REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **M**écanique

Mémoire de fin d'études de Master en

Filière : Génie climatique

Spécialité : Génie climatique

Analyse de la performance énergétique d'un bâtiment à caractère administratif

Présenté par :

AIDH Maroua Iness

Proposé et Dirigé par :

Pr. TRIKI Zakaria

Dr. ZEGUAI Salim

2024-2025

بسم الله الرحمان الرحيم

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier **ALLAH TOUT PUISSANT** pour m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour m'avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Monsieur **Triki Zakaria**, Professeur au Département de Génie mécanique et mon Co-encadreur **ZEGUAI Salim**, Maître de Conférences A au Département de Génie mécanique, pour l'intérêt porté à l'égard de mon travail, leurs précieux conseils et leur disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire. Qu'ils trouvent ici mes sincères reconnaissances.

Mes remerciements s'adressent également à Madame **BEN HADJ TAHAR Dhouha**, Docteur en Génie climatique, pour son aide, ses inestimables conseils, ses explications claires et ses orientations précises.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury pour avoir accepté d'examiner et évaluer mon travail.

Mes sincères remerciements vont également à tous les enseignants du Département de Génie mécanique de l'Université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire

DEDICACE

À mon pilier, mon âme, celle qui m'a élevée avec amour et qui a veillé sur moi sans relâche, ma précieuse mère, je te dédie ce travail en témoignage de ma gratitude infinie.

À mes chers **parents,** pour leur soutien inestimable et pour m'avoir offert toutes les conditions nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

À **ma tante maternelle**, pour son affection et ses encouragements, ainsi qu'à **ma sœur,** qui n'a jamais hésité à partager avec moi son expérience et ses précieux conseils.

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont aidée et soutenue de près ou de loin, recevez ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de Master analyse la performance énergétique d'un bâtiment administratif à travers différentes configurations d'isolation thermique, simulées à l'aide du logiciel TRNSYS. L'étude se concentre sur les besoins en chauffage et en climatisation, en comparant quatre configurations distinctes : absence d'isolation, isolation extérieure, isolation intérieure, et isolation intérieure combinée à du double vitrage. Les résultats montrent que l'isolation thermique joue un rôle déterminant dans la réduction des besoins énergétiques. L'isolation extérieure et intérieure permet une diminution significative des besoins en chauffage, avec une réduction annuelle allant jusqu'à 35 % pour la configuration combinant isolation intérieure et double vitrage. En revanche, l'impact sur la climatisation est moins marqué, bien que l'isolation extérieure et le double vitrage contribuent à une réduction modérée des besoins estivaux. L'analyse souligne ainsi l'importance de traiter simultanément les parois opaques et les fenêtres pour optimiser l'efficacité énergétique. Le double vitrage s'avère particulièrement efficace pour limiter les déperditions de chaleur en hiver et réduire les gains solaires en été. Ces conclusions mettent en évidence les avantages d'une approche intégrée pour améliorer la performance énergétique des bâtiments administratifs, notamment dans le cadre de projets de rénovation.

Mots-clés : Performance énergétique, isolation thermique, chauffage, climatisation, TRNSYS, double vitrage, lame d'air, configurations d'isolation, efficacité énergétique, bâtiment administratif.

ABSTRACT

This Master's thesis analyzes the energy performance of an administrative building by evaluating different thermal insulation configurations simulated using TRNSYS software. The study focuses on heating and cooling demands, comparing four scenarios: no insulation, external insulation, internal insulation, and internal insulation combined with double glazing. The results demonstrate that thermal insulation significantly reduces energy consumption. External and internal insulation lead to a notable decrease in heating needs, with annual reductions of up to 35% for the combined internal insulation and double-glazing configuration. However, the impact on cooling is less pronounced, though external insulation and double glazing still contribute to moderate reductions in summer demand. The analysis also highlights the importance of addressing both opaque walls and windows to optimize energy efficiency. Double glazing proves particularly effective in minimizing heat loss in winter and reducing solar heat gain in summer. These findings underscore the benefits of an integrated approach to improving the energy performance of administrative buildings, especially in renovation projects.

Keywords: Energy performance, thermal insulation, heating, cooling, TRNSYS, double glazing, air gap, insulation configurations, energy efficiency, administrative building.

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى تحليل الأداء الطاقوي لمبنى إداري من خلال تقييم أنظمة مختلفة للعزل الحراري باستخدام محاكاة برنامج .TRNSYS تركز الدراسة على احتياجات التدفئة والتبريد، مع مقارنة أربعة سيناريوهات: عدم وجود عزل، العزل الخارجي، العزل الداخلي، والعزل الداخلي مع الزجاج المزدوج. أظهرت النتائج أن العزل الحراري يلعب دورًا حاسمًا في خفض الاستهلاك الطاقوي. حيث أدى العزل الخارجي والداخلي إلى انخفاض ملحوظ في احتياجات التدفئة، مع تقليل سنوي يصل إلى 35% في حالة الجمع بين العزل الداخلي والزجاج المزدوج. أما بالنسبة للتبريد، فكان التأثير أقل وضوحًا، رغم أن العزل الخارجي والزجاج المزدوج ساهما في تخفيض متواضع للاحتياجات الصيفية. كما يؤكد التحليل على أهمية معالجة الجدران المعتمة والنوافذ معًا لتحسين الكفاءة الطاقوية. كما يثبت الزجاج المزدوج فعاليته في الحد من فقدان الحرارة شتاءً وتقليل الاكتساب الحراري صيفًا. هذه النتائج تبرز فوائد اتباع نهج متكامل لتحسين أداء المباني الإدارية، خاصة في مشاريع الترميم.

الكلمات المفتاحية: الأداء الطاقوي، العزل الحراري، التدفئة، التبريد، برنامج (TRNSYS)، الزجاج المزدوج، فجوة هوائية، أنظمة العزل، الكفاءة الطاقوية، المبنى الإداري.

