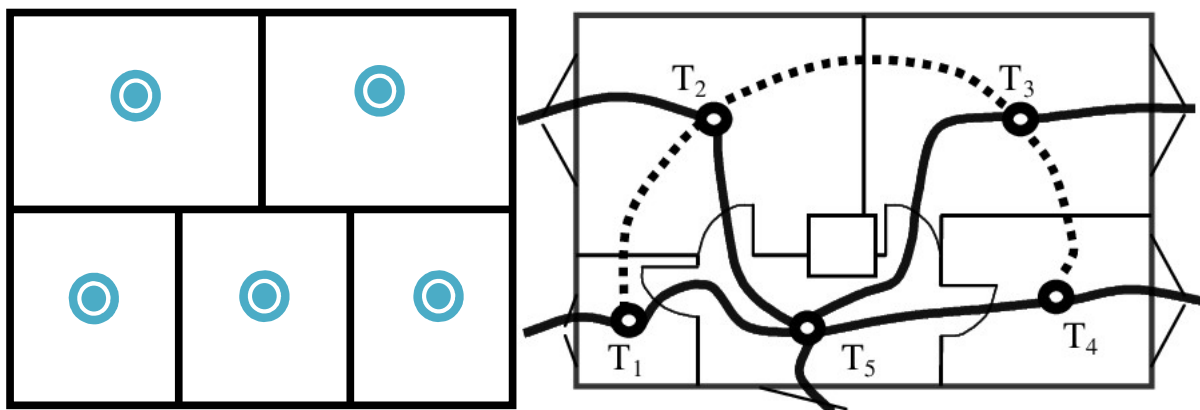


Figure 2.2 : Type de discrétisation dans un modèle nodale multizone [34 - 36]

La discrétisation doit être ajustée pour simuler même les immeubles ou les bâtiments entiers.

La simulation prédit le comportement thermique et aéraulique du bâtiment grâce à l'application des équations de conservation d'énergie et de masse [34 - 36]. Néanmoins, elle ne traite pas non plus la stratification thermique au sein de chaque zone. Elle reste ainsi limitée à l'étude globale du comportement thermo-aéraulique pour un bâtiment réel, plus particulièrement dans le cas d'une forte hétérogénéité de l'air au sein de la zone. Cependant, comme pour les modèles

monozone, l'homogénéisation de l'air intérieur de la zone devra être retenue comme hypothèse [34-36].

II.2.4. Les modèles zonaux

Pour les bâtiments ayant des espaces intérieurs volumineux, l'hypothèse d'homogénéisation des propriétés physiques utilisée par les modèles monozone et multizonnes n'est pas convenable. En d'autres termes, le maillage grossier des zones dans ce genre de situation conduit à une description moins précise de l'écoulement d'air. Le modèle zonal permet de représenter plus de phénomènes à savoir : la stratification thermique, l'écoulements de type jet, le panache thermique et les couches limites. En effet, la modélisation zonale permet la résolution simultanée et en temps réel de problèmes mettant en jeu des phénomènes complexes de transfert de chaleur et de masse dans les bâtiments. Selon la **figure 2.3**, le concept est donc basé sur la décomposition de la zone étudiée elle-même en un petit nombre (inférieur à 1000) de volumes de forme cubique ou parallélépipédique.

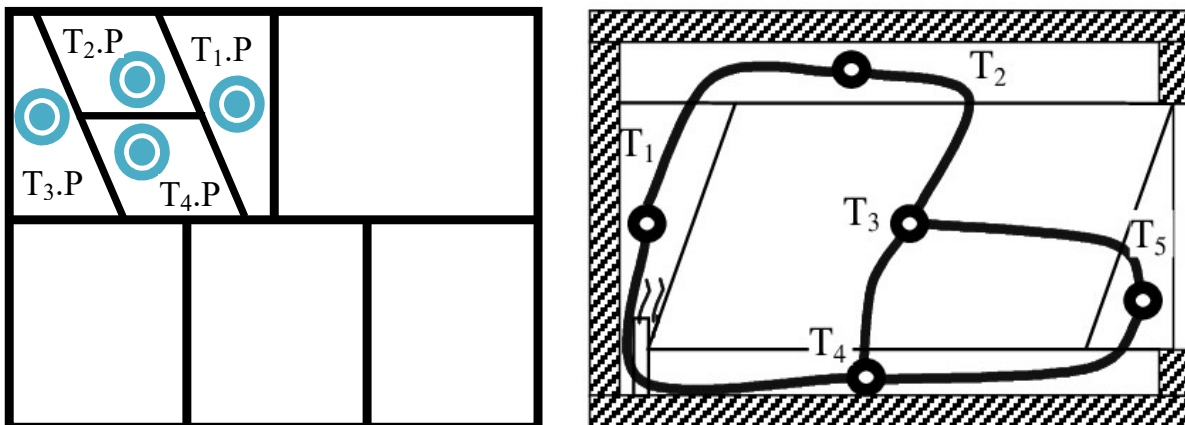


Figure 2.3 : Type de discrétisation dans un modèle zonal [34 - 36]

Les différents travaux liés à la performance de cette méthode vis-à-vis le comportement thermique ont montré en majorité une bonne précision.

II.2.5. Les modèles CFD

Les modèles CFD "Computational Fluid Dynamics" sont des modèles de simulation numérique de mécanique des fluides permettant de simuler des écoulements des espaces à formes géométriques complexes. La **figure 2.4** donne

un exemple fort dont le choix de l'échelle est lié directement au processus de conception dans lequel le modèle s'intègre.

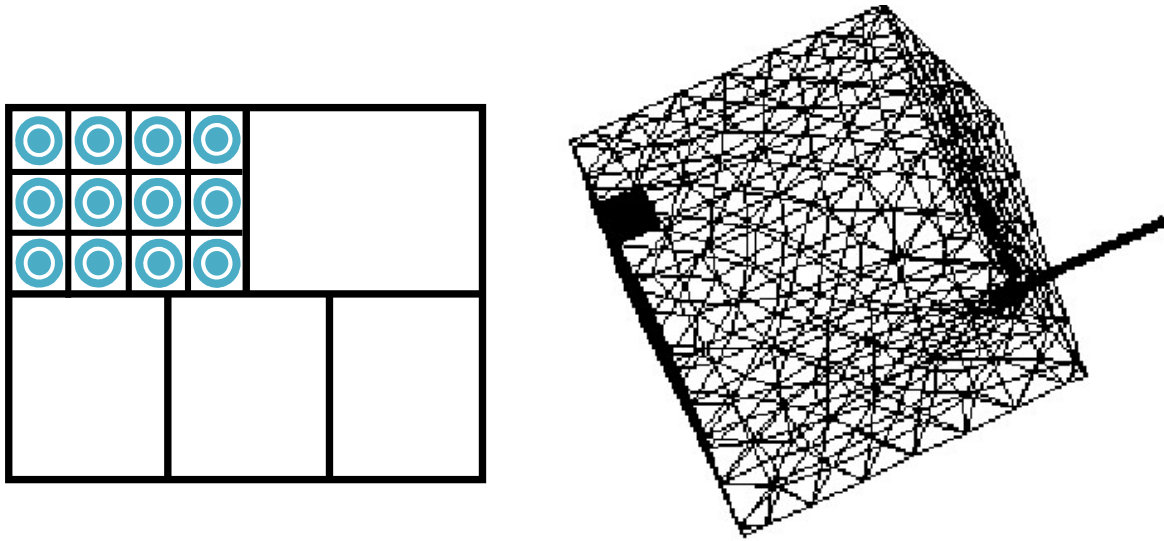


Figure 2.4 : Type de discrétisation dans un modèle CFD [34 - 36]

Le principe de la résolution de ces codes de champs consiste à résoudre numériquement les équations de la conservation de masse et de la quantité de mouvement et d'énergie. La démarche engendre une bonne précision sur la réaction des mouvements d'air, de la température, de la pression et de l'humidité relative. Dans notre cas, cette évaluation concerne les mouvements d'air intérieur, les différents champs de température, la vitesse ou encore la concentration. Ces codes calculent les paramètres de l'écoulement (vitesses, pressions) et d'état (températures, concentrations) dans un maillage de points suffisamment fin. La discrétisation forme un réseau de volumes de contrôle infinitésimaux dans lequel on applique et on résout le système d'équations couplées de la mécanique des fluides : équations Navier-Stokes, équations de transport de propriété et modèles de turbulence.

L'utilisation des modèles CFD destinés à l'étude du comportement thermique et aérodynamique des bâtiments (tertiaires et résidentiels) est globalement large et très répandue. La contrainte majeure qui subsiste lors des calculs est le temps d'exécution important des programmes de simulation, ce qui mérite des machines de calcul puissantes.

II.3. Différents types de simulation

Actuellement, plusieurs outils mathématiques destinés à la modélisation du bâtiment sont disponibles dans la littérature. L'analyse bibliographique a montré une pertinence des modèles basés sur des analogies électriques. Les principales catégories de modèles sont classées conformément aux facteurs de qualité répertoriés dans le **tableau 2.1**. Les facteurs les plus demandés dans le choix de la méthode de modélisation sont la réutilisabilité, la visibilité et la flexibilité [38]. La construction d'un modèle global consiste en une décomposition du bâtiment en plusieurs éléments, modélisés séparément, puis regroupés en un seul modèle global [38].

Tableau 2.1 : Evaluation des facteurs de qualité en fonction de la méthode de modélisation [38]

Modèles	Modèle de Givoni Méthode des plans d'expérience	Modèle de connaissance (zonaux, CFD, etc.)	Modèle systémique Méthode de Bond Graph Méthode nodale Méthode des analogies électriques
Modularité			X
Flexibilité		X	X
Extensibilité			X
Réutilisabilité		X	X
Pérennité (robustesse)	X	X	X
Vérifiabilité		X	X
Convivialité	X		X
Visibilité		X	X
Encapsulation	X		X
Précision des résultats	X	X	X
Temps de calcul réduit	X		
Adaptation à l'analyse de sensibilité		X	X
Domaines d'application	<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction du comportement thermique - Diagnostic de performance énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> - Pré-étude de la conception des bâtiments complexes - Identification et localisation des points chauds et froids, phénomène de stratification 	<ul style="list-style-type: none"> - Diagnostic de performance énergétique - Audit énergétique - Etude paramétrique - Analyse de sensibilité - Etude d'optimisation

II.3.1. La modélisation énergétique

Cette modélisation définit intégralement le comportement thermique du bâtiment représenté par sa température régnant à l'intérieur d'un local. A l'issue

de ce paramètre, considéré comme étant un critère majeur dans les travaux menés liés à la consommation énergétique, il est possible d'évaluer les performances énergétiques du bâtiment.

Plusieurs outils informatiques ont été utilisés en modélisation énergétique, les plus répandus sont :

- DOE-2E: Department Of Energy, version 2E [39 - 41]. C'est un logiciel d'analyse énergétique.
- BLAST: Building Loads Analysis and System Thermodynamic [37, 42]. Comme le DOE-2E, il utilise le mode séquentiel dans la simulation énergétique, il permet aussi de simuler les charges de chauffage/refroidissement.
- EnergyPlus [37, 43] : il fusionne les fonctionnalités des deux logiciels précédents, c'est une machine de calcul complexe et extrêmement puissante.
- TRNSYS : Transient Systems [37]. C'est un logiciel de simulation de systèmes transitoire destiné à la simulation thermique dynamique.

II.3.2. La modélisation aéraulique

Elle donne une description fiable du mouvement d'air intérieur. Ceci dit, elle identifie le couplage de deux zones à travers des ouvertures. Plusieurs codes ont été développés à cet égard :

- AIRNET: Airport Network Simulation Model [37, 44]
- COMIS : Counterparty Management Information System [37, 45]
- CONTAM: Committee on Nationwide Television Audience Measurement [37, 46]. Un outil d'analyse de la qualité d'air intérieur et de la ventilation multizone.

II.3.3. La modélisation thermo-aéraulique

La démarche est basée sur une méthode plus réaliste. Les débits d'air, qu'ils soient dus à l'infiltration ou aux mouvements d'air interzonaux, sont pris en considération dans la simulation. Cependant, plusieurs travaux ont été entrepris pour permettant de réaliser des codes thermo-aérauliques. Nos citons à titre indicatif : le couplage de TRNSYS et COMIS [47], BILGA [48], DTFAM [49],

BREEZE [50], BUS [51], ESP-r [52] et CODYRUN [53]. Le couplage des systèmes énergétiques et aérauliques, résolus séparément ou simultanément, est assuré par une méthode itérative. Nous citons comme exemples : CLIM2000 [54], ALLAN [55] ou SPARK [56].

II.3.4. La modélisation hygro-thermo-aéraulique

L'interaction entre les phénomènes physiques mis en jeu est complexe, c'est pourquoi ce type de modèle est très peu utilisé en simulation énergétique. L'humidité a été obligatoirement prise en compte et elle sera systématiquement considérée dans l'estimation de la consommation énergétique.

En 1999, Woloszyn [36] a représenté l'humidité d'une manière plus réaliste, les paramètres retenus pris en considération sont comme suit :

- Les échanges d'air humide avec les zones périphériques et l'extérieur
- L'influence du système de chauffage et de climatisation
- Les échanges de vapeur avec les matériaux hygroscopiques à l'intérieur d'une zone
- La diffusion de la vapeur dans l'air et les apports internes (d'humidité) dus à l'occupant, à l'animale et aux plantes

Les équations d'état, les principes de la thermodynamique et les lois de Fourier et de Fick ont été appliqués pour déterminer les différents transferts de chaleur et de masse sous quelques hypothèses simplificatrices. Les écoulements ont été supposés toujours unidirectionnels tout en introduisant des équations empiriques vu la complexité de certains phénomènes physiques.

II.4. Le modèle thermique retenu

Une des lois fondamentales de la physique précise que la masse ne peut être ni produite ni détruite, c'est-à-dire, elle est conservée. Bien que l'énergie puisse changer dans la forme, elle ne peut pas être créée ou détruite. Ces deux lois de la physique constituent la base de deux outils qui sont utilisés couramment dans l'ingénierie de l'environnement et de la science "l'équilibre de masse et l'équilibre enthalpie", sachant que l'enthalpie est une mesure de l'énergie totale

d'un système thermodynamique. Nous appliquons donc aux bilans thermiques le principe de la conservation de l'énergie.

II.4.1. Hypothèses simplificatrices

Les modèles de la littérature se diffèrent selon les approches de la modélisation et l'importance des hypothèses. Certains d'entre eux sont plus ou moins raffinés et tous reposent sur des hypothèses plus ou moins fortes. La finalité du problème mathématique que l'on cherche à mettre au point et à résoudre concerne principalement la description des transferts thermiques, la compréhension des fondements théoriques des formulations utilisées et l'adoption correcte des hypothèses qui en découlent. Les hypothèses simplificatrices retenues sont comme suit :

- Le gradient de température (le sens du flux de chaleur) est unidirectionnel et perpendiculaire aux parois opaques et transparentes.
- L'air est considéré comme un gaz parfait
- L'air ambiant s'est mis en mouvement spontanément par convection naturelle
- Les propriétés thermo-physiques des matériaux de construction sont homogènes, isotropes et indépendantes de la température
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir à la température du ciel pour les radiations de grandes longueurs d'ondes
- Les apports énergétiques internes par chaleur sensible et latente sont négligeables

Selon le **tableau 2.1**, l'approche nodale nous semble très appropriée pour répondre à notre problématique. Nous l'utilisons pour créer un modèle nodal (discrétisé et décomposé) à partir de l'ensemble de données géométriques et thermo-physiques mis à disposition.

II.4.2. Bilan enthalpique

Le bilan enthalpique comprend les enthalpies liées aux flux de matière et celles échangées avec l'extérieur à la paroi. La variation d'enthalpie (en joules) par unité de temps (secondes) d'une zone i en contact avec $n+1$ zones est donné par l'équation 2.1 [56 - 60] :

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{dH_i^{\text{Entrant}}}{dt} - \frac{dH_i^{\text{Sortant}}}{dt} + Q_{CV_{ij}} + P_{\text{Sens_Clim}} + P_{\text{Lat_Clim}} + P_{\text{Sens_AOE}} + P_{\text{Lat_AOE}} \quad (2.1)$$

La zone $i=0$ correspond l'extérieur.

H_i^{Entrant} : L'enthalpie de l'air humide entrant dans la zone i (Joule)

H_i^{Sortant} : L'enthalpie de l'air humide sortant de la zone i (Joule)

$P_{\text{Sens_Clim}}$: Puissance sensible due à la climatisation (Watt)

$P_{\text{Lat_Clim}}$: Puissance latente émise due à la climatisation (Watt)

$P_{\text{Sens_AOE}}$: Puissance sensible émise due aux appareils, aux occupants, à l'éclairage...etc.

$P_{\text{Lat_AOE}}$: Puissance latente émise due aux appareils, aux occupants, à l'éclairage...etc.

$$H_i^{\text{Entrant}} = \sum_{n=0}^{n+1} \text{Débit}(n,i) \left(T_{\text{Air}}(n) C_{\text{mas}} + \text{Hum}_{\text{Spéc}}(n) \right) (L_v + C_v T_{\text{Air}}(n)) \quad (2.2)$$

$\text{Débit}(n,i)$: Débit massique de l'air provenant de la zone n vers la zone i (kg/s)

$T_{\text{Air}}(n)$: Température de l'air provenant de la zone n , elle est supposée la même à celle de l'air entrant dans la zone i (K)

C_{mas} : Chaleur massique de d'air (J Kg⁻¹ K⁻¹)

$\text{Hum}_{\text{Spéc}}(n)$: Définie la masse de vapeur d'eau contenue dans une unité de masse d'air sec (kg_{vap}/kg_{mas} ou en %). C'est la teneur en eau de l'air dans la zone n , correspondant à l'humidité spécifique entrant à la zone i

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J Kg⁻¹)

C_v : La capacité thermique à volume constant (J Kg⁻¹ K⁻¹)

$$H_i^{\text{Sortant}} = \sum_{n=0}^{n+1} \text{Débit}(i,n) \left(T_{\text{Air}}(i) C_{\text{mas}} + \text{Hum}_{\text{Spéc}}(i) \right) (L_v + C_v T_{\text{Air}}(i)) \quad (2.3)$$

$\text{Débit}(i,n)$: Débit massique de l'air provenant de la zone i vers la zone n (kg/s)

$Q_{CV_{ij}}$: Le flux de chaleur échangé par convection entre l'air de la zone i et les surfaces des parois de température $T_j(i)$ appartenant à la même zone (W)

$$Q_{cv_{ij}} = \sum_{j=1}^{j=m} S_j(i) h_{cv_{ij}} (T_{Air}(i) + T_j(i)) \quad (2.4)$$

$T_j(i)$: Température surfacique de la paroi j dans la zone i (K)

$S_j(i)$: Surface d'échange convectif entre le mur j et l'air de la zone i (m²)

m : Nombre de parois opaques et transparentes intérieures (murs, portes, fenêtres...etc.) dans la zone i

Les formules du coefficient du transfert de chaleur convectif entre l'air ambiant et les parois intérieures sont répertoriées en trois cas comme le montre le **tableau 2.2**. Le régime d'écoulement varie en fonction du nombre de Rayleigh, qui est un nombre sans dimension et défini par la multiplication du nombre de Grashof Gr et le nombre de Prandtl Pr. Le nombre de Grashof est lui-même un nombre sans dimension qui sert à caractériser la convection naturelle ou libre. Cependant, la rapidité des phénomènes thermiques se compare avec celle des phénomènes hydrothermiques dans un fluide par le nombre de Prandtl Pr. Ce nombre adimensionnel est défini comme étant le rapport entre la viscosité cinématique et la diffusivité thermique.

Tableau 2.2: Coefficient du transfert de chaleur convectif entre l'air ambiant et les parois [61]

Surface d'échange de chaleur convectif	Régime d'écoulement	Conditions sur le nombre de Rayleigh	Formule du calcul
Paroi verticale	Laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1.42 (\Delta T/L)^{1/4}$
	Turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1.31 (\Delta T/L)^{1/3}$
Surface supérieure d'une plaque horizontale chaude ou surface inférieure d'une plaque froide	Laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 1.32 (\Delta T/L)^{1/4}$
	Turbulent	$Gr Pr > 10^9$	$h_{Conv} = 1.52 (\Delta T/L)^{1/3}$
Surface inférieure d'une plaque chaude ou surface supérieure d'une plaque froide	Laminaire	$10^4 < Gr Pr < 10^9$	$h_{Conv} = 0.59 (\Delta T/L)^{1/4}$
	Turbulent	$Gr Pr > 10^9$	

II.4.3. Bilan massique

Le bilan massique de l'air est défini par la loi de la conservation massique. À l'exception des réactions nucléaires et atomiques, la matière se transforme, rien ne se crée et rien ne se perd/détruit. La variation de la matière (masse

d'air) dans un habitat est très faible, c'est pourquoi, l'équation de la conservation de la masse d'air dans une zone i est donnée par l'équation 2.5 suivante:

$$\sum_{n=0}^{n+1} \text{Débit}(n,i) - \text{Débit}(i,n) = \frac{dm_{\text{Air}}}{dt} \approx 0 \Rightarrow \sum_{n=0}^{n+1} \text{Débit}(n,i) = \sum_{n=0}^{n+1} \text{Débit}(i,n) \quad (2.5)$$

Dans la zone i, la somme des débits massiques entrant égale à la somme des débits sortant. L'équation des bilans enthalpiques de l'air sec dans la zone i peut être simplifiée sous la forme suivante [57]:

$$H_i = H_i^{\text{Sens}} + H_i^{\text{Lat}} = m_{\text{Air}} C_{\text{mas}} T_{\text{air}}(i) + m_{\text{Air}} \text{Hum}_{\text{Spéc}}(i) (L_v + C_v T_{\text{Air}}(i)) \quad (2.6)$$

La quantité $L_v m_{\text{Air}} \text{Hum}_{\text{Spéc}}(i)$ est fortement supérieure par rapport à la quantité $C_v T_{\text{air}}(i) m_{\text{Air}} \text{Hum}_{\text{Spéc}}(i)$. Cette approximation nous a conduit à des formules plus simplifiées de l'enthalpie sensible et latente :

$$H_i^{\text{Sens}} = m_{\text{Air}} C_{\text{mas}} T_{\text{Air}}(i) \quad (2.7)$$

$$H_i^{\text{Lat}} = m_{\text{Air}} L_v \text{Hum}_{\text{Spéc}}(i) \quad (2.8)$$

II.4.4. Bilan sensible

En conséquence, la variation d'enthalpie peut être adoptée à une variation de températures :

$$\frac{dH_i^{\text{Sens}}}{dt} = \frac{d(m_{\text{Air}} C_{\text{mas}} T_{\text{Air}}(i))}{dt} = C_{\text{as}} \frac{dm_{\text{mas}}}{dt} T_{\text{Air}}(i) + C_{\text{mas}} \frac{dT_{\text{Air}}(i)}{dt} m_{\text{mas}} \quad (2.9)$$

$$\frac{dH_i^{\text{Sens}}}{dt} = \frac{dH_i^{\text{Entrant_Sens}}}{dt} - \frac{dH_i^{\text{Sortant_Sens}}}{dt} + Q_{\text{cv}_{ij}} + P_{\text{Sens_Clim}} + P_{\text{Sens_AOE}} \quad (2.10)$$

$$\rho_{\text{mas}} C_{\text{mas}} V_{\text{Air}}(i) \frac{dT_{\text{Air}}(i)}{dt} = \sum_{i=0}^{n+1} [\text{Débit}(i,n) C_{\text{mas}} (T_{\text{Air}}(n) - T_{\text{Air}}(i))] + Q_{\text{cv}_{ij}} + P_{\text{Sens_Clim}} + P_{\text{Sens_AOE}} \quad (2.11)$$

La température surfacique $T_j(i)$ de la paroi j dans la zone i peut être obtenue en résolvant le système d'équations relatif au bilan thermique des murs, présenté dans la section II.4.6.

II.4.5. Bilan latent

Le bilan latent est déterminé par l'application de l'équation simplifiée de la conservation de la masse d'air sec :

$$\frac{dH_i^{Lat}}{dt} = \frac{dH_i^{Entrant_Lat}}{dt} - \frac{dH_i^{Sortant_Lat}}{dt} + P_{Lat_Clim} + P_{Lat_AOE} \quad (2.12)$$

Avec

$$m_{Air}(i) = \frac{V_{Air}(i)}{V_S(i)} \quad (2.13)$$

$V_S(i)$: Volume spécifique de l'air humide, il définit le volume d'air humide contenant un kilogramme d'air sec à une pression et une température donnée

$V_{Air}(i)$: Volume de la zone i (m³)

Faisant suite à ces relations, il est possible d'aboutir à l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \frac{dH_i^{Lat}}{dt} = \frac{d(m_{Air} L_v Hum_{Spéc}(i))}{dt} = L_v \frac{dm_{Air}}{dt} Hum_{Spéc}(i) \\ + L_v m_{Air} \frac{dHum_{Spéc}(i)}{dt} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Par concordance, nous obtenons l'équation finale suivante :

$$\begin{aligned} m_{Air} \frac{dHum_{Spéc}(i)}{dt} = \sum_{i=0}^{n+1} [Débit(i,n) (Hum_{Spéc}(n) - Hum_{Spéc}(i))] \\ + \frac{P_{Lat_Clim}}{L_v} + \frac{P_{Lat_AOE}}{L_v} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Également pour le bilan sensible, nous aboutissons à un système de n équations avec n inconnus. Les variables d'états représentent les humidités spécifiques de l'air de chaque zone i.

