

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Science Appliquée
Département : Génie Mécanique



*Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE*

*Filière : Génie Mécanique
Option : Energétique*

Présenté par :
BENBADA Younes & ELGUAIZI Brahim

Thème

**Initiation à La Simulation de L'environnement
Intérieur d'un Habitat à L'aide de L'outil
EnergyPlus**

Devant le jury composé de :

| | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| <i>Pr. BOUBEKRI Abdelghani.</i> | <i>Président</i> | <i>Université de UKM Ouargla</i> |
| <i>Dr. KABDI Zakaria</i> | <i>Examineur</i> | <i>Université de UKM Ouargla</i> |
| <i>Dr. CHERIER Mohamed Kamel</i> | <i>Encadreur</i> | <i>URAER - Ghardaïa</i> |
| <i>Dr. ZIANI Lotfi</i> | <i>Co-Encadreur</i> | <i>Université de UKM Ouargla</i> |

Année Universitaire : 2020 / 2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à Mes très chers parents la lumière de ma vie pour leur soutien et leur encouragement.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé de me donner le courage et la confiance dans les moments difficiles

Mes amis et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin tout au long de mon parcours universitaire.

Mr. BENBADA Younes

Dédicaces

À ma mère et mon Père.

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

À mon fils Fares Abdelhak et ma fille.

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

Mr .ELGVAIZI Brahim

Remerciements

Nous tenons avant toute chose, à remercier ALLAH qui nous a donné la force et le pouvoir pour effectuer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tout d'abord nos directeurs de recherche Mr. CHERJER Mohamed Kamel chercheur à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa et Mr. ZIANI Lotfi Docteur à l'Université KASDI Merbah d'Ouargla pour leur collaboration, leur soutien, leur patience, pour leurs efforts et leurs conseils précieux et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur BOUBEKRI Abdelghani Professeur à l'Université Kasdi Merbah d'Ouargla pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Mes plus sincères remerciements s'adressent à Monsieur KABDI Zakaria Docteur à l'Université KASDI Merbah d'Ouargla pour avoir accepté de lire et d'évaluer notre travail et donner son avis. Je lui adresse toute ma reconnaissance.

Nos remerciements vont également à tous nos honorables enseignants sans exception qui ont assuré notre formation durant ces cinq années Enfin, Nous adressons nos vifs remerciements à tous les gens de l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable de Ghardaïa et toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Merci beaucoup.

BENBADA Younes & ELGUAIZI Brahim

Table des Matières

| | |
|--|------|
| Dédicaces..... | i |
| Remerciements..... | iii |
| Table des matières..... | iv |
| Table des figures..... | vi |
| Liste des tableaux..... | viii |
| Les Abréviations..... | ix |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 1 |
| CHAPITRE I : Quelques Concepts sur la Thermique de L'habitat | 4 |
| I.1 Introduction..... | 5 |
| I.2 Quelques définitions..... | 5 |
| I.2.1 Champ de température..... | 5 |
| I.2.2 Gradient de température..... | 5 |
| I.2.3 Flux de chaleur..... | 6 |
| I.3 Modes de transfert de chaleur..... | 6 |
| I.3.1 Transfert de chaleur par conduction..... | 7 |
| I.3.2 Transfert de chaleur par convection..... | 7 |
| I.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement..... | 7 |
| I.4 Quelques Rappels sur la physique du bâtiment..... | 7 |
| I.4.1 Les échanges thermiques dans le bâtiment..... | 7 |
| I.4.1.1 Stockage et restitution de la chaleur..... | 8 |
| I.4.1.2 Déperditions thermiques dans le bâtiment..... | 9 |
| I.4.2 Le confort thermique..... | 10 |
| I.4.2.1 Modèles de confort thermique..... | 11 |
| I.4.2.2 Les facteurs influençant le confort thermique..... | 14 |
| I.4.3 L'isolation thermique..... | 15 |
| I.4.3.1 Buts et limites de l'isolation thermique..... | 16 |
| I.4.3.2 Techniques de l'isolation thermique..... | 16 |
| I.4.3.3 Matériaux d'isolation thermique..... | 17 |
| I.5 Approches de la modélisation thermique des bâtiments..... | 20 |
| I.5.1 Modèle Monozone..... | 22 |
| I.5.2 Modèle Multizone..... | 23 |
| I.5.3 Modèles zonaux..... | 24 |
| I.5.4 Les CFD..... | 24 |
| CHAPITRE II : Choix des Outils de Simulation Appropriés | 26 |
| II.1 Introduction..... | 27 |

| | | |
|---------|--|----|
| II.2 | A quoi sert la Simulation Thermique Dynamique (STD) ?..... | 29 |
| II.3 | Quelques outils de simulation thermique..... | 30 |
| II.4 | Points communs entre les outils STD..... | 34 |
| II.5 | La conception 3D..... | 34 |
| II.6 | La conception du bâtiment par Google SketchUp..... | 36 |
| II.7 | EnergyPlus : outil puissant pour la simulation thermique et dynamique..... | 38 |
| II.8 | Le module complémentaire Euclid..... | 39 |
| II.9 | Etapes de simulation d'un bâtiment avec EnergyPlus..... | 40 |
| II.9.1 | Première étape..... | 40 |
| II.9.2 | Seconde étape..... | 41 |
| II.9.3 | Troisième étape..... | 41 |
| II.10 | Conclusion..... | 43 |
| | | |
| | CHAPITRE III : Résultats et Analyses | 44 |
| III.1 | Introduction..... | 45 |
| III.2 | Les données climatiques..... | 46 |
| III.2.1 | Choix des Journées..... | 46 |
| III.3 | Présentation et conception de l'habitat..... | 47 |
| III.4 | Hypothèses et données..... | 49 |
| III.5 | Résultats de simulation..... | 50 |
| III.5.1 | Période chaude..... | 51 |
| III.5.2 | Période froide..... | 52 |
| III.6 | Conclusion..... | 55 |
| | Conclusion Générale..... | 56 |
| | Bibliographie..... | 59 |
| | Résumé | 65 |

Table des figures

Chapitre I

- Figure I.1 Modes de transfert thermique.
- Figure I.2 Pourcentage des personnes insatisfaites.
- Figure I.3 Photos de différents isolants : (1) Laine de verre, (2) Laine de roche, (3) Polystyrène, (4) Polyuréthane.
- Figure I.4 (1) Laine de bois, (2) Ouate de cellulose, (3) Liège, (4) Isolant mince.
- Figure I.5 Exemples de discrétisation spatiale d'un bâtiment.
- Figure I.6 Représentation d'une modélisation monozone.
- Figure I.7 Représentation multizone d'un bâtiment.
- Figure I.8 Exemple de discrétisation d'un local (figure gauche) et de distribution du champ des vitesses (figure droite).

Chapitre II

- Figure II.1 Interface graphique de TRNSYS.
- Figure II.2 Schéma de principe du logiciel Pléiades et Comfie.
- Figure II.3 Interface graphique d'EnergyPlus.
- Figure II.4 Quelques programmes de conception 3D.
- Figure II.5 Interface graphique de Google Sketch Up, Création d'un modèle 3D.
- Figure II.6 Maquette numérique d'un appartement Studio : (a) Plan opaque, (b) plan semi-transparent (c) et (d) zone opaque avec distinction des cloisons.
- Figure II.7 Introduction des coordonnées d'une habitation dans l'option "Surface détaillée" d'EnergyPlus (L'éditeur IDF).
- Figure II.8 Lancement de la simulation à travers l'interface graphique d'EnergyPlus.
- Figure II.9 Rapport d'erreur généré par EnergyPlus après l'exécution.
- Figure II.10 Visualisation et analyse des résultats de simulation (exemple).
- Figure II.11 Schéma récapitulatif des étapes de simulation.

Chapitre III

- Figure III.1 Déperditions thermiques dans un habitat.
- Figure III.2 Température extérieure moyenne jour par jour pour une année de la ville de Ouargla.
- Figure III.3 Représentation 3D (semi-transparente) et plan de l'habitat.
- Figure III.4 Le plan 3D de l'habitat.
- Figure III.5 Températures de l'air intérieur de la chambre 1, du 16 au 20 juillet.

- Figure **III.6** Températures de l'air intérieur de la chambre 2, du 16 au 20 juillet.
- Figure **III.7** Températures de l'air intérieur de la salle de séjour, du 16 au 20 juillet.
- Figure **III.8** Températures de l'air intérieur de la Chambre 1, du 16 au 20 Décembre.
- Figure **III.9** Températures de l'air intérieur de la Chambre 2, du 16 au 20 Décembre.
- Figure **III.10** Températures de l'air intérieur de la salle de séjour, du 16 au 20 Décembre.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1.1 Echelles du confort thermique d'ASHRAE et de Bedford.

Chapitre III

Tableau 3.1 Couches et Caractéristiques des différentes parois.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| | |
|----------|---|
| ASHRAE : | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| CAO : | Conception Assistée par Ordinateur |
| CFD : | Computational Fluid Dynamics |
| COV : | Composés Organiques Volatils |
| CVCA : | Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'Air |
| DOE : | Département de l'Énergie des États-Unis |
| HVAC : | Systems Heating, Ventilation, and Air Conditioning |
| ISO : | Organisation Internationale de Normalisation |
| NREL : | National Renewable Energy Laboratory |
| OMS : | Organisation Mondiale de la Santé |
| PMV : | Vote Moyen Prévisible |
| PPD : | Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits |
| PSE : | Polystyrène Expandé |
| PSX : | Polystyrène Extrudé |
| STD : | Simulation Thermique Dynamique |
| TMY : | Typical Meteorological Year |

Nomenclature

| | |
|---------|--|
| e : | L'épaisseur du matériau (mm) |
| F : | Fonction d'habillement |
| f : | Fraction de surface habillée |
| h : | Taille de l'individu (m) |
| h_c : | Coefficient de transfert de chaleur convectif ($\text{kcal/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$) |
| M : | Production de taux métabolique (kcal/h) |
| P : | pression de vapeur (mmHg) |
| Q : | Déperditions thermiques totales (W) |
| R : | Résistance thermique (m K/W) |
| S : | Surface (m^2) |
| T : | Température (K) |
| T_e : | La température extérieure moyenne (K) |
| T_i : | La température intérieure moyenne (K) |

| | |
|-------------|---|
| T_n : | la température neutre ($^{\circ}\text{C}$). |
| T_o : | la température extérieure moyenne pour un mois en question ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_a : | Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_{cl} : | température de surface des vêtements ($^{\circ}\text{C}$) |
| t_{mrt} : | la température radiative moyenne ($^{\circ}\text{C}$) |
| U : | conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) |
| V : | Vitesse relative de l'air (m/s) |
| W : | Poids de l'occupant, (kg) |
| \vec{n} : | Vecteur unitaire de la normale. |
| φ : | flux de chaleur (W) |
| λ : | conductivité thermique ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) |

Introduction Général

Introduction Générale

L'architecture a toujours impliqué l'utilisation des ressources naturelles pour servir les besoins humains. Il existe une longue et inventive tradition de réalisation de bâtiments influencés par les lieux et les climats. Depuis la révolution industrielle, les évolutions technologiques affectent le secteur du bâtiment, notamment l'éclairage électrique, le chauffage central et la climatisation. Ces derniers ont permis aux bâtiments de se détacher progressivement de leur environnement. Les combustibles bon marché, les nouvelles technologies de chauffage, de climatisation et d'éclairage et les exigences accrues des occupants ont abouti à des bâtiments conçus et utilisés sans tenir compte de leur emplacement ou de leur environnement ambiant.

Beaucoup de ces bâtiments parviennent à fournir des niveaux acceptables de confort thermique et visuel à l'intérieur, mais à des coûts énormes et insoutenables pour l'environnement. Par ailleurs, il existe de plus en plus de preuves que les conditions artificiellement entretenues dans bon nombre de nos bâtiments modernes ne sont pas propices à une bonne santé.

Cependant, avec une prise de conscience croissante de l'impact environnemental de la vie moderne, une nouvelle approche émerge qui cherche à fournir des bâtiments mieux adaptés aux besoins des occupants et plus respectueuse de l'environnement.

L'architecture bioclimatique est l'art et le savoir-faire de bâtir en alliant respect de l'environnement et confort de l'habitant. Pour cela, les concepteurs d'architecture bioclimatique effectuent une étude approfondie sur le site, son environnement, le climat, les risques naturels ou encore la biodiversité existante et font en sorte de tirer le meilleur du lieu d'implantation tout en prévoyant les contraintes éventuelles. Développement durable, sobriété d'usage, insertion dans le territoire et confort intérieur sont les fondements de l'architecture bioclimatique. Il s'agit donc de capter l'énergie nécessaire, de la diffuser et surtout de la conserver de manière naturelle et respectueuse de l'environnement. En parallèle, le principe est de réduire au maximum l'utilisation des énergies polluantes et non renouvelables telles que le gaz et l'électricité [1].

La simulation thermique du bâtiment est une méthode puissante pour étudier la performance thermique des bâtiments. Des problèmes de conception complexes peuvent être étudiés et leurs performances peuvent être quantifiées et évaluées.

Le confort thermique dans les bâtiments (habitats) est en effet la principale exigence des occupants (habitants). Elle est principalement estimée à partir de paramètres climatiques externes. Dans les régions semi-arides et arides comme la région de Ouargla, bien que la demande de chauffage en hiver existe, la demande de refroidissement en été est beaucoup plus importante.

Notre objectif principal est d'effectuer une simulation numérique pour évaluer les performances thermiques du modèle d'un habitat. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé une simulation à l'aide d'un outil de simulation qui est EnergyPlus.

Le travail présenté dans ce document comporte trois chapitres. Le premier chapitre présente quelques concepts sur la thermique de l'habitat telles que les bases de la construction thermique, la conception architecturale et les modes de transfert de chaleur ainsi que les déperditions thermiques dans le bâtiment à travers les murs et le vitrage.

Le second chapitre a été consacré à la présentation de quelques outils de simulation thermique, les techniques de conception d'un habitat à l'aide du programme Sketch Up et le choix de l'outil qui convient le mieux pour notre travail.

Le troisième chapitre est un récapitulatif de quelques résultats obtenus à partir de la simulation. Une des techniques passives de la bioclimatique qui est l'isolation thermique était le sujet de nos investigations. Nous nous sommes basés lors de notre travail sur les données d'un fichier météorologique propre à la ville de Ouargla pour étudier et comparer les températures intérieures de l'habitat pour différents cas d'étude.

Chapitre I :
Quelques Concepts sur la
Thermique de L'habit

I.1 Introduction

Les phénomènes de transfert thermique ou de la chaleur, ont une grande importance pour les études de la thermique en raison du développement rapide de l'industrie et de l'accroissement de la demande et du prix de l'énergie, l'utilisation efficace d'une installation (d'échange de chaleur) pour une dépense d'énergie minimale est le but recherché dans tous les cas.

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts théoriques et pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications. Les connaissances de base dans ce domaine sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation et l'exploitation pratique de la chaleur et en conséquence de l'énergie. Nous essaierons par la suite de fournir quelques définitions de ce phénomène et de faire le point sur ses différentes modes de transfert [2].

I.2 Quelques définitions

I.2.1 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. On distingue deux cas [3] :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

I.2.2 Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température [3] :

$$\overrightarrow{grad}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (I.1)$$

Avec :

\vec{n} : Vecteur unitaire de la normale.

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

I.2.3 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [3] :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I.2})$$

Où S est l'aire de la surface (m²).

Ou sous forme vectorielle :

$$\vec{\phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$\vec{\phi}$: Vecteur densité de flux de chaleur

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I.4})$$

I.3 Modes de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est défini comme le transfert d'énergie d'un milieu à un autre sous un gradient de température. Ce transfert peut se présenter sous trois modes principaux : la conduction, la convection ou le rayonnement. [4]

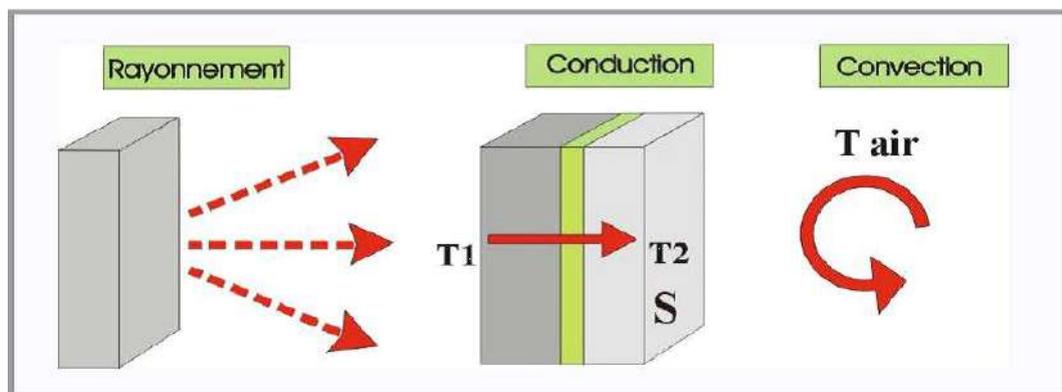


Figure I.1 : Modes de transfert thermique [5].

I.3.1 Transfert de chaleur par conduction

La chaleur est transportée par conduction à travers des parties de l'énergie thermique dans le corps physique, ce qui entraîne un gradient de température. Le transfert de chaleur se fait par conduction pour les solides ainsi que pour les matériaux confinés à vitesse nulle [6].