SOMMAIRE

Remerciements
Dédicace
Résumé
Abstract
Listes Des Figures
Liste Des Tableau
Nomenclature
Acronymes

Introduction générale 1

Chapitre I : Contexte général et notions théoriques

I.1 Introduction 5
I.2 Concepts généraux sur l'énergie dans les bâtiments 5
I.2.1 Les formes d'énergie 5
I.2.2 Sources d'énergie : renouvelables et non renouvelables 7
I.2.2.1 Energie non renouvelables 7
I.2.2.2 Energie renouvelable 7
I.2.3 Utilisations de l'énergie dans les bâtiments 8
I.3 La performance énergétique dans les bâtiments : 9
I.3.1 Définition 9
I.3.2 Facteurs influençant la performance énergétique des bâtiments 10
I.3.3 Indicateurs de performance énergétique des bâtiments 12
I.3.4 L'importance de l'amélioration de la performance énergétique 13
I.3.5 La relation entre la performance énergétique et la durabilité environnementale 14
I.4.1 Définition 14
I.4.2 Les facteurs influençant le confort thermique 15
I.4.2.1 Confort et température 15
I.4.2.2 Confort et humidité 16
I.4.2.3 Confort et vitesse de l'air 18
I.4.2.4 Confort, activité, habillement 22
I.5. La performance énergétique dans le contexte algérien 22
I.5.1 La consommation énergétique en Algérie (2023) 22
I.5.2 Analyse par secteur de la demande énergétique en Algérie 23
I.5.3 Les défis liés à la performance énergétique dans le secteur de la construction en Algérie……24
I.6 Conclusion 25

Chapitre II: Presentation du Projet

II.1 Introduction 27
II.2 Paramètres Géographiques 27
II.4 Paramètres Climatiques 30
II.4 .1 Paramètres Climatiques externes 30
II.4.1 Les températures 31
II.4.2 L'ensoleillement 32
II.4.2. Paramètres Climatiques internes 33
II.5 Paramètres Thermiques 34
II.5 Conclusion 40

Chapitre III : Simulation dans TRNSYS

III.1. Introduction 42
III.2. Outils de simulation thermique 42
III.3. TRNSYS 42
III.3.1. Les avantages 43
III.3.2. Les inconvénients 43
III.3.3. La suite TRNSYS 43
III.3.3.1. TRNSYS Simulation Studio 43
III.3.3. TRNBuild 44
III.4. METEONORM 45
III.5. Simulation du projet 45
III.6. Conclusion 55

Chapitre VI: Resultants et discussion

IV.1. Introduction 57
IV.2. L'isolation thermique 57
IV.2.1. Définition 57
IV.2.2 Les différents types de configuration d'isolation 58
IV.3. Interprétation des résultats 62
IV.3.1. Analyse des besoins en chauffage 62
IV.3.1.1. Configuration Sans isolation 62
IV.3.1.2. Configuration avec Isolation extérieur 63
IV.3.1.3. Configuration avec une isolation intérieur 64
IV.3.1.5. Comparaison des besoins en chauffage selon le type d'isolation 66
IV.3.2 Analyse des besoins en climatisation 67
IV. 3.2.1 Configuration Sans isolation 67

IV. 3.2.2 Configuration avec une isolation extérieur 68
IV.3.2.4. Configuration à double vitrage et isolation intérieure 70
IV.3.2.5. Comparaison des besoins en climatisation selon le type de configurations d'isolation. 71
IV.3.2.6. Comparaison finale : Chauffage et Climatisation 72
IV.6. Conclusion 73

Chapitre V: Suggestions d'amélioration

V.1. Introduction 75
V.2. Résumé des principales conclusions. 75
V.3. Propositions techniques pour l'amélioration 76
V.3.1 Amélioration de l'isolation thermique 76
V.3.1.1. Propositions techniques 77
V.3.1.2. Les effets positifs : 80
V.3.2. Amélioration des fenêtres et des ouvertures en verre 80
V.3.2.1 Propositions techniques : 80
V.3.2.2. Les effets positifs : 82
V.3.3. Intégration des énergies renouvelables 82
V.3.3.1 Propositions techniques : 82
V.3.3.2. Les effets positifs 83
V.3.4. Intégration de technologies intelligentes et de contrôle automatisé 83
V.3.4.1 Propositions techniques : 83
V.3.4.2. Les effets positifs : 86
V.3.5. Exploitation de la ventilation naturelle et orientation architecturale 86
V. 3.5.1. Propositions techniques : 86
3.5.2 Les effets positifs : 87
V.4. Conclusion 88

Chapitre VI: Étude économique

VI.1. Introduction 90
VI.2. Hypothèses et données de base 90
VI.3. Consommation annuelle et coût énergétique 90
VI.4. Coût de l'investissement 91
VI.5. Synthèse des résultats économiques 92
VI.6. Conclusion 92
Conclusion et perspectives 93
Références Bibliographiques 94

Listes des figures

Figure I.1 : Consommation d'énergie primaire dans le monde 6
Figure I.2 : Consommation d'énergie finale dans le monde..... 7
Figure I.3 : Classification de la performance énergétique et des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments selon l'indice DPE..... 12
Figure I.4 : la sensation de confort thermique exprimée par les personnes..... 15
Figure I.5 : Les facteurs influençant le confort thermique du corps humain et les méthodes d'échange thermique 16
Figure I.6 : Plage hygiénique de l'humidité relative 17
Figure I.8 : Effets de l'humidité relative sur les polluants biologiques et la santé intérieure 18
Figure I.9 : Structure de la consommation d'énergie en Algérie..... 23
Figure I.10 : Structure de la consommation par forme d'énergie en Algérie 23
Figure I.11 : Structure de la consommation finale d'énergie par Secteur en Algérie..... 24
Figure II.1 : Localisation géographique de la commune de berrouaghia dans la wilaya de Médéa. 28
Figure II.2 : Le plan architectural de ce bâtiment..... 29
Figure II.3 : Variation mensuelle des températures à Berrouaghia 32
Figure II.4 : Variation des températures extrêmes journalières à Berrouaghia..... 32
Figure II.5: durée d'ensoleillement 33
Figure II.6 : Irradiation Solaire mensuelle..... 33
Figure III.1 : Interface du logiciel TRNSYS. 44
Figure III.2 : Interface du logiciel TRNBuild. 44
Figure III.3 : interface de logiciel Meteonorm (8.2). 45
Figure III.4 : Étape 1 : Lancement de l'assistant de bâtiment..... 46
Figure III.6 : Étape 3 : Dimensions des salles. 47
Figure III.7: Étape 4 : Orientation du bâtiment et du verre**.** 48
Figure III.8: infiltration et ventilation. 48
Figure III.9 : Étape 6 : Chauffage et Climatisation..... 49
Figure III.10 : Étape 7 : Les gains internes..... 49
Figure III.11 : La dernière étape est la génération du projet TRNSYS. 50
Figure III.12 : Le projet final TRNSYS créé par l'assistant de bâtiment**.** 50
Figure III.13 : La fenêtre d'initialisation du projet et la fenêtre des entrées. 51
Figure III.14 : La fenêtre de SORTIE. 52
Figure III.15 : 1 : La fenêtre de ZONE. 53
Figure III.16 : La fenêtre de l'infiltration. 53
Figure III.17 : la fenêtre de ventilation. 54
Figure III.18 : la fenêtre de chauffage. 54