La relation qui lie l'humidité spécifique (la teneur en eau ou l'humidité absolue) et l'humidité relative est exprimée selon la formule empirique de Nadeau et Puiggali [58] :

$$\text{Hum}_{\text{Spéc}}(i) = \frac{0.622 P_{\text{Sat}}(T) H_{\text{Relative}}(i)}{101325 - P_{\text{Sat}}(T) H_{\text{Relative}}(i)} \quad (2.16)$$

H_{Relative} : Humidité relative (%)

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

II.4.6. Modèle de conduction & Couplage avec les échanges superficiels

L'objectif est de déterminer un modèle de conduction d'un mur composite en interaction avec son environnement extérieur. On peut le définir comme étant plusieurs murs simples juxtaposés, constitués de matériaux différents, limités par des plans parallèles et en contact parfait les uns avec les autres.

La modélisation des phénomènes conductifs en régime dynamique au sein des murs est réalisée par une méthode proposée par Rumianowski et al [62 - 64] et reprise par Cron et al [62 - 64]. Le modèle se limite donc à un système d'équations algébriques différentielles ordinaires. La formulation du modèle mathématique est envisageable, elle peut être simplifiée en représentant le système dynamique du mur multicouche par un modèle basé sur une analogie électrique. Il se compose de 2 résistances et de 3 capacités (2R-3C). La **figure 2.5** présente le principe de ce modèle.

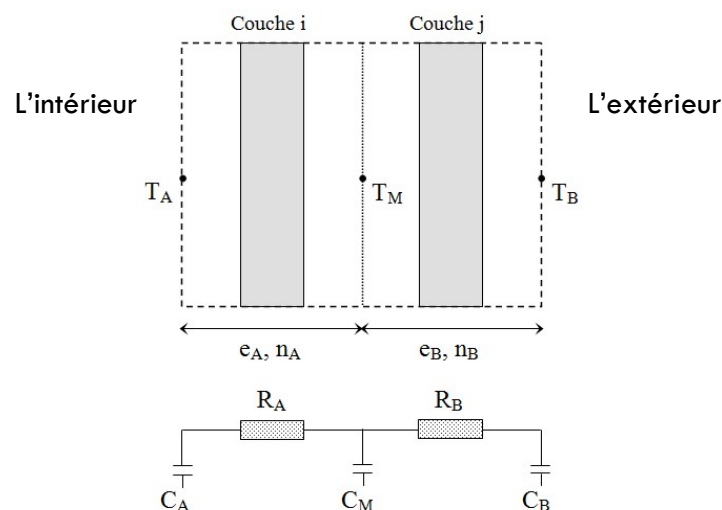


Figure 2.5 : Le modèle de conduction retenue pour le calcul des températures nodales [62 - 64]

Les résistances thermiques équivalente sont calculées comme suit :

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k} \quad R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k} \quad n = n_A + n_B \quad (2.17)$$

e : L'épaisseur (m)

n : Le nombre de nœuds

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

Les capacités thermiques quant à elles sont déterminées selon les relations suivantes :

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j \delta_j \quad (2.18)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j S_j (1 - \delta_j) \quad (2.19)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \quad \delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \quad (2.20)$$

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

ρ : La densité volumique ($kg m^{-3}$)

Le bilan énergétique relatif aux murs est donné par les équations suivantes [62]:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum_{i=1}^{i=m} S F_{Surf-i} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{Conv-A} (T_{air} - T_A) \quad (2.21)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S_B G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S_B \frac{1 - \cos(\beta)}{2} (T_{Sol_ext}^4 - T_B^4) + \varepsilon S_B \frac{1 + \cos(\beta)}{2} (T_{Cel}^4 - T_B^4) + S_B h_{Conv-amb} (T_{amb} - T_B) \quad (2.22)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = -\frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (2.23)$$

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, sa valeur est de $5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

G : L'éclairement solaire global incident sur les parois extérieures ($W m^{-2}$)

α : Coefficient d'absorption solaire

ε : Émissivité thermique

- $F_{\text{Surf-i}}$: Facteur de forme ; c'est un facteur purement géométrique, il caractérise la disposition d'une surface par rapport à une autre, il identifie les échanges de chaleur entre ces différentes parois dans une même zone thermique i
- $h_{\text{Conv-A}}$: Coefficient du transfert de chaleur par convection entre les surfaces d'échange et l'air ambiant intérieur ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- $h_{\text{Conv-amb}}$: Coefficient du transfert de chaleur par convection entre les surfaces d'échange et l'air ambiant extérieur ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

La température du ciel est donnée par l'équation classique suivante :

$$T_{\text{Ciel}} = 0.0552 T_{\text{amb}}^{1.5} \quad (2.24)$$

De même pour le coefficient du transfert de chaleur par convection entre les surfaces d'échange et l'air ambiant extérieur, sa formule classique est liée à la vitesse du vent :

$$h_{\text{cv-amb}} = 2.8 + 3.3 V_{\text{vent}} \quad (2.25)$$

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

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

II.5. L'humidité relative

A l'extérieur, l'humidité est une grandeur physique variable dans le temps et l'espace. Elle est relative à des phénomènes naturels aléatoires (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, l'humidité est plus constante. Elle peut être créée par la respiration et la transpiration humaine. Elle peut être diffusée aussi par les plantes et le sèche-linge. 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 varie selon le taux de saturation défini par la capacité de l'air à contenir de l'eau. Le degré de saturation change avec la 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. À 0 °C, 1 m³ d'air saturé (100% d'humidité) contient 7.7 g d'eau, 15 g à 10 °C, 28 g à 20 °C, 50 g à 30 °C, soit environ 3.5% de la masse d'air.

L'humidité relative varie de 0 à 100%. L'air est sec si elle est inférieure à 35%. L'air est moyennement humide à un intervalle de 35% à 65%, et il est humide au-delà de 65%. Le taux d'humidité change avec la température de l'air, plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau. D'ailleurs, la température humide est toujours plus basse que la température sèche [30 - 65]. Selon une source bibliographique [66], une augmentation d'une degré Celsius engendre une baisse de 2 à 3 % d'humidité relative et vice-versa, sachant que la zone du confort correspond à environ 20 °C et 50 % d'humidité. L'humidité ambiante peut provoquer une élévation de la consommation d'énergie et donc des coûts de chauffage. Elle peut jouer un rôle positif car elle peut accentuer 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.

II.6. La conformité avec les résultats expérimentaux

Ce sujet a déjà été abordé par nos collègues de l'équipe "Architecture Solaire et Bioclimatique" de l'URAER de Ghardaïa, dont ils ont souvent eu des résultats prometteurs. Les travaux menés par Bekkouche et al [57] par exemple aborde ce sujet en détail en comparant les résultats calculés (température et humidité) avec des valeurs expérimentales. La procédure de traitement nous a

proposé une série de tests pour évaluer les principaux paramètres du confort d'un espace bureaux d'une superficie de $4.7 \times 3.4 \times 3.5 \text{ m}^3$ localisé à Ghardaïa. Les données de mesure ont été fournies par quatre stations météorologiques hautement calibrées. Les capteurs de température ont été installés en tenant compte de la stratification de l'air. Des données radiométriques externes (heures d'ensoleillement) et climatiques (température, humidité, vitesse du vent) ont été recueillies par transmission.

Pour la température, les valeurs calculées obtenues correspondent à :

- Une erreur algébrique relative inférieure à 8.78 %
- Une valeur minimale de $5 \cdot 10^{-3} \%$
- Une valeur moyenne proche de 3.57 %
- Un écart moyen de température estimé à $0.51 \text{ }^\circ\text{C}$
- Une erreur absolue comprise entre $8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ et $1.36 \text{ }^\circ\text{C}$

Pour l'humidité :

- L'erreur relative moyenne algébrique est estimée à 2.47 %
- L'erreur relative minimale est environ $2.3 \cdot 10^{-3} \%$
- L'erreur relative minimale est au voisinage 6.88 %
- L'erreur absolue moyenne est à 0.89 %
- L'erreur absolue varie de $7.93 \cdot 10^{-4} \%$ au 2.41 %

Dans certaines situations, les méthodes utilisées peuvent contribuer aux erreurs commises. Les méthodes d'interpolation réduisent considérablement le temps d'exécution du programme mais elles peuvent influencer sur la précision des calculs, en particulier pour les comportements instantanés rapides, aléatoires et très complexes. Nous retenons comme exemple les changements instantanés brusques de la vitesse du vent. Pour répondre à ces difficultés, les auteurs ont proposé une discrétisation plus fine de l'intervalle du temps en fonction de la complexité des variables climatiques. Cette méthode accorde un temps d'exécution du programme plus long mais elle renforce la précision des calculs.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, une approche de modélisation multizone dans le bâtiment a été introduite. La méthode nodale a été retenue pour décrire le comportement thermo-aéraulique de l'air à l'intérieur d'un local soumis à des conditions climatiques extérieures.

Le calcul et la prédiction de l'humidité et la température de l'air sont une phase essentielle et utile pour une meilleure compréhension des paramètres du confort. Elle permet d'anticiper les solutions qui nous conduisent à des performances satisfaisantes de l'enveloppe et d'avoir une évaluation adéquate du degré de confort.

Les bilans sensible et latent intègrent les phénomènes thermo-aérauliques en régime transitoire. Malgré la complexité des phénomènes et les contraintes rencontrées, la concordance était dans l'ensemble très encourageante. Il a été prouvé que les modèles numériques sont devenus des laboratoires numériques dans lesquels des hypothèses peuvent être testées. Les écarts qui existent peuvent être attribués aux différentes approches, aux erreurs de mesure et aux hypothèses imposées.

Chapitre III

L'influence de la hauteur du bâtiment sur le confort thermique

Chapitre III :

L'influence de la hauteur du bâtiment sur le confort thermique

III.1. Introduction

La performance thermique d'un bâtiment dépend de nombreux facteurs qui influent directement sur le confort thermique. Nayak et Prajapati [67] ont proposé un classement selon la conception architecturale, les propriétés et les performances des matériaux, les données météorologiques et l'occupation de l'espace [68]. Faisant suite à plusieurs travaux axés sur cette thématique [69 - 72, 57], les déperditions thermiques d'un cadre bâti représentent un champ d'économie très important. Le sentiment de confort est un mélange de sensations qui dépend de l'occupant, de son mode de vie, de ses habitudes. Il concerne principalement la température des zones aménageables, leurs répartitions harmonieuses dans l'espace et la qualité de l'air ambiant (taux d'humidité, propreté, salubrité...).

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier l'influence de la hauteur de l'immeuble de logements sur le niveau d'amélioration du confort thermique vue que la taille d'un bâtiment impacte systématiquement sa compacité. Mais avant d'entamer le travail, nous présentons une revue de littérature qui nous présente et évalue la documentation sur cette notion de conception bioclimatique très intéressante.

III.2. Une revue rapide de la littérature

La géométrie des structures thermiques est un facteur essentiel pour déterminer le confort acquis dans les bâtiments. Ce facteur de forme est une mesure de la compacité du bâtiment. Plusieurs contributions ont révélé que la conception du bâtiment a un effet significatif à la fois sur la performance thermique et sur les besoins énergétiques. Martaa et Belinda [73] ont proposé un modèle simplifié pour prévoir les besoins en énergie de chauffage et de

refroidissement d'un bâtiment soumis à un climat Espagnol. Ils ont signalé que le facteur de compacité était l'un des facteurs déterminants et prépondérants. Wenwen et al [74] ont donné quelques pistes qui permettent de calculer la compacité de la forme en fonction du moment d'inertie. Comme prévu, Bansal et al [75] ont prouvé que les concepts énoncés qui ont un lien direct avec les propriétés géométriques peuvent améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. En 2012, Parasonis et al [76] a indiqué que la relation entre la forme d'un bâtiment et sa performance énergétique était significative. Elle dépend, d'une part, des dimensions et des proportions relatives, et d'autre part des déperditions thermiques à travers les éléments de l'enveloppe qui constituent une part importante des besoins énergétiques totaux.

Cependant, dans certaines régions climatiques algériennes, comme celle d'Alger et Ghardaïa, la compacité optimale est une mesure supplémentaire à considérer ; l'augmentation de l'indice de compacité a un effet contrasté, négatif pour le chauffage et positif pour le refroidissement. Les économies pour les besoins de refroidissement sont plus importantes face aux inconvénients des besoins accrus de chauffage [77]. Certains travaux de recherche, menés par Ourghi et al [78], nous ont permis d'obtenir un outil d'analyse pour prédire l'effet de la forme géométrique d'un bureau sur son refroidissement annuel et sa consommation énergétique totale. Le même objectif a été abordé par AlAnzi et al [79], les travaux réalisés ont pris en considération plusieurs formes de construction, notamment rectangulaire, en forme de L, en forme de U et en forme de H. A cette fin, un indice de compacité a été utilisé pour évaluer l'impact de la forme sur l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux.

En plus, les recherches entreprises par Danielski et al [80] ont montré que la conception de bâtiments avec un facteur de forme plus faible se traduit par une demande de chaleur spécifique plus faible. L'impact de ce facteur varie considérablement en fonction des différentes propriétés de l'enveloppe sous différentes conjonctures climatiques. Pour un scénario d'occupation approprié, les besoins énergétiques ont varié de 12 à 52 kWh/m²/an. Le facteur de forme a

un impact sensible sur cette demande avec des propriétés thermiques plus faibles et pour des climats froids. Par ailleurs, un grand nombre de contributions n'ont utilisé que la surface du toit pour calculer les économies d'énergie des toits verts. L'objectif principal conduit par Park [81] était de déterminer les bâtiments les plus efficaces pour installer des toits verts à Harrisburg. Tous les résultats de recherche ont démontré que la température intérieure des bâtiments et les demandes énergétiques sont affectées par la forme des bâtiments. Une étude expérimentale a été réalisée pour déterminer la relation entre la compacité du bâtiment et la température intérieure après l'intégration de toitures végétalisées durant la saison estivale. L'approche adoptée a été appuyée sur quatre modèles physiques testés pendant 54 jours. Les températures intérieures peuvent être réduites de 8.1°C pour un bâtiment moins compact par rapport à un bâtiment plus compact (4.6°C). Ces résultats sont plus apparents les jours chauds. Juste après, une autre contribution d'Almumar [81] a permis d'établir une nouvelle compréhension de l'évaluation de la compacité des bâtiments qui peut contribuer à créer des morphologies de bâtiment en termes de confort et de performance thermique. L'étude de terrain a montré qu'une modification de la taille, notamment la hauteur des murs en fixant les surfaces de plafond et de plancher, entraîne systématiquement une modification de l'indice de compacité.

III.3. Le climat à Ghardaïa

La région de Ghardaïa est une région située dans le Sahara septentrional caractérisé par un climat chaud et sec en été et froid en hiver. L'altitude de Ghardaïa est de 503 m au-dessus du niveau de la mer, sa Latitude : 32°29'27" Nord, et sa Longitude : 3°40'24" Est. Les informations (base de données) qui y figurent révèlent une période qui s'étend du 01 Janvier 2004 au 31 Décembre 2015. Elles correspondent à une année typique formée de 12 mois typiques (**tableau 3.1**). Les chiffres indiquent que le climat est désertique avec des hivers doux et très froids la nuit et des étés très chauds et ensoleillés (**figures 3.1** et **3.2**). L'état du ciel est clair au cours d'une bonne partie de l'année (**figure 3.1**), mais les vents sont parfois fréquents. Le 20 Décembre 2004, l'air était très

humide et parfois saturé (l'humidité relative = 100%) en vapeur d'eau. Ce phénomène est classiquement lié et causé principalement par le risque des nuages, la pluie, le brouillard, la rosée ou le givre.

La durée du jour à Ghardaïa varie considérablement au cours de l'année. Le jour le plus court est le 21 Décembre avec une durée d'insolation d'environ 10 heures et 1 minute, par ailleurs, le jour le plus long est celui du 21 Juin avec une durée d'environ 14 heures et 06 minutes. A Ghardaïa, l'indice de clarté a sensiblement varié selon les mois. Le mois le plus clair de l'année où le ciel est généralement dégagé est celui d'Août. La période la plus claire de l'année dure presque trois mois et commence généralement au début du mois de Juin. Le mois le plus nuageux de l'année durant lequel le ciel est généralement couvert ou nuageux environ 79.47% du temps est celui d'Octobre. Le taux de clarté annuel est très élevé, estimé à 88.87%.

Tableau 3.1 : Valeurs des irradiations solaires horizontales correspondantes au site de Ghardaïa

Mois	Moyenne mensuelle de l'irradiation globale journalière (kWh/m ²)	Jour type du mois	Taux de clarté x 100 (%)
Janvier	3.3938	05	84.76
Février	4.4587	08	88.81
Mars	5.4712	15	83.64
Avril	6.7837	19	87.25
Mai	7.3356	20	88.08
Juin	7.8755	07	93.45
Juillet	7.7935	21	95.95
Août	7.1240	25	96.88
Septembre	5.8233	16	87.80
Octobre	4.6171	30	93.64
Novembre	3.5753	26	86.72
Décembre	3.1020	28	79.47

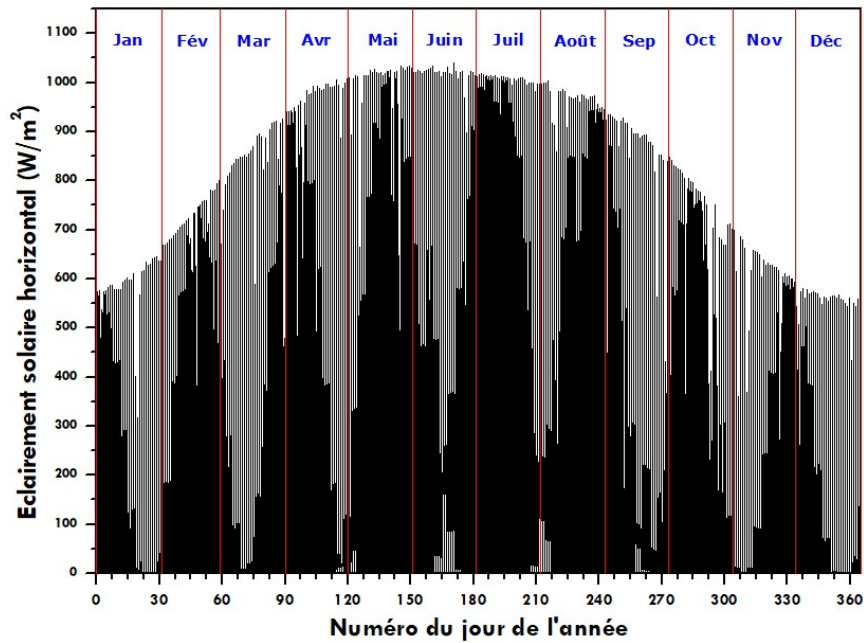


Figure 3.1 : Éclairement solaire horizontal correspondant au site de Ghardaïa

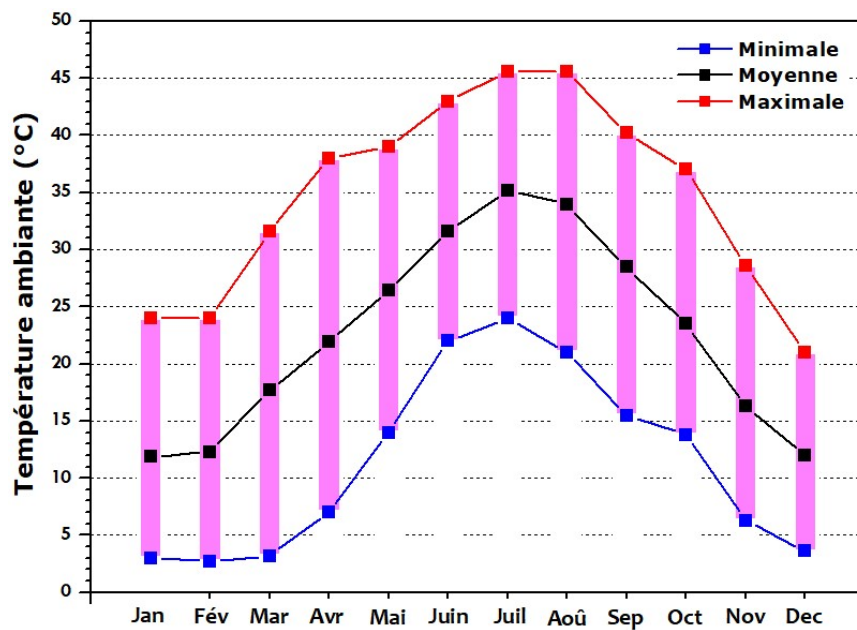


Figure 3.2 : Températures ambiantes correspondantes au site de Ghardaïa

III.4. Description et structure nodale approuvée aux bureaux de travail

Les travaux à entreprendre sont cadrés sur un espace bureau de type monozone, d'une superficie d'usage d'environ 16 m² (4m×4m) et d'une hauteur sous plafond de 4 m. La façade Sud est vitrée à 8.12% pour bénéficier des apports solaires d'hiver et assurer un espace particulièrement lumineux. La surface de la porte représente 13.75% de la section totale de la façade Nord.

Un aperçu global est ainsi présenté en **figure 3.3**. Le plan descriptif du bureau est de forme cubique simple. Les facteurs de forme, calculés analytiquement, entre les différentes surfaces dans cette configuration géométrique sont les mêmes quelque soit la disposition d'une surface par rapport à une autre. La valeur de ce facteur purement géométrique, qui identifie l'agencement d'une surface par rapport à une autre, est de 0.2.

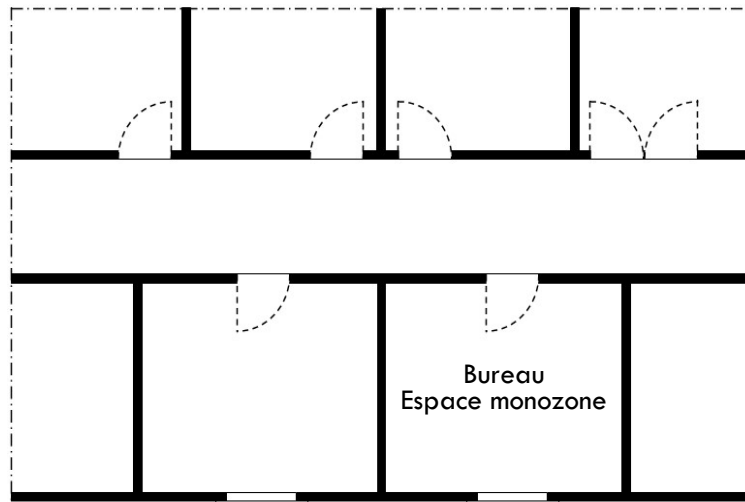


Figure 3.3 : Plan d'aménagement 2D du bureau

Les propriétés thermo-physiques de l'enveloppe et les épaisseurs des parois, définies dans le **tableau 3.2**, sont des paramètres influençant fortement les résultats.

Tableau 3.2 : Propriétés thermo-physiques et épaisseurs des parois

Type de parois	Matériaux de construction	Epaisseur de la couche (cm)	U-value (W/m ² K)
Murs de l'enveloppe De l'intérieure à l'extérieure	Mortier de ciment	1.5	2.51
	Pierre lourde	35.0	
	Mortier de ciment	1.5	
	Enduit à base de plâtre	1.0	
Toiture Du haut en bas	Carrelage	2.5	3.62
	Chape en ciment	1.5	
	Dalle en béton pressé	12.0	
	Mortier de ciment	1.5	
Plancher bas sur terre-plein Du haut en bas	Carrelage	2.5	2.82
	Chape en ciment	4.0	
	Dalle en béton armé	22.0	
Fenêtres simple vitrage, admettant la pose de châssis			4.50
Porte en bois incluant le cadre			3.19

La méthode nodale est basée sur l'analogie électrique-thermique. Les transferts de chaleurs sont alors représentés sous forme d'un réseau. Un nombre de champs d'information sera connecté à chaque nœud. Par rapport aux équations, les nœuds sont concernés par des phénomènes différents. Par exemple, un nœud qui représente une couche d'une paroi concerne l'échange de chaleur par conduction. Ce même nœud, en fonction de sa situation, peut également interagir selon un processus convectif. Sur la face extérieure de la paroi de l'enveloppe, le nœud de la surface est affecté par les irradiances extérieures et les échanges convectifs. La taille de la structure nodale étant liée aux dimensions des systèmes à résoudre, la notion de temps de calcul ne doit pas être négligée. La méthode entreprise par Haddam [30] nous a montré en détaille les différents types de nœuds rencontrés et à attribuer. La modélisation donc est constituée d'un réseau complexe de résistances et de capacités thermiques entre les différentes zones et entre ces zones et l'environnement proche, l'extérieur et les zones non chauffée en particulier. Le modèle thermique retenu est présenté dans la **section II.4**.

III.5. Compacité : Analyse comparative du confort thermique

Le confort dépend d'un certain nombre de facteurs notamment la température et l'humidité relative. PMV et PPD sont couramment appliqués comme indicateur du confort thermique, mais ces indices ne sont pas adaptés à l'évaluation en climat chaud et humide. Ceux-ci sont utiles pour l'évaluation dans un bâtiment chauffé et climatisé [82]. Dans notre cas, les limites du confort thermique sont déterminées conformément à la norme DIN 1946-4:2008-12 [83].

Deux jours de temps ensoleillé et à ciel dégagé (28 Janvier et 28 Juin 2016) ont été retenus pour achever le travail. La température ambiante varie de 4.51 à 16.27°C pour la journée d'hiver et oscille entre 28 et 41°C pour la journée d'été. La vitesse du vent était variable entre 1 et 5 km/h. La méthode numérique de Runge-Kutta du quatrième ordre a été utilisée pour résoudre l'ensemble des équations différentielles ordinaires non linéaires. L'édifice est supposé comme un local de type plain-pied.