I.3.2 Transfert de chaleur par convection

La convection est un mode de transfert rencontré seulement dans le cas des fluides (liquides ou gaz) et est indissolublement lié au mouvement du milieu. Le transfert de chaleur par convection se divise en deux parties principales :

➤ Une convection naturelle

Ce phénomène apparaît généralement lorsqu'il y a une variation de la masse volumique du fluide induite par des gradients de température et de concentration, la distribution non uniforme de densité causée par ces gradients thermique et massique provoque un mouvement convectif sous l'effet de la gravité [7].

➤ Une convection forcée

Le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...) [6].

I.3.3 Transfert de chaleur par rayonnement

L'énergie thermique est transmise dans ce cas par des ondes électromagnétiques sans contact. En fait, chaque corps physique émet et reçoit un rayonnement sous forme de phonons, une partie de son énergie est convertie en énergie interne, ce qui conduit à une augmentation de la température du corps récepteur.

I.4 Quelques Rappels sur la physique du bâtiment

I.4.1 Les échanges thermiques dans le bâtiment

L'échange thermique est continu entre les matériaux de construction et l'environnement avec une chaleur fluctuante, le bâtiment doit donc offrir un confort optimal à ses utilisateurs car ils y occupent la plupart de leur temps.

Le bâtiment contient plusieurs murs, chacun d'eux est composé de plusieurs matériaux aux propriétés différentes. L'énergie thermique est transformée en une autre forme d'énergie selon le principe de la thermodynamique. Le processus est réalisé par conduction, convection ou rayonnement. Pendant la transformation thermique, le matériau le plus chaud perd de l'énergie au profit du matériau froid au contact par exemple, ce processus s'arrête lorsque la température des deux matériaux est égale [8].

La chaleur cherche à pénétrer dans le bâtiment en été, tandis qu'en hiver elle cherche à sortir lutter contre les déperditions. La conductivité thermique est exprimée en W/m^2K (la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur d'un matériau par seconde et par mètre carré de surface). Cela peut nous aider à comparer les matériaux les uns par rapport aux autres Plus la conductivité thermique est petite, plus le matériau freine le flux de chaleur et plus il est isolant [8].

I.4.1.1 Stockage et restitution de la chaleur

✚ La conductivité thermique

La conductivité thermique (souvent désignée par λ et exprimée en $Wm^{-1}K^{-1}$) fait référence à la capacité intrinsèque d'un matériau à transférer ou à conduire la chaleur. Elle est également définie comme la quantité de chaleur par unité de temps par unité de surface qui peut être conduite à travers une plaque d'épaisseur unitaire d'un matériau donné, les faces de la plaque ont une différence d'une unité de température.

$$\lambda = \Phi * L/A(T_2 - T_1) \quad (I.5)$$

Où :

Φ est le flux de chaleur (W)

L est l'épaisseur du matériau (mm)

A est la surface du matériau (m^2)

T_1-T_2 est le gradient de température (K)

✚ La capacité thermique

La capacité thermique est exprimée en $Jkg^{-1}^{\circ}C^{-1}$, elle représente la tendance du matériau à stocker et à dégager la chaleur (en fonction de sa masse). Plus

précisément, c'est la quantité de chaleur qu'un gramme d'un matériau doit absorber ou perdre pour que sa température s'élève ou baisse d'un degré Celsius. La capacité thermique massique est également appelée chaleur spécifique ou chaleur massique [9].

I.4.1.2 Déperditions thermiques dans le bâtiment

La déperdition thermique c'est la perte de chaleur par transmission à travers l'enveloppe du bâtiment (les charges de ventilation et d'infiltration provoquent également des pertes de chaleur). Une énergie supplémentaire de chauffage est nécessaire pour compenser cette perte. D'autres sources de chaleur sont souvent présentes pour réduire ces déperditions. Les gains de chaleur des personnes, de l'éclairage et des équipements apportent souvent une contribution significative.

La valeur U (U-value en anglais), parfois appelée transmittance thermique est utilisée pour mesurer l'efficacité des éléments de l'enveloppe d'un bâtiment. Autrement dit, dans quelle mesure l'enveloppe est-elle efficace pour empêcher la chaleur de se transmettre entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment. La valeur R, qui mesure la résistance thermique plutôt que la transmission thermique, est souvent décrite comme étant l'inverse de la valeur U [10].

Plus la valeur U d'un élément de l'enveloppe d'un bâtiment est faible, plus la chaleur est capable de se transmettre lentement à travers celui-ci, et donc mieux elle fonctionne comme isolant. De manière très générale, plus la valeur U du tissu d'un bâtiment est élevée, plus il faut d'énergie pour maintenir des conditions confortables à l'intérieur du bâtiment [10].

À mesure que les prix de l'énergie augmentent et qu'il y a une plus grande prise de conscience de la durabilité, les mesures de performance telles que les valeurs U sont devenues plus importantes et les normes de construction (telles que les réglementations thermiques sur la construction) sont plus exigeantes. Ces normes requièrent que des valeurs U de plus en plus basses doivent être atteintes. Cela a nécessité des changements dans la conception des bâtiments, à la fois dans l'utilisation des matériaux (tels que l'isolation), la composition des éléments de construction (tels que les murs creux et le double vitrage) et la composition globale de l'enveloppe du bâtiment (par exemple, la réduction de la proportion de vitrage) [10].

Les valeurs U et R sont utilisées dans les calculs de perte de chaleur et de gain de chaleur. La valeur R est le taux correspondant de résistance thermique [10].

$$R = 1/U \quad (I.6)$$

Les déperditions totales Q d'un bâtiment en une seule zone, à température intérieure constante et uniforme pour une période donnée peuvent s'exprimer en fonction de la différence de température moyenne entre l'intérieur et l'extérieur :

$$Q = U * A(T_i - T_e) \quad (I.7)$$

Où :

Q : Déperditions thermiques totales(W)

U : La conductivité thermique $Wm^{-1}K^{-1}$

A : La surface (m^2)

T_e : La température extérieure moyenne (K)

T_i : La température intérieure moyenne (K)

I.4.2 Le confort thermique

La définition du confort thermique est très complexe en raison de l'interaction de plusieurs variables environnementales et personnelles. Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort. Les conditions dans lesquelles on obtient cet équilibre est l'état du corps lorsqu'il atteint l'équilibre avec son environnement, dépendant de la conjugaison de nombreux facteurs. Certains de ces facteurs sont d'ordre personnel (l'activité physique, le niveau d'habillement, etc....) et d'autres sont des facteurs de l'environnement tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, l'humidité relative et le mouvement de l'air. Le confort thermique a été défini comme l'état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique établi par échange thermique entre le corps et son environnement. Le confort thermique dépend du contexte et des caractéristiques individuelles. Il est conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques [11].

I.4.2.1 Modèles de confort thermique

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit également le confort thermique comme « **une condition lorsque les gens sont satisfaits de l'environnement thermique** » et déclare que la santé est un état général de bien-être physique, mental et social et non pas l'absence de maladies ou d'infirmités seulement [12]. On distingue deux types d'approche du confort thermique :

a) Le modèle de Fanger (L'approche analytique)

Le Vote Moyen Prévisible PMV et le Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits PPD utilisés dans la norme ISO 7730 sont les deux indices décrits par Fanger dans les années 70[13]. Ces indicateurs dépendent de deux facteurs humains qui sont le métabolisme et l'habillement ainsi que quatre facteurs environnementaux qui sont la température de l'air T_a , l'humidité relative H_R , la température radiante T_r et la vitesse de l'air V_a . Fanger a réuni des participants portant les mêmes vêtements et faisant des activités standardisées, sous différents environnements thermiques, afin de se concentrer sur l'étude de l'échange d'énergie entre le corps humain et l'environnement.

Les conditions thermiques ont été choisies par des participants qui ont noté à quel point ils étaient chauds ou froids, par l'utilisation de l'échelle de sept points de la sensation thermique ASHRAE allant du plus froid (- 3) au plus chaud (+3) avec neutre (0) au milieu comme c'est exposé ci-dessous :

- (±) 1: (+) légèrement chaud ou (-)légèrement froid ;
- (±) 2: (+)chaud ou (-) froid ;
- (±) 3: (+) Très chaud ou (-) Très froid ;
- 0: neutre (ni froid, ni chaud).

Tableau 1.1 : Echelles du confort thermique d'ASHRAE et de Bedford

| Descripteur ASHRAE | Descripteur numérique | Descripteur de Bedford |
|--------------------|-----------------------|------------------------|
| Très chaud | 3 | Beaucoup trop chaud |
| Chaud | 2 | Trop chaud |
| Légèrement chaud | 1 | Confortablement chaud |
| Neutre | 0 | Confortable |
| Légèrement froid | -1 | Confortablement froid |
| Froid | -2 | Trop froid |
| Très froid | -3 | Beaucoup trop cool |

Fanger a développé une équation liée aux paramètres environnementaux, physiologiques et physiques et aux indicateurs de sensation thermique, basée sur les commentaires et les sensations thermiques que les gens expriment lors d'une activité spécifique.

Actuellement, des personnes spécialisées dans ce domaine utilisent l'indice PMV Fanger comme indicateur expérimental largement utilisé comme indicateur de confort thermique et il a été cité dans plusieurs travaux, à titre d'exemple : de Butera (1998) ; Skoog, Fransson et Jagemar (2005); Jang, Koh et Moon (2007); Wong, Mui et Hui (2008); et Wei et al. (2010) [14].

Le vote moyen prévu PMV est la réponse moyenne d'un grand nombre de personnes. Compte tenu de la nature subjective du confort, il y aura en fait une répartition de la satisfaction parmi un grand groupe de personnes. La figure (I.2) montre une relation empirique entre le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) d'un environnement thermique en fonction du PMV.

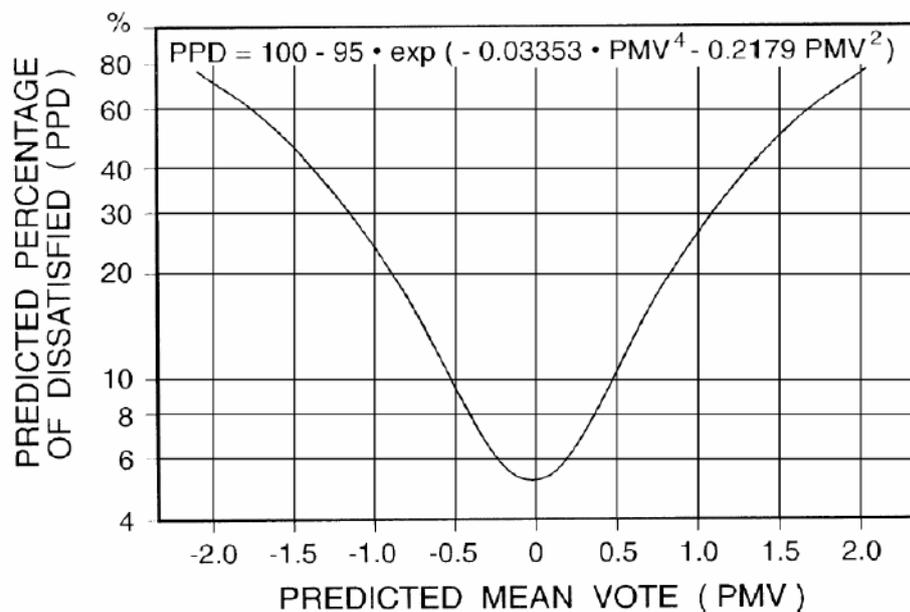


Figure 1.2 : Pourcentage des personnes insatisfaites [15].

Le modèle de confort thermique de Fanger est utilisé pour calculer le PMV dans les équations suivantes :

$$PMV = [0.303 \exp^{-0.036M} + 0.028] \{ (M - W) - 0.00305 [5733 - 6.99 (M - W) - p] - 0.42 [(M - W) - 58.15] - 0.0000173M (5867 - p) - 0.0014M(30.7 - t_a) D - F \} \quad (I.8)$$

Où la fonction d'habillement F est donnée par :

$$F = 3.96 \cdot 10^{-8} f (t_{cl}^4 - t_{mrt}^4) + fh_c (t_{cl} - t_a) \quad (I.9)$$

Pour le coefficient h de transfert thermique des habits, on prend celle des expressions ci-dessous qui donne la valeur la plus grande :

$$h = 2.38 (t_{cl} - t_a)^{1/4} \quad \text{ou} \quad h = 12.1(V)^{1/2} \quad (\text{I.10})$$

La température absolue des habits est donnée par :

$$T_{cl} = 308.9 - 0.028 (M - W) - RF \quad (\text{I.11})$$

La fraction de surface habillée peut être estimée par :

$$f = 1.00 + 1.290 R \quad \text{si} \quad R < 0.078 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (\text{I.12})$$

$$f = 1.05 + 0.645 R \quad \text{si} \quad R > 0.078 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (\text{I.13})$$

Puisque PPD est une fonction de PMV, il peut être défini comme :

$$PPD = 1 - 0.95 \exp(-0.003353 \text{ PMV}^4 - 0.2179 \text{ PMV}^2) \quad (\text{I.14})$$

b) L'approche adaptative

Les humains peuvent s'adapter à différentes températures à différentes périodes de l'année et c'est ici que l'idée est venue que le climat extérieur affecte le confort intérieur. De nombreux chercheurs ont mené des études sur le terrain dans le monde entier dans le cadre desquelles ils ont interrogé les occupants des bâtiments sur leur confort thermique tout en prenant des mesures environnementales simultanées. Ensuite, il a été établi le modèle dynamique qui permet de prévoir les variables physiologiques sous des conditions instationnaires à travers le calcul d'un indice représentant la température équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative. En 1970, Humphrey, est arrivé à déterminer une expression mathématique de la température neutre basée sur la température extérieure moyenne mensuelle dont la formule est [16] :

$$T_n = 11.09 + 0.534T_0 \quad (\text{I.15})$$

Où :

T_n : est la température neutre (°C).

T_0 : la température extérieure moyenne pour un mois en question (°C)

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

$$T_n = 17.6 + 0.314T_0 \quad (\text{I.16})$$

Le modèle adaptatif offre des dépendances pour le confort thermique, obtenues à partir des résultats d'études de terrain à grande échelle. La théorie de l'approche adaptative s'exprime en principe adaptatif : « Si le changement conduit à une gêne, alors les gens recherchent des voies qui mènent à la restauration du confort » [17].

I.4.2.2 Les facteurs influençant le confort thermique

Il existe plusieurs facteurs qui interfèrent avec le concept de confort, dont certains sont liés à l'individu et d'autres liés au climat environnemental :

A - Les facteurs climatiques environnementaux

- ✚ **La température de l'air** : le facteur le plus influent sur le confort humain est la température de l'air qui doit varier entre 22 et 27°C, elle est acceptable d'après la recommandation architecturale de ministère de L'habitat d'Algérie (1993) [18].

La convection ici est l'une des conditions importantes de l'équilibre thermique car la température de l'air contrôle directement les échanges qui la traversent. La température de l'air dans un local n'est pas uniforme est inégale car des différences de température se produisent, en particulier près des surfaces froides et des éléments chauffants [18].

- ✚ **L'humidité de l'air** : Si la température de l'air est confortable, l'humidité de l'air n'aura pas beaucoup d'effet sur la sensation de confort, tant qu'elle n'est ni trop élevée ni trop basse.

L'humidité de l'air est exprimée en pression de vapeur d'eau, où le corps humain est directement ou indirectement affecté par l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments et provoque une sensation d'inconfort, par exemple la sensation de sécheresse [18].

- ✚ **Le mouvement de l'air** : La vitesse de l'air et le mouvement de l'air affectent grandement la sensation de confort ; Cela signifie que : plus le mouvement de l'air est important plus le refroidissement du corps ou l'échange de chaleur par convection avec l'air ambiant est accéléré [18].

- ✚ **Le rayonnement** : L'effet du rayonnement dépend de la position de l'objet par rapport au soleil, ainsi que de la vitesse du vent et de la blancheur des

objets qui l'entourent. B. GIVONI en 1978 a déduit de l'expérience que l'effet du rayonnement sur un homme debout sans vêtements est d'environ 70% de celui qui lui tombe assis, le dos incliné vers le soleil [18].

B - Les variables dépendant du sujet

- ✚ Les activités physiques de l'individu. La quantité de chaleur dégagée dépend sensiblement de la nature de l'activité physique pratiquée. Une personne qui fait le ménage dégage plus de chaleur qu'une personne qui est dans une position assise.
- ✚ L'habillement représentant la résistance thermique aux échanges de chaleur qui ont lieu entre la surface de la peau et l'ambiance [18].

C - Les facteurs subjectifs

L'individu peut contrôler les échanges thermiques qui se produisent par le choix de la tenue vestimentaire et il y a d'autres facteurs non qualifiables qui varient d'un individu à un autre [acclimatation, l'âge, le sexe, les conditions de santé...etc.]. D'après Alain Liébard et André De Herde (2003), La sensation du confort thermique dépend de [18] :

- Le métabolisme représentant la production de chaleur interne du corps humain nécessaire pour le maintenir à une température constante de 36.7°C, soit environ 80wau repos.
- La température de surface du corps ou température de la peau variant en fonction du métabolisme.
- La température moyenne de surface des parois concernant les échanges par rayonnement avec les parois, proportionnellement à leurs superficies.

I.4.3 L'isolation thermique

L'isolation thermique est l'un des moyens les plus efficaces pour améliorer le confort thermique des bâtiments et réduire la consommation d'énergie. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des matériaux performants pour obtenir une isolation thermique efficace, et donc de choisir des climatiseurs moins puissants (économiques). Les matériaux utilisés pour l'isolation thermique doivent avoir les caractéristiques les plus importantes de résistance au transfert

de chaleur, légèreté en poids, résistance à l'humidité, bonne résistance mécanique, sans résidus nocifs sur les matériaux de contact [19].