Figure III.19 : la fenêtre de climatisation 55
Figure IV.1 : les différents types de configurations d'isolations..... 58
Figure IV.2 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment à configuration sans isolation. 62
Figure IV.3 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment à configuration avec une isolation extérieur. 63
Figure IV.4 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment avec la configuration d'isolation intérieur..... 64
Figure IV.5 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment avec Configuration à double vitrage et isolation intérieur. 65
Figure IV.6 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment en l'absence d'isolation thermique. 67
Figure IV.7 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment avec la configuration d'isolation extérieur..... 68
Figure IV. 8 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment avec la configuration à isolation intérieur..... 69
Figure IV.9 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment avec Configuration à double vitrage et isolation intérieure. 70
Figure V.1 : Rôle de l'isolation thermique dans la réduction du transfert de chaleur pendant les saisons d'été et d'hiver..... 77
Figure V.2 : Les différentes formes d'un isolant. 78
Figure V.3 : Les différents-types-de-vitrages. 81
Figure V.4 : Technique de vitrage Low-E. 81
Figure V.5 : Joints d'étanchéité des fenêtres latérales..... 81
Figure V.6 : Panneaux photovoltaïques en toiture d'immeuble. 82
Figure V.7 : Thermostats intelligents. 84
Figure V.8 : Capteurs de mouvement. 84
Figure V.9 : Systèmes de surveillance de la consommation d'énergie. 85
Figure V.10 : Contrôle automatique des rideaux et des fenêtres. 85
Figure V.11 : Gestion Technique du Bâtiment 86

Liste des tableaux

Tableau I.1 : L'effet de la vitesse du vent en hiver sur le confort thermique 19
Tableau I.2 : Refroidissement perçu selon la vitesse de l'air en conditions estivales 20
Tableau I.3 : Vitesse du vent selon l'échelle de Beaufort 21
Tableau II.1 : Paramètres géométriques principaux du bâtiment 30
Tableau II.2 : Données climatiques mensuelles de la commune de Berrouaghia 31
Tableau II.3 : Caractéristiques de construction des murs extérieurs sans isolation 34
Tableau II.4 : Caractéristiques de construction des murs extérieurs avec isolation intérieur 35
Tableau II.5 : Caractéristiques de construction des murs extérieurs avec isolation par l'extérieur 36
Tableau II.6 : Caractéristiques de construction des murs intérieurs 37
Tableau Ⅱ.7:Caractéristiques de construction du plancher 37
Tableau II.9 : Caractéristiques de construction de la toiture sans isolation 38
Tableau II.10 : Caractéristiques de construction de la toiture avec isolation 39
Tableau II.11 : Caractéristiques de construction des vitres et des portes..... 39
Tableau IV.1 : Avantages et inconvénients de l'isolation par l'ame d'air..... 59
Tableau IV.2 : Avantages et inconvénients de l'isolation extérieur. 60
Tableau IV.3 : Avantages et inconvénients de l'isolation intérieur. 61
Tableau IV.4 : Comparaison des besoins en chauffage selon le type de configuration d'isolation 66
Tableau IV. 5 : Comparaison des besoins en climatisation selon le type de configurations d'isolation. 71
Tableau IV. **6**: Comparaison finale: Chauffage et Climatisation..... 72
Tableau V.1 : Valeurs de conductivité thermique λ de différents matériaux d'isolation à 10°C 79
Tableau VI.1 : Comparaison de la consommation énergétique annuelle (chauffage et climatisation). 90
Tableau VI.2 : Coûts d'investissement liés à l'isolation thermique..... 91
Tableau VI.3 : Synthèse économique de l'isolation thermique 92

Introduction générale

Le monde connaît ces dernières décennies une aggravation croissante du phénomène de changement climatique, en raison de l'accumulation des émissions de gaz à effet de serre principalement issues de la combustion des combustibles fossiles tels que le pétrole, le gaz et le charbon, qui représentent plus de 75 % des émissions mondiales totales. Ces émissions entraînent la rétention de la chaleur du soleil dans l'atmosphère, ce qui élève la température de la Terre à un rythme sans précédent dans l'histoire enregistrée [1].

Ce réchauffement climatique n'affecte pas seulement le climat, mais menace également les écosystèmes, la santé publique, la sécurité alimentaire et hydrique, et augmente la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes tels que les ouragans, les vagues de chaleur, la sécheresse et l'élévation du niveau de la mer.

Le secteur de la construction est l'un des plus grands contributeurs à cette crise, représentant environ 30% de la consommation finale d'énergie au niveau mondial et près de 26% des émissions liées à l'énergie (8% directement et 18% provenant de l'électricité et du chauffage utilisés à l'intérieur) [2].

Bien que les efforts internationaux se dirigent vers l'application de nouvelles normes de construction et l'intégration des énergies renouvelables, la transformation nécessaire pour atteindre l'objectif de neutralité carbone (zéro émission nette) d'ici 2050 reste encore loin d'être atteinte, ce qui nécessite une intensification des efforts au cours de cette décennie cruciale.