Lorsqu'on change les hauteurs, automatiquement il y aura des changements radicaux au niveau du bilan sensible de l'édifice. Les coefficients d'échange par conduction et convection vont être changés puisque les hauteurs des murs ont été modifiées. Les modifications les plus déterminantes s'effectuent aux niveaux des coefficients d'échange par rayonnement qui dépendent des facteurs de forme définissant la disposition d'une surface par rapport à l'autre. Ces facteurs de surfaces sont en général fournis par des abaques. En effet, leur détermination, mis à part quelques rares systèmes à géométrie simple, est généralement très pénible, et les chercheurs préfèrent utiliser des abaques quand ils existent, plutôt que de chercher des solutions analytiques.

Les solutions analytiques présentent de nombreux avantages plus particulièrement la précision. Les calculs adoptés pour notre cas reposent sur les formules mathématiques définies ci-après.

Pour des surfaces carrées ou rectangulaires planes et parallèles non centrées et de dimensions quelconques, nous considérons le schéma suivant donné par la figure 3.4.

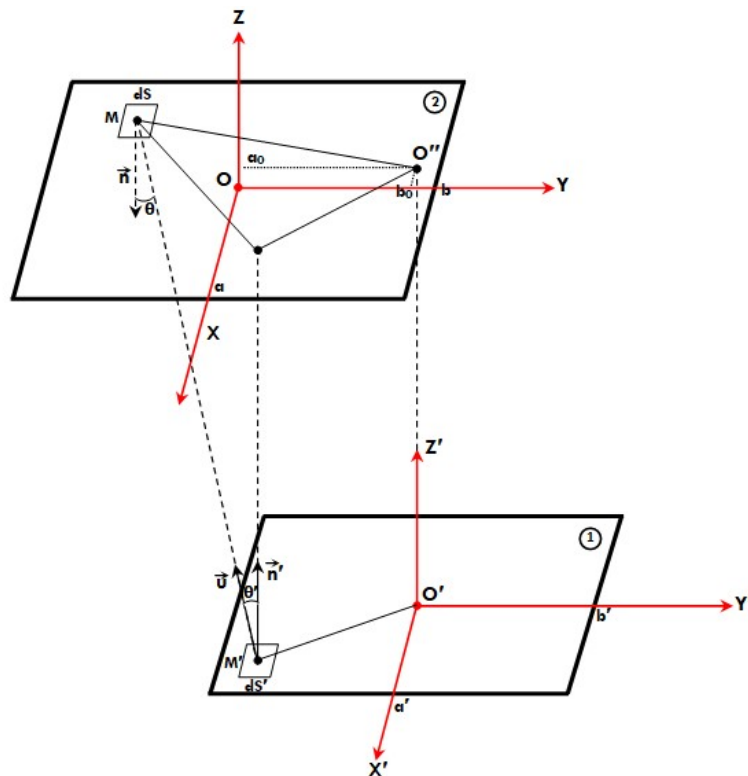


Figure 3.4 : Surfaces carrées ou rectangulaires planes et parallèles non centrées et de dimensions quelconques

$$MM' = r \quad OO'' = \rho_0 (a_0, b_0, 0) \quad O'M' = \rho' (X', Y', 0)$$

$$r^2 = (X - X' - a_0)^2 + (Y - Y' - b_0)^2 + d^2 \quad O'O'' = d \quad \cos \theta = \cos \theta' = d/r$$

Dimensions des plaques:

$$1. -a' < X' < +a' \quad -b' < Y' < +b'$$

$$2. -a < X < +a \quad -b < Y < +b$$

Afin de généraliser les résultats, nous introduisons les surfaces de dimensions réduites qui sont notées comme suit :

$$X = \frac{a}{d} \quad Y = \frac{b}{d} \quad X_0 = \frac{a_0}{d} \quad X' = \frac{a'}{d} \quad Y' = \frac{b'}{d} \quad Y_0 = \frac{b_0}{d}$$

$$F_{12} = \frac{1}{8\pi X' Y'} \left(F(X-X_0+X', Y-Y_0+Y') - F(X-X_0+X', Y-Y_0-Y') + F(X-X_0+X', Y+Y_0-Y') - \right. \\ \left. - F(X-X_0+X', Y+Y_0+Y') - F(X-X_0-X', Y-Y_0+Y') + F(X-X_0-X', Y-Y_0-Y') \right. \\ \left. + F(X-X_0-X', Y+Y_0-Y') - F(X-X_0-X', Y+Y_0+Y') + F(X+X_0+X', Y-Y_0+Y') \right. \\ \left. - F(X+X_0+X', Y-Y_0-Y') + F(X+X_0+X', Y+Y_0-Y') - F(X+X_0+X', Y+Y_0+Y') \right. \\ \left. - F(X+X_0-X', Y-Y_0+Y') + F(X+X_0-X', Y-Y_0-Y') - F(X+X_0-X', Y+Y_0-Y') \right. \\ \left. + F(X+X_0-X', Y+Y_0+Y') \right) \quad (3.1)$$

$$F(u, v) = u\sqrt{v^2 + 1} \operatorname{Arctg} \frac{u}{\sqrt{v^2 + 1}} + v\sqrt{u^2 + 1} \operatorname{Arctg} \frac{v}{\sqrt{u^2 + 1}} - \frac{1}{2} \operatorname{Ln}(u^2 + v^2 + 1) \quad (3.2)$$

Cette formule complexe, mais facile à programmer, est d'une réelle importance. Elle contient, en effet, tous les cas de figures pour calculer les facteurs de forme de n'importe quelles surfaces planes parallèles, rectangulaires ou carrées, centrées ou non. Or, toutes les références ne traitent que les surfaces centrées, ou bien les surfaces dont l'une a des petites dimensions et se trouve en position particulière vis-à-vis de l'autre.

Si les surfaces sont de formes planes rectangulaires formant un dièdre droit, nous considérons le schéma de la **figure 3.5** avec :

$$M'M = r \quad OM' = \rho' (X', Y', 0) \quad OM = \rho (O', Y, Z)$$

$$\cos \theta' = (Z/r) \quad \cos \theta = X'/r \quad r^2 = X'^2 + (Y-Y')^2 + Z^2$$

De même, nous introduisons les coordonnées réduites suivantes :

$$X = \frac{a}{b} \quad Z = \frac{c}{b}$$

Ceci conduit à l'équation suivante :

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi X} (F(X, Z) - F(X, 0) - F(0, Z)) \quad (3.3)$$

Avec :

$$F(u, v) = -4\sqrt{u^2 + v^2} \operatorname{Arctg} \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2}} + (u^2 + v^2 - 1) \ln(u^2 + v^2 + 1) - (u^2 + v^2) \ln(u^2 + v^2) \quad (3.4)$$

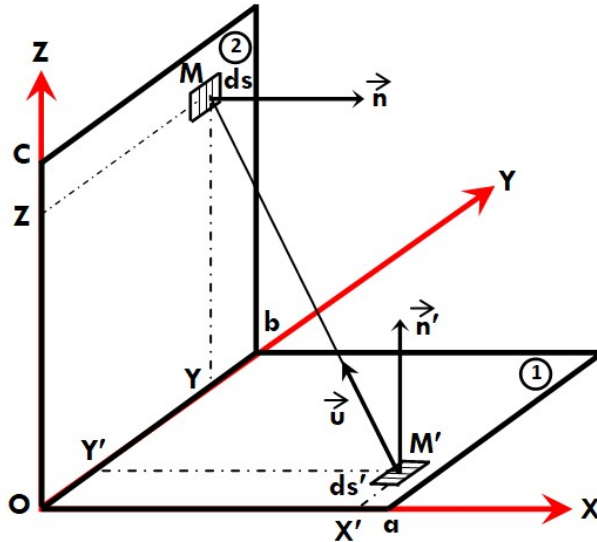


Figure 3.5 : Surfaces planes rectangulaires formant un dièdre droit

La variation de la hauteur entraîne donc une variation de la compacité du local. En faisant varier les dimensions géométriques, des modifications seront apportées à la surface d'échange avec l'air intérieur (échange thermique par convection) et avec d'autres surfaces entourant la même zone (échange thermique par rayonnement). Ce type d'échange thermique dépend des surfaces d'échange des différentes parois opaques, des températures des parois et du facteur de forme entre les surfaces réceptrices et émissives. A partir de ce facteur, nous pouvons décrire la disposition d'une surface par rapport à l'autre. Cependant, l'évaluation du facteur de forme est numériquement complexe mais elle est obligatoire. Certains chercheurs préfèrent utiliser les nomogrammes lorsqu'ils existent au lieu de rechercher des solutions analytiques. Notre résolution repose sur l'utilisation des valeurs analytiques, mentionnées sur le **tableau 3.3** qui présentent de nombreux avantages notamment la précision des calculs. Le facteur de forme fait référence donc à la taille et à la forme. La variation de

l'indice de compacité, définie par le rapport des surfaces extérieures et le volume total du cadre bâti, est exprimée en fonction de la hauteur des bâtiments.

Pour généraliser les calculs des indices de compacité équivalents à chaque cas, nous proposons la **figure 3.6** qui décrit la variation de l'indice de compacité en fonction de la taille des façades pour trois cas possibles. Le premier correspond à une construction de type plain-pied selon laquelle toutes les façades et la toiture terrasse sont exposées aux conditions environnantes extérieures. Dans le second, le toit et les façades Sud et Nord sont exposées. Dans le troisième cas, l'édifice présente toujours une mitoyenneté, le toit est considéré comme étant un plancher intermédiaire avec un autre local supérieur, c'est-à-dire, il n'est pas à l'abri des conditions extérieures.

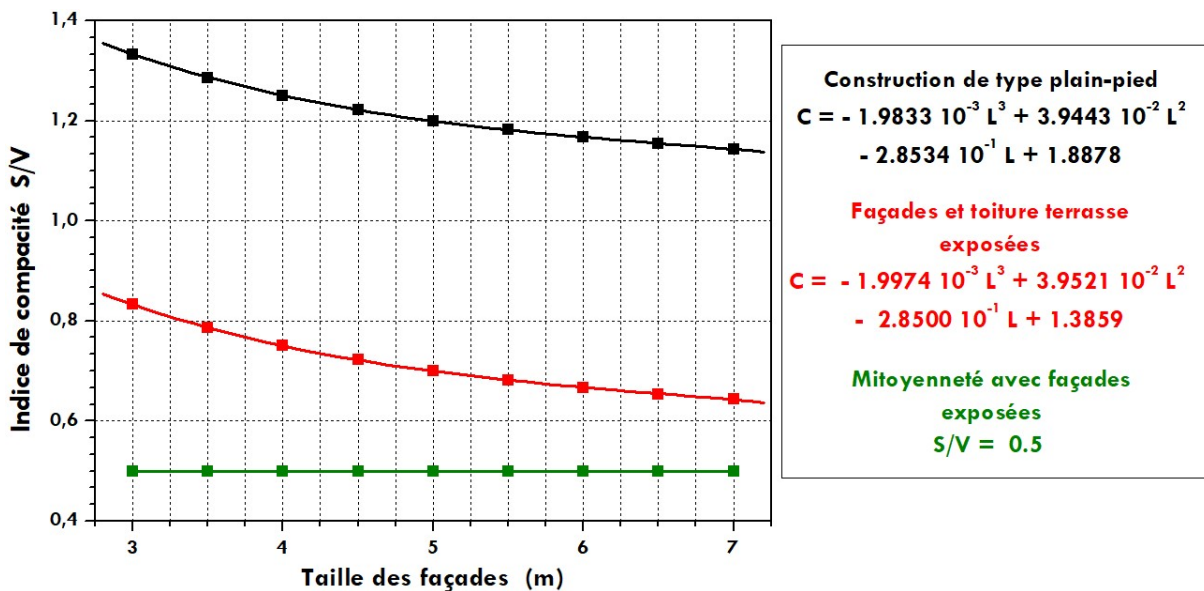


Figure 3.6 : Variation de l'indice de compacité en fonction de la hauteur des façades

Cette variation est inexistante si la construction est un immeuble de bureaux mitoyen conformément au troisième cas. Par opposition, elle est inversement proportionnelle par rapport aux hauteurs pour les autres cas.

En effet, vu que cet indice ne reflète pas l'effet du rayonnement solaire incident, il est donc nécessaire d'apporter une attention toute particulière sur les valeurs des irradiances solaires journalières incidentes sur toute l'enveloppe pour

achever une comparaison argumentée. Il est possible de les exprimer par volume habitable.

L'approche adoptée s'appuie sur des modèles de prédiction très fiables issus de la littérature [84-86]. Pour quantifier le gain solaire incident exprimées en wattheures puis converties en wattheures par mètre cube, nous devons chaque fois calculer la surface équivalente relative aux déperditions murales et à travers la toiture. La **figure 3.7** représente la variation de ce gain en fonction de la taille des façades, traduite par son indice de compacité pour les trois cas possibles.

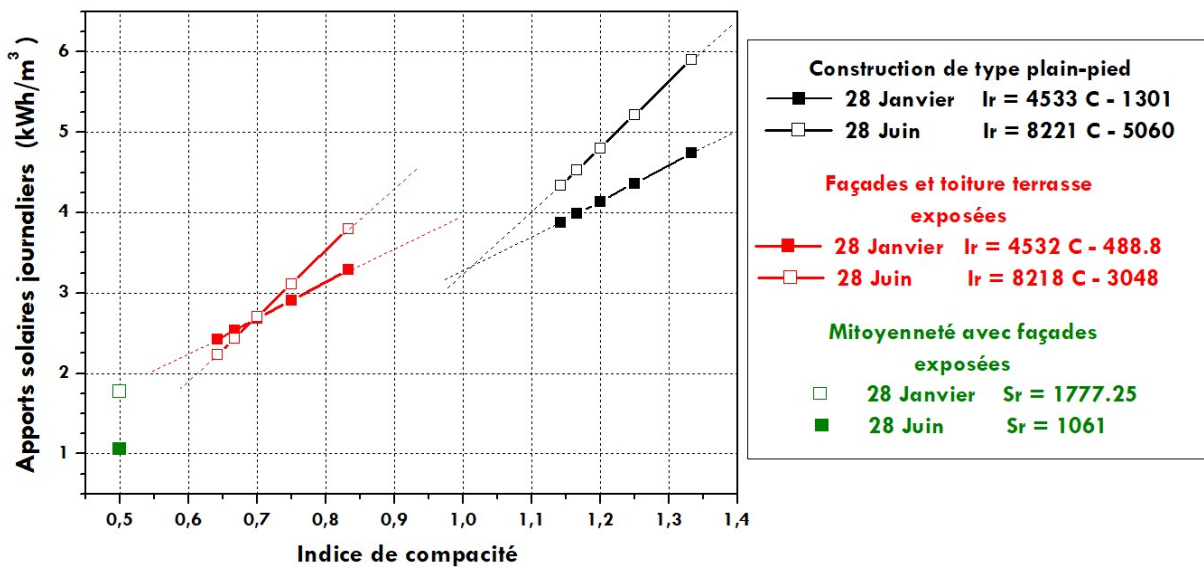


Figure 3.7 : Variation des apports solaires journaliers (par unité de volume) incidents sur la surface extérieure de l'enveloppe

Tableau 3.3 : Indices de compacité et facteurs de forme en fonction de la hauteur de la construction, les dimensions de la zone est de 4 x 4 x L m³, cas d'un local de type plain-pied

Hauteur de la construction	Indice de compacité classique S/V	Irradiations solaires journalières	Facteur de forme entre			
			le Toit et le mur Est	le Toit et le mur Ouest	le Toit et le mur Sud	le Toit et le mur Nord
L = 3 m	1.33	227.66 kWh	0.1793			
			0.1795			
		4.74 kWh/m ³	0.2391			
			0.2551	0.1820		

Chapitre III : L'influence de la hauteur du bâtiment sur le confort thermique

Hauteur de la construction	Indice de compacité classique S/V	Irradiations solaires journalières	Facteur de forme entre			
			le Toit et le mur Est	le Toit et le mur Ouest	le Toit et le mur Sud	le Toit et le mur Nord
L = 4 m	1.25	279.38 kWh 4.36 kWh/m ³			0.2	
			les murs Sud et Est	les murs Sud et Ouest	les murs Est et Nord	les murs Ouest et Nord
			le mur Est et le Sol	le mur Ouest et le Sol	le mur Sud et le Sol	le mur Nord et le Sol
			le Toit et le Sol	les murs Est et Ouest	les murs Sud et Nord	
L = 5 m	1.20	331.09 kWh 4.14 kWh/m ³			0.2134	
			les murs Sud et Est	les murs Sud et Ouest	les murs Est et Nord	les murs Ouest et Nord
			le mur Est et le Sol	le mur Ouest et le Sol	le mur Sud et le Sol	le mur Nord et le Sol
			le Toit et le Sol	les murs Est et Ouest	les murs Sud et Nord	
L = 6 m	1.17	382.81 kWh 3.99 kWh/m ³			0.2223	
			les murs Sud et Est	les murs Sud et Ouest	les murs Est et Nord	les murs Ouest et Nord
			le mur Est et le Sol	le mur Ouest et le Sol	le mur Sud et le Sol	le mur Nord et le Sol
			le Toit et le Sol	les murs Est et Ouest	les murs Sud et Nord	
L = 7 m	1.14	434.52 kWh 3.88 kWh/m ³			0.2285	
			les murs Sud et Est	les murs Sud et Ouest	les murs Est et Nord	les murs Ouest et Nord
			le mur Est et le Sol	le mur Ouest et le Sol	le mur Sud et le Sol	le mur Nord et le Sol
			le Toit et le Sol	les murs Est et Ouest	les murs Sud et Nord	

L'étape à suivre concerne la détermination des températures et d'humidités relatives. Le premier exemple donne un ensemble de résultats contenant des

courbes de températures et d'humidités relatives pour une teneur en eau fixée à $5 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}_{\text{Eau}}/\text{Kg}_{\text{Air-sec}}$. Les principaux paramètres du confort ont été investigués. Les **figures 3.8-3.11** donnent respectivement une description de la température de l'air intérieur, les températures surfaciques intérieures et extérieures du mur Sud et les valeurs d'humidité relative correspondante. La variation a été estimée en tenant en considération les différentes hauteurs. La **figure 3.12** propose une projection de la température ambiante intérieure et d'humidité relative. Des valeurs d'humidité plus élevées sont respectivement tolérées pour des basses températures ambiantes. Les résultats affichés sur le diagramme ne concernent que les valeurs journalières pour une exposition au soleil à tous niveaux, c'est-à-dire le local est considéré de type plain-pied.

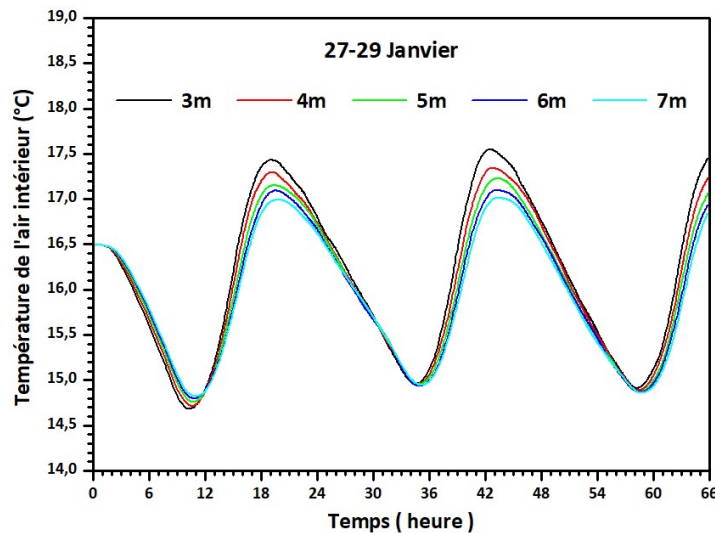


Figure 3.8 : Température de l'air intérieur

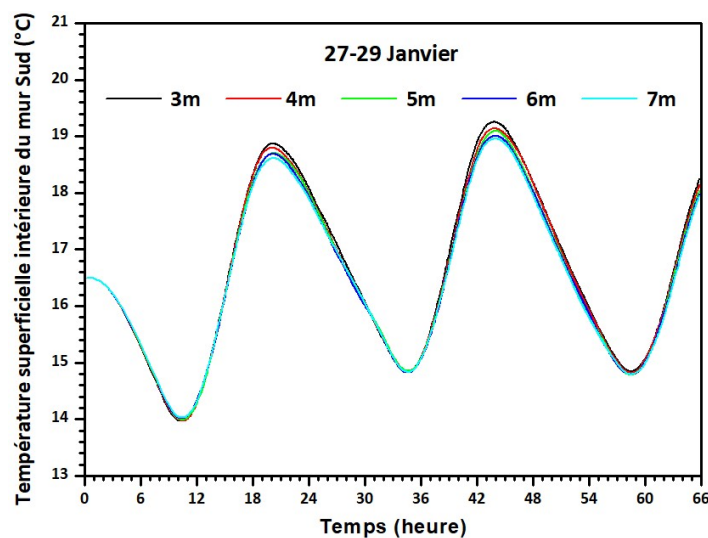


Figure 3.9 : Température superficielle intérieure du mur Sud

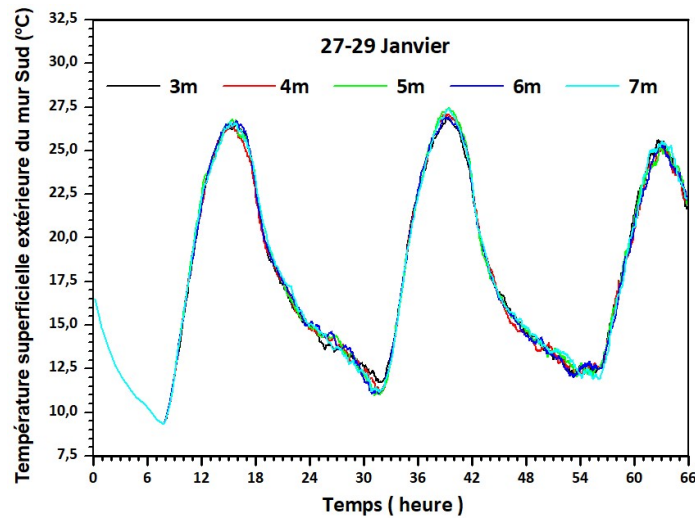


Figure 3.10 : Température superficielle extérieure du mur Sud

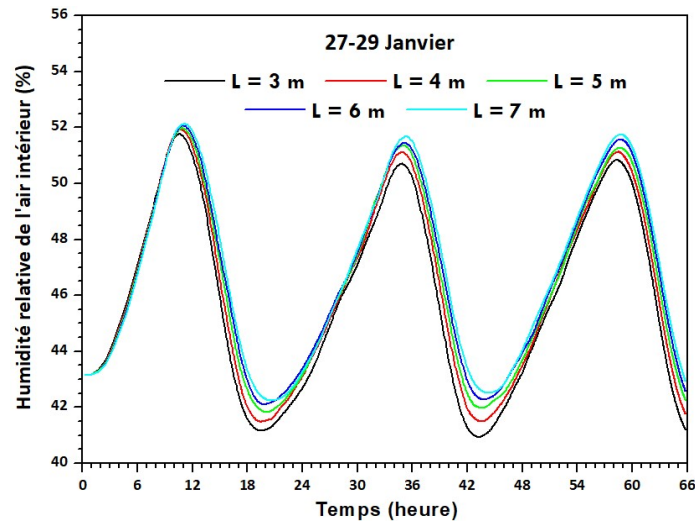


Figure 3.11 : Humidité relative de l'air intérieur

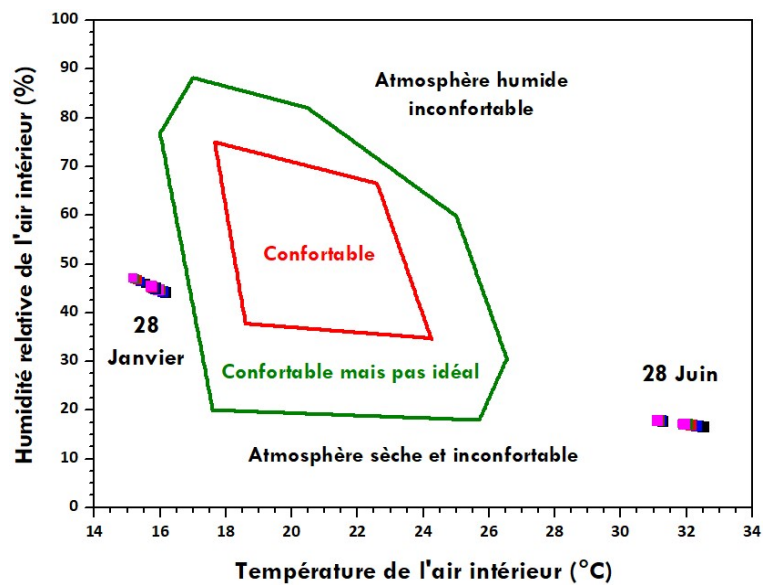


Figure 3.12 : Niveau du confort à différentes hauteurs pour une teneur en eau fixée à $5 \cdot 10^{-3} \text{ KgEau/KgAir sec}$

Les principales données recueillies dans le cadre de cette simulation sont représentées par le **tableau 3.4**. Les valeurs calculées correspondent à la journée du 28 Janvier. Les paramètres à analyser sont ceux qui correspondent aux propriétés fonctionnelles de l'inertie thermique telles que le déphasage et les fluctuations maximales de température. Les valeurs moyennes de toutes les températures seront estimées pour accomplir une comparaison rigoureuse entre les différents cas, selon le concept de compacité et en fonction du gain solaire incident sous un ciel clair et par unité de volume. Cette méthode se réfère également au gain solaire journalier en raison de l'indice géométrique utilisé qui ne prend pas en considération l'orientation des façades et par conséquent l'intensité du rayonnement solaire incident.