I.4.3.1 Buts et limites de l'isolation thermique

Dès que deux éléments en contact possèdent des températures différentes, il se produit un échange de chaleur entre eux jusqu'à ce que leurs températures deviennent identiques. Le but de l'isolation est de freiner cet échange thermique et de permettre ainsi de garder les parois de l'habitation à une température la plus proche possible de celle de l'air intérieur. Une grande partie de déperdition de chaleur se manifeste par les toits et les murs, par conséquent une bonne isolation thermique des parois permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60% [20].

I.4.3.2 Techniques de l'isolation thermique

Il existe de nombreuses techniques d'isolation thermique, on peut citer à titre d'exemple :

- L'orientation du bâtiment pour qu'il soit ouvert au soleil, placer les ouvertures aux bons endroits.
- L'utilisation d'une grande épaisseur d'isolant pour bien isoler le bâtiment.
- Une réduction des ponts thermiques. Il arrive qu'il y ait des ruptures de continuité dans l'isolation du bâtiment. C'est ce qu'on appelle un pont thermique. Ces ponts thermiques engendrent alors d'importantes « fuites » de chaleur.
- L'utilisation du double ou triple vitrage dans les fenêtres car le verre est considéré comme un isolant thermique faible en raison de son épaisseur.

✚ L'isolation intérieure

Ce type d'isolation est le plus répandu, il est facile à mettre en œuvre, et nécessite des travaux directement dans l'espace intérieur du logement en mettant l'isolant sur la face intérieure du mur. L'isolation intérieure laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire, par contre elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter [20].

L'isolation extérieure

Cette technique nécessite généralement une épaisseur plus faible de l'isolant. Elle consiste à mettre un isolant sur le mur de l'habitation, côté extérieur. Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation, de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse, et moins intéressante du point de vue énergétique [20].

L'isolation répartie

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est généralement utilisée en construction neuve. Elle est performante et durable. La recherche des conditions de confort de l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois [20].

I.4.3.3 Matériaux d'isolation thermique

Les matériaux d'isolation se sont considérablement développés avec les progrès technologiques. La législation a joué un rôle important au développement des constructions, depuis les exigences de base des réglementations thermiques sur la construction jusqu'à la conformité avec les objectifs gouvernementaux de réduction des émissions de carbone.

Les produits d'isolation varient en termes de couleur, de finition de surface et de texture, de composition du noyau et, surtout, de performance. La spécification des matériaux isolants n'est pas seulement une décision scientifique, mais une spécification réussie qui repose aussi sur la compréhension des performances et sur les facteurs périphériques qui peuvent influencer l'installation finale.

Cependant, afin de spécifier correctement l'isolation, le prescripteur doit comprendre les raisons pour lesquelles elle fonctionne et appliquer la technologie appropriée à tout détail de construction donné. En comprenant plus complètement les processus qui font fonctionner l'isolation, et en fait les facteurs qui

l'empêchent de fonctionner, les prescripteurs seront dans une position beaucoup plus forte pour spécifier le bon matériau pour une application appropriée [21-22].

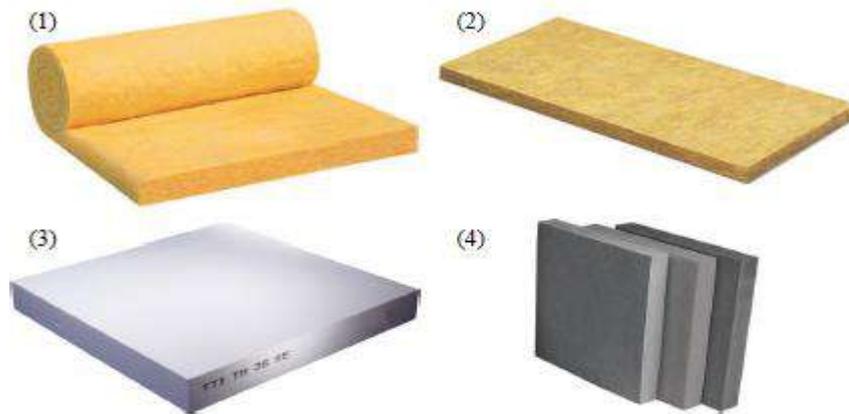


Figure I.3 : Photos de différents isolants : (1) Laine de verre, (2) Laine de roche, (3) Polystyrène, (4) Polyuréthane.

a) Matériaux d'isolation classiques

+ La laine de verre

Cette isolation est disponible en grande quantité, économique, avec assez de bonnes conductivités thermiques (de l'ordre de 0.035 W/mK). L'énergie impliquée dans sa production est très élevée, et ses matériaux constitutifs sont non dégradables, le processus de fabrication du liant conduit à des émissions de chlorures, fluorures, particules, composés organiques volatils (COV) et solvants. Résistante à la décomposition, elle se stabilise au fil du temps, mais elle perd ses performances si elle est exposée à l'humidité.

+ La laine de roche

Elle est généralement obtenue à partir de la fonte des roches, en particulier du basalte. La laine de roche est un matériau économique (équivalent à la laine de verre), elle est ignifuge et dotée de bonnes performances acoustiques et thermiques. Des précautions doivent être prises lors de l'installation, le produit est très difficile à recycler et possède une grande énergie grise [23].

Le polystyrène

Le polystyrène se présente sous deux formes de panneaux : le PSE (polystyrène expansé) et le PSX (polystyrène extrudé). Le PSE est obtenu par polymérisation du styrène en utilisant le pentane comme agent d'expansion. L'émission du i-pentane est importante pendant sa mise en œuvre et elle décroît au fil du temps jusqu'à devenir négligeable. En utilisant des effluents gazeux ainsi que des solvants, le PSX est fabriqué à partir de billes de styrène. Elles sont mélangées et extrudées avec un agent gonflant qui peut être du dioxyde de carbone ou des gaz HFC (hydrofluorocarbures) [23].

Le polyuréthane

Le polyuréthane est constitué de polyol, d'un isocyanate (toluène diisocyanate) et d'un agent d'expansion (HCFC ou CO₂) avec des catalyseurs (amines aliphatiques ou aromatiques). Le polyuréthane libère d'importantes quantités d'isocyanates au moment de sa mise en œuvre, ces émissions s'estompent quand le produit durcit. En cas d'incendie, il dégage des substances irritantes pour la peau, les yeux et les voies respiratoires. Le polyuréthane libère de l'isocyanate, du monoxyde de carbone et surtout de l'acide cyanhydrique qui provoque des maux de tête, des étourdissements, une oppression thoracique et un coma pouvant évoluer vers la mort très rapidement [23].

b) Matériaux d'isolation issus de ressources naturelles ou organiques

Les panneaux ou laines de fibres de bois

Les feuilles de fibres de bois ou de laine présentent de nombreux avantages, notamment recyclables car 100% naturels, ainsi que contenant parfois des produits ignifuges chimiques et dont la conductivité thermique est généralement comprise entre 0,038 et 0,042 W/mK. Elles nécessitent une faible énergie grise (50 kW/m³). Elles sont également sûres à installer et résistent aux attaques d'insectes. Mais elles restent quatre fois plus chères que la laine de verre [23].

La ouate de cellulose

Elle est fabriquée à partir de journaux ou de boîtes en carton usagés, etc. après avoir été recyclée, cette garniture est biodégradable et coûte deux fois le coût de la laine de verre de base. De plus, sa conductivité thermique est généralement comprise entre 0,035 et 0,040 W/mk. La laine de coton

contient du borax, particulièrement toxique au contact de l'aluminium, ainsi que des additifs ignifuges et des fongicides [23].

Les panneaux de Liège

Les panneaux de liège nécessitent peu d'énergie et peuvent contenir du liège recyclé (bouchons, etc.) Ils sont également sûres à installer et résistent aux attaques d'insectes (ne contiennent pas de fibres dangereuses). Ces panneaux ont une très bonne résistance mécanique. Ce type d'isolation est produit en très petites quantités en raison de son prix élevé (trois fois le prix de base de la laine de verre). Sa conductivité thermique limitée entre 0,039 et 0,045 W/mk [23].

c) Les isolants minces

Les plus populaires sur le marché car ils sont très fins et garantissent les mêmes performances thermiques que la laine de verre, c'est-à-dire que 2 cm de ces isolants correspondent en performances à 20 cm de la laine de verre. Les utilisateurs le préparent par réflexion avec une feuille d'aluminium au lieu d'empêcher le transfert de chaleur par conduction avec l'exigence d'un entrefer pour fournir une isolation thermique. L'inconvénient des isolants à couche mince est qu'ils ne sont pas dégradables et ont 3 fois le prix de la laine de verre. Ils nécessitent également une grande énergie physique et présentent également un risque d'accumulation de vapeur d'eau car ils ont une faible capacité respiratoire [23].

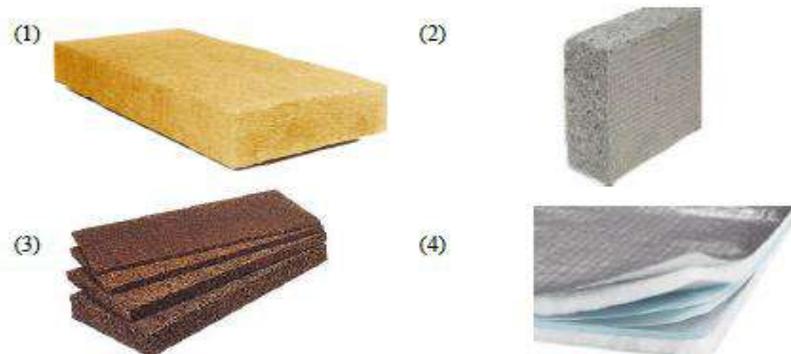


Figure I.4: (1) Laine de bois, (2) Ouate de cellulose, (3) Liège, (4) Isolant mince [23].

I.5 Approches de la modélisation thermique des bâtiments

Pour réaliser des analyses thermiques et énergétiques à l'intérieur des bâtiments, il faut s'appuyer fortement sur des outils (des logiciels ou des programmes) de simulation. Ces derniers présentent de grands avantages

indéniables car ils permettent d'améliorer la conception en évaluant préalablement la performance thermique et énergétique du bâtiment, avant, pendant et après la phase de conception. Cela se traduit par des avantages significatifs, tant sur le rapport coût-efficacité (l'analyse est effectuée plus efficacement), qu'au niveau de la fiabilité (les modèles de simulation sont conformes aux modèles de conception) [24].

Les volumes d'air et les murs jouent un grand rôle pour la détermination de la taille des cellules primaires afin d'obtenir une bonne précision des résultats que l'on peut espérer, et cela est dû à la complexité géométrique d'un bâtiment. En fait, un bâtiment est considéré comme un système composé de plusieurs sous-systèmes qui interagissent entre eux. Un échange de chaleur et d'énergie constant se produit entre les différentes composantes d'un bâtiment tel que les pièces, les murs, fenêtres, plancher, etc.

Donc le comportement thermique ne peut être traité que de manière approximative et en utilisant une estimation spatiale (zones) et chaque cellule (zone) est supposée uniforme (figure I.5). Pour des niveaux de discrétisation élevés la nature non linéaire et le couplage fort du système d'équations traduisant les transferts hygrothermiques rendent la modélisation plus complexe et difficile à mettre en œuvre [5].

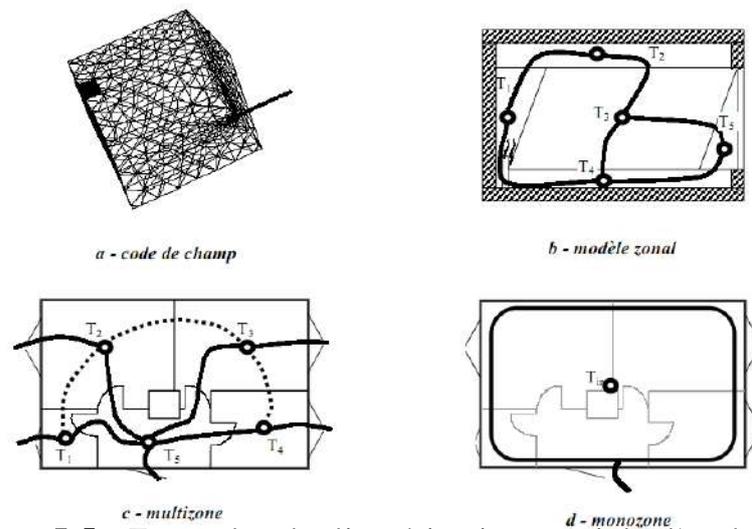


Figure I.5 : Exemples de discrétisation spatiale d'un bâtiment [25].

I.5.1 Modèle Mono zone

La première génération d'environnement de simulation qui a permis de représenter adéquatement l'enveloppe du bâtiment et les déperditions énergétiques engendrées sur de longues périodes de temps sont les modèles monozones. Ce sont des modèles très simples ; ils considèrent que tout le bâtiment possède des caractéristiques uniformes (une maille). Ces modèles sont simples à utiliser et nécessitent uniquement des données générales concernant l'enveloppe du bâtiment (résistance thermique, capacité thermique, perméabilité, etc.). Les modèles monozones permettent d'accéder rapidement aux estimations des consommations énergétiques [26]. L'environnement intérieur du bâtiment est représenté par un nœud. Chaque nœud échange de la chaleur et de l'humidité avec ses composants de construction environnants et l'environnement extérieur. En ce qui concerne les coefficients de transfert de surface par convection, des coefficients de valeurs moyennes et uniformes sont utilisés pour modéliser le transfert de chaleur et d'humidité entre l'air dans la pièce et le composant de construction correspondant. Le principal avantage est que ces modèles conviennent à la simulation efficace de l'énergie d'un bâtiment relativement grand. Le modèle nécessite de résoudre seulement un nombre relativement petit d'équations, c'est-à-dire une équation d'équilibre énergétique et une équation d'équilibre d'humidité dans chaque nœud [5].

Toutefois, la prise en compte des phénomènes aérauliques dans ce type de modèle se limite à un calcul forfaitaire du renouvellement d'air qui est relativement difficile à estimer. De plus, ces modèles ne sont pas adaptés aux évaluations du confort thermique. Ils s'avèrent insuffisants si des écarts importants de température existent entre les différentes parties du bâtiment ou si une information plus locale est demandée telle que la température moyenne dans chaque pièce [26].



Figure I.6 : Représentation d'une modélisation monozone [3].

I.5.2 Modèle Multizone

Le modèle multizone est un modèle nodal ou en réseau où le bâtiment est représenté par un ensemble de nœuds et chaque nœud représente une zone. Les ouvertures de portes et fenêtres, les entrées d'air, les défauts d'étanchéité de l'enveloppe...etc ; sont des connexions représentant le chemin emprunté par l'air c'est le lien entre ces zones [27]. Deux familles d'outils multizones sont connues. La première a pour objectif l'étude de la qualité de l'air au sein des bâtiments et l'aide à la conception des systèmes de ventilation ; plusieurs outils de simulation sont utilisées par les chercheurs et concepteurs tels que COMIS ou CONTAM dont le but est de prédire les écoulements et le transport d'espèces polluantes entre les zones des bâtiments.

La deuxième famille a pour objectif d'affiner la prédiction des transferts de chaleur. On peut citer par exemple TRNSYS qui permet la modélisation en régime transitoire des systèmes CVCA. Il est considéré comme un outil puissant qui a occupé et qui occupe encore une place importante dans le monde de la simulation thermique du bâtiment. Cependant, ces outils trouvent leurs limites dès qu'il s'agit de couplage entre les phénomènes de transfert de chaleur et de masse. De plus, ils ne permettent pas d'appréhender les détails de l'écoulement et du champ de température au sein même des zones. Or, la connaissance de beaucoup de détails est nécessaire pour améliorer le confort des occupants et la qualité de l'air tout en réduisant la consommation énergétique [26].



Figure I.7 : Représentation multizone d'un bâtiment.

I.5.3 Modèles zonaux

Le concept des modèles zonaux est basé sur le partitionnement d'une pièce en plusieurs macro-volumes caractérisés par un écoulement aéraulique et thermique. Les modèles zonaux permettent de représenter correctement les pièces avec une forte stratification thermique, ils sont adaptés à l'étude d'un local, même de taille importante, et dans le cas de la complexité géométrique d'un bâtiment ils montrent certaines limites cela est dû à comportement aéraulique, les murs et les meubles. Ce type de modélisation se situe entre les modèles multizones et les codes de champs [26].

I.5.4 Les CFD

Une dernière approche existe pour caractériser les mouvements d'air dans les bâtiments, il s'agit de la méthode dite des codes de champs ou CFD (Computational Fluid Dynamics). On parle d'approche microscopique de la modélisation de la ventilation. Le comportement de l'ambiance du local étudié y est caractérisé par ses variables fondamentales pour chaque volume de contrôle :

- La vitesse (à travers ses composantes V_x , V_y et V_z) ;
- La pression ;
- La température.

Les logiciels CFD sont basés sur la résolution des équations de Navier-Stokes (équations de la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement). Ils permettent de décrire avec précision l'allure de l'écoulement, même dans le cas où celui-ci est soumis à des écoulements dominants (jets, panache thermique...). Les données d'entrées (positionnement des entrées d'air, type d'écoulement en entrée, description des sources de chaleur, obstacles, etc.) présupposent un stade très avancé dans la conception du bâtiment et une compréhension poussée des phénomènes physiques de la part de l'utilisateur [26].

Les modèles CFD sont capables de prédire la température locale et l'humidité relative à proximité d'un composant du bâtiment ainsi que les coefficients de transfert de surface locaux [5].