Quant à l'Algérie, la situation n'est pas moins grave. Le secteur de la construction est classé comme le premier consommateur d'énergie, représentant jusqu'à 46 % de la consommation nationale totale, selon les déclarations d'une experte du Centre CNERIB [3]. Les bâtiments administratifs, éducatifs, et même religieux sont parmi les espaces les plus consommateurs d'énergie sans tenir compte des principes d'isolation ou des conceptions climatiques appropriées. Des tentatives éparses ont été entreprises pour améliorer la performance des bâtiments, en soutenant des matériaux de construction alternatifs et en utilisant des énergies renouvelables, mais elles en sont encore à leurs débuts et manquent d'application à grande échelle.

Dans ce contexte, cette étude constitue une contribution scientifique visant à analyser et à améliorer la performance énergétique d'un bâtiment administratif typique en Algérie, en s'appuyant sur des outils numériques avancés pour simuler la consommation d'énergie et étudier l'efficacité de certaines améliorations proposées telles que l'isolation thermique et la qualité du vitrage. Partant de la situation énergétique préoccupante des bâtiments en Algérie, ce travail soulève la problématique suivante :

- Dans quelle mesure les outils de simulation numérique, tels que le logiciel TRNSYS, peuvent-ils contribuer à l'analyse et à l'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment administratif ?
- Quel est l'impact de l'isolation thermique sur les besoins énergétiques du bâtiment ?
- Comment la qualité du verre affecte-t-elle le confort thermique ?
- Quel est la configuration le plus approprié pour obtenir les meilleures performances avec une consommation minimale ?

Ainsi, ce mémoire a pour objectif général d'analyser la performance énergétique d'un bâtiment administratif type et de proposer des pistes d'amélioration afin d'en optimiser l'efficacité énergétique. Dans un contexte où la transition énergétique devient une priorité mondiale et nationale, cette étude vise à apporter une contribution concrète à la conception durable des bâtiments tertiaires.

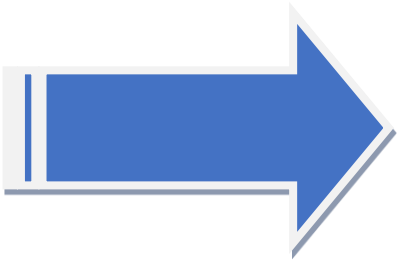
Plusieurs objectifs spécifiques ont guidé cette recherche. Le premier consiste à modéliser le bâtiment en question à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS, reconnu pour ses capacités d'analyse thermique dynamique. Ensuite, l'étude cherche à évaluer l'impact de l'isolation thermique ainsi que du type de vitrage sur la consommation énergétique globale du bâtiment, tant pour le chauffage que pour la climatisation. Une comparaison entre différentes configurations – avec et sans isolation, avec verre simple ou double – permet de déterminer la solution la plus performante sur le plan énergétique. Enfin, à travers cette démarche, le travail ambitionne de contribuer à la diffusion d'une culture de la conception énergétique en Algérie, encore peu développée dans la pratique architecturale locale.

Le mémoire est structuré en six chapitres. Le premier présente le cadre théorique de l'étude, en exposant les notions clés liées à la performance énergétique et au confort thermique, ainsi que les indicateurs couramment utilisés pour les évaluer.

Le second chapitre est consacré à la présentation du projet : il décrit le bâtiment étudié, son environnement climatique, ses caractéristiques architecturales et les différentes configurations envisagées. Le troisième chapitre développe la méthodologie adoptée, notamment les outils numériques et les données d'entrée utilisées dans TRNSYS.

Le quatrième chapitre analyse les résultats issus des simulations, en comparant les performances enregistrées selon les différentes variantes. Le cinquième chapitre propose des recommandations concrètes pour améliorer la performance énergétique des bâtiments similaires, avec une attention particulière portée au contexte algérien.

Enfin, le sixième chapitre présente une étude économique permettant d'évaluer la rentabilité financière des solutions proposées, en comparant les coûts d'investissement avec les économies d'énergie potentielles.



CHAPITRE I

Contexte général et notions théorique

I.1 Introduction

Dans le contexte des changements que connaît notre monde aujourd'hui, l'efficacité énergétique est un concept d'une importance capitale. Elle représente une vision globale de la gestion des ressources et de la durabilité environnementale. L'efficacité énergétique inclut l'utilisation de technologies innovantes pour réduire la consommation d'énergie et ses coûts, ainsi que pour limiter l'impact environnemental. Le secteur de la construction est le plus grand consommateur d'énergie, consommant 40 % et émettant 36 % des émissions de carbone, ce qui rend l'amélioration de ses performances cruciale pour atteindre la durabilité. [1]

Dans ce contexte, les bâtiments administratifs sont parmi les espaces les plus énergivores en raison de leur utilisation quotidienne et du grand nombre d'appareils qui y sont liés et consomment de l'énergie.

Et dans cette optique, nous avons réalisé cette étude pour analyser la performance énergétique d'un bâtiment administratif afin de tenter de déterminer les aspects pouvant être améliorés, tels que l'isolation, etc.

Ce chapitre vise à présenter le cadre théorique lié à cette étude en fournissant des concepts généraux sur l'énergie dans les bâtiments, des définitions importantes associées, et en introduisant des outils de simulation thermique qui nous aident à étudier ce sujet.

I.2 Concepts généraux sur l'énergie dans les bâtiments

I.2.1 Les formes d'énergie

L'énergie joue un rôle important dans le fonctionnement et l'opération des bâtiments, car elle est impliquée dans le refroidissement, la climatisation, l'éclairage, la ventilation et également dans le fonctionnement des équipements de ces bâtiments. Pour gérer cette consommation d'énergie, nous distinguons trois formes d'énergie :

- **L’énergie primaire :**

L’énergie primaire, c’est l’énergie disponible dans la nature avant transformation : l’énergie mécanique d’une chute d’eau, l’énergie solaire ou l’énergie issue de la fission nucléaire, par exemple.