Tableau 3.4 : Irradiations solaires journalières, températures moyennes calculées et propriétés d'inertie thermique, les dimensions de la zone est de 4 x 4 x L m³, cas d'un local de type plain-pied

Hauteur de la construction	Indice de compacité classique S/V	Irradiations solaires journalières	Températures moyennes (°C)		Propriétés d'inertie thermique	
					Déphasage (h : mn)	Fluctuations (°C)
L = 3 m	1.33	227.66 kWh 4.74 kWh/m ³	Air intérieur	15.57	04 : 02	3.65
			Mur sud Superficielle intérieure	16.34	04 : 57	5.40
			Superficielle extérieure	17.71	00 : 32	17.51
L = 4 m	1.25	279.38 kWh 4.36 kWh/m ³	Air intérieur	15.41	03 : 58	3.49
			Mur sud Superficielle intérieure	16.23	05 : 06	5.31
			Superficielle extérieure	17.67	00 : 32	17.73
L = 5 m	1.2	331.09 kWh 4.14 kWh/m ³	Air intérieur	15.33	04 : 34	3.37
			Mur sud Superficielle intérieure	16.19	04 : 56	5.16
			Superficielle extérieure	17.76	00 : 35	17.75
L = 6 m	1.17	382.81 kWh 3.99 kWh/m ³	Air intérieur	15.23	04 : 18	3.29
			Mur sud Superficielle intérieure	16.12	04 : 48	5.09
			Superficielle extérieure	17.68	00 : 27	17.74
L = 7 m	1.14	434.52 kWh 3.88 kWh/m ³	Air intérieur	15.18	05 : 06	3.26
			Mur sud Superficielle intérieure	16.10	05 : 06	5.05
			Superficielle extérieure	17.67	00 : 28	17.49

En été (28 Juin), les températures résultantes simulées sous les mêmes conditions, et le décryptages des droites tracées sur la **figure 3.6** prouvent que l'élévation de la hauteur des façades des immeubles de bureaux entraîne à la fois une diminution de l'indice de compacité (amélioration de la compacité) et des apports solaires journaliers par unité de volume. C'est une situation favorable pour converger progressivement vers le niveau du confort souhaité correspondant aux deux premiers cas. au fur et à mesure que les températures commencent à baisser. Dans le troisième cas, l'indice de compacité reste constant. Cette situation nous fait intervenir (voir le chapitre suivant 4) un autre indice dit "indice de compacité adapté à l'architecture".

Par ailleurs, en hiver (28 Janvier), l'élévation de la taille de l'immeuble entraîne à son tour une diminution des rayons solaires interceptés par unité de volume. Donc logiquement, ces circonstances se répercutent cette fois-ci négativement sur le confort. Les valeurs obtenues s'accordent avec cette analyse sauf que cette diminution n'est pas vraiment influente.

La deuxième partie sera consacrée à ces cas indiqués précédemment. Nous nous concentrerons cependant sur les températures simulées sans les présenter. On s'intéresse donc au calcul des valeurs moyennes journalières et des fluctuations maximales des températures obtenues en fonction de l'indice de compacité (la hauteur des immeubles). La contribution se limite toujours au calcul de la température de l'air intérieur et du mur Sud de part et d'autre. Les trois modes de contact ont été convenablement traités. Les **figures 3.13-3.16** correspondent à un ensoleillement total de 100%. Les modèles prédictifs déterminés (de régression linéaire ou non linéaire) sont très fiables car le coefficient de détermination est près de l'unité. Le 28 Janvier, le lever du soleil est à 07h : 48mn, la durée d'ensoleillement est d'environ 10h : 23mn pour un ciel totalement dégagé. Le déphasage induit par la variation de la compacité ne subit pas un comportement particulier. Cette variation n'est pas susceptible de changer les températures de manière significative, le déphasage de la température de l'air est en moyenne 4h : 24mn. Les températures superficielles

extérieures du parement Sud du mur s'élèvent en moyenne à 17.70 °C quelque soit le degré de compacité. Le taux de cette variation ne fluctue pas avec les changements de compacité; l'amortissement est au voisinage de 17.64 °C.

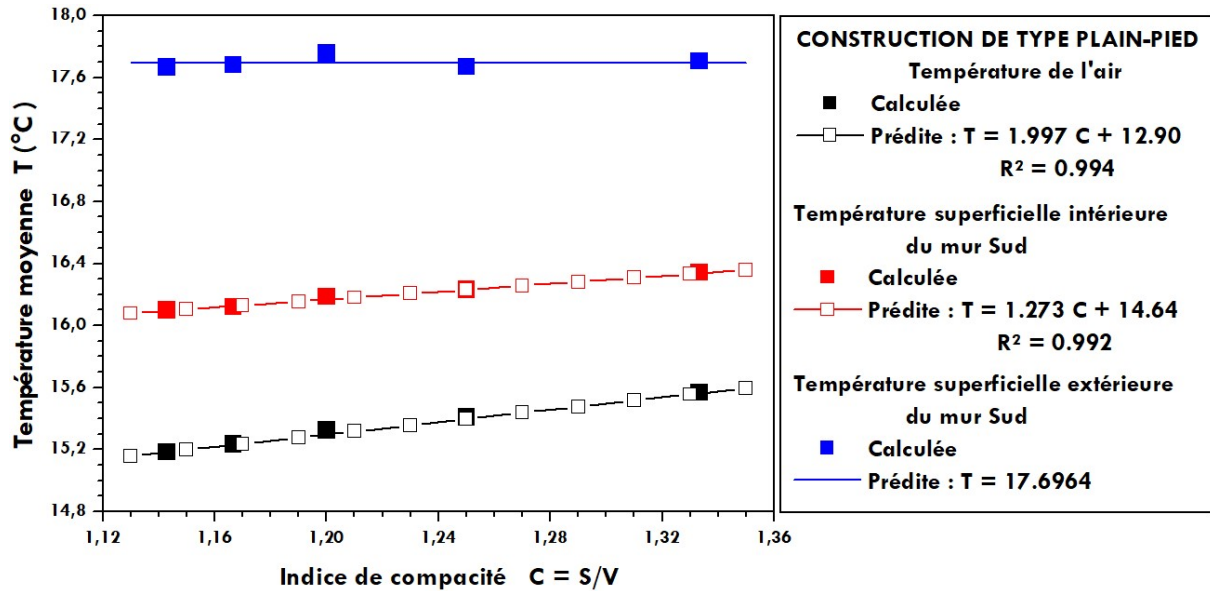


Figure 3.13 : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, construction de type plain-pied, 28 Janvier 2016

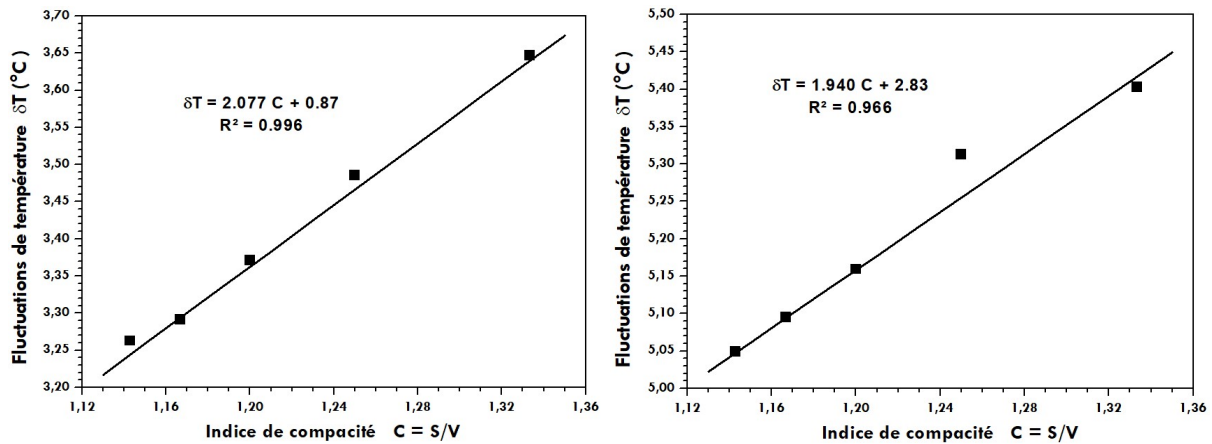


Figure 3.14 : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, construction de type plain-pied, 28 Janvier 2016

Le 28 Juin est retenu comme étant une journée de la période estivale, le lever du soleil correspondant est à 05h : 44mn, la durée d'insolation est de 14h : 07mn si le ciel est totalement dégagé.

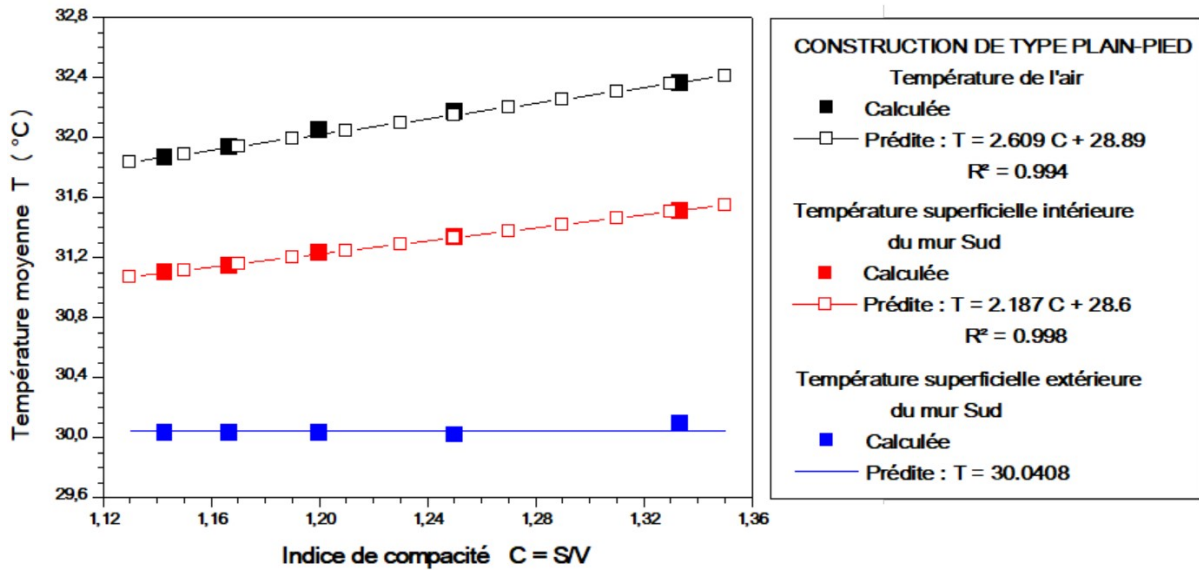


Figure 3.15 : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, construction de type plain-pied, 28 Juin 2016

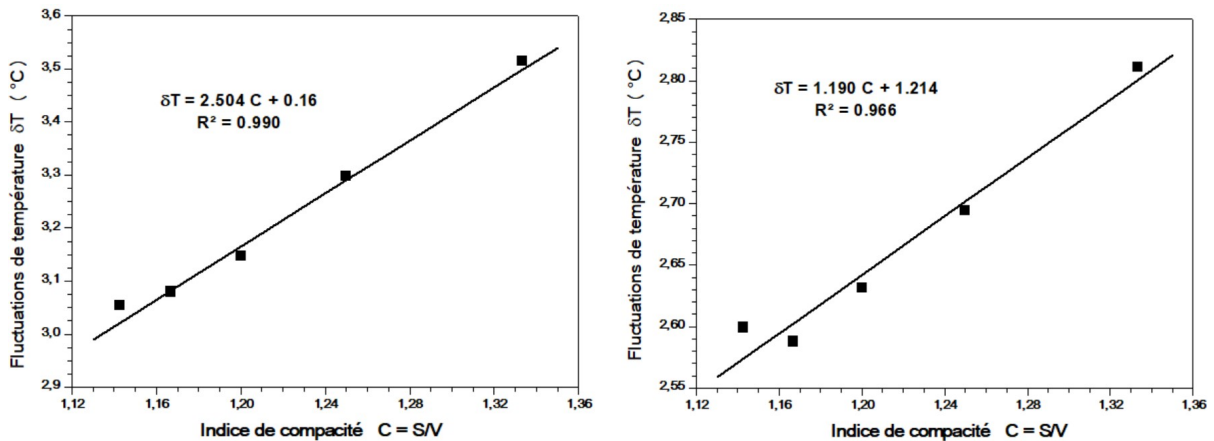


Figure 3.16 : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, construction de type plain-pied, 28 Juin 2016

En cohérence avec le jour précédent, en faisant varier la hauteur, le déphasage reste aux alentours de 4h : 27mn pour la température de l'air ambiant. La température extérieure du parement Sud du mur est estimée à 30.04 °C, les fluctuations de température ne varient pas avec les niveaux de compacité et sont proches de 7.29 °C.

Dans le cas d'une construction est mitoyenne avec une toiture terrasse exposée, les courbes correspondantes à la journée du 28 Janvier 2016 sont décrites par les **figures 3.17** et **3.18**.

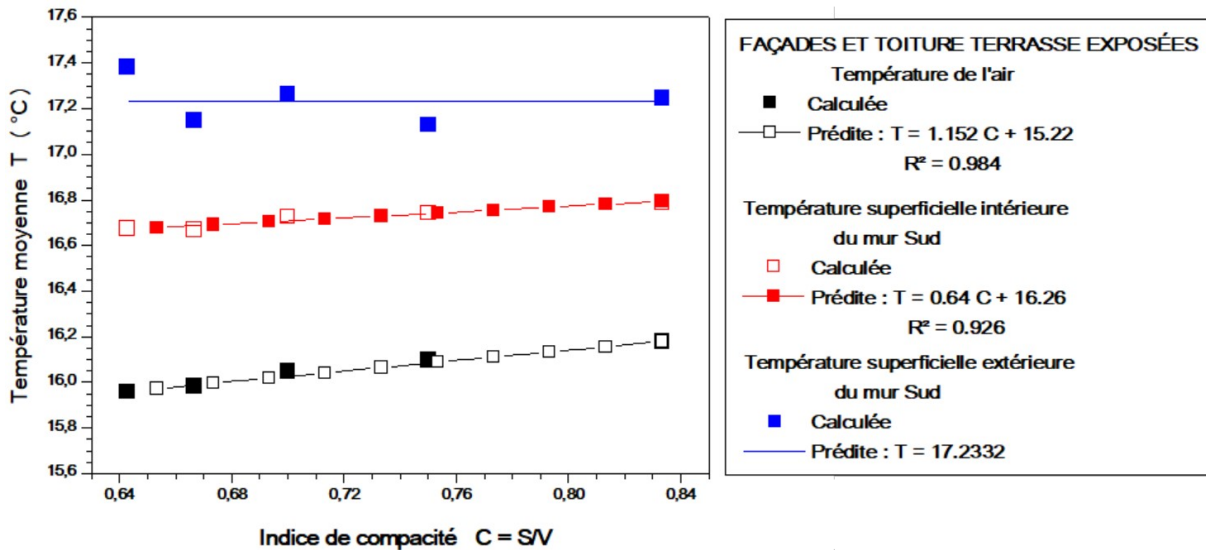


Figure 3.17 : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Janvier 2016

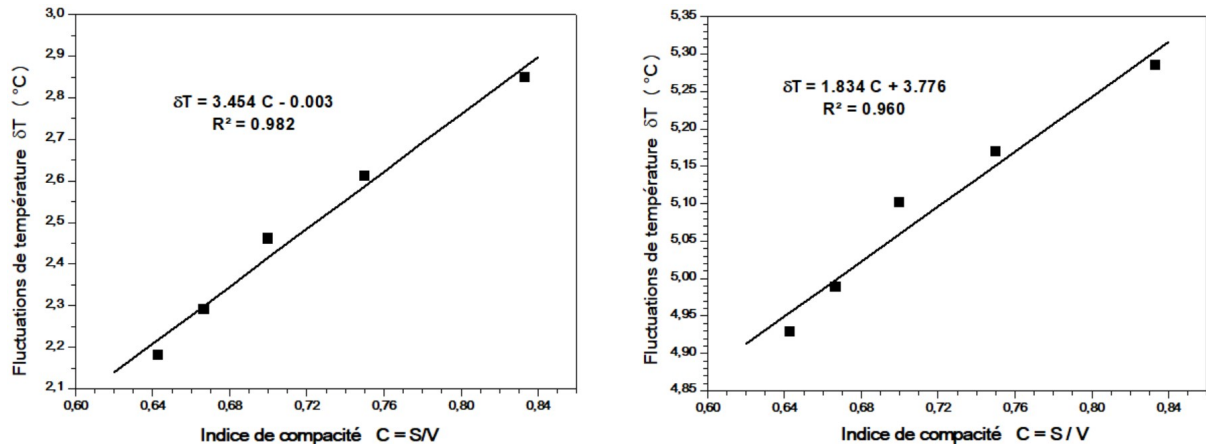


Figure 3.18 : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Janvier 2016

La variation du déphasage ne subit aucun comportement particulier et elle n'est pas vraiment considérable, le déphasage est en moyenne 3h : 50mn pour l'air. La température de la surface extérieure du parement Sud du mur s'élève en moyenne à 17.23 °C. Le taux de variations ne fluctue pas avec les changements de compacité; elles sont généralement au voisinage de 17.86 °C.

A l'image de la journée du 18 Janvier, le déphasage journalier de la température de l'air le 28 Juin est toujours insensible et il a une moyenne de près de 3h : 46mn (figures 3.19 et 3.20). La température calculée à l'extérieur du parement Sud du mur montre qu'elle est en moyenne comprise entre 30.04 et

30.25 °C. Ces fluctuations ne varient pas avec la variation de la compacité, elles sont estimées à 7.44 °C.

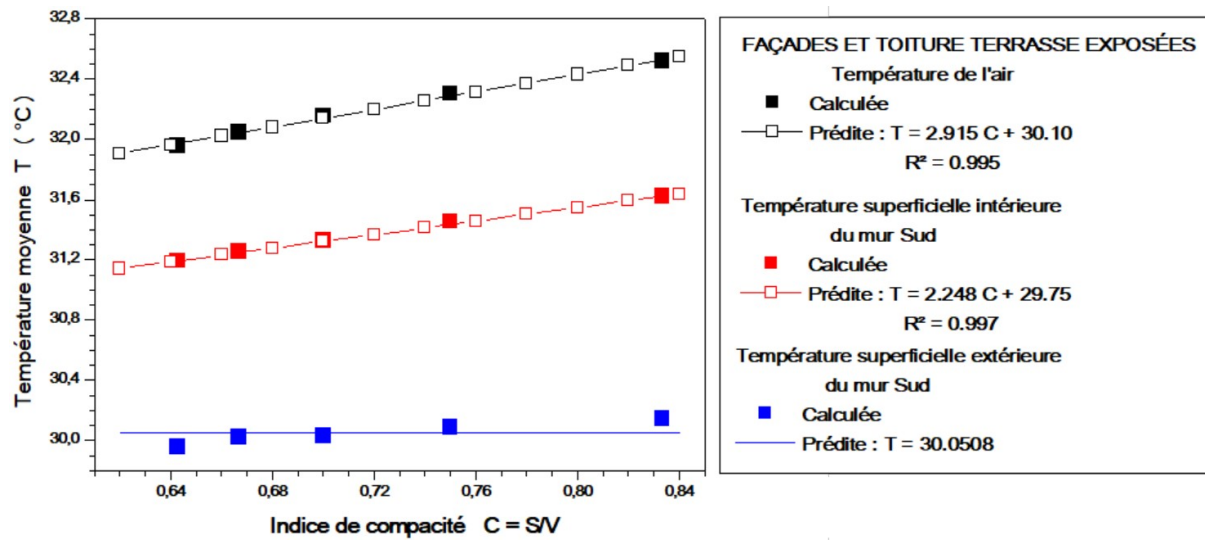


Figure 3.19 : Températures moyennes journalières en fonction de l'indice de compacité, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Juin 2016

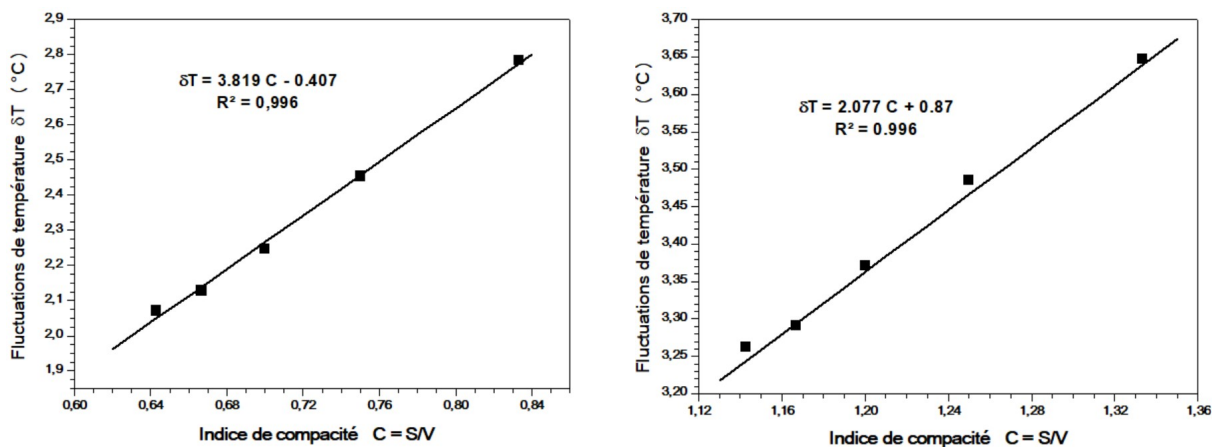


Figure 3.20 : Fluctuations des températures en fonction de la compacité, à gauche : l'air intérieur, à droite : superficie intérieure du mur Sud, cas de façades et toiture terrasse exposées, 28 Juin 2016

Enfin, en supposant que cet immeuble est mitoyen à toiture non exposée, l'indice de compacité et l'intensité du rayonnement solaire incident restent fixes en faisant varier la hauteur de l'immeuble. Pour ces cas indiqués, tous les paramètres calculés restent constants. La température moyenne de l'air reste quasiment constante et varie entre 15.88 et 15.72 °C pour le 28 Janvier et entre 31.30 et 31.12 °C pour le 28 Juin.

À l'issu des résultats obtenus, un local dans un immeuble de bureaux mitoyen favorise une meilleure stabilisation des températures de l'air intérieur et un meilleur déphasage quelle que soit la taille du bâtiment. Les fluctuations maximales de température sont comprises entre 1.19 et 1.44 °C avec une moyenne de 1.34 °C au cours de la Journée du 28 Juin. Pour le 28 Janvier, un bureau dans un bâtiment mitoyen engendre des fluctuations de température maximales allant de 1.18 à 1.45 °C avec une moyenne de 1.33 °C. Même le déphasage de la température s'améliore, il est estimé à 5h : 58mn pour le 28 Janvier et il devient 8h : 09mn le 28 Juin. Ce type de conception permet d'exploiter le niveau d'inertie thermique atteint en maîtrisant par exemple les apports de chaleur solaire et en combinant quelques concepts architecturaux passifs.

III.6. Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est de déterminer l'influence de la hauteur des façades sur les conditions du confort thermique. Les surfaces déperditives en contact avec les milieux extérieurs ont été prises en considération.

Selon les résultats obtenus, la compacité peut légèrement améliorer le confort thermique et réguler les fluctuations des températures intérieures. D'autre part, il est plus souhaitable de chercher un autre indicateur géométrique convenable et plus fiable pour prendre en considération la variation de la taille des façades dans le cas d'un immeuble mitoyen avec façades exposées. Le fonctionnement des modèles de prédiction fiables et leur relative simplicité permettent de les utiliser comme outil d'estimation des différentes grandeurs physiques.

Chapitre IV

**Le compromis hauteur /
compacité, est un facteur
d'économies important**

Chapitre IV :

Le compromis hauteur / compacité, est un facteur d'économies important

IV.1. Introduction

Selon la littérature, plusieurs travaux [76, 87 - 98] ont révélé que la forme du bâtiment peut engendrer des effets sur la performance thermique et les besoins énergétiques. Une meilleure forme entraîne systématiquement une meilleure compacité et favorise en conséquence une économie d'énergie à long terme, mais elle engendre également une meilleure répartition des parois en contact avec l'extérieur. Une bonne économie implique que pour un volume bien déterminé, la surface des matériaux constituant les parois du contenant doit être la plus faible possible. A plusieurs reprises, il a été prouvé que ce concept est lié directement avec les propriétés géométriques qui peuvent améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier l'influence de la hauteur de l'immeuble de logements sur son efficacité énergétique. Cependant, on s'est aperçu qu'une isolation thermique bien conçue et correctement mise en œuvre apporte et offre d'innombrables avantages. C'est pourquoi, nous apportons une attention toute particulière aux performances thermiques de l'enveloppe pour déduire l'apport de la compacité dans les cas d'une enveloppe à faible et à forte isolation thermique. Ce travail a fait l'objet d'un article publié dans le journal "Modelling, Measurement and Control C", IETA International Information and Engineering Technology Association.

IV.2. La compacité

La compacité est une règle en architecture bioclimatique car elle permet de limiter les surfaces déperditives ou obéissantes à un rayonnement solaire intense [80]. 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 la notion de géométrie utilisée pour maximiser le volume intérieur d'un contenant en fonction de sa forme. La notion de volume ou de masse du cadre bâti 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, la surface du matériau constituant les parois du contenant, soit la plus petite possible [81].