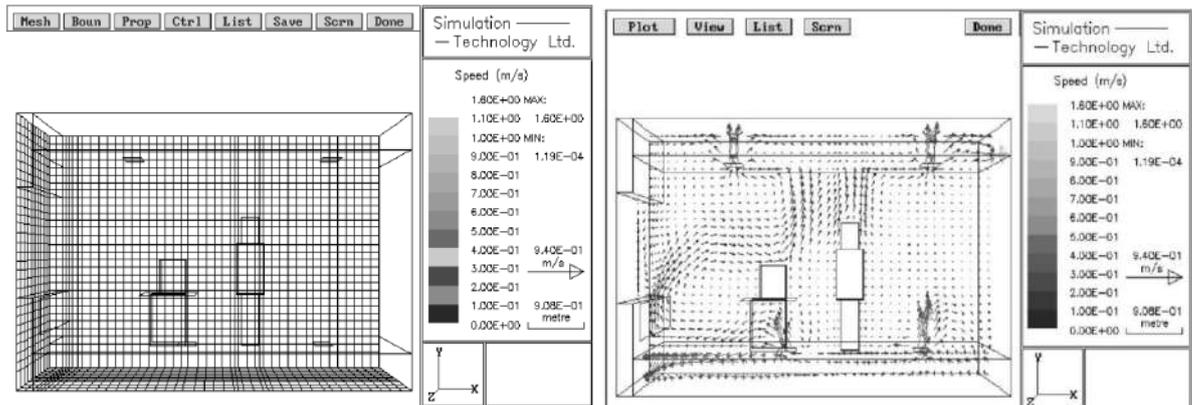


Figure I.8 : Exemple de discrétisation d'un local (figure gauche) et de distribution du champ des vitesses (figure droite) [28].

Chapitre II

Choix des Outils de Simulation Appropriés

II.1 Introduction

La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation. Les outils de simulation numérique occupent une place prépondérante dans les études en physique du bâtiment. La démarche de conception optimale qui résulte de l'épuisement des ressources énergétiques et du souci de préservation de l'environnement, n'a fait qu'amplifier leur utilisation [29].

Les outils de simulation thermique sont de plus en plus utilisés par tous les métiers impliqués dans la conception des bâtiments. Au fur et à mesure que les logiciels d'analyse de bâtiment deviennent plus sophistiqués, intégrés et plus faciles à utiliser, les chercheurs, les designers et les architectes sont confrontés à l'opportunité et à la nécessité de mieux comprendre la performance du bâtiment, notamment en termes d'optimisation énergétique.

Reconnaître les implications des décisions de conception prises par les différents membres de l'équipe de conception sur les performances énergétiques et environnementales du bâtiment engage tous les membres à effectuer des simulations. En conséquence, les outils de simulation sont devenus reconnus comme des outils d'aide à la conception au sein de l'industrie, de l'architecture, de l'ingénierie...etc [30].

La simulation thermique des bâtiments est l'analyse dynamique de la performance énergétique des bâtiments à l'aide de techniques de modélisation et de simulation informatiques. Dans ces simulations, un calcul des charges thermiques et de la consommation énergétique du bâtiment est impliqué via la détermination des caractéristiques thermiques du bâtiment et de ses systèmes de construction. La simulation thermique du bâtiment est une méthode puissante pour étudier la performance thermique des bâtiments et évaluer la conception architecturale. Des problèmes de conception complexes peuvent être étudiés et leurs performances peuvent être quantifiées et évaluées.

La collection des outils de simulation thermique pour tous les professionnels de la conception de bâtiments est diversifiée, allant des logiciels de recherche aux produits commerciaux. Ils varient dans leurs modèles thermodynamiques, leurs interfaces graphiques, leur objectif d'utilisation, leur applicabilité au cycle de vie et leur capacité à échanger des données avec d'autres codes de calcul. Le fait que la simulation thermique soit devenue un élément intégré au processus de conception a entraîné une adoption diversifiée et croissante des utilisateurs, s'adressant à toute l'équipe de conception. D'autre part, en raison de l'importance croissante des décisions prises au début du processus de conception et de leur impact sur les performances énergétiques et sur les coûts, plusieurs outils de simulation thermique ont été développés pour effectuer des analyses énergétiques précoces de manière indépendante.

Avec le développement d'outils thermiques du bâtiment intégrant des données météorologiques locales, la disponibilité des caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction et l'exigence de réglementations thermiques locales, le nombre d'utilisateurs d'outils augmente considérablement. Actuellement, il existe des centaines de programmes qui peuvent être appliqués à l'analyse de l'énergie des bâtiments et à la simulation thermique. Ils sont exploités sur la base des instructions des fabricants, répartis dans le monde entier et ont leurs propres normes. Ces diverses applications doivent être étudiées pour déterminer laquelle d'entre elles a effectué une analyse approfondie de la conception durable et laquelle fournit une base pour l'interopérabilité [31-32].

On peut citer encore plus efficacement la Simulation Thermique Dynamique (STD). Cette dernière permet d'estimer la capacité future d'un bâtiment, en construction ou rénovation, à offrir un niveau de confort thermique acceptable selon différents scénarios. La Simulation Thermique Dynamique a pour objectif de créer un modèle numérique permettant de simuler le comportement du bâtiment heure par heure en fonction de ses caractéristiques (orientation, isolation, inertie, surfaces vitrées,...).

Dans ce chapitre, nous essaierons de faire le point sur l'un des outils de simulation thermique qu'est EnergyPlus et d'expliquer les étapes et la méthode de travail.

II.2 A quoi sert la Simulation Thermique Dynamique (STD) ?

Également appelée « modélisation thermique » par les concepteurs de bâtiments, la simulation thermique dynamique (*Dynamic Thermal Simulation*) est une méthode utilisée pour prédire la façon dont un bâtiment réagit lorsqu'il est soumis à des facteurs environnementaux externes. Tous les paramètres de conception nécessaires, tels que les scénarios d'occupation, les gains de chaleur internes et les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment qui affectent le résultat, sont pris en compte dans un modèle 3D dans le but de réduire les coûts opérationnels sur toute la durée de vie et d'assurer le confort et le bien-être des utilisateurs du bâtiment [33].

Fondamentalement, les logiciels de STD décrivent les échanges thermiques classiques (convection, conduction, rayonnement, changement d'état). Leurs développements récents leur confèrent aussi la capacité très appréciée qui sont :

- ✚ de dimensionner les solutions énergétiques complexes en développant une approche globale (prise en compte de différentes sources d'énergie, du bilan carbone, de l'énergie grise...) ;
- ✚ d'évaluer le confort d'hiver comme d'été, selon un pas de temps bien défini ;
- ✚ de procéder à une approche globale de l'éclairage (en tenant compte de la lumière naturelle et de la modulation de l'appoint artificiel, des protections solaires...) ;
- ✚ de simuler l'impact du vent sur les façades, les phénomènes de ventilation naturelle ;
- ✚ et surtout, d'estimer les consommations réelles d'énergie à partir des informations sur l'enveloppe du bâtiment, de son inertie, des systèmes énergétiques (quelle que soit l'énergie exploitée et en prenant en compte les apports gratuits externes ou internes), du comportement des occupants et du climat local [34].

Pour cela, il nous sera plus pratique d'utiliser un outil de simulation dynamique permettant de modéliser et de simuler les systèmes thermiques, et d'étudier la pertinence d'une approche « bioclimatiques », en particulier de concepts comme l'isolation, à la fois en termes d'économie d'énergie et de confort. Dans ce chapitre, nous allons essayer d'introduire quelques outils de simulation thermique ainsi que des étapes pour simuler un bâtiment à l'aide d'EnergyPlus.

II.3 Quelques outils de simulation thermique

Les logiciels de simulation thermique dynamique (STD) permettent d'optimiser la conception d'un bâtiment. Comment ? En proposant une approche réaliste du fonctionnement thermique de l'ouvrage à l'aide de calculs énergétiques détaillés. Les professionnels exploitent aujourd'hui des modèles numériques que l'on retrouve dans les différents logiciels disponibles selon la qualité des bases de données utilisées, le comportement annuel des systèmes étudiés est lisible au pas de temps horaire, voire au pas de temps de quelques minutes.

✚ TRNSYS (Transient System Simulation)

TRNSYS est un logiciel avec un environnement graphique extrêmement flexible utilisé pour simuler le comportement de systèmes transitoires. Alors que la grande majorité des simulations sont axées sur l'évaluation des performances des systèmes d'énergie thermique et électrique, TRNSYS peut également être utilisé pour modéliser d'autres systèmes dynamiques tels que les flux de trafic ou les processus biologiques.

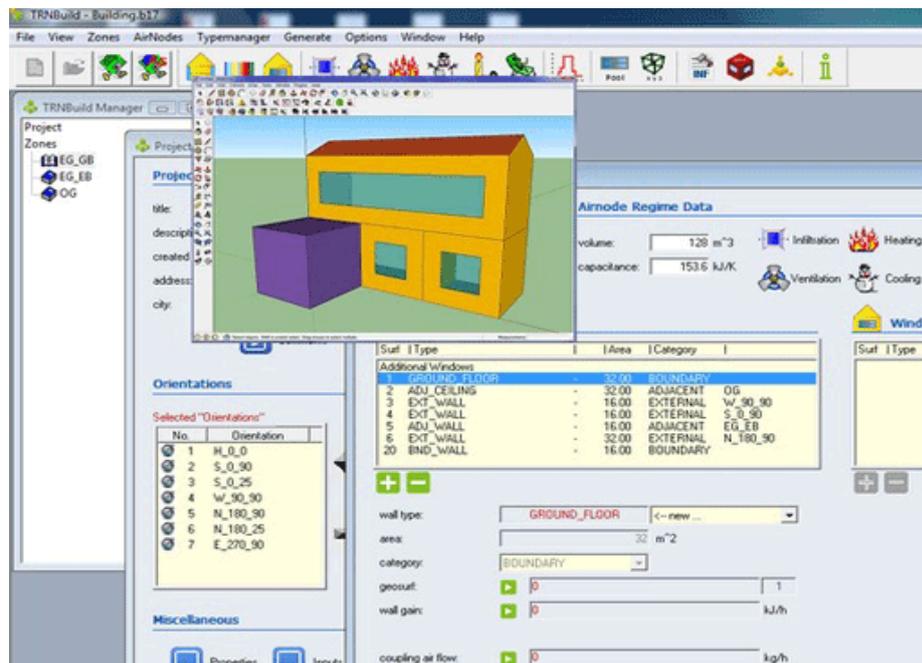


Figure II.1 : Interface graphique de TRNSYS.

TRNSYS est composé de deux parties. La première est un moteur (appelé noyau) qui lit et traite les fichiers d'entrée, résout le système de manière itérative, détermine la convergence et trace les variables système. Le noyau fournit également des utilitaires qui (entre autres) déterminent les propriétés thermophysiques, inversent les matrices, effectuent des régressions linéaires et

interpolent des fichiers de données externes. La deuxième partie de TRNSYS est une vaste bibliothèque de composants, dont chacun modélise les performances d'une partie du système. La bibliothèque standard comprend environ 150 modèles allant des pompes aux bâtiments multizones, des éoliennes aux électrolyseurs, des processeurs de données météorologiques aux routines économiques, et des équipements HVAC de base aux technologies émergentes de pointe. Les modèles sont construits de manière à ce que les utilisateurs puissent modifier les composants existants ou écrire les leurs, étendant ainsi les capacités de l'environnement [35].

TRNSYS comprend TRNSYS3D - un plugin pour SketchUp qui permet à l'utilisateur de dessiner des bâtiments multizones et d'importer leur géométrie (y compris l'ombrage du bâtiment et les facteurs de vue internes pour l'échange de rayonnement) directement depuis la puissante interface SketchUp dans l'environnement de construction TRNBuild.

TRNBuild à son tour est une interface permettant de créer et de modifier toutes les informations non géométriques requises par le modèle de construction TRNSYS. TRNBuild offre à l'utilisateur une grande flexibilité dans la modification des propriétés des matériaux des murs et des couches, la création de profils de ventilation et d'infiltration, l'ajout de gains internes et externes, la définition de plafonds et de sols radiants et le positionnement des occupants pour les calculs de confort [36].

PLEIADES et COMFIE

Ce logiciel, édité par IZUBA énergies, permet de résoudre numériquement des problèmes complexes de thermique. Une fois les maisons finement modélisées dans l'interface PLEIADES et COMFIE, l'utilisateur n'a qu'à décrire des scénarios de fonctionnement selon les paramètres auxquels il s'intéresse. L'outil de simulation dynamique COMFIE résout alors le système d'équations différentielles temporelles et spatiales décrivant l'ensemble des zones, avec un pas horaire, et simule la consommation de chaque logement pour les paramètres d'entrée considérés (figure II.2).

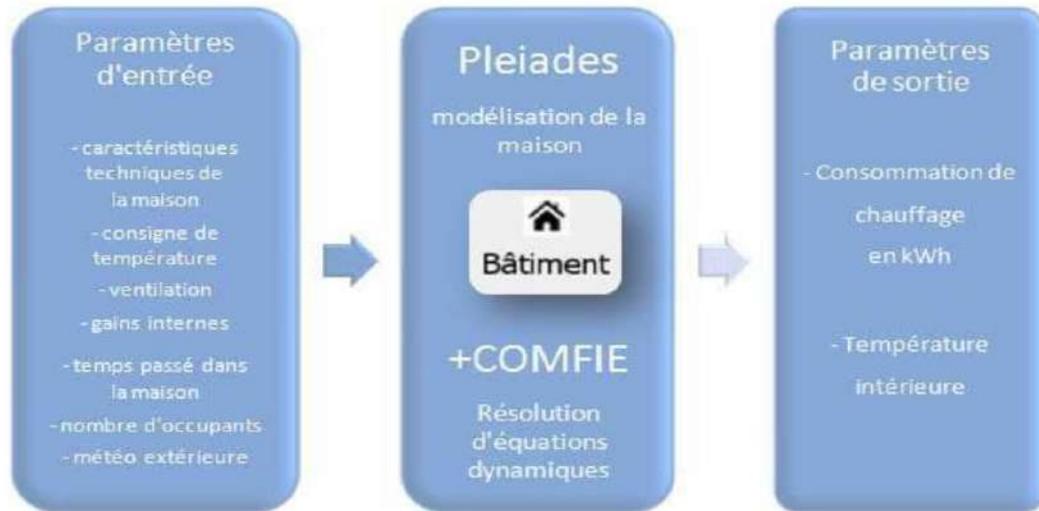


Figure II.2 : Schéma de principe du logiciel Pléiades et Comfie [37].

Le simulateur COMFIE a été développé pour simuler et anticiper le comportement des bâtiments. Le modèle d'enveloppe (volumes finis et réduction par analyse modale) permet d'évaluer les besoins de chauffage et de climatisation, ainsi que le niveau de confort thermique selon une approche multizones.

Un modèle de réseau a été intégré afin de prendre en compte les mouvements d'air. Un chaînage a été réalisé avec un calcul d'éclairage, basé sur le suivi de rayons (modèle RADIANCE via ENLIGHT). Des modules complémentaires concernent les systèmes solaires thermiques et photovoltaïques, les pompes à chaleur, les échangeurs air-sol et les matériaux à changement de phase.

✚ GAMBIT et FLUENT

FLUENT est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides. Ce logiciel est un solveur : il ne comporte pas de processeur de maillage (le maillage doit être réalisé avec un programme de maillage, Gambit par exemple, qui est réalisé par le même éditeur). Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides: écoulements diphasiques(miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence, combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage...etc. [38].

Cependant, GAMBIT est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous FLUENT. L'étape du maillage est un prétraitement au logiciel de simulation. Elle permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Gambit peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de forme rectangulaire ou triangulaire [39].

EnergyPlus

EnergyPlus est l'un des outils de simulation d'énergie les plus connus. Son développement a commencé en 1996, parrainé par le Département de l'énergie (DOE) des États-Unis [20]. Initialement, le gouvernement américain développait deux outils qui sont des logiciels différents, BLAST et DOE-2. Ils ont été abandonnés et ils représentaient une première étape et la base de travail d'EnergyPlus.

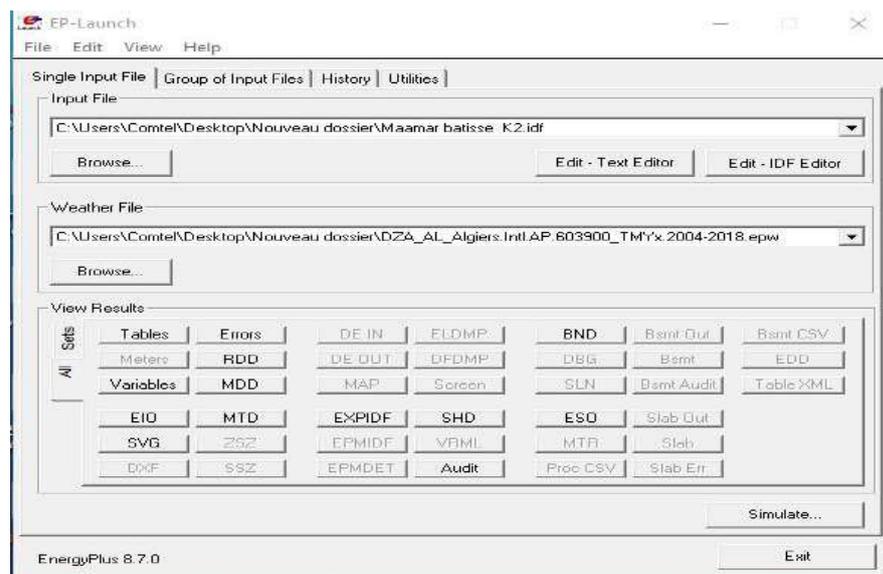


Figure II.3 : Interface graphique d'EnergyPlus.