Pour apporter une certaine quantité d’énergie à un consommateur, il faut mobiliser une quantité totale d’énergie supérieure, qui est appelée énergie primaire (Ep) et qui inclut les déperditions lors de la chaîne énergétique : production, transformation, transport, distribution, stockage.[2]

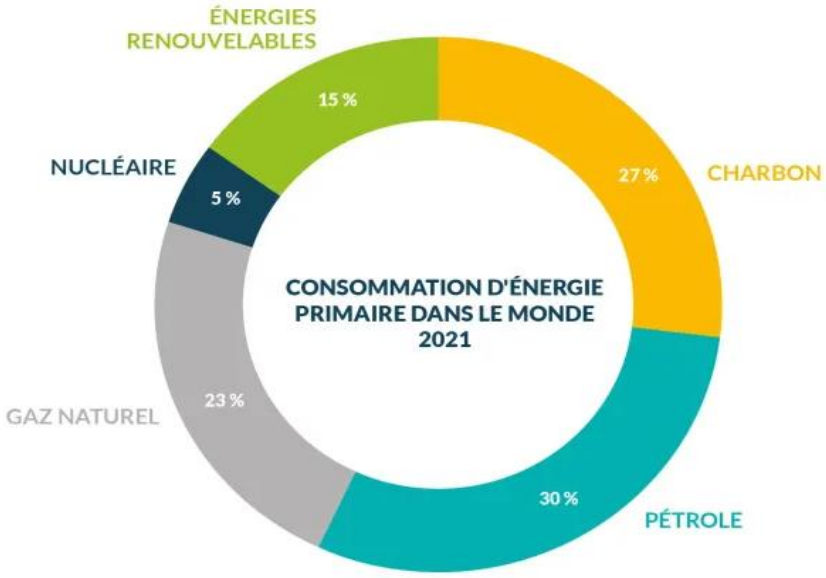


Figure I.1 : Consommation d'énergie primaire dans le monde [3]

- **L'énergie finale**

L'énergie finale, que l'on appelle aussi énergie disponible, est l'énergie qui est livrée chez vous, sous forme de gaz, fioul, bois ou électricité. Et c'est celle qui correspond à la facture de votre fournisseur d'énergie.

La conversion entre l'énergie finale et l'énergie primaire est différente selon l'énergie utilisée :

- Dans le cas de la production d'électricité, le coefficient de conversion est de 2,58. Cela veut dire que, pour que vous bénéficiez chez vous d'1 kWh, il a fallu dépenser 2,58 kWh d'énergie primaire.
- Pour le bois et le gaz, le coefficient de conversion est égal à 1. Ainsi, 1 kWh d'énergie primaire suffit à fournir 1 kWh d'énergie finale.[2]

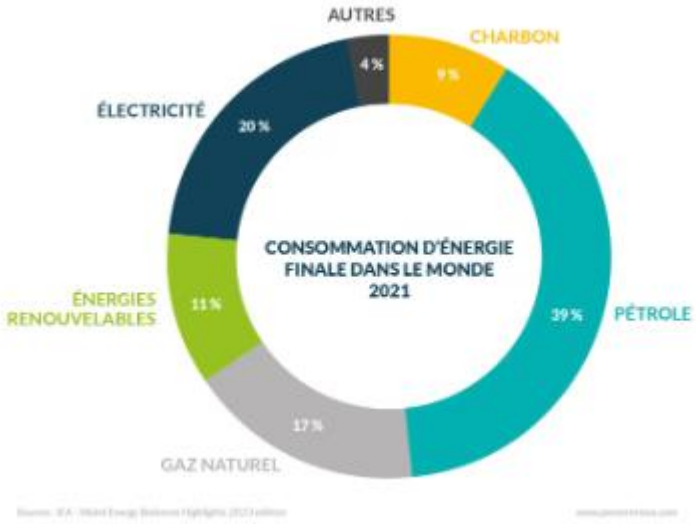


Figure I.2 : Consommation d'énergie finale dans le monde [3]

- **L'énergie utile**

L'énergie utile est la part d'énergie finale réellement exploitée pour répondre à un service précis : chaudière, climatisation, chauffe-eau, éclairage, lave-vaisselle, pompe à chaleur, radiateur, réfrigérateur, etc. Autrement dit, c'est l'énergie restituée à la sortie d'un système ou d'un équipement électromécanique, et dont vous bénéficiez concrètement.

Cette séquence nous montre le parcours de l'énergie étape par étape, et révèle les endroits où il y a du gaspillage, afin que nous puissions l'améliorer et garantir que nous en tirions le meilleur parti possible.[2]

I.2.2 Sources d'énergie : renouvelables et non renouvelables

I.2.2.1 Energie non renouvelables

Les énergies non renouvelables sont des énergies qui n'ont pas la capacité de se reconstituer à l'échelle du temps humain. Il peut s'agir d'énergies fossiles ou nucléaires. Parce qu'elles s'épuisent au fur et à mesure de notre consommation, on peut dire que leurs stocks sont limités. En effet, il faut attendre parfois jusqu'à plusieurs millions d'années pour qu'elles se renouvellent comme : le charbon, le pétrole et le gaz naturel

I.2.2.2 Energie renouvelable

Les énergies renouvelables sont celles que la nature peut reconstituer de manière permanente, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, la biomasse, etc. Parce qu'elles se renouvellent plus rapidement que nous ne pouvons les consommer, ces ressources sont considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

- Le monde connaît une transformation notable vers les énergies renouvelables, ce qui témoigne de la prise de conscience de l'humanité quant à l'importance de protéger la planète. Après des années de dépendance excessive aux combustibles fossiles, nous prenons pleinement conscience de leur impact négatif sur notre climat, en particulier dans le secteur de la construction qui consomme d'énormes quantités d'énergie chaque jour.

I.2.3 Utilisations de l'énergie dans les bâtiments

Les bâtiments comptent parmi les plus grands consommateurs d'énergie au monde, car ils utilisent l'énergie pour soutenir un certain nombre de fonctions vitales qui assurent le confort et la fonctionnalité des utilisateurs ou des résidents. Ces utilisations sont rapportées comme suit :

- **Le chauffage :**

Le chauffage reste un poste important de consommation d'énergie dans les bâtiments, en particulier dans les régions au climat plus ou moins froid. Grâce à des systèmes comme le chauffage central, les pompes à chaleur ou le gaz, l'énergie est utilisée pour chauffer l'air ou l'eau à l'intérieur des espaces. Cependant, dans les climats chauds, sa contribution à la consommation énergétique globale est souvent moins significative que celle de la climatisation.