Dans ce même contexte, les déperditions thermiques, qui sont liées à la forme géométrique du bâtiment, sont proportionnelles à la surface d'échange extérieure. Une construction à forme cubique et à isolation égale perd donc moins qu'une construction de forme rectangulaire. A ce titre, plusieurs contributions récentes [57, 104, 99 - 108] ont montré que la géométrie la plus propice en terme de confort thermique est celle qui correspond à un faible indice de compacité. La compacité et le confort sont donc meilleurs lorsque le facteur de compacité est plus faible. Le choix doit se porter sur l'indice de compacité le plus en accord avec la réalité physique de nos habitations et notamment les besoins énergétiques.

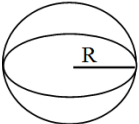

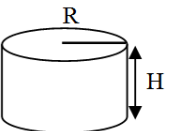
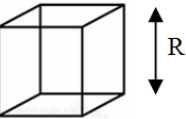
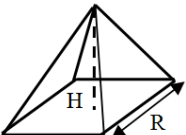
Toutefois, une comparaison prévisionnelle menée entre plusieurs cas, de point de vue compacité et en tenant en considération la forme, la taille et la surface des contacts nous a permis :

- De montrer l'intérêt des formes sphériques pour limiter les échanges surfaciques avec l'extérieur
- De prouver que la construction échange d'autant plus d'énergie avec son milieu que sa surface extérieure est grande [109]
- De confirmer la possibilité d'économiser les matériaux de construction. A titre indicatif, la superficie globale d'une construction de 64 m³ sous forme cubique égale à 80m² contre 73.81m² et 61.41m² si cette construction (de même

volume) est de forme cylindrique et d'une forme de demi-sphère, respectivement.

Le **tableau 4.1** ci-dessous donne une comparaison géométrique en considérant une multitude de formes et de volumes croissants. La variation de l'indice de compacité est évaluée en fonction de la forme et des grandeurs relatives à chaque géométrie.

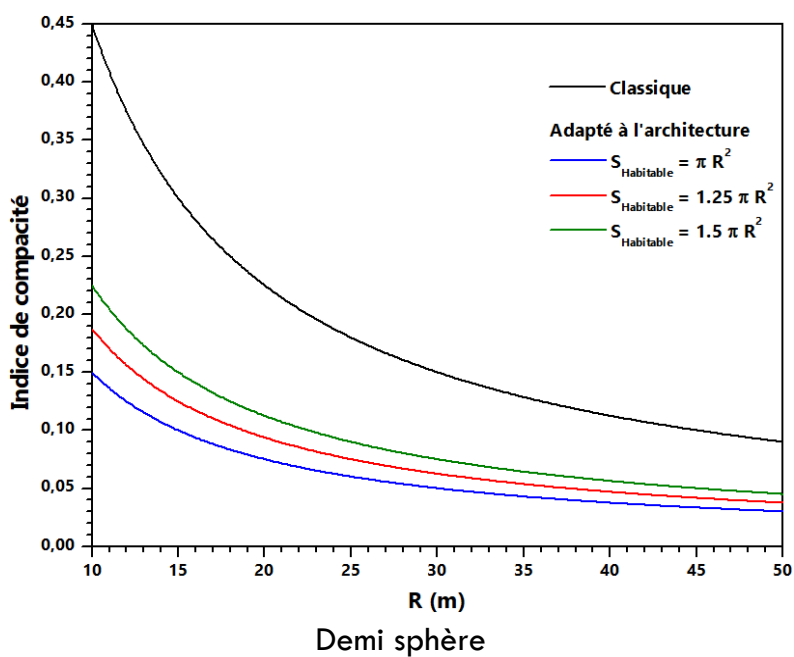
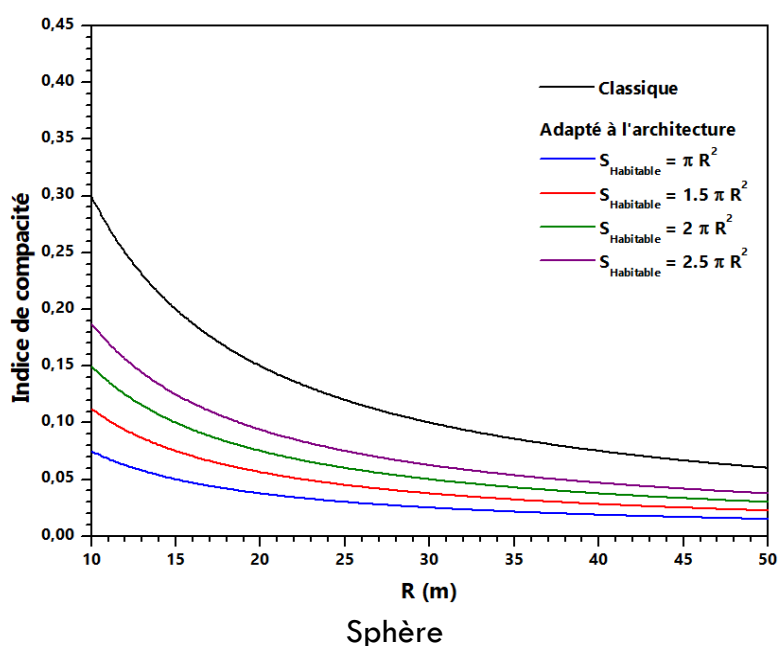
Tableau 4.1 : Formules mathématiques permettant de calculer le volume et la surface des différentes géométries

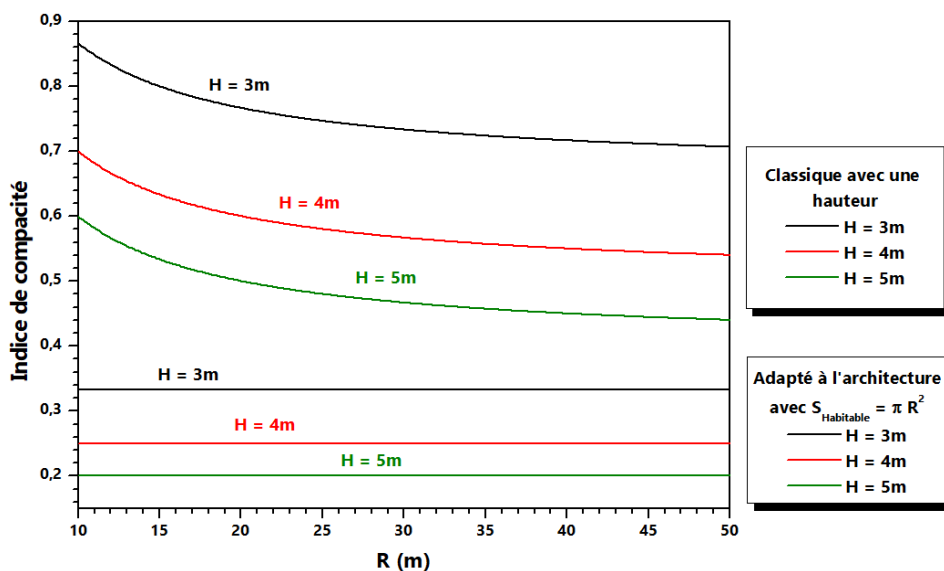
Forme géométrique	Volume	R	Surface totale	Surface sans surface de base
Sphère 	$V = 4 \pi R^3 / 3$	$R = (3 V / 4 \pi)^{1/3}$	$S = 4 \pi R^2$	/
Demi sphère 	$V = 2 \pi R^3 / 3$	$R = (3 V / 2 \pi)^{1/3}$	$S = 3 \pi R^2$	$S = 2 \pi R^2$
Cylindre fermé 	$V = \pi R^2 H$	$R = (V / H \pi)^{1/2}$	$S = 2 \pi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

Dans certaines situations, l'indice de compacité classique ne prend pas en compte la réalité physique de la surface habitable qui est pourtant un des facteurs, si ce n'est, parfois, le facteur le plus important d'un programme de construction. Les courbes tracées ci-dessous (**figure 4.1**) traduisent la variation des compacités géométriques en fonction de la dimension caractéristique de la forme

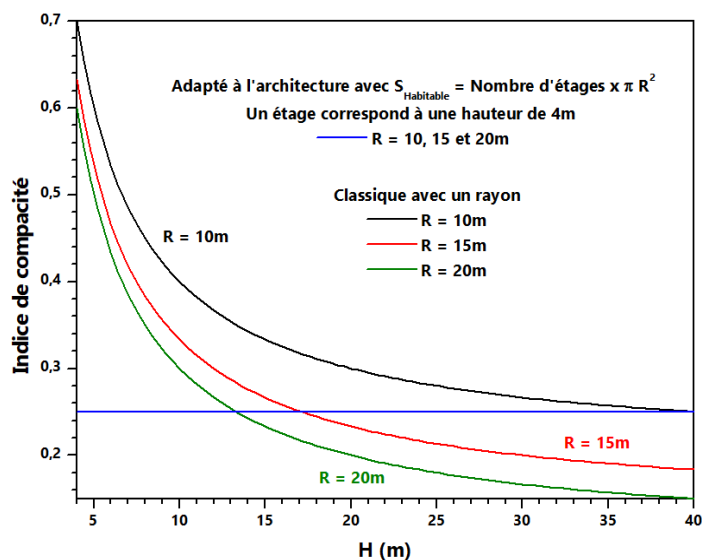
correspondante. Les calculs des valeurs sont issus des équations données dans le **tableau 4.1**.

Ce paramètre purement géométrique définit fortement la taille du logement et influence largement sa forme. Conformément aux courbes obtenues, une comparaison des indices de compacité peut être adressée. Le **tableau 4.2** présente cette comparaison entre ces deux indices auxquels ils font le plus communément référence à la compacité.

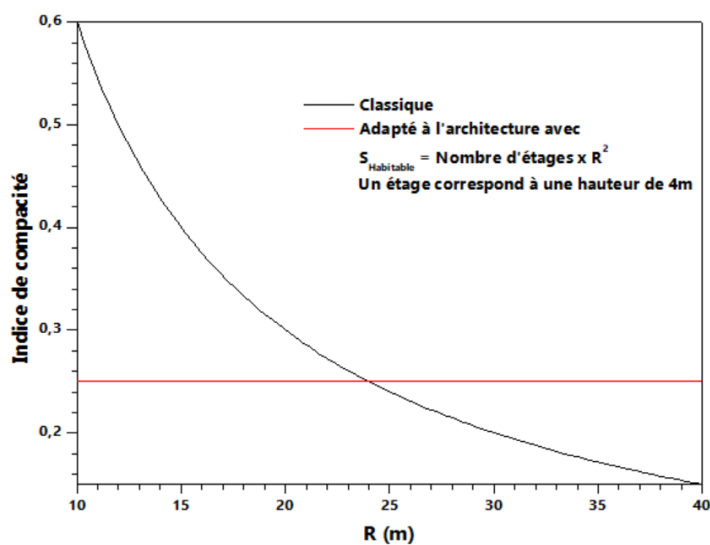




Cylindre fermé



Cylindre fermé



Cube

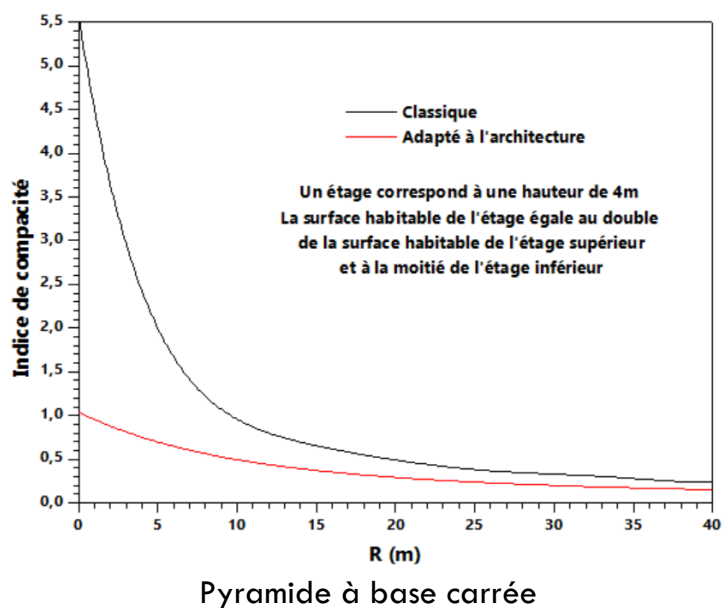


Figure 4.1: Variation des compacités géométriques en fonction des dimensions caractéristiques

Les courbes tracées montrent que :

- La compacité s'améliore avec la taille en raison de la diminution des deux facteurs de compacité.
- Les variations de la compacité sont d'autant plus importantes que les tailles sont petites.
- La taille a un impact relativement plus important que la forme.
- L'influence de la forme a tendance à disparaître avec l'augmentation de la taille.

Tableau 4.2: Comparaison des indices de compacité

	Facteur de compacité classique	Nouveau facteur adapté à l'architecture
Expression des indices	$S_{\text{Paroi d'échange}} / V$	$S_{\text{Paroi d'échange}} / S_{\text{Habitable}}$
Remarques générales	<ul style="list-style-type: none"> - De point de vue géométrique, ne prend pas en compte les volumes inutilement grands - Avantage les grandes tailles quelles 	<ul style="list-style-type: none"> - Est le plus réaliste, détermine les pertes totales par les parois d'échange en proportion de la surface habitable - À forme constante, il est

- | | |
|---|--|
| que soient les formes | totallement indépendant des tailles |
| - Présente une hiérarchie non conforme à la réalité en variant les formes | - Varie correctement en fonction des formes |
| | - À surface habitable égale, les volumes les plus importants ne sont pas avantagés |
-

IV.3. L'isolation thermique

L'isolation thermique est une technique à mettre en œuvre pour limiter les transferts de chaleur à travers les parois opaques et transparentes et réduire la consommation énergétique dans les bâtiments. C'est la première étape d'action pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. L'isolation d'un bâtiment permet donc d'affaiblir les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'environnement extérieur, et ainsi diminuer les besoins de chauffage et, le cas échéant, de climatisation. 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 [75]. Plusieurs perspectives d'application [77, 78, 110] ont montré que pour les climats chauds, l'isolation des toits doit être prioritaire par rapport à celle des murs et des planchers.

IV.4. Contexte de la problématique

L'obtention d'un confort thermique satisfaisant exige un cadrage des paramètres du confort, plus précisément, la température de l'air/parois, l'hygrométrie, les mouvements d'air, le métabolisme et l'habillement. Une architecture optimisée peut, parfois sensiblement, contribuer à l'amélioration d'au moins trois de ces paramètres. Cet art de créer et de construire ce type de bâtiments respecte les aspects sociaux et environnementaux qui sont inclus dans la conception.

Les solutions susceptibles d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort intérieur peuvent facilement s'accorder avec :

- Une architecture moderne qui se base couramment sur des styles futuristes et mettent en avant des formes géométriques atypiques et des formes épurées plutôt que l'ornementation. Elle est caractérisée généralement par des toits plats, des intérieurs spacieux et de grandes ouvertures vitrées sur l'extérieur.
- Une architecture contemporaine basée même sur des formes courbées destinée à consommer peu d'énergie.
- Une architecture traditionnelle sachant que les techniques et les formes de conception étant facilement réalisable et extrêmement bien maîtrisées de nos jours. Un logement traditionnel est simple à bâtir et peu coûteux.

Le travail mené essaie donc d'examiner la problématique de la forme architecturale retenue pour un immeuble de logements ou un ensemble d'habitats collectifs.

IV.5. Méthode d'évaluation de l'efficacité énergétique

Le bilan énergétique de la construction tient en considération la spécificité du bâti (matériaux utilisés, niveau d'isolation thermique, les murs, le sol, les ouvertures...), l'aération et les systèmes de ventilation, le chauffage et la production de l'eau sanitaire, les équipements électroménagers et le système d'éclairage et les concepts énergétiques passifs et actifs. Le calcul des besoins énergétiques se base sur les équations suivantes [26, 93] :

Chauffage :

$$\text{Con}_{\text{Tot}} = \text{Con}_{\text{Env}} - \underbrace{\left(\text{Ap}_{\text{Occup}} + \text{Ap}_{\text{Elec}} + \text{Ap}_{\text{Sol}} \right)}_{\text{Apports de chaleur gratuits}} + \text{Con}_{\text{ECS}} + \text{Con}_{\text{Elc}} \quad (4.1)$$

Refroidissement :

$$\text{Con}_{\text{Tot}} = \text{Con}_{\text{Env}} + \left(\text{Ap}_{\text{Occup}} + \text{Ap}_{\text{Elec}} + \text{Ap}_{\text{Sol}} \right) + \text{Con}_{\text{ECS}} + \text{Con}_{\text{Elc}} \quad (4.2)$$

Intersaisons : Chauffage / Climatisation :

$$\text{Con}_{\text{Tot}} = \left| \text{Con}_{\text{Env}} \pm \left(\text{Ap}_{\text{Occup}} + \text{Ap}_{\text{Elec}} \pm \text{Ap}_{\text{Sol}} \right) \right| + \text{Con}_{\text{ECS}} + \text{Con}_{\text{Elc}} \quad (4.3)$$

IV.5.1. Consommation énergétique liée à l'enveloppe

L'enveloppe qui sépare l'intérieur de l'extérieur est composée des murs, du plancher, du toit, des fenêtres et des portes. Le niveau et la qualité de l'isolation thermique sont liés directement à la consommation énergétique engendrée par le conditionnement d'air (chauffage et climatisation) et la ventilation. Sa valeur est exprimée par la formule suivante [101, 109 - 112] :

$$\text{Con}_{\text{Enveloppe}} = 24 \text{ Dép}_{\text{Env}} \text{ Dj} \quad (4.4)$$

$$\text{Dép}_{\text{Env}} = \text{Dép}_{\text{Parois}} + \text{Dép}_{\text{Ventilation}} \quad (4.5)$$

$$\text{Dép}_{\text{Env}} = \text{Dép}_{\text{Murs}} + \text{Dép}_{\text{Toit}} + \text{Dép}_{\text{Portes}} + \text{Dép}_{\text{Plancher bas}} + \text{Dép}_{\text{Fenêtres}} \quad (4.6)$$

$\text{Dép}_{\text{Enveloppe}}$: Déperditions thermiques totales, s'exprime en W/K.

Dj : Nombre de degrés-jours.

$$\text{Dép}_{\text{Parois}} = \sum_{i=1}^{i=n} b_{\text{Paroi } -i} A_{\text{Paroi } -i} U_{\text{Paroi } -i} \quad (4.7)$$

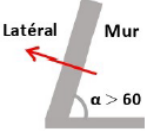
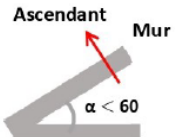
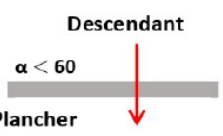
$A_{\text{Parois-i}}$: Surface des parois (m^2).

$b_{\text{Parois-i}}$: Coefficient de réduction des déperditions thermiques des parois.

- Si la paroi est en contact avec l'extérieur, $b = 1$.
- Si elle est enterrée ou sur un vide sanitaire, $b = 0.8$.
- Pour les locaux adjacents autres que d'habitation, $b = 0.2$.

Une paroi échange de la chaleur par convection et rayonnement avec les deux milieux qu'elle sépare. Ces échanges sont pris en considération dans les calculs par un coefficient d'échange dit superficiel noté "h" qui s'expriment en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Les valeurs retenues des résistances thermiques d'échanges superficiels intérieur $R_{\text{Paroi-i-intérieure}} = 1/h_{\text{Paroi-i-intérieure}}$ et extérieur $R_{\text{Paroi-i-externe}} = 1/h_{\text{Paroi-i-externe}}$ sont données dans le **tableau 4.3** ci-dessous.

Tableau 4.3: Résistances thermiques d'échanges superficiels [113]

$\frac{1}{h}$ W/m ² K	Paroi en contact avec :			Paroi en contact avec :		
	$\frac{1}{h_{\text{Paroi-i-intérieure}}}$	$\frac{1}{h_{\text{Paroi-i-extérieure}}}$	Somme	$\frac{1}{h_{\text{Paroi-i-intérieure}}}$	$\frac{1}{h_{\text{Paroi-i-extérieure}}}$	Somme
 <p>Latéral Mur $\alpha > 60$</p>	0.11	0.06	0.17	0.11	0.11	0.22
 <p>Ascendant Mur $\alpha < 60$</p>	0.09	0.05	0.14	0.09	0.09	0.18
 <p>Descendant $\alpha < 60$ Plancher</p>	0.17	0.05	0.22	0.17	0.17	0.34

Le calcul du coefficient de transmission thermique $U_{\text{Paroi-i}}$, exprimé en W/m²K, consiste à diviser la paroi en éléments homogènes.

$$\frac{1}{U_{\text{Paroi-i}}} = \sum_{k=1}^{k=m} R_{\text{Couche k-paroi i}} + \frac{1}{h_{\text{Paroi-i-intérieure}}} + \frac{1}{U_{\text{Paroi-i-extérieure}}} \quad (4.8)$$

$$R_{\text{Couche k de la paroi i}} = \frac{e_{\text{Couche k-paroi i}}}{\lambda_{\text{Couche k-paroi i}}} \quad (4.9)$$

$\sum_{k=1}^{k=m} R_{\text{Couche k-paroi i}}$: Somme des résistances thermiques des différentes couches intérieures de matériaux constituant la paroi (m² K/W)

$e_{\text{Couche k-paroi i}}$: Épaisseur de la couche du matériau (m)

$\lambda_{\text{Couche k-paroi i}}$: Conductivité thermique du matériau (W/mK)

La méthode d'estimation du coefficient de transmission thermique pour une porte peut être la même à celle d'un mur opaque, mais il est possible de s'inspirer directement du **tableau 4.4** ci-dessous donné par le Document Technique Réglementaire D.T.R délivré par le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment CNERIB.

Tableau 4.4: Coefficient de transmission thermique des portes U (W/m² K) [113]

		En contact avec l'extérieur	En contact avec un local non chauffé
Porte en bois	Porte opaque	3.5	2
	Porte avec vitrage, surface vitrée inférieure à 30%	4.0	2.4
	Porte avec vitrage, surface vitrée de 30% à 60%	4.5	2.7
<hr/>			
Porte en métal	Porte opaque	5.8	4.5
	Porte avec vitrage simple	5.8	4.5

Le coefficient de transmission thermique des parois vitrées de l'ensemble fenêtre-occultation a été calculé en retenant une lame d'air immobile entre la fenêtre et l'occultation. Les coefficients $U_{\text{vitrage-nu}}$ (W/m² °C) des vitrages nus sont donnés par le **tableau 4.5**.

$$U_{\text{Vitrage}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{\text{Vitrage-nue}}} + R_{\text{Voilages}} + R_{\text{Rideaux}} + R_{\text{Occultations}}} \quad (4.10)$$

R_{Voilages} : Résistance thermique additionnelle des voilages, elle est fixée à 0.025 m²K/W

R_{Rideaux} : Résistance thermique additionnelle des rideaux, la valeur retenue est de 0.030 m² °C/W

Tableau 4.5: Coefficients $U_{\text{vitrage-nu}}$ (W/m² °C) des vitrages nus

Type de vitrage	Épaisseur de la lame d'air	Nature de la menuiserie	Paroi verticale	Paroi horizontale
Simple vitrage		Bois	5.0	5.5
		Métal	5.8	6.5
<hr/>				
Double vitrage	5 à 7mm	Bois	3.3	3.5
		Métal	4.0	4.3
	8 à 9mm	Bois	3.1	3.3
		Métal	3.9	4.2
	10 à 11mm	Bois	3.0	3.2
		Métal	3.8	4.1
	12 à 13mm	Bois	2.9	3.1
		Métal	3.7	4.0
<hr/>				
Double fenêtre	Plus de 30mm	Bois	2.6	2.7
		Métal	3.0	3.2

$R_{\text{Occultations}}$: Résistance thermique additionnelle des occultations, elle est retenue à $0.17 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ si elles existent

Les déperditions liées au système de ventilation (W/K) est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Dép}_{\text{Ventilation}} = 0.34 \text{ Débit}_{\text{éq}} \quad (4.11)$$

$\text{Débit}_{\text{éq}}$: Débit équivalent de l'air entrant (m^3/h)

0.34 : Capacité thermique volumique de l'air ($\text{Wh}/\text{m}^3 \text{ K}$)

$$\begin{aligned} \text{Dép}_{\text{Ventilation}} = & \text{Dép}_{\text{Hyg}} + \text{Dép}_{\text{Ad}_f} + \text{Dép}_{\text{Comb}} + \text{Dép}_{\text{VMC}} \\ & + \text{Dép}_{\text{Perm}} + \text{Dép}_{\text{Cond}} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$\text{Débit}_{\text{Hyg}}$: Débit d'air d'aération naturelle, considéré comme système de ventilation d'hygiène.