EnergyPlus est utilisé par les ingénieurs, les architectes et les chercheurs pour modéliser à la fois la consommation d'énergie - pour les charges de chauffage, de climatisation, de ventilation, d'éclairage, de conduction et de traitement - et l'utilisation de l'eau dans les bâtiments. EnergyPlus, combine BLAST, DOE-2 et les systèmes HVAC dans des modules qui peuvent facilement fonctionner ensemble ou séparément. Il permet de calculer les charges de chauffage et de climatisation nécessaires pour des points de consigne de contrôle thermique bien définis, de dimensionner les systèmes HVAC (Systems Heating, Ventilation, and Air

Conditioning), ainsi que de nombreux autres détails. Des données sont nécessaires pour vérifier que la simulation fonctionne comme pour un bâtiment réel sur la base d'un fichier descriptif du bâtiment du point de vue de la structure physique de ce dernier, et les mécanismes associés. Il n'y a pas d'interface visuelle permettant aux utilisateurs de voir et de visualiser le bâtiment [40].

II.4 Points communs entre les outils STD

Les procédures d'analyse énergétique des bâtiments ont les points communs suivants éléments :

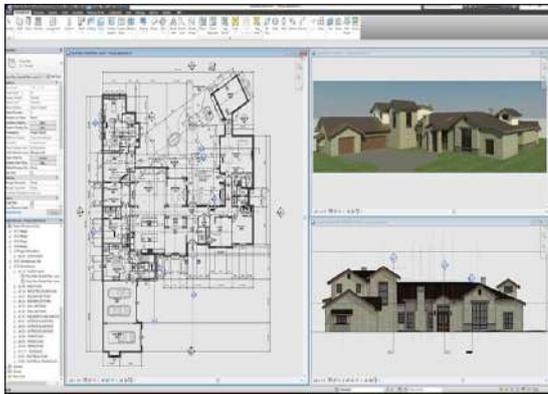
- ✓ Calcul de la charge thermique de l'environnement bâti, liée aux performances du bâtiment (enveloppe).
- ✓ Calcul de la charge thermique/électrique des équipements secondaires (systèmes), c'est-à-dire des appareils de refroidissement, de chauffage ou de la ventilation dans des environnements climatisés.
- ✓ Analyse économique/environnementale permettant de faire le point sur la rentabilité et la performance environnementale pour établir les mesures nécessaires d'économie ou d'énergie à établir.

II.5 La conception 3D

La conception 3D nous aide à avoir une vision large de la réalité. Elle développe la capacité de concevoir et de mieux comprendre et apprécier les relations entre les caractéristiques. La conception 3D (ou modélisation) est le processus de développement d'une représentation mathématique de toute surface tridimensionnelle d'un objet via un logiciel de visualisation spécialisé. La sortie générée à partir du logiciel de modélisation 3D est appelée modèle 3D. La conception peut être créée automatiquement ou manuellement.

La conception 3D est largement utilisée dans divers domaines de la recherche scientifique pour de nombreux objectifs, à titre d'exemple : la modélisation d'une zone ou construction d'un bâtiment particulier. Cette technique a contribué à aider les chercheurs, architectes et designers à visualiser et à construire des prototypes visuels de leurs produits ainsi qu'à fournir une représentation hautement graphique dans les activités quotidiennes.

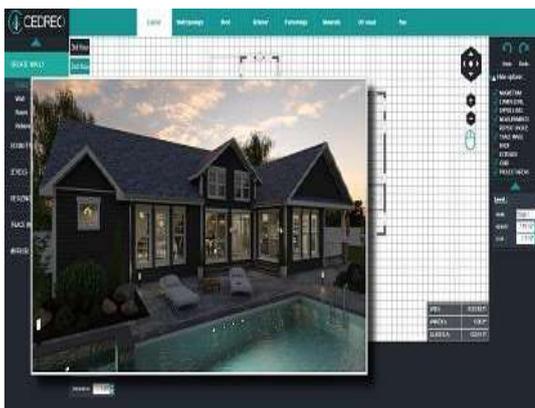
Un logiciel de conception 3D est un outil indispensable si on travaille dans le secteur de l'architecture, de la recherche ou le design. Il peut être utilisé par des architectes, des designers, mais aussi par des étudiants ou des ingénieurs civils, pour créer leurs modèles ou conceptions structurelles. C'est un très bon moyen d'obtenir une meilleure visualisation des projets. Au cours de la conception, on a une base de choix riche pour utiliser de nombreux matériaux et textures différents. Cela permet d'obtenir une représentation photo-réaliste. Un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) est également une bonne solution pour éditer, faire et refaire des modèles très rapidement et facilement pour répondre à nos finalités. La conception 3D peut transformer nos idées en conceptions détaillées [41].



REVIT



ARCHICAD



CEDREO



3D STUDIO MAX

Figure II.4 : Quelques programmes de conception 3D.

II.6 La conception du bâtiment par Google SketchUp

Il faut vérifier plusieurs choses avant de faire le choix final pour une conception 3D appropriée. Il faut se poser les questions suivantes : de quel type de programme on a besoin ? Un programme d'exposition architectural gratuit ? Ou un programme de dessin 3D ? Un programme 3D pour Mac ou Windows ?, en effet il faut faire attention aussi au système d'exploitation avant de choisir un programme 3D.

Il faut également vérifier ce qui convient le mieux à notre usage professionnel. Veut-on utiliser un programme pour aider notre équipe de conception à collaborer ou à obtenir une meilleure visualisation ?

Il existe de nombreux logiciels de cartographie et de modélisation 3D disponibles sur le marché. Google SketchUp est l'une des applications logicielles open source simples, importantes et faciles à utiliser. Il peut être utilisé au niveau éducatif de manière efficace pour démontrer les choses compliquées de manière systématique. L'interface du logiciel est très simple et les outils sont faciles à utiliser. L'utilisateur peut dessiner l'objet très rapidement et le décorer magnifiquement. Les jeux de couleurs et les outils de conception sont conviviaux. Son tutoriel (guide d'apprentissage) est très simple à comprendre pour les nouveaux utilisateurs et ses vidéos de démonstration sont disponibles gratuitement sur la toile pour plus détails [42].

SketchUp est positionné de manière optimale dans le flux de travail du processus de conception pour le couplage à un outil de simulation d'énergie.

Google SketchUp est un programme qui nous permet de représenter la première étape du bâtiment en créant des modèles 3D et en visualisant le bâtiment dans tous ses détails, et cela se fait à l'aide du plugin Euclid selon l'étapes les plus importantes :

- Création de la géométrie par dessin en 3D avec le module complémentaire.
- Création de la géométrie par dessin en 3D

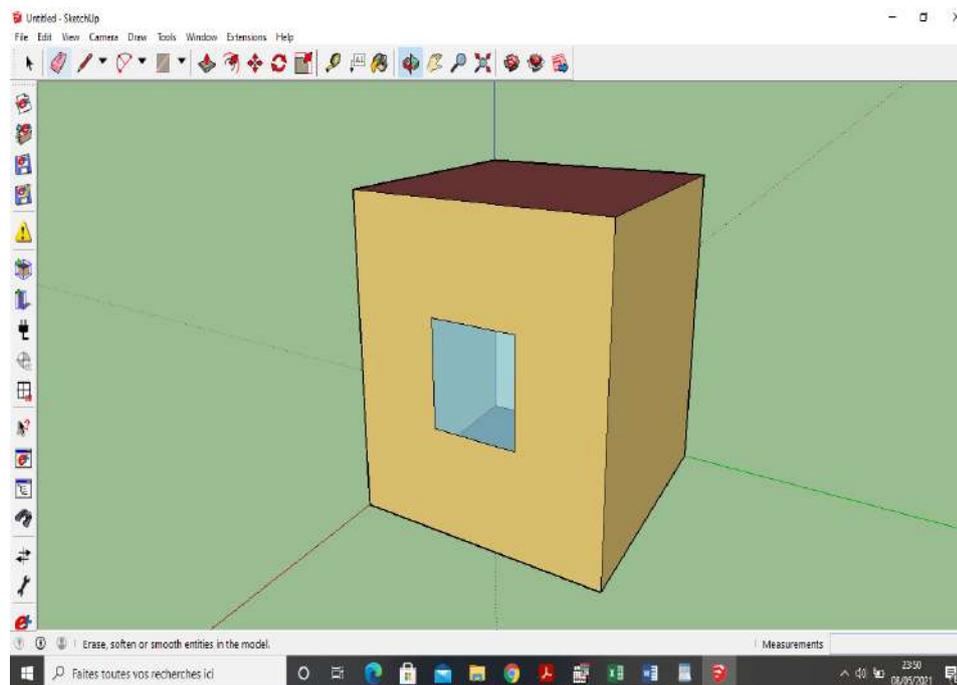


Figure II.5 : Interface graphique de Google Sketch Up, Création d'un modèle 3D.

Après cela, les fichiers créés sont affichés sous Google SketchUp (*.idf) dans EnergyPlus, Il présente également de nombreux avantages pour créer différentes tailles 3D, le rendre transparent ou visible (figure II.6), et d'autres options en plus de la facilité d'utilisation [32].

Ce programme nous garantit des informations d'ingénierie centralisées et organisées, par exemple le Nord est représenté par défaut, le Nord est confondu avec la direction de l'axe vert du repère absolu de l'application et a comme valeur 0° .

Une partie de l'attrait du couplage d'EnergyPlus à SketchUp est qu'il s'agit déjà d'un outil bien connu et populaire parmi les architectes, les designers et les étudiants.

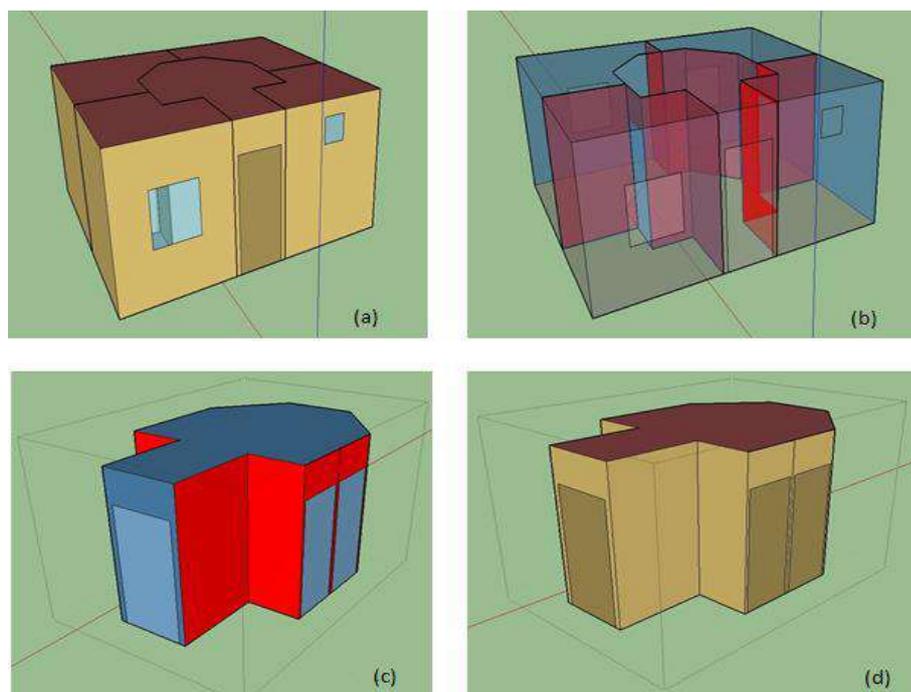


Figure II.6 : Maquette numérique d'un appartement Studio : (a) Plan opaque, (b) plan semi-transparent (c) et (d) zone opaque avec distinction des cloisons [5].

II.7 EnergyPlus : outil puissant pour la simulation thermique et dynamique

C'est l'un des outils de simulation énergétique les plus robustes et les plus utilisés disponibles aux niveaux académique et commercial. Il est open source et téléchargeable gratuitement (<https://energyplus.net/downloads>) et il est compatible avec les systèmes Windows et Linux & Mac (avec quelques limitations). Une à deux nouvelles versions sont publiées chaque année ; la version actuelle est la version 9.5.0 (Mars 2021).

EnergyPlus a les caractéristiques et les capacités de BLAST et DOE-2, mais il est un logiciel entièrement nouveau qui combine le bilan thermique de BLAST avec un système HVAC. EnergyPlus vise à développer et à organiser des outils dans des modules qui peuvent facilement travailler ensemble ou séparément.

EnergyPlus simule les performances énergétiques et environnementales d'un bâtiment en tenant compte de l'interaction de tous les composants et systèmes du bâtiment. Par exemple, l'enveloppe du bâtiment, les fenêtres, la structure, le chauffage, la ventilation, le système de climatisation, l'éclairage, les charges de prises, le gain de chaleur interne provenant de différents systèmes, etc. Le logiciel adopte une technique de correction prédictive pour communiquer avec les systèmes

du bâtiment et les différentes zones et prédit la charge énergétique du système pour maintenir la température de l'air dans la zone dans l'intervalle recommandé. Après cela, le logiciel simule le système du bâtiment pour déterminer la taille de l'équipement (dimensionnement) et refait le bilan thermique de l'air de la zone et la température réelle de l'air de la zone [43].

Désormais, grâce à Google Sketch Up qui est le plus courant, nous pouvons donc définir et créer la géométrie de notre bâtiment 3D et ses différentes zones (également visualiser les résultats d'études spécifiques). De manière simple et facile, il est également disponible gratuitement et sans restrictions (contraintes) imposées.

Ci-après, une liste de certaines fonctionnalités d'EnergyPlus [44] :

- ✓ Pas de temps par heure, définissables par l'utilisateur pour l'interaction entre les zones thermiques et l'environnement.
- ✓ Les fichiers de temps, d'entrée et de sortie basés sur le texte ASCII (d'extension epw) comprenant des conditions environnementales horaires ou secondaires, ainsi que des rapports standard et définis par l'utilisateur respectivement.
- ✓ Bilan de chaleur basé sur une technique de solution des charges thermiques permettant un calcul simultané des effets radiatifs et convectifs à la fois dans la surface intérieure et extérieure pendant chaque pas de temps.
- ✓ Modèles de confort thermique basés sur l'activité, la température à l'intérieur, l'humidité....etc.
- ✓ Calculs de vitrage avancés, y compris stores à vitres contrôlables, vitrages électro chromes, bilans de chaleur couche par couche qui permettent une affectation correcte de l'énergie solaire absorbée par les vitres et une bibliothèque de performances pour de nombreux types de fenêtres.

La simulation d'un bâtiment peut se faire en plusieurs étapes comme il est représenté sur la figure (II.7).

II.8 Le module complémentaire Euclid

Euclid est une extension gratuite et open-source pour SketchUp qui facilite la création et la modification des entrées géométriques pour les modèles énergétiques de construction. Euclid s'appuie sur l'extension Legacy OpenStudio développée à l'origine par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). Euclid prend en

charge la lecture et l'écriture de la géométrie EnergyPlus dans son format IDF natif, et ajoute également de nouvelles fonctionnalités et capacités pour lire et écrire d'autres formats de modèles énergétiques [45].

II.9 Etapes de simulation d'un bâtiment avec EnergyPlus :

II.9.1 Première étape

La création du bâtiment est la première étape d'une simulation énergétique. Ce processus peut être fait par exemple en insérant les coordonnées dans l'outil ou le logiciel EnergyPlus (figure II.7) ou en téléchargeant des fichiers à partir d'autres modules. En ce qui concerne la structure du bâtiment et sa construction, il est essentiel de préciser les dimensions de la structure organisationnelle, de la géométrie et des matériaux utilisés dans les composants de l'architecture du bâtiment.

Avant de lancer la simulation, les utilisateurs ont besoin d'un fichier décrivant les caractéristiques des matériaux utilisés pour la simulation. L'éditeur IDF est fourni pour écrire ce fichier. Afin de pouvoir apporter des modifications à notre fichier grâce à l'éditeur IDF, l'utilisateur doit saisir les caractéristiques thermophysiques de chaque matériau, chaque surface. Cet éditeur permet d'accéder facilement aux données du bâtiment et de les modifier si nécessaire. Cette interface simplifie la lecture et la modification, et facilite l'accès aux différents objets [46].

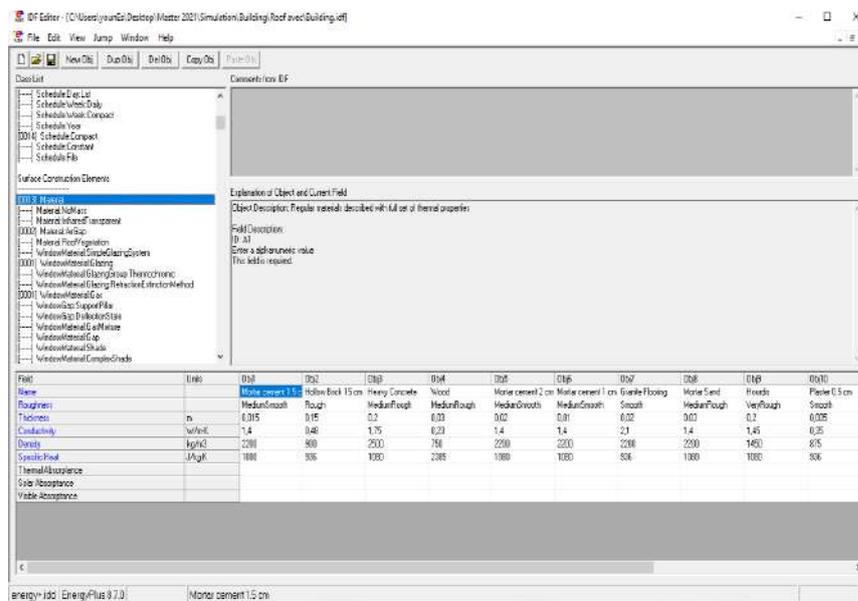


Figure II.7 : Introduction des coordonnées d'une habitation dans l'option "Surface détaillée" d'EnergyPlus (L'éditeur IDF)

II.9.2 Seconde étape

EnergyPlus offre à travers une interface graphique interactive (figure II.8), la possibilité de simuler plusieurs types de systèmes HVAC couramment utilisés. De plus, les utilisateurs peuvent créer leur propre modèle de systèmes et indiquer le niveau de détail à toutes les étapes du processus de conception et produire les scénarios désirés [47].