- **La climatisation :**

Dans les zones chaudes ou dans les bâtiments à forte densité de population (comme les bâtiments administratifs), l'énergie est utilisée pour faire fonctionner les systèmes de climatisation. Bien que la consommation de refroidissement soit historiquement inférieure à celle du chauffage dans de nombreuses régions, elle tend aujourd'hui à la surpasser, notamment dans les pays à climat chaud comme l'Algérie. Cette tendance s'explique par la hausse des températures, l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et l'utilisation croissante d'appareils électroniques.

- **La ventilation :**

L'énergie est également utilisée pour faire fonctionner les systèmes de ventilation, en particulier les systèmes mécaniques, car la ventilation est essentielle pour renouveler l'air intérieur et garantir la qualité de l'air, en particulier dans les bâtiments thermiquement isolés.

Les systèmes CVC (chauffage, ventilation, climatisation) sont souvent les plus gros consommateurs d'énergie. Ils sont chargés de maintenir la qualité de l'air et des températures intérieures agréables. Ils peuvent représenter 40 à 60 % de la consommation totale d'énergie d'un bâtiment.[4]

- **L'éclairage :**

L'éclairage est un autre poste de consommation énergétique important, représentant généralement 20 à 30 % de la consommation énergétique d'un bâtiment. Les avancées technologiques, comme l'éclairage LED et les systèmes d'éclairage intelligents qui s'adaptent à la lumière naturelle et à l'occupation, peuvent permettre de réaliser d'importantes économies d'énergie à long terme.[4]

- **Les équipements électriques :**

Ces appareils comprennent les ordinateurs, les imprimantes, les réfrigérateurs, les appareils de cuisson, les ascenseurs et les systèmes de contrôle intelligents.

Leur consommation varie en fonction du comportement de l'utilisateur et de la qualité de l'appareil.

Cette catégorie est cruciale pour déterminer la charge électrique globale des bâtiments administratifs.

I.3 La performance énergétique dans les bâtiments :

I.3.1 Définition

La performance énergétique d'un bâtiment est définie comme l'efficacité de son utilisation de l'énergie pour assurer des conditions idéales de confort thermique ou fonctionnel, tout en minimisant le gaspillage.

Il est généralement mesuré en kWh/m².an, c'est-à-dire l'énergie consommée annuellement par mètre carré de surface exploitable.

La bonne performance énergétique repose sur :

- Qualité de l'isolation thermique du bâtiment (enveloppe thermique)
- Efficacité des équipements (chauffage, ventilation, climatisation, éclairage)
- Recourir aux sources d'énergie renouvelable si possible.
- Méthode d'exploitation (nombre d'heures, occupation des espaces, maintenance)

L'amélioration de la performance énergétique ne contribue pas seulement à réduire la facture énergétique, mais constitue également un moyen efficace de réduire l'empreinte carbone des bâtiments, ce qui contribue à atteindre les objectifs de développement durable.

I.3.2 Facteurs influençant la performance énergétique des bâtiments

La performance énergétique des bâtiments est influencée par plusieurs facteurs interconnectés qui déterminent le niveau de consommation d'énergie et la qualité des conditions intérieures en termes de confort. Parmi ces facteurs, les plus notables sont :

- **Qualité de l'enveloppe thermique du bâtiment :**

  L'enveloppe thermique d'un bâtiment est la barrière physique qui sépare l'intérieur de l'extérieur, régulant ainsi les échanges de chaleur. Elle est composée de matériaux isolants, de murs, de toits et de fenêtres conçus pour optimiser l'efficacité énergétique. Une bonne enveloppe thermique réduit les besoins de chauffage et de climatisation, contribuant ainsi à une consommation d'énergie plus faible et à des factures réduites.

- **Systèmes énergétiques :**

  Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, connus sous le nom de CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation), sont des éléments essentiels pour garantir le confort thermique et la qualité de l'air dans les bâtiments résidentiels, administratifs et industriels. Ces systèmes ne se limitent pas seulement à contrôler les températures, mais contribuent également à renouveler l'air et à améliorer la qualité de vie à l'intérieur des espaces architecturaux. Son importance réside dans l'établissement d'un équilibre précis entre le confort énergétique, la préservation de l'environnement et la garantie de la durabilité des performances du bâtiment. D'une part, ces systèmes permettent de fournir un environnement confortable aux utilisateurs en régulant la température et l'humidité tout au long de l'année. D'autre part, les technologies modernes et leur contrôle intelligent permettent de réduire la consommation d'énergie et les émissions, ce qui est en accord avec les objectifs de développement durable. De plus, l'absence d'un système de ventilation adéquat peut entraîner la détérioration de la structure du bâtiment en raison de l'humidité et de la moisissure, en particulier dans les bâtiments anciens. Par conséquent, l'installation de systèmes CVC efficaces contribue à prolonger la

durée de vie du bâtiment et à améliorer sa performance énergétique globale. Ainsi, ces systèmes constituent un pilier essentiel dans toute approche visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, et représentent un investissement nécessaire dans le cadre de la transition énergétique et du respect des normes environnementales modernes.[5]

- **Conception architecturale et orientation :**

  Une bonne orientation permet de profiter de la chaleur et de la lumière naturelles. Les bâtiments bien orientés (par exemple, vers le sud en climat froid) bénéficient du rayonnement solaire, ce qui réduit la consommation d'énergie. De même, la masse thermique du bâtiment (inertie thermique) joue un rôle dans le stockage et la libération progressive de la chaleur.

- **Comportement des usagers :**

  Les habitudes quotidiennes des utilisateurs ont un impact direct sur la consommation d'énergie, comme laisser les lumières allumées, ouvrir les fenêtres pendant le chauffage ou utiliser des appareils à forte consommation de manière non calculée.

- **Entretien et exploitation :**

  La maintenance régulière des appareils est nécessaire pour maintenir leur efficacité.

  Négliger l'entretien entraîne une dégradation des performances et une augmentation de la consommation, et pour garantir des performances optimales, il est nécessaire de suivre une liste de maintenance stricte :

  - ✓ Inspectez régulièrement les filtres afin de préserver la qualité de l'air
  - ✓ Testez fréquemment les thermostats pour assurer leur bon fonctionnement
  - ✓ Inspectez les conduits d'air pour détecter les fuites ou obstructions
  - ✓ Nettoyez fréquemment les unités extérieures pour les débarrasser des poussières.
  - ✓ Vérifiez à chaque début de saison que les thermostats sont bien réglés
  - ✓ Assurez-vous régulièrement que les programmations horaires des équipements CVC sont adaptées aux besoins des utilisateurs.