$\text{Débit}_{\text{Ad}_f}$: Débit additionnel, l'ouverture des fenêtres vient en complément

$\text{Débit}_{\text{Comb}}$: Débit additionnel des appareils à combustion dans les pièces chauffées

$\text{Débit}_{\text{VMC}}$: Débit d'air extrait par la ventilation mécanique

$\text{Débit}_{\text{Perm}}$: Débit de fuite de l'enveloppe

$\text{Débit}_{\text{Cond}}$: Débit d'air extrait par les conduits à tirage naturel

IV.5.2. Besoins énergétiques liés au chauffage d'eau

L'approvisionnement de la consommation énergétique due au chauffage d'eau est compliqué car il est difficile de prédire le comportement des usagers. Souvent, il a été considéré qu'un occupant consomme près de 50 litres d'eau chaude par jour. Le calcul des besoins énergétiques en eau chaude sanitaire, exprimés en Wh/an, qui, en fait, représente l'énergie calorifique consommée permettant de garantir une quantité suffisante d'eau chaude sanitaire aux utilisateurs. Si ce volume produit est radicalement différent les jours de la semaine et le Week-end, une moyenne journalière peut être retenue [26, 101, 111, 112].

$$\text{Con}_{\text{ECS}} = p \cdot 1.1628 \cdot V_{\text{ECS}} \cdot (T_{\text{ECS}} - T_{\text{EF}}) \quad (4.13)$$

$$V_{\text{ECS}} = 50 \cdot \text{Nombre d'occupants} \quad (4.14)$$

Con_{ECS} : Besoins énergétiques journaliers à la demande de l'utilisateur, en Wh.

p : Densité volumique de l'eau, sa valeur retenue est fixée à 1 kg/litre.

V_{ECS} : Quantité (par litres) d'eau chaude demandée par l'utilisateur.

T_{ECS} : Température de l'eau chaude d'utilisation, par °C.

T_{EF} : Température moyenne de l'eau froide à l'entrée du système de chauffage, par °C.

IV.5.3. Apport de chaleur interne dû aux occupants

Le corps humain produit de la chaleur à l'issue des différents efforts physiques. La diffusion de cette chaleur est élevée en accroissant l'activité humaine. Des valeurs par défaut peuvent être retenues conformément au **tableau 4.6** ci-dessous.

Les apports de chaleur interne dus aux occupants seront calculés suivant la formule 4.15 [20].

Tableau 4.6 : Estimation de la chaleur irradiée par le corps humain [26, 114]

Niveau d'activité	Apports internes par chaleur sensible et latente par personne
Activité statique assise (lire, écrire, voir la télévision...)	120 W
Travaux simples assis ou debout (travaux de laboratoire, machine à écrire...)	150 W
Activités corporelles légères	190 W
Activités corporelles moyennes à difficiles	Plus de 200 W

$$A_{p_{\text{Occup}}} = C_{\text{Ir}} \cdot \text{Nbr}_{\text{Occup}} \cdot \text{Dur}_{\text{Près / Jour}} \cdot \text{Nb}_{\text{Jour}} \quad (4.15)$$

Nb_{Occup} : Nombre d'occupants.

C_{Ir} : Chaleur irradiée par chaque occupant (W/occupant),

$\text{Dur}_{\text{Près / Jour}}$: Durée de présence de chaque occupant par jour (heure),

Nb_{Jour} : Nombre de jours à chauffer/climatiser (jours par mois).

IV.5.4. Apports de chaleur dus à l'éclairage et aux équipements internes

Il n'existe pas une règle de calcul générale, c'est pourquoi, des valeurs par défaut peuvent être retenues conformément à la littérature. L'équation permettant d'estimer cette grandeur énergétique est donnée comme suit [26, 112, 114] :

$$Ap_{Elec} = P_{Irradiée} \cdot Dur_{Fonctionnement} \cdot Nb_{Jour} \quad (4.16)$$

Dur_{Fonctionnement} : La durée du fonctionnement de l'équipement (heure par jour)

P_{Irradiée} : La puissance irradiée par l'équipement (W).

La quantité totale de la chaleur libérée par l'équipement est déterminée par l'utilisation / l'allumage de celui-ci.

Par ailleurs, nous avons sélectionné une méthode qui consiste à estimer le gain de chaleur lié à l'éclairage par mètre carré dans un bâtiment résidentiel. Le **tableau 4.7** ci-dessous donne les valeurs permises des gains de chaleur par mètre carré liés à l'éclairage selon la norme ASHRAE 90.1-2007 pour une gamme de types d'espace.

Tableau 4.7 : Densités maximales de puissance d'éclairage pour la méthode pièce par pièce, en W/m² [115]

Éclairage	Salle à manger familiale	Préparation des repas	Toilettes	Dressing / Vestiaire / Salle d'essayage...	Couloir / Transition
Gains maximums de chaleur	23	13	10	6	5

Faisant suite à cette norme, il est possible de dresser le **tableau 4.8** qui résume les valeurs équivalentes des apports internes journaliers dus à l'éclairage, aux équipements internes, et aux meubles correspondant à notre cas.

Tableau 4.8 : Densités de chaleur diffusée par éclairage, équipements et meubles internes [116]

Types d'équipements	Durée et puissance consommée en fonction du mode de fonctionnement				Énergie Wh
	Mode 1	Nombre d'heures	Mode 2	Nombre d'heures	
TV LCD+ Démo intégrée	20W	19 h	78W	5 h	1540
Réfrigérateur	La moyenne quotidienne est de 23W				552
Éclairage	75W	21.75 h			1631.3
Ordinateur à écran plat	32W	2 h	186W	4h	808
Autre					1200
Total par jour					5731.3

IV.5.5. Consommation d'énergie due à la charge électrique

Pour estimer la consommation énergétique journalière d'un équipement (kWh), trois paramètres devront être pris en considération [114 - 117] :

- La puissance de l'équipement électrique (W),
- La durée pendant laquelle l'équipement électrique marche (h), et
- Le nombre de jours pendant lesquels l'équipement électrique fonctionne.

$$Con_{Elec} = P_{eq} \cdot Dur_{Util} \cdot Nb_{Jour-Util} \cdot 10^{-3} \quad (4.17)$$

P_{eq} : Puissance électrique de l'équipement (W),

Dur_{Util} : Nombre d'heures d'utilisation (h),

$Nb_{Jour-Util}$: Nombre de jours d'utilisation.

La consommation d'énergie moyenne par jour des appareils électriques est estimée conformément au **tableau 4.9**.

Tableau 4.9 : Consommation énergétique journalière moyenne des appareils électriques [116]

Type d'équipement		Puissance (W) Cadrage des valeurs		Valeurs retenues	Durée d'utilisation par jour (h & min)	Consommation journalière moyenne (Wh)
TV LCD avec démo intégrée	En service	90 à 250		140	5 h	1514.0
	Mode veille	3		/	19 h	
Réfrigérateur d'une capacité de 250 litres		150 à 200		/	En continu	551.0
Éclairage 12 lampes	2: Séjour				6 h	304.5
	1: Chambre 1				3 h	
	1: Chambre 2				4 h	
	1: Hall				1 h	
	1: Cuisine				3 h	
	1: WC		14	/	45 mn	
	1: SDB				2 h	
	1: Couloir				1 h	
	2: Au dessus des 2 portes				45 mn	
	1: Terrasse				15 mn	
Ordinateur à écran plat	En service	70 à 80		75	4 h	306.0
	Mode veille	3		/	2 h	
Chargeur GSM		5		/	3 h	15.0
Fer à repasser		750 à 1100		925	7 min	107.9
aspirateur		650 à 800		720	12 min	144.00
Alarme radio		3 à 6		4.5	En continu	108.00
Rasoir électrique		8 à 12		10	6 min	1
Sèche-cheveux		300 à 600		450	5 min	37.50
Machine à laver		2500 à 3000		2800	30 mn	1400
Total par jour						4488.9

IV.5.6. Apports solaires passifs

L'angle que font les rayons du Soleil avec une surface détermine la densité énergétique que reçoit cette surface. Une surface perpendiculaire à ces rayons intercepte la densité maximale d'énergie. Si on incline la surface à partir de cette position perpendiculaire, son éclairage diminue. A cet effet, la maison doit pouvoir profiter en hiver d'un apport solaire optimum et l'été d'une possibilité de rafraîchissement. La densité du flux solaire dépend fortement de l'orientation du mur façade.

- Les surfaces horizontales et Sud peuvent généralement recevoir le rayonnement solaire pendant toute la journée.
- La surface verticale orientée à l'Est recevra le rayonnement solaire direct au lever du soleil.
- Au contraire, une surface plane orientée vers l'Ouest ne recevra le rayonnement solaire direct qu'après le passage du soleil à son zénith.
- Contrairement à la saison estivale, qui se caractérise par un soleil trop haut dans le ciel, dans la période entre Octobre et Février, le soleil est à une altitude beaucoup plus basse, ce qui signifie que le plus grand rayonnement total sera reçu par la façade Sud.
- Entre Mars et Septembre, la surface horizontale recevra le plus de rayonnement lors d'une journée ensoleillée.

L'énergie incidente sur l'ensemble de l'enveloppe et le gain solaire passif entrant vont être aussi pris en considération conformément aux orientations retenues. Les apports solaires représentent l'énergie provenant directement du soleil via le vitrage, par transmission surfacique des parois chaudes en contact avec l'extérieur. Ils sont calculés comme suit [29, 110] :

$$Ap_{Sol} = \sum_j I_j \sum_n A_{nj} \quad (4.18)$$

Les deux sommes sont effectuées sur toutes les orientations j ,

n : Nombre de surfaces de captation,

I_j : Densité du rayonnement solaire incident sur une surface unitaire d'orientation j (W/m^2).

A_{nj} : Surface réceptrice équivalente ayant une orientation j , elle permet de déterminer la capacité du bâtiment à capter les apports solaires [29, 110].

$$A_{nj} = A F_s S \quad (4.19)$$

A : Surface d'ouverture (m^2).

S : Facteur solaire des fenêtres. Une partie des rayons solaires sera réfléchié et une autre sera absorbée lors de leurs passages à travers le vitrage. La partie restante "appelée facteur solaire", qui peut être exprimée en pourcentage, sera

diffusée à l'intérieur. Le facteur solaire est généralement compris entre 0.63 et 0.75 pour une fenêtre à double vitrage et entre 0.59 et 0.61 pour une fenêtre à triple vitrage. Pour les doubles vitrages peu émissifs, des valeurs comprises entre 0.63 et 0.67 peuvent être retenues. Pour un double vitrage clair à incidence normale, la valeur correspondante peut atteindre 0.75. On peut prévoir que le vitrage simple ayant un facteur solaire de 0.86 – 0.87 sera le moins efficace pour réduire les problèmes de surchauffes [113].

F_s : Facteur de correction d'ombrage, compris entre 0 et 1, représente toute réduction du rayonnement solaire incident entraînant un ombrage permanent de la surface considérée dû :

- À l'ombrage dû à un autre bâtiment,
- À l'ombrage dû à la topographie (collines, arbres, etc.),
- Aux surplombs,
- À l'ombrage issu par autres éléments du même bâtiment,
- À la position de la fenêtre par rapport à la surface extérieure du mur extérieur.

$$F_s = \frac{I_{s,er}}{I_s} = F_h F_0 F_f \quad (4.20)$$

I_{s,er} : Densité du rayonnement solaire total reçu par la surface ouvrante avec un ombrage permanent (W/m²),

I_s : Densité du rayonnement solaire total qui aurait été reçu sans ombre (W/m²),

F_h : Facteur de correction pour l'horizon,

Les effets de l'ombrage de l'horizon (terrain, arbres et autres bâtiments) dépendent de la hauteur à l'horizon, de la latitude, de l'orientation, du climat local et de la saison de chauffage.

IV.6. Nombre de degrés jour (site de Ghardaïa)

Le nombre de degrés-jours est obtenu en multipliant le nombre de jours chauffés par la différence entre la température du confort intérieur et la température extérieure moyenne. Durant une période de climatisation, ce

nombre est obtenu en multipliant le nombre de jours à climatiser par la différence entre la température extérieure moyenne et la température intérieure souhaitée du local considéré [118].

Période froide

$$DJ_{\text{Chauffage}} = \text{Nombre de jours chauffés} \left(T_{\text{Confort}} - T_{\text{Extérieure}} \right) \quad (4.21)$$

Période chaude

$$DJ_{\text{Climatisation}} = \text{Nombre de jours climatisés} \left(T_{\text{Extérieure}} - T_{\text{Confort}} \right) \quad (4.22)$$

Le **tableau 4.10** donne en chiffres le nombre de jours à chauffer, confortables et à climatiser durant toute l'année. Il est à noter que la température du confort retenue est comprise entre 21 et 26 °C.

Tableau 4.10 : Nombre de degrés jours et nombre de jours et d'heures à chauffer, confortables et à climatiser

Mois	Température ambiante extérieure (°C)			Nombre de jours et d'heures			Nombre de degrés jour de	
	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale	froids	confortables	chauds	chauffage	refroidissement
Janvier	03.00	11.84	24.00	30j 08h	16h	/	284.60	/
Février	02.70	12.31	24.00	27j 09h	15h	/	244.09	/
Mars	03.20	17.67	31.00	21j 14h	07j 12h	01j 22h	132.09	05.27
Avril	07.00	21.93	38.00	13j 3h	09j 05h	07j 16h	61.87	29.07
Mai	14.00	26.43	39.00	06j 1h	09j 14h	15j 09h	16.90	81.67
Juin	22.00	31.64	43.00	/	05j 03h	24j 21h	/	177.72
Juillet	24.00	35.19	45.00	/	01j 01h	29j 23h	/	285.55
Août	21.00	33.95	45.60	/	01j 10h	29j 14h	/	248.14
Septembre	15.50	28.481	40.20	02j 9h	08j 08h	19j 07h	4.67	110.22
Octobre	13.80	23.61	37.00	09j 17h	12j 21h	8j 10h	25.38	29.80
Novembre	06.30	16.28	28.60	24j 16h	05j 02h	06h	150.15	00.48
Décembre	03.60	11.99	21.00	30j 23h	01h	/	279.20	/
Année	02.70	22.61	45.60	166j 4h	61j 12h	137j 08h	1198.97	967.91

IV.7. Cas d'études & Description de la bâtisse

Le logement est d'une superficie totale de 126.69 m² et d'un volume de 380.07 m³. Cette surface comprend un hall d'entrée, un salon, une cuisine, une salle de bain, une toilette, deux chambres et une cage d'escalier si cette bâtisse est une maison plain-pied (**figure 4.2**). La maison n'est pas munie d'un système de

conditionnement d'air (climatisation et chauffage) ou d'un système de ventilation mécanique. L'électricité est la principale source d'énergie fournie à cette construction. La hauteur sous plafond est de 3 m.

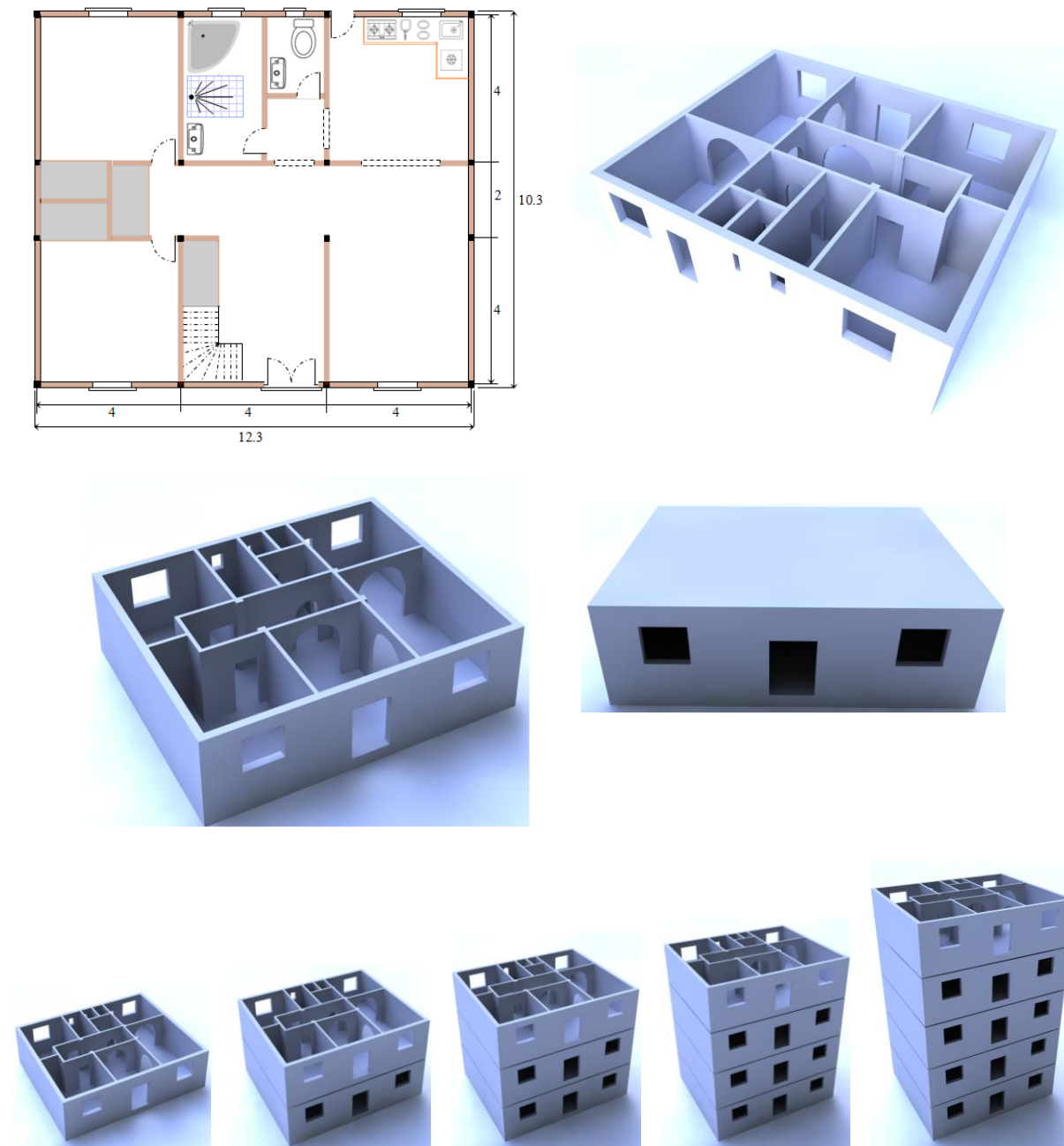
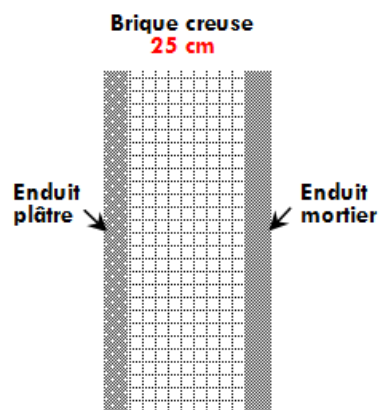


Figure 4.2 : Plans descriptifs, Modélisation 2D et 3D des bâtiments, maison plain-pied et bâtiments à plusieurs étages

Les configurations de l'enveloppe et la composition de la maçonnerie sont décrites conformément à la **figure 4.3**.

Mur de façade



Plancher haut



Plancher bas

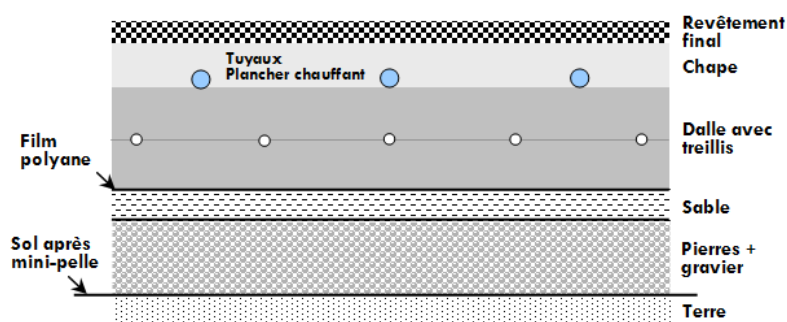


Figure 4.3 : Composition de maçonnerie et configuration d'éléments structurels

Les coefficients de transmission U des parois de l'enveloppe sont donnés par le **tableau 4.11**.

Tableau 4.11 : Coefficient de transmission thermique U des éléments de construction ($W/m^2 K$)

Éléments de construction	Maison unifamiliale
Murs	1.44
Sols	1.36
Toits	2.32
Fenêtres à simple vitrage	5.00
Porte en bois y compris le cadre	5.80

IV.8. Analyse comparative des besoins énergétiques en fonction des hauteurs

Cette étude se consacre à la comparaison des cas mentionnés en effectuant un diagnostic approfondi et une analyse des charges énergétiques. La spécificité de ce travail est liée à certaines conditions sévères. Outre, les informations précédemment indiquées et les autres facteurs identifiant ainsi le scénario retenu sont les suivants :

- Les températures proposées du confort thermique se situent entre 21 et 26 °C.
- Le nombre d'occupants dans ce logement est de 5.
- La fréquentation moyenne des personnes est environ 15 heures par jour par occupant.
- La chaleur irradiée moyenne est de 150 W par occupant.
- La surface vitrée représente environ 95 % de la surface totale de la fenêtre.
- Le facteur d'ombrage est fixé à 0.7.
- Le facteur solaire de la baie vitrée est fixé à 0.8.

Le **tableau** récapitulatif **4.12** ci-dessous résume les paramètres énergétiques communs à tous les cas étudiés.

Tableau 4.12 : Besoins énergétiques (kWh) en eau chaude sanitaire, Consommation d'énergie électrique et Énergie générée par les gains gratuits internes et passifs

	Température (°C)			Gains gratuits			Con _{ECS}	Con _{Elec}
	De l'air extérieur	Du confort	De l'eau froide	Gains solaires Ap _{Sol}	Gains internes Q _{occup}	Gains internes Q _{Eic}		
Janvier	10.10	21.00	07.00	394.57	348.75	177.67	387.50	139.16
Février	12.30	21.00	09.00	338.81	315.00	160.48	333.72	125.69
Mars	15.30	21.00	11.50	323.43	348.75	177.67	346.95	139.16
Avril	20.00	21.00	13.00	0	337.50	171.94	322.68	134.67
Mai	24.50	24.50	16.00	0	348.75	177.67	306.40	139.16
Juin	29.70	26.00	19.00	0	337.50	171.94	270.35	134.67
Juillet	33.40	26.00	21.00	0	348.75	177.67	261.34	139.16
Août	32.70	26.00	20.00	0	348.75	177.67	270.35	139.16
Septembre	27.80	26.00	17.50	0	337.50	171.94	283.43	134.67
Octobre	20.70	21.00	15.00	0	348.75	177.67	315.41	139.16
Novembre	14.40	21.00	11.00	354.19	337.50	171.94	340.12	134.67
Décembre	10.70	21.00	08.00	348.36	348.75	177.67	378.49	139.16
Annuelle							3816.74	1638.49

IV.8.1. Sans isolation thermique

La démarche repose sur une étude approfondie de la différence entre plusieurs maisons familiales identiques. Cette similitude concerne l'ensemble des caractéristiques: propriétés thermo-physiques de l'enveloppe, dimensions des éléments structuraux, modes de vie des occupants et leurs températures de confort souhaitées. La seule différence réside dans son implantation dans le bâtiment. Les résultats fournis seront exprimés en kWh/m²/an. Ces valeurs représentent les besoins énergétiques annuels moyens d'une maison familiale située dans l'immeuble de logements.

Le programme de calcul conçu à cet effet nous donne aussi la possibilité de calculer les besoins énergétiques d'une maison plain-pied (exposée à tous les niveaux). Il est également envisageable d'étudier des bâtiments à plusieurs étages et des maisons familiales.

Le **tableau 4.13** donne les résultats obtenus par calcul des besoins énergétiques mensuels et annuels des différents cas. À cet égard, une comparaison peut être faite entre deux maisons unifamiliales: une plain pied et l'autre dans un immeuble multifamilial.

Tableau 4.13 : Besoins énergétiques mensuels et annuels d'une maison plain-pied comparés aux besoins énergétiques mensuels et annuels moyens d'une maison située dans un immeuble de logements

Nombre d'étages Nombre de niveaux + 1	Rez-de- chaussée	R+1 2	R+2 3	R+3 4	R+4 5	R+5 6	R+6 7	R+7 8	R+8 9	R+9 10	R+10 11	R+11 12	R+12 13
Indice de compacité S/V	0.6901	0.5234	0.4679	0.4401	0.4234	0.4123	0.4044	0.3984	0.3938	0.3901	0.3871	0.3846	0.3824
Janvier	7404	10277	13150	16022	18895	21767	24640	27512	30385	33258	36130	39003	41875
Février	5258	7250	9242	11234	13226	15218	17210	19202	21193	23185	25177	27169	29161
Mars	3694	5025	6355	7685	9015	10346	11676	13006	14337	15667	16997	18327	19658
Avril	632	964	1646	2327	3008	3690	4371	5052	5734	6415	7097	7778	8459
Mai	972	1944	2916	3888	4860	5832	6804	7776	8748	9720	10692	11664	12636
Juin	3473	5449	7424	9399	11374	13349	15324	17299	19274	21250	23225	25200	27175
Juillet	6285	9417	12549	15682	18814	21946	25078	28211	31343	34475	37607	40740	43872
Août	5774	8705	11635	14566	17496	20426	23357	26287	29218	32148	35078	38009	40939
Septembre	2165	3607	5049	6491	7933	9375	10816	12258	13700	15142	16584	18026	19468
Octobre	769	1662	2554	3447	4340	5232	6125	7018	7910	8803	9695	10588	11481
Novembre	4163	5676	7188	8700	10212	11724	13236	14749	16261	17773	19285	20797	22309
Décembre	7009	9736	12463	15190	17917	20644	23371	26098	28825	31552	34279	37006	39733
Total en kWh x 10 /an	4760	6971	9217	11463	13709	15955	18201	20447	22693	24939	27185	29431	31677
Total en kWh/m ² /an	375.72	275.12	242.51	226.20	216.42	209.89	205.23	201.74	199.02	196.85	195.07	193.59	192.33

Afin de réaliser une étude comparative cohérente, la méthode se référerait aux différents bâtiments représentés sur la **figure 4.2**, en remontant jusqu'au douzième étage. La **figure 4.4** donne une idée sur la consommation énergétique moyenne d'une maison dans l'immeuble de logements pour maintenir la plage du confort souhaité.