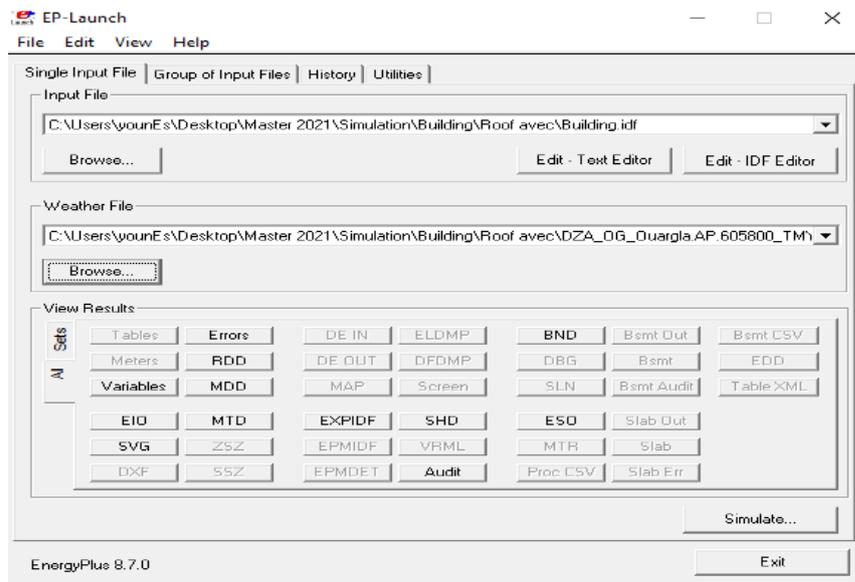


Figure II.8 : Lancement de la simulation à travers l'interface graphique d'EnergyPlus.

II.9.3 Troisième étape

Après l'exécution de ce logiciel, il convient de vérifier s'il existe une erreur ou une discordance sévère introduite dans la console de variables. Dans tous les cas, l'outil de simulation publie ses propres avertissements dans un rapport final contenant les résultats et les erreurs y compris toutes les conclusions pertinentes pour le déroulement de l'exécution du programme comme le montre la figure (II.9).

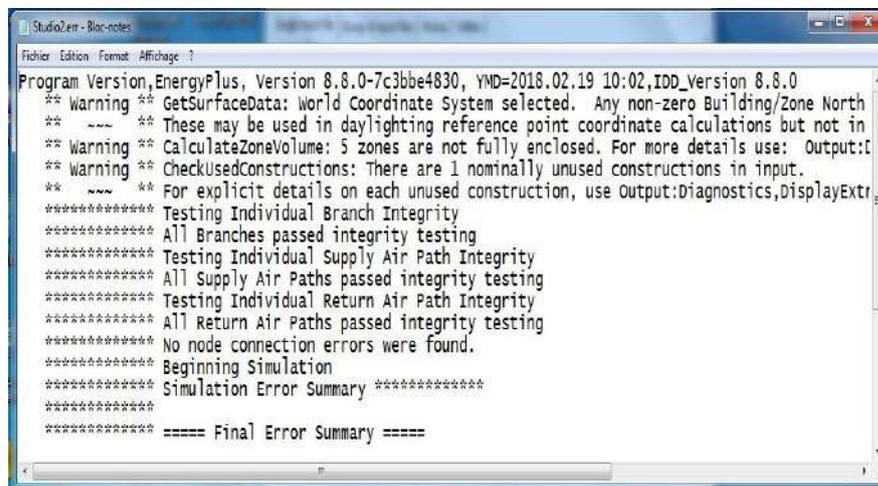


Figure II.9 : Rapport d'erreur généré par EnergyPlus après l'exécution.

Les résultats obtenus peuvent être visualisés grâce au programme auxiliaire xEsoView propre à EnergyPlus. Cependant pour effectuer une représentation plus lucide, il faut avoir recours à un programme d'analyse de données et de représentation graphique. Pour notre cas, nous avons opté pour Origin 6.0. Les résultats d'analyse peuvent être mis à jour automatiquement en cas de changement de données ou de paramètres, ce qui nous permet de créer des modèles pour des tâches répétitives ou d'effectuer des opérations par lots à partir de l'interface utilisateur, sans avoir besoin de programmation.

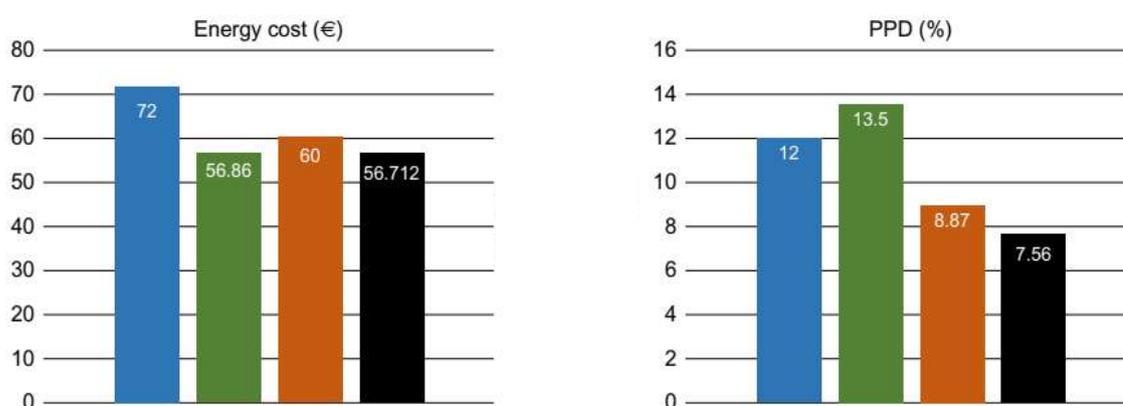


Figure II.10 : Visualisation et analyse des résultats de simulation (exemple).

EnergyPlus utilise également quelques programmes auxiliaires pour effectuer des tâches supplémentaires. On peut citer à titre d'exemple :

- ✚ **Elements** (création des fichiers météo) : Outil open-source, pour créer et modifier des fichiers météorologiques personnalisés. Il peut générer plusieurs types de fichiers (bin, fmt, epw...etc). L'extension epw est utilisée par EnergyPlus.
- ✚ **View Factor** : Utilisé pour calculer les facteurs de formes qui peuvent être utilisés avec EnergyPlus.
- ✚ **HVAC Performance Curve Fit Tool** : Génère des courbes de performance HVAC dans le format EnergyPlus IDF.
- ✚ **EP-Compare** : Un utilitaire pour comparer graphiquement les résultats tabulaires de plusieurs fichiers de simulation.
- ✚ **xEsoView** : Une visionneuse des résultats (Outputs) de la simulation avec EnergyPlus.

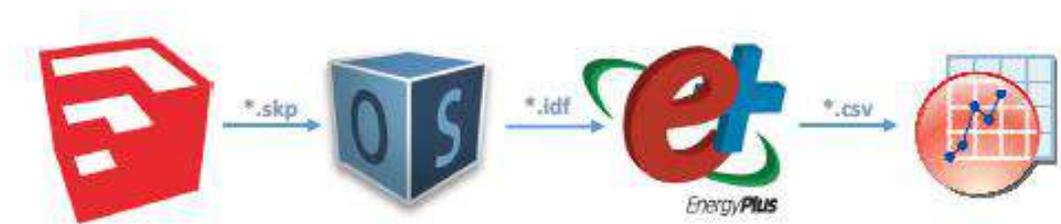


Figure II.11 : Schéma récapitulatif des étapes de simulation.

II.10 Conclusion

La simulation est une série de calculs effectués par un ordinateur et reproduisant des phénomènes physiques pour s'approcher de la réalité ; elle offre la possibilité de comparer de nombreuses variables entre elles en économisant du temps et des moyens. Elle permet ainsi d'atteindre plus facilement un objectif donné.

La simulation thermique permet d'optimiser les performances thermiques, d'analyser les paramètres physiques dans une période spécifique, et de prendre en compte l'évolution des conditions extérieures au cours d'une période, le but primordial étant d'assurer le confort thermique.

Il existe une variété de boîtes à outils de simulation thermique disponibles et elles diffèrent par les modèles, les interfaces et le but d'utilisation. Pour notre cas, nous avons opté pour Google SketchUp pour la conception 3D de l'habitat et pour EnergyPlus comme outil de simulation thermique.

Chapitre III

Résultats et Analyses

III.1 Introduction

Un bâtiment adapté au climat est un bâtiment bien conçu qui assure le confort de ses habitants. Pour intégrer les outils architecturaux dans un site sec et aride, nous avons besoin de données climatiques car elles sont considérées comme très importantes. Avec les renforcements des normes, les recherches au niveau de la thermique du bâtiment se sont accentuées, en particulier sur l'isolation thermique de l'enveloppe qui joue un rôle important dans la maîtrise de la consommation d'énergie. En effet, une grande part des déperditions thermiques est liée aux pertes de chaleur à travers les murs, la toiture et le plancher et même les vitres.

Avec les renforcements des normes, les recherches au niveau de la thermique du bâtiment se sont accentuées, en particulier sur l'isolation thermique de l'enveloppe qui joue un rôle important dans la maîtrise de la consommation d'énergie. En effet, une grande part des déperditions thermiques est liée aux pertes de chaleur à travers les murs, la toiture et le plancher et même les vitres (figure III.1).

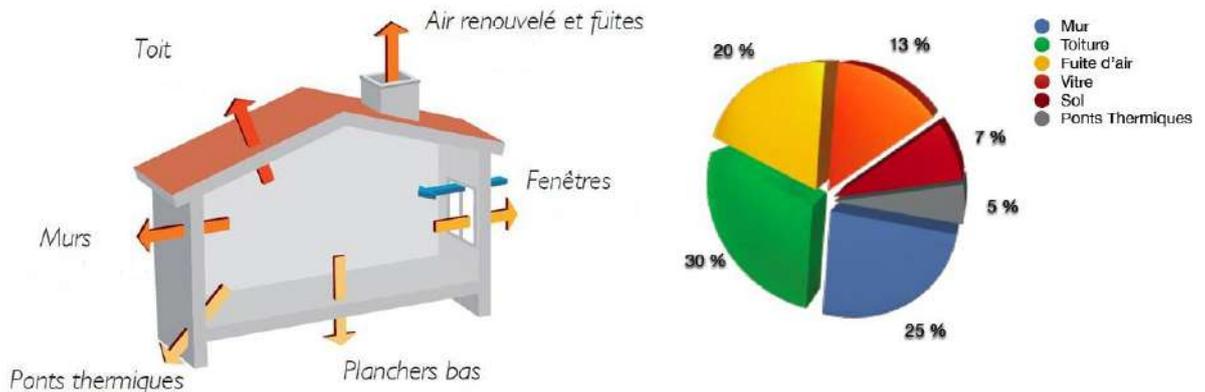


Figure III.1 : Déperditions thermiques dans un habitat [48].

Le choix des matériaux est donc une étape fondamentale dans le processus de conception architecturale d'un bâtiment. Nous avons sélectionné des matériaux utilisés qui sont actuellement disponibles sur le marché algérien (ciment, brique, plâtre ... etc.), ces matériaux ont des caractéristiques d'émissions de carbone faibles, et ils ne contiennent pas de matériaux recyclés.

Les matériaux d'isolation jouent un rôle important dans la réduction de la consommation d'énergie et la création d'espaces de vie sains et confortables. En hiver, la couche d'isolation maintient la chaleur à l'intérieur, limitant ainsi les déperditions thermiques du bâtiment. En été, la couche isolante joue un rôle

inverse, elle empêche donc cette fois-ci la chaleur de s'introduire vers l'intérieur du bâtiment. Aujourd'hui, avec une multitude de produits d'isolation sur le marché, le choix n'est souvent pas toujours évident. Cependant, chaque isolant possède un ensemble très précis de propriétés physiques [49].

Dans ce chapitre, nous procéderons à la conception 3D d'un habitat de manière ordinaire. Nous continuerons par la suite par le renforcement de l'enveloppe de l'habitat par une couche isolante de polystyrène. Le but est de voir l'effet de l'isolation thermique des parois extérieures sur l'environnement intérieur de l'habitat. Une analyse des résultats obtenus à partir du programme de simulation sera effectuée.

III.2 Les données climatiques

Le climat est l'ensemble des données caractérisant l'état moyen de l'atmosphère dans une région déterminée. Les climats sont classés selon la température et l'humidité : climat tropical, le climat sec, climat tempéré chaud, climat tempéré froid et climat froid. Par contre la météo est l'ensemble des conditions atmosphériques prévalant à un endroit donné durant une période [50].

La wilaya de Ouargla est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduite, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l'écosystème [51].

Les températures moyennes mensuelles enregistrées au mois le plus chaud (juillet) sont de 35.5°C. Alors que celles du mois le plus froid (janvier) sont de 11.7°C. L'humidité relative enregistre des taux aux alentours de 25 à 61 % [51]. Les précipitations sont rares et irrégulières et varient entre 0.3 mm et 14.4 mm par an. Le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année, avec une vitesse pouvant atteindre 4.2 m/s [51].

III.2.1 Choix des Journées

Le choix des jours de simulation a été rigoureux, un tracé des températures ambiantes tout au long de l'année nous a permis de faire le choix sur deux périodes différentes, ces périodes étant les plus chaudes et les plus froides de l'année. Ces valeurs ont été extraites d'un fichier TMY qui contient toutes les informations nécessaires (température ambiante, vitesse du vent, humidité relative...etc.) pour

une simulation minutieuse. Pour garantir une comparaison constructive, il est suffisant de se limiter à ces deux courtes périodes : cinq jours appartenant au mois de Décembre et cinq autres appartenant au mois de Juillet.

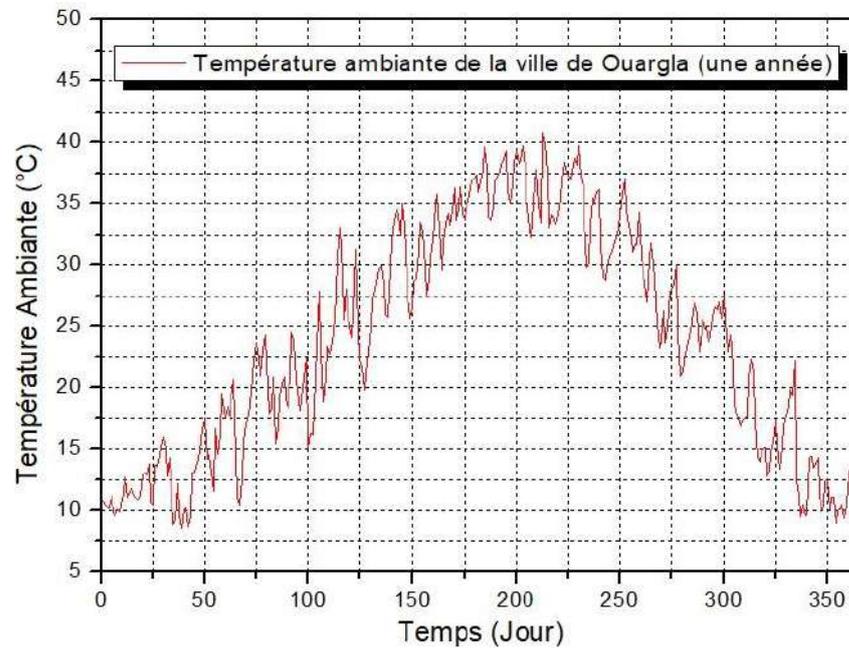


Figure III.2 : Température extérieure moyenne jour par jour pour une année de la ville de Ouargla.

Dans notre cas, on s'intéresse particulièrement aux températures intérieures de l'habitat. Pour cela nous avons utilisé le fichier météo de Ouargla [52]. Ce fichier (*.epw) comprend les valeurs du rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse et la direction du vent, et des informations propres au site de Ouargla comme la latitude, la longitude et l'altitude du lieu.

III.3 Présentation et conception de l'habitat

Le modèle de notre étude est un appartement à quatre façades. La construction est implantée sur une surface de 82.8 m². La construction proposée est composée de parois, portes en bois et fenêtres en verre. Le système constructif est un système poteaux poutres, avec un plancher et une dalle en béton armé. Les murs extérieurs se composent de plusieurs couches de matériaux de construction ; la brique creuse de 15 cm d'épaisseur, le ciment mortier et de plâtre, avec des épaisseurs bien précises. À l'inverse, les murs de l'intérieur (les cloisons) sont d'une épaisseur de 20 cm en brique plus une couche d'enduit de plâtre. Le bâtiment a une porte principale sur le côté Nord et dispose de grandes fenêtres de 1,44 m² chacune sur les côtés Est et Ouest respectivement, ce qui le rend exposé au soleil et à la ventilation naturelle de tous les côtés. Les façades de cet habitat se divisent en

deux types, l'une est principale, comprend certaines ouvertures et l'autre secondaire ne portant aucune ouverture et la hauteur des murs est égale à 2,8 m. Ce modèle se compose de deux chambres d'une superficie de 10,8 m² pour la première et de 12 m² pour la deuxième, d'un séjour de 10,8 m², cuisine et salle de bain. Les fenêtres et les portes sont supposées fermées.