I.3.3 Indicateurs de performance énergétique des bâtiments[6]

Un Indicateur de Performance Énergétique (IPÉ) est une mesure clé permettant d'évaluer l'efficacité énergétique d'un bâtiment, d'un équipement ou d'un processus. Il s'agit d'un KPI énergétique (Key Performance Indicator) conçu pour suivre, analyser et améliorer la gestion de l'énergie.

Les entreprises, collectivités et industriels utilisent ces indicateurs pour comparer leurs performances énergétiques, détecter des anomalies et identifier des opportunités d'optimisation.

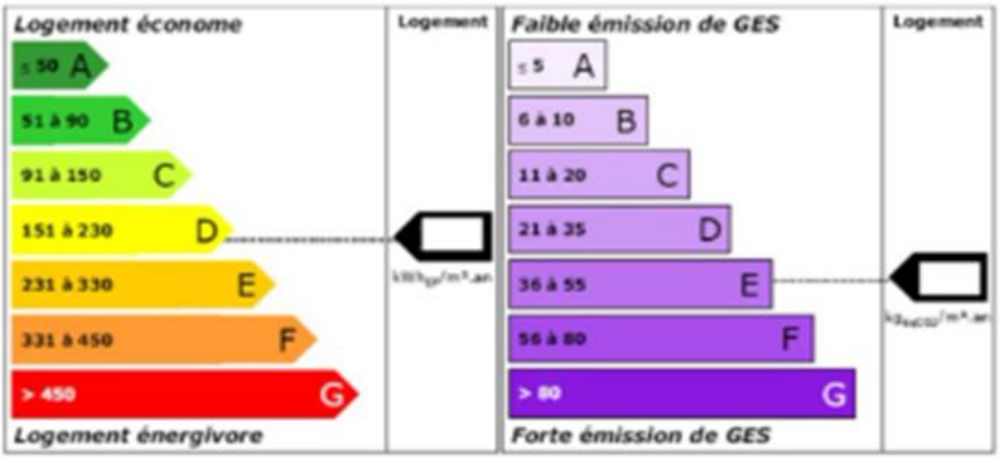


Figure I.3 : Classification de la performance énergétique et des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments selon l'indice DPE[6]

Grâce aux IPÉ, il est possible de :

- ✓ Suivre les consommations en temps réel
- ✓ Analyser les écarts et dérives énergétiques
- ✓ Comparer la performance énergétique d'un site à un autre
- ✓ Identifier les économies potentielles

Les indicateurs clés de performance énergétique sont :

a. <u>IPÉ pour le chauffage</u> :

Cet indicateur est mesuré en kWh/m². DJU (Degré Jour Unifié). Il permet de comparer la consommation d'énergie entre différents bâtiments en tenant compte des différences climatiques

- Très utile pour évaluer l'efficacité du système de chauffage après la correction climatique.

b. IPÉ pour les bâtiments administratifs et industriel :

Pour les bâtiments administratifs (tertiaires) : l'indice kWh/m²/an est utilisé pour mesurer la consommation annuelle par rapport à la superficie.

Pour les industriels : L'indice kWh/unité produite est utilisé pour évaluer la consommation d'énergie par rapport au nombre d'unités produites, et inclut l'efficacité des machines et les pertes dans les opérations.

c. IPÉ pour l'éclairage :

Il mesure la consommation d'énergie dédiée à l'éclairage en kWh/m²/an et est utilisé pour détecter les comportements inefficaces tels que l'éclairage en l'absence des utilisateurs ou le mauvais réglage des équipements.

d. IPÉ pour les systèmes auxiliaires : air comprimé, ventilation et refroidissement :

Ces indicateurs incluent la consommation d'énergie des systèmes auxiliaires qui sont souvent énergivores. L'IPÉ permet de détecter les écarts énergétiques et de régler les équipements pour réduire la consommation inutile.

I.3.4 L'importance de l'amélioration de la performance énergétique

L'un des plus grands défis du secteur de la construction face aux mutations économiques et environnementales actuelles est l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

Ces derniers représentent une part importante de la consommation énergétique mondiale et contribuent significativement aux émissions de gaz à effet de serre, ce qui nécessite l'adoption de mesures efficaces d'économie d'énergie. Réduire la consommation d'énergie permet non seulement de réduire les factures et les coûts d'exploitation, mais aussi de protéger l'environnement en diminuant les émissions de carbone et en améliorant le confort des utilisateurs et la qualité de l'air intérieur.

De plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique augmente la valeur d'un bâtiment sur le marché immobilier et s'inscrit dans les politiques internationales de développement durable et de transition énergétique.

C'est pourquoi l'utilisation d'équipements à haut rendement énergétique, une isolation thermique adaptée et des systèmes intelligents de contrôle de l'éclairage et de la climatisation sont considérés comme des moyens efficaces d'atteindre ces objectifs.

I.3.5 La relation entre la performance énergétique et la durabilité environnementale[7]

La performance énergétique des bâtiments est étroitement liée à la performance environnementale, notamment en raison de son impact sur les émissions de gaz à effet de serre, la consommation des ressources naturelles et la qualité de l'environnement.

Le renforcement progressif des normes en matière de performance énergétique a permis de réduire l'énergie primaire nécessaire au fonctionnement des bâtiments durant leur phase d'exploitation. Une meilleure efficacité énergétique favorise donc une utilisation plus rationnelle des ressources, en limitant notamment le recours aux énergies fossiles et à l'électricité, et en réduisant ainsi l'empreinte environnementale.