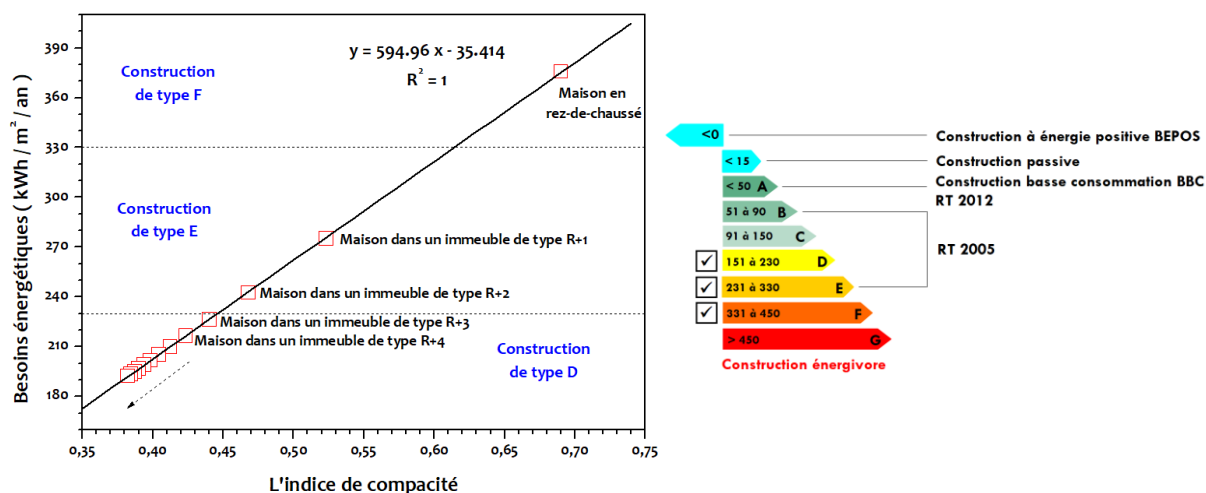


Figure 4.4 : Besoins énergétiques en fonction de l'indice de compacité classique et la labellisation des maisons unifamiliales

Les besoins énergétiques varient linéairement en fonction de l'indice de compacité classique. L'équation de regression linéaire correspondante est donnée dans la figure. Le coefficient de détermination est en adéquation parfaite avec les données calculées.

La différence entre les charges énergétiques totales est parfois radicale; ces bâtiments rejoignent les constructions d'une étiquette énergétique de type F, E ou D. Ces résultats indiquent qu'il faut privilégier les grands bâtiments pour rationaliser la consommation énergétique. En plus, la convergence des valeurs calculées (en élevant le nombre d'étages de l'immeuble, c'est-à-dire en améliorant la compacité du bâtiment et en diminuant l'indice de compacité) vers des valeurs plus inférieures a été très rapide au début, mais au-delà d'un certain niveau, la vitesse de cette convergence devient moins intéressante. Pour être plus précis, nous traçons la variation des économies énergétiques engendrées en fonction du nombre d'étages (**figure 4.5**).

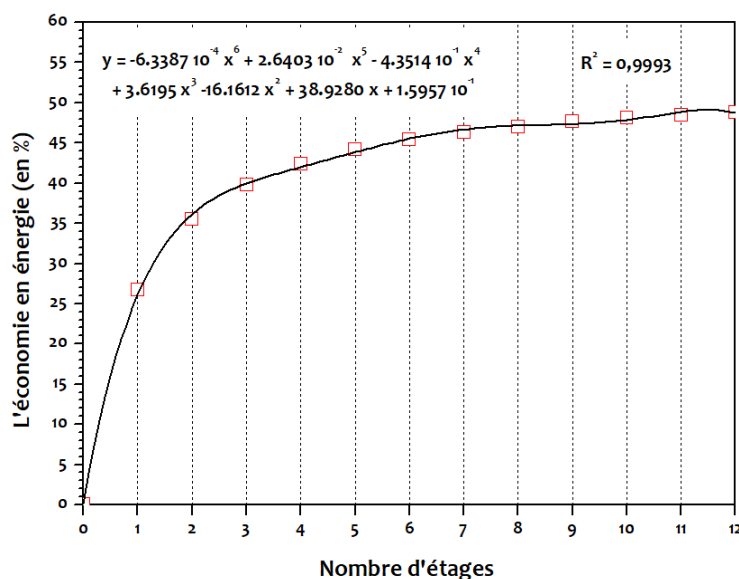


Figure 4.5 : Économies d'énergie annuelles en fonction du nombre d'étages, la maison unifamiliale plein pied est retenue comme référence

En comparant les valeurs mentionnées sur cette figure, il a été constaté qu'une économie d'énergie d'exactly 26.77% peut être obtenue simplement en transformant une maison individuelle plein pied en un bâtiment à un seul étage. En passant à un bâtiment à quatre étages, c'est-à-dire un immeuble de cinq logements, nous obtenons des économies plus substantielles qui dépassent les 40% mais avec une stabilité des valeurs. Cette dernière est plus significative en allant plus vers des étages plus supérieurs. Cette variation est traduite par un modèle de régression polynomiale d'ordre 6 qui prouve une très bonne qualité de prédiction.

IV.8.2. Avec isolation thermique

Le même travail a été mené avec l'intégration extérieure d'un isolant thermique couvrant ainsi toute la surface de l'enveloppe. Le choix a été fixé sur le polystereine défini par une conductivité thermique de 0.04 W/mK et une épaisseur de 10cm. Le **tableau 4.14** résume l'ensemble des résultats obtenus concernant les besoins énergétiques mensuels et annuels dans différents cas.

La **figure 4.6** donne une description quantitative de la consommation énergétique moyenne d'une maison dans l'immeuble de logements comparée avec celle d'une maison plain-pied qui nous permettent de maintenir et garantir une température du confort comprise entre 21 et 26°C.

Tableau 4.14 : Besoins énergétiques mensuels et annuels d'une maison plain-pied comparés aux besoins énergétiques mensuels et annuels moyens d'une maison située dans un immeuble de logements. Intégration d'un isolant thermique dans l'enveloppe

Nombre d'étages Nombre de niveaux + 1	Rez-de-chaussée	R+1	R+2	R+3	R+4	R+5	R+6	R+7	R+8	R+9	R+10	R+11	R+12	
Indice de compacité S/V		0.6901	0.5234	0.4679	0.4401	0.4234	0.4123	0.4044	0.3984	0.3938	0.3901	0.3871	0.3846	0.3824
Janvier	2621	3614	4607	5600	6593	7586	8579	9572	10565	11558	12551	13544	14537	
Février	1812	2451	3091	3730	4369	5008	5648	6287	6926	7565	8205	8844	9483	
Mars	1197	1549	1900	2252	2603	2954	3500	04120	04741	05362	05983	06603	07224	
Avril	0706	1553	2400	3247	4094	4941	5788	06635	7482	08329	09175	10022	10869	
Mai	0972	1944	2916	3888	4860	5832	6804	07776	8748	09720	10692	11664	12636	
Juin	1906	3267	4628	5990	7351	8712	10073	11434	12796	14157	15518	16879	18241	
Juillet	3041	4901	6761	8620	10480	12340	14200	16060	17919	19779	21639	23499	25358	
Août	2838	4617	6396	8175	9954	11733	13512	15291	17070	18849	20627	22406	24185	
Septembre	1403	2546	3690	4834	5978	7121	8265	9409	10553	11696	12840	13984	15128	
Octobre	0900	1844	2788	3732	4676	5620	6564	7508	8452	09396	10339	11283	12227	
Novembre	1364	1779	2194	2608	3023	3437	3852	4266	4681	05096	05510	05925	06339	
Décembre	2490	3442	4394	5345	6297	7249	8200	9152	10104	11055	12007	12958	13910	
Total en kWh x 10 /an		2125	3351	4576	5802	7028	8253	9498	10751	12004	13256	14509	15761	17014
Total en kWh/m ² /an		167.75	132.24	120.41	114.49	110.94	108.58	107.10	106.07	105.27	104.63	104.11	103.67	103.30

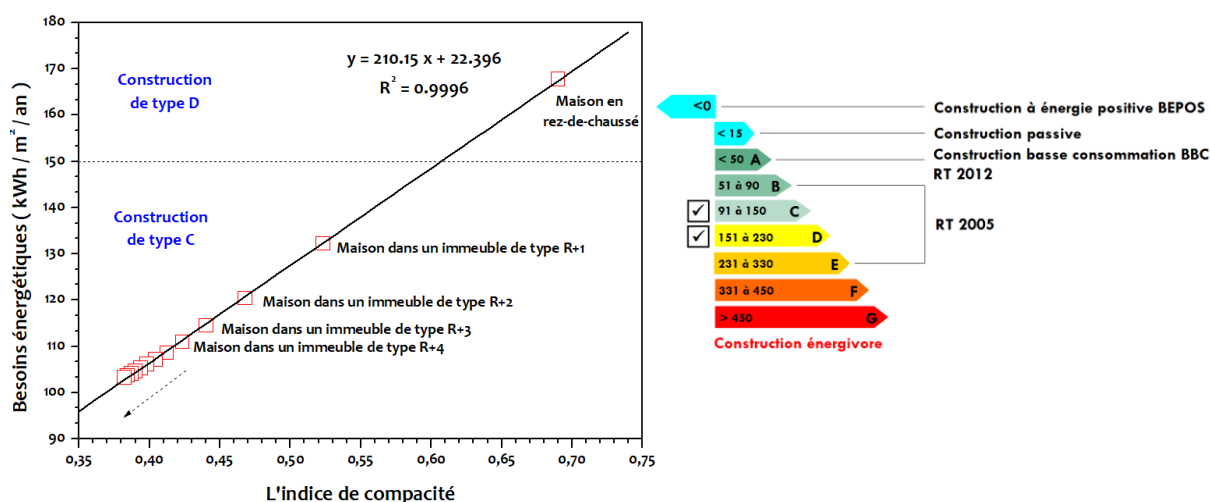


Figure 4.6 : Besoins énergétiques en fonction de l'indice de compacité classique et la labellisation des maisons unifamiliales. Cas d'une enveloppe isolée par l'extérieur

Les résultats obtenus révèlent généralement les mêmes remarques (**figure 4.7**). L'équation de régression montre que la relation entre les besoins énergétiques et l'indice de compacité est également linéaire. A l'exception du premier cas, correspondant à maison unifamiliale plain pied, les autres logements peuvent être considérés comme étant des constructions ayant une étiquette énergétique

de type C. Il est encore confirmé qu'il est essentiel de privilégier les grandes constructions immobilières.

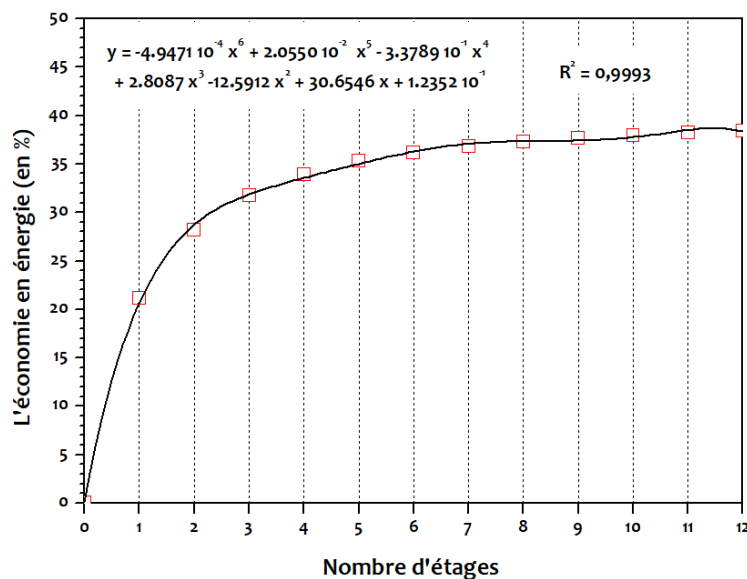


Figure 4.7 : Économies d'énergie annuelles en fonction du nombre d'étages, la maison unifamiliale plein pied est retenue comme référence. Cas d'une enveloppe isolée par l'extérieur

La même remarque est soulevée à propos la convergence des valeurs obtenues. À l'issue de ces résultats, un gain énergétique d'exactly 21.17% peut être économisé en substituant une maison individuelle par une autre dans une construction à un étage. Cette valeur est moins importante par rapport à celle du premier cas mais elle est tout de même intéressante en terme d'économie d'énergie. Pour une maison dans un immeuble à trois étages, la diminution de la consommation énergétique dépasse les 35 % mais elle reste inférieure à 38.5 %. La variation d'économie en énergie est modélisée par un modèle polynomial de régression précis d'ordre 6.

Il est possible d'étudier aussi la relation entre l'isolation thermique et la compacité. C'est pourquoi, il nous apparaît indispensable de tracer l'évolution de l'économie en énergie due à l'isolation thermique en fonction de l'indice de compacité (**figure 4.8**). L'avantage de l'isolation thermique par l'extérieur est d'augmenter significativement les performances thermiques globales du bâtiment, ce qui favorise une réduction significative des coûts de chauffage et de refroidissement et améliore le confort thermique. Cet avantage (atout positif)

diminue progressivement en améliorant la compacité du bâtiment (en ajoutant des étages supplémentaires). Cet aspect peut être justifié par la forme de la courbe non linéaire décrite sur la **figure 4.8**.

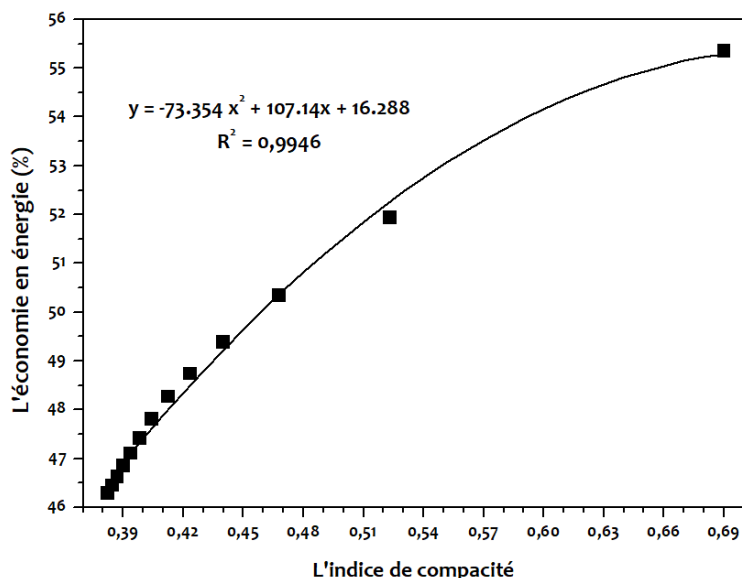


Figure 4.8 : Diminution des besoins énergétiques due à l'isolation thermique en fonction de l'indice de compacité

Cependant, si le logement est une maison plain-pied à faible compacité, la baisse est conséquente, elle est estimée à 55.35% contre 51.93% pour une maison dans un bâtiment à deux étages, soit une différence de 3.42 %. Cet écart est rapidement amorti ; il passe de 0.47% d'un logement dans un immeuble de quatre étages à un autre dans un immeuble de cinq étages. De même, il est de 0.16% d'un logement dans un immeuble de onze étages à un autre dans un immeuble de douze étages.

IV.8.3. Retour sur investissement

Le retour sur investissement fait partie des indicateurs les plus importants. C'est un rapport financier qui mesure le montant d'argent gagné ou perdu à l'issue d'un système, un concept énergétique ou d'une technique architecturale intégrée par rapport à la somme initialement dépensée dans un investissement. La méthode consiste dans un premier temps à estimer le coût total résultant de la procédure d'isolation en additionnant le prix de l'isolant thermique (polystyrène),

le coût de l'ensemble des travaux d'isolation et la facture énergétique annuelle initiale. Pour ce faire, nous considérons que :

- Le prix retenu d'une plaque de polystyrène de 5 cm d'épaisseur et 2m² de surface est fixé à 600 DZD.
- Les dépenses financières dues aux travaux d'isolation thermique sont estimées à 3000 DZD/m². Elles concernent le nettoyage à sec des façades par brossage manuel avec une brosse tendre en fibres végétales. Le degré de complexité est considéré moyen, l'état des revêtements est bon et aucun personnel spécialisé n'est nécessaire pour son application. Les dépenses concernent aussi la pose par l'extérieur des façades/toitures terrasses et sur les dallages en contact avec le terrain.
- Le coût réel du kilowattheure s'élève en moyenne à 10.54 DZD

Le temps de retour sur investissement, exprimée par le nombre de mois, est par définition le rapport entre le surcoût (les frais totales de l'isolation + la facture après l'isolation - la facture initiale sans isolation thermique) multiplié par 12 et le gain financier annuel défini par la différence entre la facture initiale et la nouvelle facture (après l'isolation thermique). La **figure 4.9** met l'accent sur l'efficacité de ce concept passif et son impact financier sur le temps de retour sur investissement.

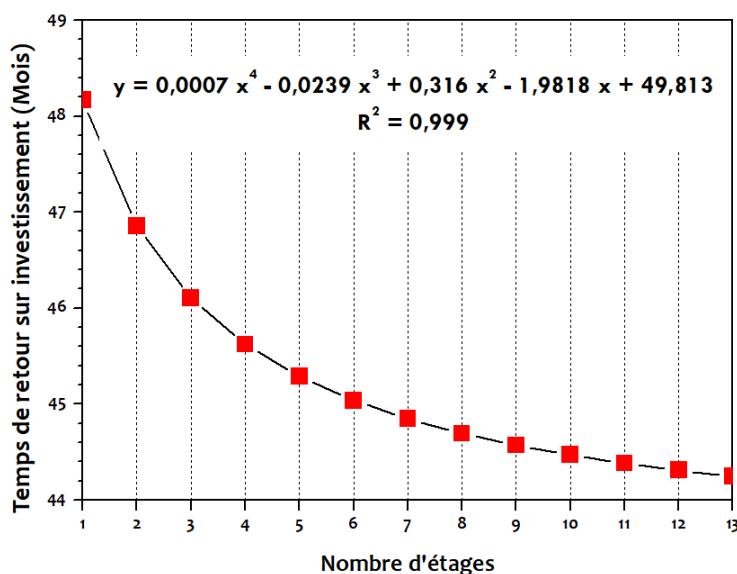


Figure 4.9: Variation du temps de retour sur investissement en fonction du nombre d'étages

La figure indique que le temps de retour sur investissement diminue très légèrement en passant à un immeuble avec un étage supérieur. A cet effet, il convient de noter qu'il faudra 4 ans et 5 jours pour récupérer le montant dépensé pour une couche d'isolation de 10 cm dans le cas d'une maison individuelle. Pour un immeuble à un étage, il est possible de réduire ce délai à seulement 3 ans, 10 mois et 27 jours. Si l'immeuble est à deux étages, le temps de retour sur investissement sera réduit de 22 jours supplémentaires. Pour les étages supérieurs, il sera possible d'obtenir des économies dans l'ensemble invariables et légèrement importantes. Le temps de retour sur investissement est compris entre 49 mois et 44 mois.

IV.9. L'influence de la compacité sur les besoins de chauffage et de refroidissement

Faisant suite aux résultats précédents, nous avons montré que la raison de la forte consommation d'énergie est due principalement à l'enveloppe du bâtiment. Pour faire face, cette partie est consacrée au calcul des besoins énergétiques mensuels et annuels dus à l'enveloppe (de chauffage et refroidissement) correspondant cette fois-ci à l'année 2015. La méthode se réfère à la même approche d'évaluation des performances énergétiques de chauffage et de refroidissement pour cet espace bureau sous l'effet des conditions climatiques de Ghardaïa. La température du confort retenue est celle donnée par l'équation suivante :

$$T_{\text{Confort}} = 17.8 + 0.31 T_{\text{Extérieure}} \quad (4.23)$$

À l'issue de ces données, nous pouvons présenter le **tableau 4.15** qui donne les valeurs calculées des degrés-jours en saison de chauffage et/ou de refroidissement. Les températures de l'air ambiant extérieur ont été relevées de la station météo de l'URAER.

Les besoins énergétiques dus à l'enveloppe du bâtiment d'un bureau de dimensions 4.8 x 3.2 x 3.6 m³ (3.6m la hauteur) sont représentés par les histogrammes affichés à la **figure 4.10**.

Tableau 4.15: Nombres de degrés-jours calculés déduits de l'équation du confort 4.23 et correspondants à l'année 2015

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
T_{Ext}	10.72	11.15	16.50	23.00	28.19	30.62	33.41	33.59	29.04	23.11	16.45	12.47
T_{Conf}	21.12	21.26	22.91	24.93	26.54	27.29	28.16	28.21	26.50	24.96	22.90	21.67
D_j	322.58	293.16	198.93	58.04	-51.26	-99.90	-162.83	-166.76	-67.13	57.48	193.42	284.98

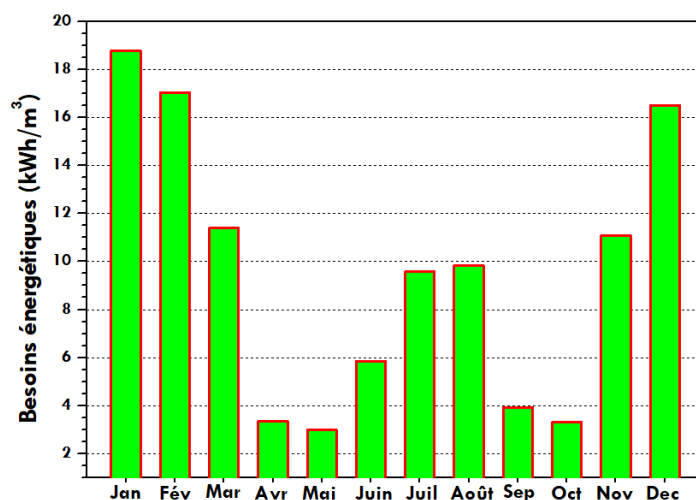


Figure 4.10 : Besoins énergétiques mensuels dus à l'enveloppe d'un local bureau de type plain-pied d'une hauteur de 3.6m

Cette étude nous permis de déduire qu'il faut exactement $113.62 \text{ kWh/m}^3/\text{an}$ pour garantir un confort intérieur permanent réglé à une température T_{Conf} , équivalent à une consommation énergétique annuelle de 6282.73 kWh/an .

L'énergie requise durant le mois de Janvier attein son niveau maximum, elle présente 16.52% du totale. En été, le mois d'Août est le plus énergivore; la consommation d'énergie couvre 8.64% par rapport à l'annuelle. Le taux de consommation en intersaison (Avril et Octobre) ne présente que 5.85% des dépenses annuelles. Les besoins énergétiques correspondants à la période de chauffage représentent 65.83% des besoins énergétiques totaux pour cette consigne de température.

Les principales raisons de cette consommation élevée sont sans doute liées premièrement à l'absence d'une isolation thermique efficace et deuxiement au mauvaise compacité. La **figure 4.11** donne une idée sur les besoins énergétiques mensuels de ce bureau d'un volume de $4.8 \times 3.2 \times h \text{ m}^3$, avec h la hauteur correspondante. Nous quantifions ces besoins sous forme d'une courbe définie

par une fonction polynomiale qui est un modèle de prédiction suffisamment précis.

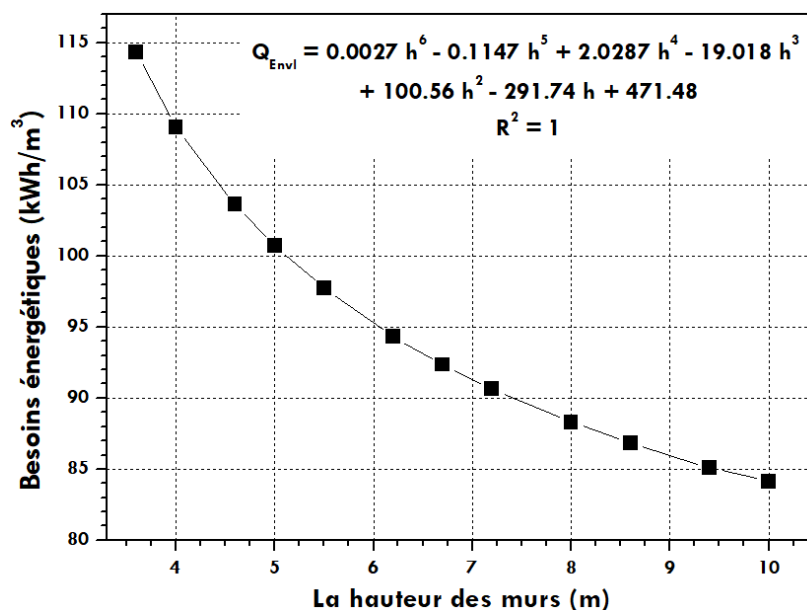


Figure 4.11: Besoins énergétiques dus à l'enveloppe en fonction de la hauteur des murs

Les besoins énergétiques totaux dus à l'enveloppe pour ce local sont inversement proportionnels à la hauteur des murs. Ces résultats signifient que l'amélioration de la compacité conduit à une minimisation des besoins énergétiques dus à l'enveloppe. En passant d'un mur de 3.6m d'hauteur à un mur de 4.6m, c'est-à-dire, en diminuant le facteur de compacité de ce bureau de 1.35 à 1.26, on peut économiser 8.81% des besoins énergétiques totaux dus à l'enveloppe sans compter les besoins engendrés par les gains de chaleur liés à l'éclairage, aux équipements électriques et aux occupants.