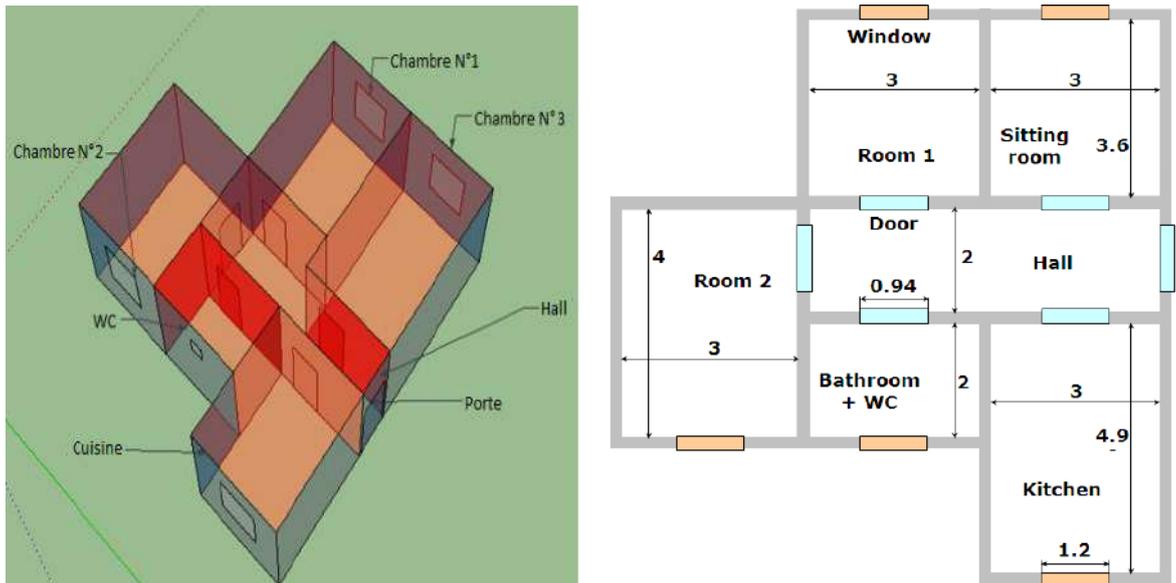


Figure III.3 : Représentation 3D

(semi-transparente) et plan de l'habitat.

Le modèle 3D de l'habitat a été réalisé dans Google SketchUp et ensuite intégré dans EnergyPlus. L'ensemble est supposé en évolution libre, c'est-à-dire sans systèmes énergétiques, et il n'y a aucun apport interne dans cette zone. La représentation de l'édifice sous le programme SketchUp est souple et flexible, elle permet de montrer les façades du bâti d'une manière opaque, semi transparente et faire apparaître même les cloisons avec une couleur différente. Cette astuce permet au concepteur de distinguer les murs extérieurs des murs intérieurs (figure III.3). Les différentes zones du bâtiment peuvent être affichées sélectivement pour détecter facilement les erreurs éventuelles.

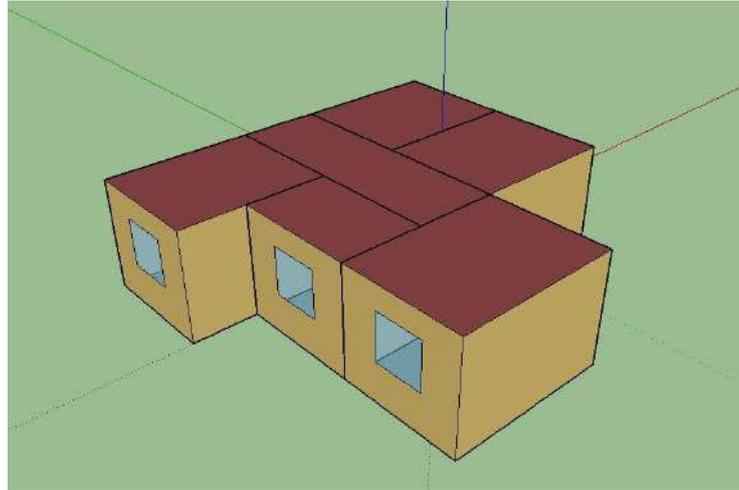


Figure III.4 : Le plan 3D de l'habitat.

Les propriétés thermiques et physiques des éléments de construction sont presque les mêmes pour la plupart des bâtiments de la région. Les matériaux de construction utilisés sont disponibles localement. Le tableau (III.1) décrit les types d'éléments de construction différents et contient la description de chaque type de construction (mur, toit ou plancher).

Tableau III.1 : Couches et Caractéristiques des différentes parois.

| Element de construction | | Description |
|-------------------------|-------------------|--|
| Mur exterior | Sans isolation | 2 cm de ciment mortier + brique creuse 30 cm + 0.5 cm plâtre |
| | Avec isolation | 2 cm de ciment mortier + 15 cm brique creuse + 05 cm polystyrène + 15 cm brique creuse + 0.5 cm plâtre |
| Mur interior | Sans isolation | 0.5 cm plâtre +20 cm brique creuse + 0.5 cm plâtre |
| Toit | Sans isolation | 4 cm ciment mortier + 20 cm Hourdis + 0.5 cm plâtre |
| | Avec isolation | 4 cm ciment mortier + 05 cm polystyrène + 20 cm Hourdis + 0.5 cm plâtre |
| Sol | | 2 cm carrelage + 3 cm mortier de sable + 20 cm béton lourd |

III.4 Hypothèses et données

Les principales hypothèses portent notamment sur l'enveloppe du bâtiment et sont introduites dans le modèle numérique pour plus de précision. Notre étude étant simple, basée uniquement sur le gain d'énergie solaire, les données supplémentaires liées à toute forme de gain interne (présence de personnes, équipements électriques, etc.) ont été omises.

Toutes les données requises pour la simulation doivent être prédéfinies dans l'éditeur de fichier *. Idf d'EP-Launch. Il faut d'abord commencer par présenter les matériaux de construction de notre maison, en précisant leurs propriétés thermo-physiques, leur épaisseur et même la nature de leur rugosité. Ensuite, les types de constructions doivent être déterminés (différentes couches de murs, sols, plafonds et même types de vitrages et de couches isolantes).

III.5 Résultats de simulation

Nos simulations sont basées sur le renforcement de l'enveloppe de la bâtisse par une couche isolante de 5 cm en polystyrène. Notre choix s'est fixé sur différentes configurations de l'isolation, à partir desquels nous pouvons obtenir les aboutissements de chaque cas. Par la suite, une comparaison minutieuse des résultats sera effectuée pour repérer la configuration idéale de l'isolation dans notre cas d'étude.

Dans ce contexte, cinq configurations des murs vont être vérifiées :

- 1er cas : Sans isolation de l'habitat ;
- 2ème cas : Isolation des parois de la zone ;
- 3ème cas : Isolation des parois de la toiture de l'habitat ;
- 4ème cas : Isolation des parois extérieures de l'habitat ;
- 5ème cas : Isolation globale de l'habitat (parois extérieures + toit).

Les figures dessinées ci-dessous représentent le tracé de la température interne de trois zones différentes de l'habitat, la salle de séjour, la chambre 1 et la chambre 2. Ce sont tout simplement les trois endroits de l'habitat où dans lesquels l'individu passe la majorité de son temps, et dans lesquels il est important d'assurer le confort thermique.

Les figures (de (III.5) jusqu'à (III.10)) représentent les températures horaires de l'air intérieur des différentes pièces de l'habitat. La simulation numérique par le programme permet de prévoir le comportement thermique pour les deux situations: sans et avec isolation thermique et pour les différents configurations mises en question.

III.5.1 Période chaude

Pour la période chaude (figures (III.5), (III.6) et (III.7)), les températures en absence d'isolation sont comprises entre 36 et 40 °C. C'est une température très élevée par rapport à la température désirée (entre 20 et 27 °C). On peut remarquer évidemment qu'un mur en brique de 30 cm n'empêche nullement la chaleur de s'introduire à l'intérieur de l'habitat. L'isolation des parois de la zone elle-même ou des parois extérieures de l'habitat reste insuffisante pour se rapprocher des températures désirées. Tandis que l'isolation de la toiture a une influence apparente, celle-ci permet de diminuer les températures de près de 5 °C dans cette période de l'année, et permet également d'amortir les fluctuations en température qui sont comprises entre 33 et 35 °C. L'isolation totale (les parois externes et la toiture) permet de gagner deux degrés en plus que l'isolation de la toiture seulement, c'est un avantage de plus, cette valeur est petite mais elle est d'une grande importance sur le plan thermique et sur le plan énergétique également.

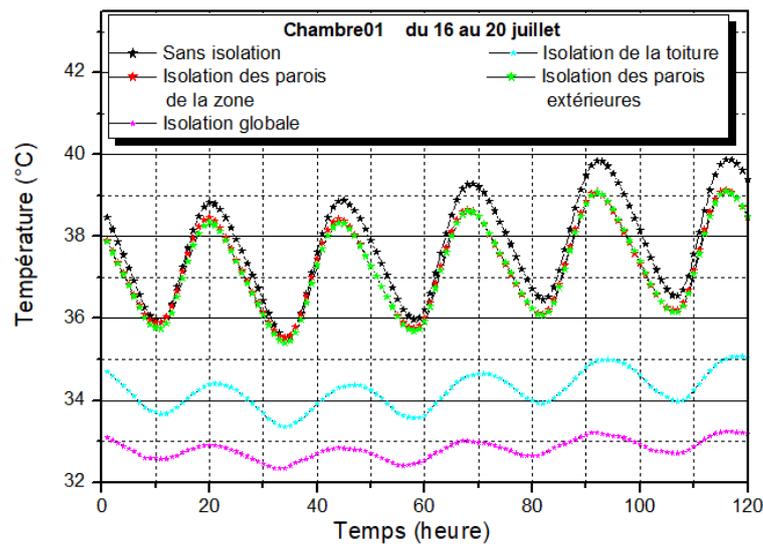


Figure III.5 : Températures de l'air intérieur de la chambre 1, du 16 au 20 juillet.

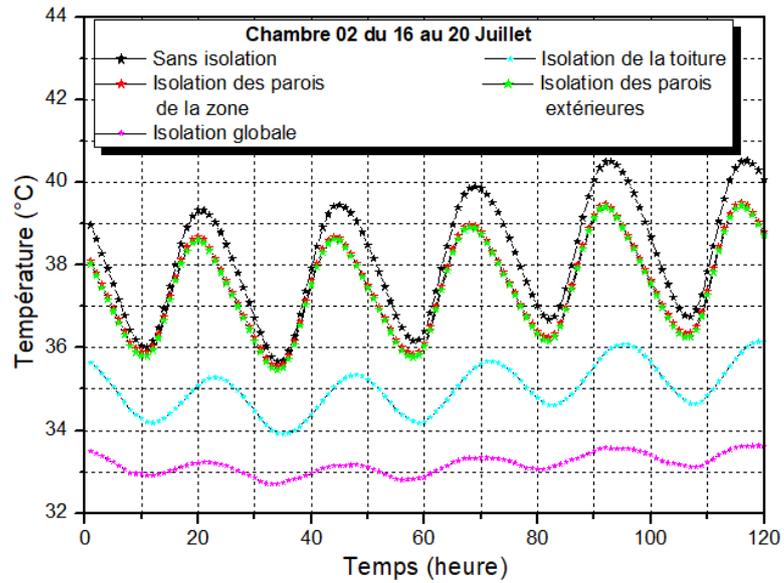


Figure III.6 : Températures de l’air intérieur de la chambre 2, du 16 au 20 juillet.

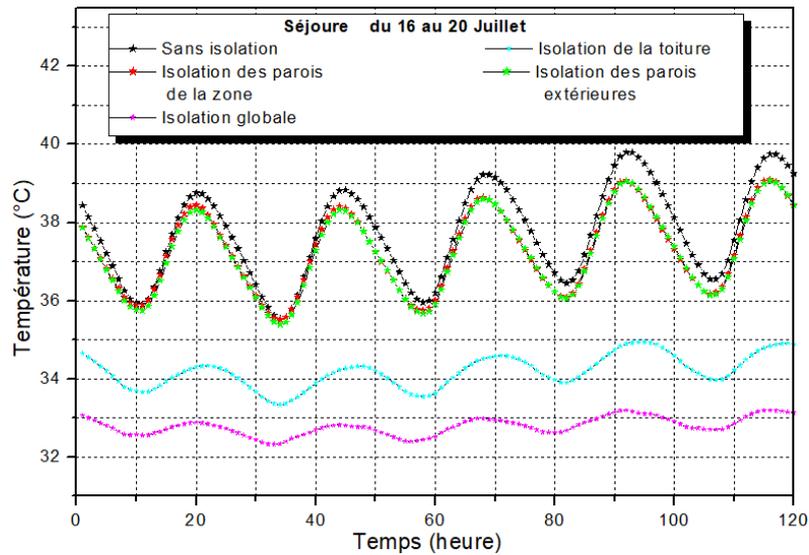


Figure III.7 : Températures de l’air intérieur de la salle de séjour, du 16 au 20 juillet.

III.5.2 Période froide

Les figures ci-dessous (III.8), (III.9) et (III.10) apportent une idée sur l’évolution des températures en faisant tourner le programme conçu sous l’environnement de simulation décrit précédemment pour la période froide de l’année.

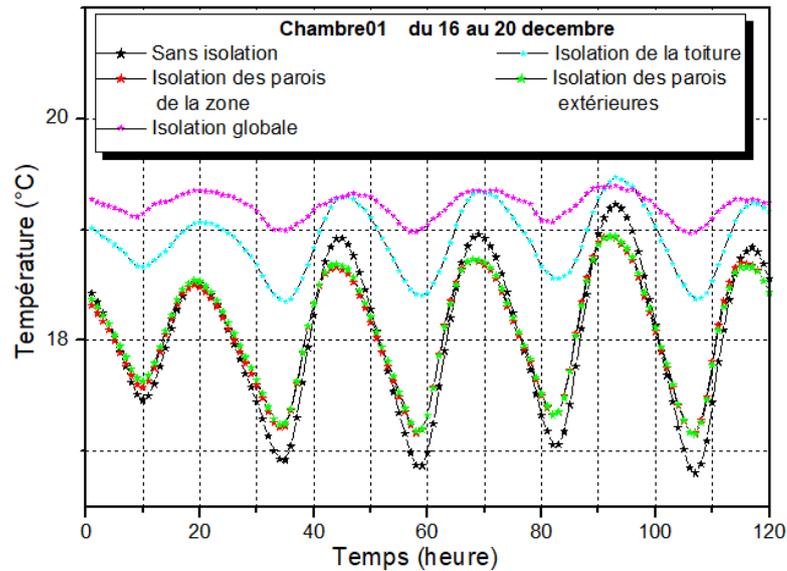


Figure III.8 : Températures de l'air intérieur de la Chambre 1, du 16 au 20 Décembre.

De même que pour la période froide, les températures durant le mois de Décembre pour le cas où l'habitat n'est pas isolé restent en dehors de l'intervalle du confort thermique, elles sont remarquablement en dessous des températures requises pour un environnement convenable pour les occupants. L'isolation des zones ou des parois extérieures n'a aucun effet sur l'évolution des températures intérieures et s'avère inefficace pour éviter les déperditions. Par contre l'isolation de la toiture a une influence considérable sur les températures et permet effectivement d'atténuer les amplitudes des écarts importants et de stabiliser ces derniers. Ces écarts qui peuvent atteindre 3°C en absence de l'isolation et sont réduites à 0,5°C dans le cas où l'habitat est isolé.

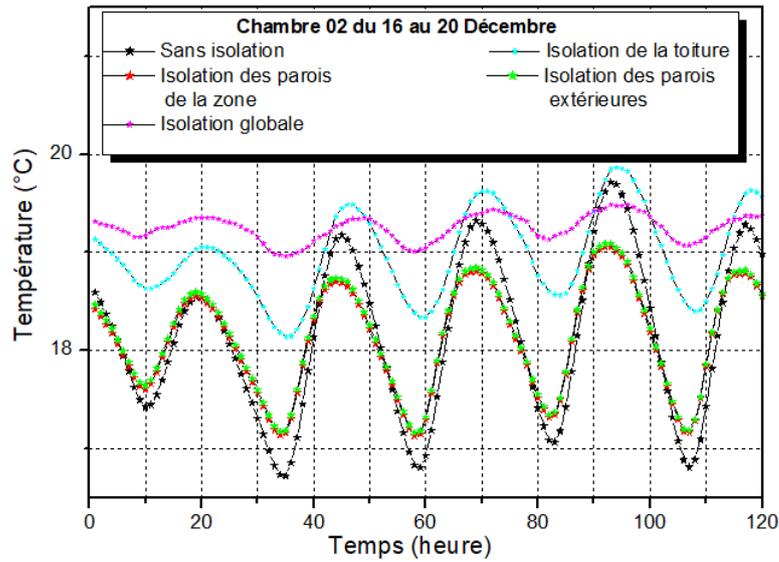


Figure III.9 : Températures de l’air intérieur de la Chambre 2, du 16 au 20 Décembre.

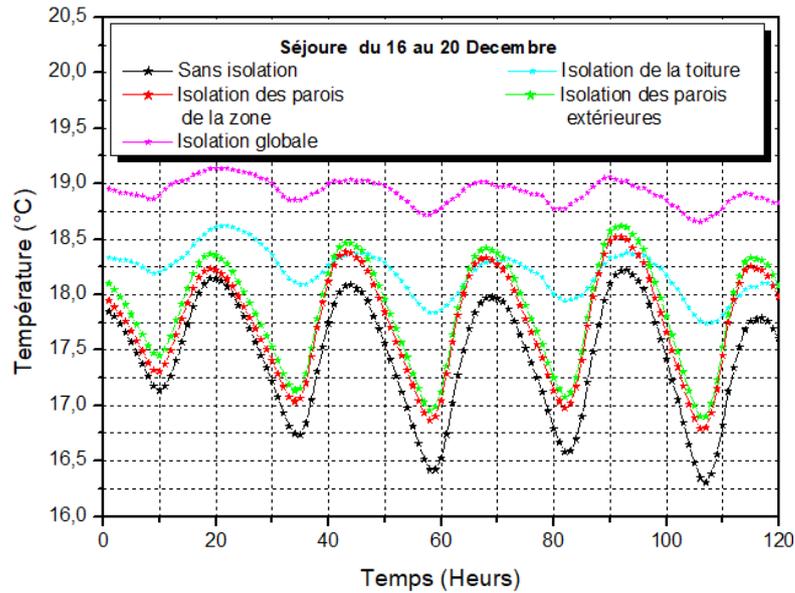


Figure III.10 : Températures de l’air intérieur de la salle de séjour, du 16 au 20 Décembre.

L’isolation de toutes les parois extérieures (y compris la toiture) s’avère de nouveau la configuration la plus avantageuse en s’approchant largement de la plage de confort (presque 19 °C) et en assurant des températures stables évitant ainsi les oscillations importantes.

C’est pourquoi qu’on peut dire d’après les relevés des températures pour l’air ambiant intérieur ; que la meilleure façon de s’approcher du confort thermique dans notre cas d’étude, c’est d’isoler toutes les parois extérieures ainsi que la toiture.

Les pertes de chaleur par les murs extérieurs et les toits représentent une part importante des pertes de chaleur totales dans les bâtiments existants. Par conséquent, l'isolation thermique le critère le plus influant sur l'efficacité énergétique d'un habitat, cette dernière contribue de façon remarquable à épargner l'énergie de refroidissement ou de chauffage, et entraîne donc une diminution de la facture de consommation comme il est prouvé dans notre travail. Elle contribue de façon indirecte à la réduction du taux de gaz polluants qui favorisent le réchauffement climatique (protection de l'environnement), et se charge de créer un milieu sain et confortable pour les occupants de l'habitat.

III.6 CONCLUSION

On a effectué une simulation thermique avec le logiciel EnergyPlus via un modèle 3D conçu sous Google Sketch-Up d'une construction pour des conditions climatiques propres à la ville d'Ouargla. Dans cette simulation on a procédé à plusieurs analyses de la température intérieure, on a fait une comparaison entre cinq configurations différentes de l'isolation thermique de l'habitat. On a opté pour le Polystyrène comme isolant.

À travers la simulation de la température intérieure on peut dire que la technique de l'isolation est une solution pour s'approcher du confort thermique. Les résultats indiquent que l'isolation thermique est un moyen indiscutable pour améliorer les températures intérieures.

La simulation par EnergyPlus, a permis d'aboutir aux résultats suivants :

- ✓ La simulation nous a permis de voir et d'étudier le comportement thermique d'un habitat soumis aux conditions climatique d'un climat saharien.
- ✓ Les parois extérieures et la toiture en particulier sont la source principale des déperditions thermiques. Leur isolation représente un atout pour s'approcher de la marge de confort et assurer ainsi des économies importantes en réduisant la demande en énergie de chauffage ou de climatisation.
- ✓ L'isolation le plus adéquat en termes de confort thermique est l'isolation globale. C'est le cas le plus judicieux pour notre cas d'étude.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Développement durable, rationalisation d'usage, intégration au territoire et confort intérieur sont les fondements de l'architecture bioclimatique. Il s'agit donc de capter l'énergie nécessaire et de la préserver de manière naturelle et respectueuse de l'environnement. En parallèle, le principe est de réduire l'utilisation d'énergies polluantes et non renouvelables comme le gaz et l'électricité.

La simulation thermique aide le chercheur à bien adapter les solutions architecturales et aussi techniques, afin de minimiser la consommation d'énergie et d'assurer le confort thermique, cette méthode simplifiée est une bonne approche pour la compréhension du comportement thermique des murs et de l'air dans un bâtiment réel. Ensuite, pour prédire le comportement thermique des murs et de l'air intérieur d'un bâtiment, il est essentiel de procéder à une phase de simulation précédant l'ensemble de la performance du bâtiment incluant les modes de transferts de chaleur.

Il existe plusieurs outils de simulation thermique utilisés pour étudier les bâtiments, dont le programme sur lequel nous nous sommes appuyés dans notre étude. Notre choix pour EnergyPlus comme outil de simulation repose sur plusieurs raisons ; le programme est open source, il est entièrement libre de droit et gratuit. Il est également facile à utiliser et simple à exécuter, il suffit d'avoir un exécutable et un fichier IDF bien fait pour pouvoir lancer une simulation. L'introduction des données nécessaires à la simulation est facile et peut se faire soit par l'interface graphique du programme, soit par la modification d'un fichier texte.

Ce travail répond à quelques questions concernant l'impact de l'isolation thermique sur la minimisation des consommations de climatisation et de chauffage par l'effet de quelques paramètres qualitatifs comme la température ambiante, la vitesse du vent, l'humidité relative.....etc. Tout ces paramètres ont été introduits dans le code de calcul grâce à un fichier météo propre au site de la ville de Ouargla. L'objectif était de prévoir les réponses du système et plus particulièrement celle de l'air intérieur des différentes zones d'un habitat pour différentes formes de l'isolation thermique. Pour ce faire, nous avons sélectionné deux périodes de saison différente (l'été et l'hiver). De ce fait, nous avons tiré quelques règles et critères qui sont très captivantes pour acquérir une isolation parfaite et admirable.

D'après ces études et résultats obtenus, on a pu déduire qu'il est fortement recommandé d'isoler toutes les surfaces extérieures de l'habitat (murs et toiture). Ces surfaces étant exposées aux conditions climatiques, représentent la source principale des déperditions thermiques. Cependant l'isolation de ces parois permet de s'approcher considérablement de la gamme de

température désirée et d'assurer donc des économies importantes en énergie de climatisation ou de chauffage, mais ne permet en aucun cas d'assurer un confort thermique pour l'occupant.

Bibliographie

Bibliographie

1. Maison architecture bioclimatique : <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-architecture-bioclimatique-10514/>.
2. M. Mustapha Bordjane, mode de transfert thermique,cours, pp 2, 2017.
3. Quelques définitions : <https://residences-artconcept.com/nos-maisons/nos-maisons-par-mat%C3%A9riaux/maison-bardage/>.
4. Helisoa Mamy, « Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation, Application aux économies d'énergie et au confort dans l'habitat ». Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2012.
5. M.K. Cherier « L'utilisation passive de l'énergie solaire dans les habitats de Ghardaïa », Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2018.
6. B. Horbaniuc, G. Dumitrașcu, Cours de Thermodynamique Technique Et Transfert De Chaleur.
7. Ben Khridla Hicham et Benzid Mohammed Cherif « Etudes analytique de la convection naturelle thermoslutale dans un milieu Fluide». Mémoire Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla 27-06-2019
8. Jean Pierre Oliva, Samuel Courgey. « L'Isolation écologique. Conception, matériaux, mise en oeuvre - Neuf et réhabilitation», ISBN: 9782914717885, Ed. Terre Vivante, 2001.
9. Thierry Gallauziaux, « Grand livre de l'isolation », Ed. Eyrolles,ISBN 978-2-212-13269-4, 2009.
10. North-West University (NWU) ; Building Energy Auditing Course ,Module9: EnergyEfficiency in Building ElectricalSystems.
11. Aïcha Baraka, Corinne Puny, Claire Watenberg. prévention des risques et nuisances technologiques, faculté de pharmacie- Marseille, Règles thermiques, Année universitaire 2004-2005.
12. World Health Organization (WHO). Health is a state of complete physical, mental and social well being and not merely the absence of disease or infirmity. WHO Basic documents. 42nd. Geneva: World Health Organization; 1999.

13. ISO7730, Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, Geneva, International Standards Organization; 1984.
14. BERKOUK Djihed ; «Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif , étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra», Thèse doctora 06 Juillet 2017.
15. AREN 3050 Environmental Systems for Buildings I Fall 2005.
16. Mr.bendara smail. Stratégies de contrôle passif pour l'amélioration du confort thermo-aeraulique des bâtiments multi-zones 2019.
17. Mikhailova S.V. Principes de construction d'un modèle de confort thermique adaptatif. UDC 697.1
18. Bellara Samira «Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective. Cas de la nouvelle ville Ali Mendjeli Constantine», Mémoire de magister,2010.
19. Pierre Meukam, « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de Doctorat, en cotutelle entre l'Université de Cergy-Pontoise et l'Université de Yaoundé I, 2004.
20. Nassima Sotehi, « Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation », Thèse de Doctorat, Université Mentouri - Constantine, 2010.
21. V. Kienzlen, H. Erhorn, H. Krapmeier, T. Lützkendorf, J.Werner, A. Wagner. « The Significance of Thermal Insulation, Arguments aimed at overcoming misunderstandings». Third Edition, 2015. KEA Climate Protection and Energy Agency of Baden-WürttembergGmbH.
22. Thermal for buildings: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Thermal_insulation_for_buildings.
23. Laure Ducoulombier « Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment », Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, 2014.
24. Emira El Asmi. «Un environnement méthodologique et logiciel pour l'interopérabilité de la maquette numérique du bâtiment et de la simulation énergétique Application à la réglementation thermique RT2012». Thèse de Doctorat, Université Paris VIII,avril 2016.

25. M. Woloszyn, «Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones : proposition d'une stratégie de résolution du système couple», Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 1999.
26. F. Z. Chafi, « Développement d'un modèle zonale pour la simulation thermo aéraulique des bâtiments multizones », Thèse de doctorat, école de technologie supérieure, Université du Québec, 2010.
27. M. Trocmé, «Aide au choix de conception de bâtiments économe en énergie», p 148, 2009.
28. M. W. Liddament., «A guide to energy efficient ventilation», Air Infiltration and Ventilation Center, Coventry, 1996.
29. Ahmad M.I. Husaunndee, Modélisation des installations de génie climatique en environnement de simulation graphique, thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées France. 2002.
30. Yudi Nugraha Bahar, Christian Pere, Jérémie Landrieu, and Christophe Nicolle. «A Thermal Simulation Tool for Building and Its Interoperability through the Building Information Modeling (BIM) Platform». 2013, 380-398,.
31. Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). Building Energy Software Tools Directory, U.S.Department of Energy. Available online http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/.
32. Welle, B.; John, H.; Zack, R. Thermal Opt, « A Methodology for automated BIM-based multidisciplinary thermal simulation for use in optimization environments. Building Simulation ». 2011, 4, pp.293–313.
33. Dynamic Thermal Simulation: <http://www.sustain3d.com/dynamicthermalmodelling.asp>
34. Simulation thermique dynamique :<https://cegibat.grdf.fr/dossier-technique/conception-batiments/simulation-thermique-dynamique>.
35. Noëlie Pellegrin ; Thèse: Modélisation fine des échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère urbaine. Université paris-est.
36. Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, Volume 6. Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison.

37. Ghislaine Destais, « Variables explicatives de la consommation de chauffage dans l'habitat : les leçons de l'analyse d'une copropriété sur données journalières », La revue : Développement durable et territoires Économie, géographie, politique, droit, sociologie Vol. 8, n°2 | Juillet 2017.
38. Peeyush Agarwal. « Simulation Of Heat Transfer Phenomenon In Furnace Using Fluent-Gambit », a Thesis submitted for the degree of Bachelor of Technology, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, 2009.
39. Benamar Bouhacina. Thèse de Doctorat sur le thème « Simulation numérique du comportement dynamique et thermique d'un échangeur de chaleur bi-tubulaire muni d'ailettes destiné pour le stockage de l'énergie solaire ». Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Année universitaire : 2014/2015.
40. Hamida Mohamed Lamine, Mémoire de Magister sur le thème « Effet de L'humidité sur les Caractéristiques Thermiques et Mécaniques des Matériaux Utilisés dans la Construction », Université Mentouri de Constantine, Année universitaire, 2010.
41. <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-software/best-architecture-design-software/>
42. Dr. Pradip Ashok Saymote; Google Sketch Up: A Powerful Tool for 3D Mapping and Modeling; Volume 5-Issue 3 July 2016. Pp. 377 -382.
43. Ashfaque Ahmed Chowdhury, M.G. Rasul and M.M.K. Khan. « Parametric Analysis of Thermal Comfort and Energy Efficiency in Building in Subtropical Climate ». Thermofluid Modeling for Energy Efficiency Applications, Chapter 7. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802397-6.00007-5>
44. J. Sousa, “Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison,” Inf. Technol. Energy Appl. 2012, pp. 6–7, 2012
45. L'extension euclid : <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>

46. Louis ORTA, Réalisation d'un logiciel pour l'optimisation énergétique du bâtiment, University of Colorado Boulder. Année 2015-2016.
47. S. G. Daniel Forgues, Danielle Monfet, «Guide de conception d'un bâtiment performant», 2016
48. Doerr Architecture, 2006. [Online]. Available: <http://doerr.org/>.
49. Espaces INFO ENERGIE. Propriétés et performances thermiques des matériaux. Mise a jour en avril 2008.
50. CONRADIE D, Passive design for climate Building Design and Engineering Approaches to Airborne Infection Control, 2013.
51. Akchiche Zineb. Mémoire de magister : étude de comportement d'une cheminée solaire en vue de l'isolation thermique, , Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011.
52. http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_1_Africa/DZA_Algeria/index.html

Résumé

Ce travail a pour objectif de présenter une étude sur la modélisation de l'isolation thermique interne d'un habitat. Cette étude consiste à établir un modèle à l'aide du programme Google SketchUp et l'outil de simulation EnergyPlus pour la description du comportement thermique d'un habitat au niveau de la ville de Ouargla. Afin d'évaluer aussi finement que possible les réponses en température des différentes parties du système vis-à-vis des sollicitations du milieu climatique extérieur, le modèle proposé prend en compte les flux sollicitant le système, tels que le rayonnement solaire et la température ambiante d'une part, et l'ensemble des transferts de chaleur inhérents au milieu du bâtiment d'autre part. Nous avons essayé par la suite de traiter les divers cas de l'isolation des murs pendant deux périodes différentes (été, hiver). L'objectif principal était de prédire l'influence de l'isolation thermique sur l'environnement intérieur et de prouver l'importance de cet aspect et sa capacité à réduire les fluctuations des températures de l'air intérieur, ainsi que le choix de la configuration la plus appropriée de l'isolant afin d'obtenir un confort thermique interne satisfaisant et également de réaliser des économies sur les besoins énergétiques, en tenant compte des limites de température appropriées.

Mots clés : Température - Isolation thermique – Confort thermique interne - outil de simulation - Habitat.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تقديم دراسة حول نمذجة العزل الحراري الداخلي لمبنى. تتكون هذه الدراسة من إنشاء نموذج باستخدام برنامج Google SketchUp وأداة محاكاة EnergyPlus لوصف السلوك الحراري للمبنى في مدينة ورقلة. من أجل التقييم الدقيق قدر الإمكان لاستجابات درجات الحرارة لأجزاء مختلفة من النظام لضغوط البيئة المناخية الخارجية يأخذ النموذج المقترح في الاعتبار التدفقات التي تتطلب النظام، مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة من جهة، وجميع عمليات نقل الحرارة المتأصلة في بيئة المبنى من جهة أخرى. بعد ذلك حاولنا التعامل مع الحالات المختلفة لعزل الجدران خلال فترتين مختلفتين (الصيف والشتاء). كان الهدف الرئيسي هو التنبؤ بتأثير العزل الحراري على البيئة الداخلية وإثبات أهمية هذا الجانب وقدرته على تقليل التقلبات في درجات حرارة الهواء الداخلي، وكذلك اختيار التكوين الأنسب للعزل من أجل الحصول على راحة حرارية داخلية مرضية وأيضاً لتحقيق مدخرات في متطلبات الطاقة، مع مراعاة حدود درجة الحرارة المناسبة.

الكلمات المفتاحية : درجة الحرارة – العزل الحراري الداخلي – الراحة الحرارية – أداة المحاكاة – المبنى.

abstract

This work aims to present a study on the modeling of the internal thermal insulation of a habitat. This study consists of establishing a model using the Google Sketchup program and the EnergyPlus simulation tool for the description of the thermal behavior of a habitat at the city of Ouargla. In order to ascertain the temperature responses of the different parts of the system with respect to the solicitations of the external climate environment, the proposed model takes into account the flows soliciting the system, such as solar radiation and the ambient temperature On the one hand, and all the heat transfers inherent in the middle of the building on the other. We later tried to treat the various cases of wall insulation for two different periods (summer, winter). The main objective was to predict the influence of thermal insulation on the inner environment and to prove the importance of this aspect and its ability to reduce fluctuations in indoor air temperatures, as well as the choice of the The most appropriate configuration of the insulator in order to obtain satisfactory internal thermal comfort and also save energy requirements, taking into account the appropriate temperature limits.

Key words: Temperature - Thermal isolation - Internal thermal comfort - Simulation tool - Habitat.