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre, l'effet du concept de la hauteur sur les besoins énergétiques a été rigoureusement examiné. La variation des surfaces déperditives en contact avec les milieux extérieurs a été prise en considération. L'indice de compacité classique défini comme étant le rapport entre la surface de l'enveloppe et le volume intérieur du bâtiment a été retenu pour traiter cette problématique.

Conformément aux résultats obtenus, la compacité peut contribuer à l'amélioration du confort thermique et à la minimisation des besoins énergétiques. Le mode de contact et la hauteur du bâtiment influencent la demande énergétique du bâtiment. Le fonctionnement des modèles de prédiction fiables et leur relative simplicité permettent de les utiliser comme outil d'estimation des différentes grandeurs physiques (besoins énergétiques, économies d'énergie et temps de retour sur investissement). Une compacité optimale se traduit par des déperditions thermiques minimales mais l'isolation est la première phase d'une conception architecturale passive.

En absence de toute isolation, une économie d'énergie d'exactly 26.77% est obtenue en passant d'une maison individuelle plain-pied à une maison dans un immeuble à un étage. Ces économies sont plus substantielles, c'est à dire, plus de 40% si l'immeuble est à quatre étage et plus. Dans le cas d'une couche isolante de 10 cm d'épaisseur, un gain énergétique moyen de 21.17% peut être économisé en passant d'une maison individuelle plain-pied à une maison dans un immeuble à un étage. L'économie en besoins énergétiques dépasse les 35% mais elle reste inférieure à 38.5 % pour les bâtiments de plus de trois étages. Le temps de retour sur investissement est compris entre 49 mois et 44 mois, et il est inversement proportionnel au nombre d'étages de l'immeuble.

Une compacité optimale permet de minimiser les besoins énergétiques des bâtiments, ce qui réduit systématiquement le niveau d'isolation thermique requis. Il faut donc privilégier les grands bâtiments en vue de rationaliser la consommation énergétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le recours à l'application des stratégies de contrôle passives dans le bâtiment constitue la meilleure démarche pour trouver des solutions permettant de maintenir un confort acceptable et de réduire la facture énergétique. L'objectif de cette thèse est d'étudier l'une de ces stratégies à savoir la compacité. Nous avons abordé plus précisément l'influence de la hauteur des façades d'une construction sur sa performance énergétique, sur le confort des occupants et sur sa consommation énergétique. Les surfaces déprédatives ont été rigoureusement prises en considération.

Conformément aux résultats obtenus, le compromis forme/compacité mérite une attention toute particulière. La compacité n'est pas le facteur d'économies d'énergie le plus important, mais c'est un paramètre qui permet de réduire les besoins d'énergie tout en réduisant les coûts d'investissement. La compacité est, en un mot, un prérequis à la création de constructions durables. Aggrandir la surface habitable conduit à une amélioration de la compacité parce que la surface des parois augmente généralement moins vite que la surface habitable. L'optimisation de l'intérieur offre des avantages intéressants et constitue peu de ponts thermiques. D'ailleurs, regrouper des ménages sur un même territoire veut dire limiter le coût de la construction et économiser les ressources, donc c'est un atout majeur pour l'abordabilité.

La première particularité de ce travail réside en la modélisation du confort thermique, qui nécessite un calcul couplé et simultané du bilan thermique (sensible et latent) pour évaluer leur température et humidité et calculer les transferts d'air entre zones. Pour établir ce modèle thermique, la conduction, la convection et le rayonnement et leur couplage, sont traités à l'aide d'une analyse nodale. Le calcul et la prédiction de l'humidité et la température de l'air sont une phase essentielle et utile pour une meilleure compréhension des paramètres du confort. Elle permet d'anticiper les solutions qui nous conduisent à des performances

satisfaisantes de l'enveloppe et d'avoir une évaluation adéquate du degré de confort.

La compacité peut légèrement améliorer le confort thermique et réguler les fluctuations des températures intérieures. Cependant, il est plus souhaitable de chercher un autre indicateur géométrique convenable et plus fiable pour prendre en considération la variation de la taille des façades dans le cas d'un immeuble mitoyen avec façades exposées. Une compacité optimale se traduit par des déperditions thermiques minimales mais l'isolation est la première phase d'une conception architecturale passive.

De point de vue quantitatif, une économie énergétique de 26.77% peut être aboutie en passant d'une maison individuelle plain-pied à une maison dans un immeuble à un étage. Ces économies deviendront plus substantielles, supérieure à 40%, si l'immeuble est à quatre étage et plus. Par ailleurs, une austérité énergétique et financière de 21.17% peut être aboutie en passant d'un logement du rez-de-chaussée thermiquement bien isolé (isolation de 10cm) à un logement de mêmes caractéristiques dans un bâtiment à un étage. Le temps de retour sur investissement, faisant suite au concept d'isolation, est compris entre 44 et 49 mois, et il est inversement proportionnel au nombre d'étages de l'immeuble.

Le fonctionnement de modèles de prédiction fiables, leur utilité et leur relative simplicité permettent de les utiliser comme outil d'estimation des différentes grandeurs physiques (besoins énergétiques, économies d'énergie et temps de retour sur investissement).

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 combinées avec une bonne compacité. 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.

Références

1. Les enjeux et les défis de la transition énergétique en Algérie. Le site web <https://www.algerie-eco.com/2017/03/21/enjeux-defis-de-transition-energetique-algerie/>, publication consultée en Octobre 2023.
2. A. Auliciems, S. Szokolay, Thermal comfort, 2nd Revised Edition, Brisbane, PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland, 2007.
3. M.K.A. Senin, M.A.O. Mydin, Significance of thermal comfort in buildings and its relation to the building occupants, *European Journal of Technology and Design*, 2013, 1(1): 54-63.
4. P.O. Fanger's, Conditions for thermal comfort, a review, Building Research Establishment Report 2, Thermal comfort and moderate heat stress, Proceedings of the CIB Commission W45 (Human requirements) Symposium held at the Building Research station, 13-15 September 1972, published, 1973.
5. W. Liping, W.N. Hien, Applying natural ventilation for thermal comfort in residential buildings in Singapore, *Architectural Science Review*, 2007, 50(3), 145-157.
6. J.F Nicol, Thermal comfort: A handbook for field studies towards an adaptive model, University of East London, UK, 1993.
7. K.C. Parsons, Human thermal environments, 2nd Edition, 258–92, Taylor & Francis, London, 1-143, 2003.
8. T. Randall, M. Fordham, Partners, Environmental design, an introduction for architects and engineers, 134-139, 2005.
9. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers ASHRAE, Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Standard 55-1992, Atlanta, GA: ASHRAE, 1992.
10. P.O. Fanger, Thermal comfort, Technical University of Denmark, Laboratory of Heating and Air Conditioning, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
11. O.H. Koenigsberger, T.G. Ingersoll, A. Mayhew, S.V. Szokolay, Manual of tropical housing and building climatic design, Universities Press (India), 1974.
12. C. Huizenga, S. Abbaszadeh, L. Zagreus, E. Arens, Air quality and thermal comfort in office buildings, UC Berkeley, Indoor Environmental Quality IEQ 67-73, 2006.

13. H. Rosenlund, Climatic design of buildings using passive techniques, Publisher: Lund university, 10 (1): 1-12, 2000.
14. B. Griefahn, C. Kunemund, The effects of gender, age, and fatigue on susceptibility to draft discomfort, *Journal of Thermal Biology*, 2001, 26(4-5), 395-400.
15. Y. Yao, Z. Lian, W. Liu, Q. Shen, Experimental study on skin temperature and thermal comfort of the human body in a recumbent posture under uniform thermal environments, *Indoor Built Environ*, 2007, 16(6), 505-518.
16. S. I. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki, M. Konishi, Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy and Buildings*, 34(6), 2002, 637-646.
17. K.C. Parsons, Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance, Taylor & Francis, London, New York, 527, 2003.
18. K. Cena, J.A. Clark, Bioengineering, thermal physiology and comfort, Elsevier, 1-34, 1981.
19. J.F. Nicol, M.A. Humphreys, Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Buildings*, 34(6), 2002, 563-572.
20. R.W. Muncey, Heat transfer calculations for buildings, 1-128, London: Applied Science Publishers, 1979.
21. B.W. Olesen, G.S. Brager, A better way to predict comfort: The new ASHRAE Standard 55-2004, UC Berkeley, Indoor Environmental Quality (IEQ), Powered by the California Digital Library, University of California, 2004.
22. A Auliciems, Towards a psycho-physiological model of thermal perception, *International journal of biometeorology*, 1981, 25, 109-122.
23. D. Medjelekh, Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment, Cas de l'habitation de l'époque coloniale à Guelma, Magister en Architecture bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2006.
24. C. Batier, Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen : d'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales, Doctorat en Mécanique, Génie Civil et Architecture, Université de Montpellier, 2016.

25. S. Bendara, Stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-aéraulique des bâtiments multi-zones, Doctorat Es Sciences en Physique Énergétique, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2019.
26. A. Bensaha, Exploitation d'énergies renouvelables pour la conception d'un habitat durable dans un site isolé en zone semi-aride en Algérie, Thèse de Doctorat D-LMD, Matériaux et Énergies Renouvelables, Université Amar Telidji, Laghouat, 2021.
27. S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement de quelques dispositifs solaires, Thèse de Doctorat en Physique, Université Abou-Bekr Belkaïd, Tlemcen, Juin 2009.
28. A. Bensaha, F. Benkouider, S.M.A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire en ciel clair par des modèles empiriques : Application au site de Ghardaïa (Algérie), 1st International Seminar on the Apport of the Simulation in Technological Innovation, Ghardaïa, Mars, 7-8, 2017.
29. A. Bensaha, S.M.A. Bekkouche, F. Benkouider, M.R. Yaiche, N. Benamrane, A. Abdellaoui, Concepts du solaire passif : Orientation des baises vitrées et gains solaires, Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, 2018, 7(1), 01-07.
30. M.A.C. Haddam, Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat, Thèse de Doctorat Es Sciences en Physiques Électronique et Modélisation, Université de Tlemcen, Mars 2015.
31. D.C. Karnopp, R.C. Rosenberg, Introduction to physical system dynamics, McGraw-Hill, New-York, 1983.
32. D.C. Karnopp, D.L. Margolis, R.C. Rosenberg, System dynamics: a unified approach, Wiley Interscience, second edition, 1990.
33. D.C. Karnopp, D.L. Margolis, R.C. Rosenberg, System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems, Wiley Interscience, fourth edition, 2006.
34. A. Dhalluin, Étude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire, Doctorat en Génie Civil, Université de La Rochelle, France, Juin 2012.
35. M. Stanislas N. B. BROU, Modélisation et commande d'un système de cogénération utilisant des énergies renouvelables pour le bâtiment, Thèse de Doctorat en Sciences Mécaniques et Énergétiques, Matériaux et Géosciences, Université Paris-Saclay, France, Octobre 2015.
36. M. Woloszyn, Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones, proposition d'une stratégie de résolution du système couplé, Thèse de Doctorat en Génie Civil, Lyon, France, INSA, 1999.

37. F.Z. Chafi, Développement d'un modèle zonal pour la simulation thermo-aéraulique des bâtiments multizones, Doctorat en Génie Mécanique, Université du Québec, Canada, Mars 2010.
38. A. Merabtine, Modélisation Bond Graphs en vue de l'efficacité énergétique du bâtiment, Doctorat en Génie des Procédés et des Produits, Université de Lorraine, Nancy, France, Novembre 2012.
39. A. Bensenouci, Étude de l'efficacité énergétique d'un bâtiment d'habitation à l'aide du logiciel de simulation DOE-2E, CE Mémoire, Maîtrise en Génie Mécanique, M. Ing, Université du Québec, Montréal, Mai 2006.
40. J.F. Kreider, Introduction to the Buildings Sector, Heating Ventilating and air conditioning Handbook, Boca Raton, CRC Press LLC. 2001.
41. F.C. Winkelmann, B.E. Birdsall et B.W.F, DOE-2 Supplement, Version 2.1 E, In Lawrence Berkeley National Laboratory Springfield, National Technical Information Service, 1993.
42. Blast Support Office, Blast3.0 users manual, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois, USA, 1999.
43. D.B. Crawley, L.K. Lawrence et P.C.O, Energyplus: A new generation building energy simulation program, In Renewable and advanced Energy Systems for the 21st Century (Lahaina, Maui, Hawai (US)), 1999, p 14.
44. G.N. Walton, Airflow network model for element based building airflow modelling, ASHRAE Transactions, 1989, 95(2), 611-620.
45. H.E. Feustel, A. Rayner-Hooson, COMIS Fundamentals, Technical report, Applied Science Division, LBNL-28560, 1990.
46. G.N. Walton, CONTAM, user manual, Building and file Research Laboratory, Gaithersburg, Maryland: National Institute of Standards and Technology, 1996.
47. V. Dorer, A. Weber, Air contaminant and heat transport models: Integration and application, Energy and Buildings, 1999, 30(1), 97-104.
48. R. Fauconnier, P. Guillemard, A.I. Grelat, Algorithmes des simulations du comportement thermique des bâtiments BILGA et BILBO, Annales ITBTP, 1987, 457, 86-123.
49. J. Axley, R. Grot, The coupled airflow and thermal analysis problem in building airflow system simulation, ASHRAE Transactions, 1989, 95(2), 621-628.
50. Building Research Establishment, 1993, Breeze 6.0 user manual, BRE9uk.
51. P. Tuomaala, J. Rahola, Combined air flow and thermal simulation of buildings, Building and environment, 1995, 30(2), 255-265.

52. Esru, ESP-r: A Building and plant energy simulation environment, user guide version 9 series, ESRU publication, University of Strathclyde, Glasgow (UK), 1997, 73.
53. A. Boyer, A. Laurent, A.P.L. Mara, Building ventilation: A pressure airflow model, computer generation and elements of validation, Energy and building, 1999, 29, 283-292.
54. D, Boudaud, F.X. Rongere, D. Covalet, B. Gauthier, CLIM 2000: Modular software for energy simulation in buildings, In Adelaide (Australia), IBPSA, 1993, 19-25.
55. F. Boudaud, A. Jendel, E. Lariviere, Louberen, ALLAN, Simulation: Version 3.2, In Sophia-Antipolis, France: Les actes de la conférence IBPSA, 1998.
56. W.F. Buhl, A.E. Erdem, F.C. Winkelmann, E.F. Sowell, Recent Improvements in SPARK: Strong-Component, Decomposition, Multivalued Objects and Graphical Editors, In Adelaide, South Australia, IBPSA, 1993, 283-289.
57. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, 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.
58. M.A.C. Haddam, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, N. Benamran, Integration of eaves and shading devices for improving the thermal comfort in a multi-zone building, Thermal Science, 2015, 19, Suppl 2, S615-S624.
59. J. Berger, Contribution à la modélisation hygrothermique des bâtiments : Application des méthodes de réduction de modèle, Thèse de Doctorat en Génie Civil et Sciences de l'Habitat, Université de Grenoble, Décembre 2014.
60. G. Lefebvre, 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, Août 1994.
61. R. Djedjig, Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain, Doctorat en Génie Civil, Université de La Rochelle, Décembre 2013.
62. M. Hamdani, , S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, A new modelling approach of a multizone building to assess the influence of building orientation in Saharan climate, Thermal Science, 2015, 19, Suppl 2, S591-S601.

63. L. Mora, Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet, Doctorat en Génie Civil, Université de la Rochelle, France, Septembre 2003.
64. P. Rumianowski, J. BRAU, J.J. Roux, An adapted model for simulation of the interaction between a wall and the building heating system, In Proceedings of the thermal performance of the exterior envelopes of buildings IV conference, 1989, 224-233, Orlando, USA.
65. J.J. Roux, comportement thermique des bâtiments, Cours de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Institut National des Sciences Appliquées, Département de Génie Civil et Urbanisme, INSA de Lyon, 1999.
66. J.P. Nadeau, J.R. Puiggali, Séchage : des processus physiques aux procédés industriels, Tec & Doc-Lavoisier, 1995.
67. J.K. Nayak, J.A. Prajapati, Handbook on energy conscious buildings, Project, Report, IIT Mumbai, 2006.
68. I. Tibermacine, L'impact de la typologie des habitats collectifs sur les conditions thermiques intérieures et l'efficacité énergétique, cas de climat chaud et sec, Magister en Architecture, Forme, Ambiances et Développement Durable, Université Mohamed Khider Biskra, 2016
69. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, *Energy and Buildings*, 66, 2013, 678–687.
70. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, R. Khanniche, Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria). *International Scientific Journal, Thermal Science*, 17(2), 2013, 349-364.
71. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, *Construction and Building Materials*, 52, 2014, 59–70.
72. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate, *Journal of Building Engineering*, 01, 2015, 42-52.
73. M. Marta, L.M. Belinda, Simplified model to determine the energy demand of existing buildings case study of social housing in Zaragoza, Spain. *Energy and Buildings*, 149, 2017, 483-493.

74. L. Wenwen, F.G. Michael, C. Richard, An efficient measure of compactness for two-dimensional shapes and its application in regionalization problems. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(6), 2013, 1227–1250.
75. N.K. Bansal, M.S. Bhandari, P.S. Kumar, Building components and energy efficiency in buildings, *International Journal of Ambient Energy*, 22(3), 2001, 123–131.
76. J. Parasonis, A. Keizikas, D. Kalibatiene, The relationship between the shape of a building and its energy performance, *Architectural Engineering and Design Management*, 8, 2012, 246–256.
77. F. Ali-Toudert, J. Weidhaus, Numerical assessment and optimization of a low-energy residential building for Mediterranean and Saharan climates using a pilot project in Algeria, *Renewable Energy*, 101, 2017, 327–346.
78. R. Ourghi, A. Al-Anzi, M. Krarti, A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings, *Energy Conversion and Management*, 48, 2007, 300–305.
79. A. AlAnzi, D. Seo, M. Krart, Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait, *Energy Conversion and Management*, 50(3), 2007, 822–828.
80. I. Danielski, M. Fröling, A. Joelsson, The impact of the shape factor on final energy demand in residential buildings in nordic climates, *World Renewable Energy Forum, WREF 2012, May 13–17, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES), Denver, Colorado, USA.*
81. G. Park, Using cost-benefit analysis and building compactness to determine the most effective buildings to install green roofs in Harrisburg, Pennsylvania. *Master of Science in Geoenvironmental Studies, Shippensburg University, Shippensburg, Pennsylvania, 2014.*
82. S.H. Ibrahim, A. Baharun, M.D.A. Mannan, D.A.A. Adenan, Importance of thermal comfort for library building in Kuching, Sarawak, *International journal of energy and environment*, 4(6), 2013, 1003–1012.
83. Norme DIN1946-4:2008-12, *Raumlufttechnik-Teil 4: Raumlufttechnische Anlagen in Gebäuden und Räumen des Gesundheitswesens (Ventilation and air conditioning - Part 4: Ventilation in buildings and rooms of health care)*, Beuth Verlag GmbH, 2008, Berlin.
84. M.R. Yaiche, A. Bouhanik, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, A new modelling approach intended to develop maps of annual solar irradiation and comparative study using satellite data of Algeria, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 8, 2016, 043702.

85. M.R. Yaiche, A. Bouhanik, S.M.A. Bekkouche, A. Malek, T. Benouaz, Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration, *Energy Conversion and Management*, 82, 2014, 114–123.
86. M.R Yaiche, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, Etude d'un capteur thermique de type MEGASUN sous un ciel totalement clair, influence de l'intensité du rayonnement solaire et de l'inclinaison du capteur, 15^{èmes} Journées Internationales de Thermique, Tlemcen les 24, 25 et 26 Septembre 2011.
87. A.P. Kern, R. Postay, E.R. Schneck, M. Mancio, M.A.S. Gonzalez, G. Guerra, Cost and environmental impacts reduction through building compactness, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2021, 28(4), 1176-1195.
88. E. Koźniewski, A. Żaba, P. Dudzik, The compactness indicators of solids applied to analysis of geometric efficiency of buildings, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2019, 25 (8), 742-756.
89. A. Salvati, H. Coch, M. Morganti, Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate, *Energy Procedia*, 2017, 122, 499-504.
90. P. Gon, H. Timothy, An examination of the effect of building compactness and green roofs on indoor temperature through the use of physical models, *The Geographical Bulletin, Ypsilanti*, 2015, 56(2), 93-101.
91. B. D'Amico, F. Pomponi, A compactness measure of sustainable building forms, *Royal Society Open Science*, 2019, 6: 181265.
92. E. Trepci, P. Maghelal, E. Azar, Effect of densification and compactness on urban building energy consumption: case of a transit-oriented development in Dallas, TX, *Sustainable Cities and Society*, 2020, 56, 101987.
93. N. Mohajeri, G. Upadhyay, A. Gudmundsson, D. Assouline, J. Kampf, J.L. Scartezzini, Effects of urban compactness on solar energy potential, *Renewable Energy*, 2016, 93, 469-482.
94. R. Ji, K. Wang, M. Zhou, Y. Zhang, Y. Bai, X. Wu, H. Yan, Z. Zhao, H. Ye, Green space compactness and configuration to reduce carbon emissions from energy use in buildings, *Remote Sensing*, 2023, 15, 1502.
95. M.F. Abdelalim, Impact of Urban Compactness, Architectural Form and Climatic Considerations: An analysis in traditional Islamic buildings, *International Conference on Civil and Architecture Engineering ICCAE-14, IOP Conf, Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1056, 012010
96. H. Ye, X.Y. He, Y. Song, X. Li, G. Zhang, T. Lin, L. Xiao, A sustainable urban form: The challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission, *Energy and Buildings*, 2015, 93, 90-98.

97. R. Giridharan, R. Emmanuel, The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: A review, *Sustainable Cities and Society*, 2018, 40, 677-687.
98. H. Yuan, Y. He, J. Zhou, Y. Li, X. Cui, Zhongwei Shen, Research on compactness ratio model of urban underground space and compact development mechanism of rail transit station affected area, *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55, 102043
99. M.M.S. Almumar, Understanding building compactness entity, definition and concept of assessment, *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 7(3), 2016, 165-175.
100. L. Tronchin, K. Fabbri, M.C. Tommasino, On the cost-optimal levels of energy performance requirements and its economic evaluation in Italy, *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* Vol. 03 2014 49-62.
101. 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* 141, 2019, 1-11.
102. S. Bendara, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, Influence de la compacité sur le confort et les épaisseurs énergétique et financière de l'isolation thermique, *Revue des Energies Renouvelables SIENR'2018 Ghardaïa* 77 – 85.
103. 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, *EIWahat pour les Recherches et les Etudes*, 10 (1), 2017, 51-65.
104. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate, *Energy and Buildings*, 66, 2013, 678–687.
105. M.K. Cherier, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, B. Tidjar, R.Djeffal, L'influence de l'emplacement des MCP au sein des parois sur les températures intérieures, Cas d'une maison multizone à faible compacité, *Séminaire National sur les Systèmes Énergétiques Hybrides*, Ghardaïa les 29 - 30 Novembre 2015.
106. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Prediction of the compactness for different heights of walls, *International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources*, Antalya, TURKEY, 26-29 Octobre 2014.

107. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier M.R Yaiche, N. Benamrane, Modélisation thermo-aéraulique d'une habitation multizone & Apport de l'indice de compacité par rapport au mode de contacte en milieu désertique, Troisième Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, SIENR14, Ghardaïa, 13-14 Octobre 2014.
108. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Thermo-aeraulic studies of a multizone building & influence of the compactness index, Energy Technologies Conference, ENTECH '13, December 26 - 28, 2013 Turkey.
109. H. Kadraoui, S.M.A. Bekkouche, A. Chikhaoui, Analysis of energy consumption for Algerian building in extreme North-African climates, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 19, 2019, 45-58.
110. 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, International Renewable and Sustainable Energy Conference IRSEC 2017, Date Added to IEEE Xplore: 01 October 2018.
111. S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. Hamdani, M.K. Cherier, M.R. Yaiche, N. Benamrane, Diagnosis and comprehensive quantification of energy needs for existing residential buildings under Sahara weather conditions, Advances in Building Energy Research, 11(1) 2017, 37-51.
112. S. Belgherras, S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, N. Benamrane, Prospective analysis of the energy efficiency in a farm studio under Saharan weather conditions, Energy and Buildings, 145 (2017), 342-353.
113. Document Technique Réglementaire DTR C3-2, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation Règles de calcul des déperditions calorifiques Fascicule 1, Décembre 1997, Ministre de l'Habitat
114. H. Kadraoui, Diagnostic et solutions adaptées pour l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une construction multizone énergivore, Doctorat en Énergies Renouvelables, 2019, Département de Physique, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen.
115. LUX cahier technique, Éclairage public LIEUX DE TRAVAIL STADES, Les normes européennes de l'éclairage, LUX n° 228 – Mai / Juin 2004.
116. A. Benkhalifa, S.M.A. Bekkouche, T. Allaoui, M.K. Cherier, M. Hamdani, R. Mihoub, R. Djeflal, Application of the building height concept to energy-efficient heating and cooling for Saharan buildings, Modelling, Measurement and Control C, 80 (2-4), 2019, 71-78.

117. A. Pennec, Consommation d'électricité, Mis à jour le 5 novembre 2021, <https://www.lesfurets.com/energie/guide/consommation-eclairage>. Accessible Décembre 2023.
118. R. Djefal, L. Djemoui, H. Nacer, S.M.A. Bekkouche, Z. Younsi, Estimation of real seasons in a semi-arid region, Ghardaia, case study, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(6), 1005-1017.