Toutefois, atteindre une haute performance énergétique suppose souvent la mise en œuvre de matériaux et de systèmes spécifiques, dont la fabrication, le transport et la fin de vie peuvent engendrer un impact environnemental non négligeable. Cela peut se traduire par un « coût » environnemental supplémentaire, comme dans le cas de l'ajout excessif d'isolant, ou par des choix technologiques plus complexes et coûteux, tels que l'installation de pompes à chaleur à la place de chaudières classiques**.**

I.4 Confort thermique

I.4.1 Définition

Le confort thermique est une sensation de bien-être ressentie par une personne exposée à un environnement intérieur. Il ne dépend pas uniquement de la température de l'air, mais également de l'humidité ambiante, des mouvements d'air (courants d'air), ainsi que de la qualité de l'air intérieur (QAI). [8]

Un autre facteur essentiel est la température dite « résultante », qui combine la température de l'air et celle des surfaces environnantes (murs, fenêtres, etc.). Ainsi, une pièce chauffée à 22°C peut sembler inconfortable si les parois sont froides, alors qu'une température plus basse (18°C), accompagnée d'un rayonnement thermique homogène, peut procurer un confort supérieur. [8]

À l'extérieur également, comme en montagne, on peut ressentir un bon confort thermique à 10°C grâce à un ensoleillement direct et agréable. Ces exemples montrent combien la perception du confort thermique est liée à un équilibre complexe entre plusieurs paramètres physiques et physiologiques.

I.4.2 Les facteurs influençant le confort thermique

I.4.2.1 Confort et température

Dans des conditions normales, le corps humain maintient une température interne d'environ 36,7°C. Et comme cette température est souvent supérieure à celle de l'air ambiant, un équilibre thermique doit être établi avec l'environnement pour garantir le confort thermique de l'individu[9].



Figure I.4 : la sensation de confort thermique exprimée par les personnes**[9]**

La figure (I.4) illustre la relation entre la température de l'air et le pourcentage de personnes insatisfaites des conditions de confort thermique PPD (predicted percentage of dissatisfied). Nous remarquons à travers la courbe qu'il est impossible d'atteindre une satisfaction totale pour tous les individus, car il reste toujours un pourcentage d'au moins 5% de personnes insatisfaites.

Les niveaux de confort varient selon l'activité physique : les personnes assises préfèrent des températures plus élevées que celles qui effectuent un travail léger. C'est ce que montrent les différences sous la forme des courbes rouge et verte. De plus, les individus au repos sont plus sensibles aux légers changements de température.



Figure I.5 : Les facteurs influençant le confort thermique du corps humain et les méthodes d'échange thermique.[9]

D'autre part, la figure (I.5) met en évidence les mécanismes de transfert de chaleur entre le corps humain et son environnement, qui comprennent : le rayonnement (35 %), la convection (35 %), l'évaporation et la transpiration (24 %), et la conduction (1 %), en plus de la chaleur générée par la consommation de nourriture (6 %)

I.4.2.2 Confort et humidité

Bien que l'humidité relative ne soit pas l'un des principaux facteurs affectant directement la sensation de confort thermique, son impact devient évident lorsqu'elle sort des limites confortables. La plupart des individus ne peuvent pas facilement distinguer entre 40 % et 60 % d'humidité dans l'air, mais ils commencent à ressentir de l'inconfort lorsque celle-ci descend en dessous de 30 % ou dépasse 70 %.[9]

Lorsque l'humidité descend en dessous de 30%, des phénomènes tels que l'électricité statique, la sécheresse des muqueuses, la sensibilité à la fumée et l'augmentation de la concentration des particules fines dans l'air se produisent, ce qui peut contribuer à une augmentation des cas de maladies respiratoires, surtout en hiver. Au contraire, une humidité supérieure à 70% entraîne la croissance de champignons et de microbes, ainsi que la condensation de l'humidité sur les surfaces froides, ce qui peut nuire à la santé des habitants et à la structure du bâtiment.[9]

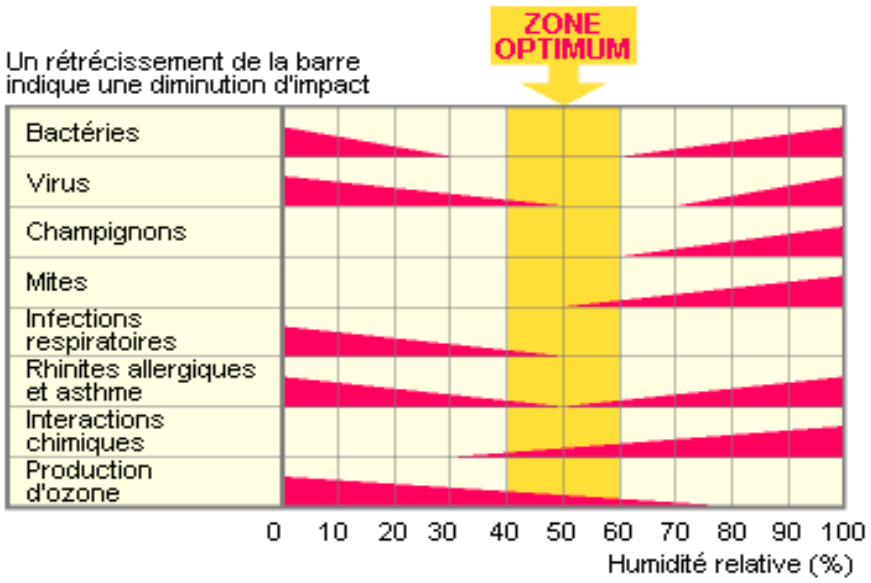


Figure I.6 : Plage hygiénique de l'humidité relative [9]

Comme le montre la figure (I.6) ci-dessous, la plage idéale d'humidité relative se situe entre 40 % et 60 %, ce qui est le domaine où l'impact des facteurs biologiques et des polluants internes, tels que les virus, les moisissures et les allergènes, est réduit.

Par conséquent, maintenir une humidité relative dans cette plage ne garantit pas seulement un meilleur confort thermique, mais constitue également une nécessité sanitaire et contribue à améliorer la qualité de l'air intérieur (QAI), un élément clé de la conception environnementale durable.

- **La plage de confort température-humidité**

L'humidité relative est un facteur complémentaire à la température pour atteindre le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, et ensemble, ils forment ce que l'on appelle le "confort hygrothermique". Des études ont montré que la plage optimale pour atteindre ce confort se situe entre 40 % et 60 % d'humidité relative, lorsque la température de l'air est d'environ 22 °C.[9]

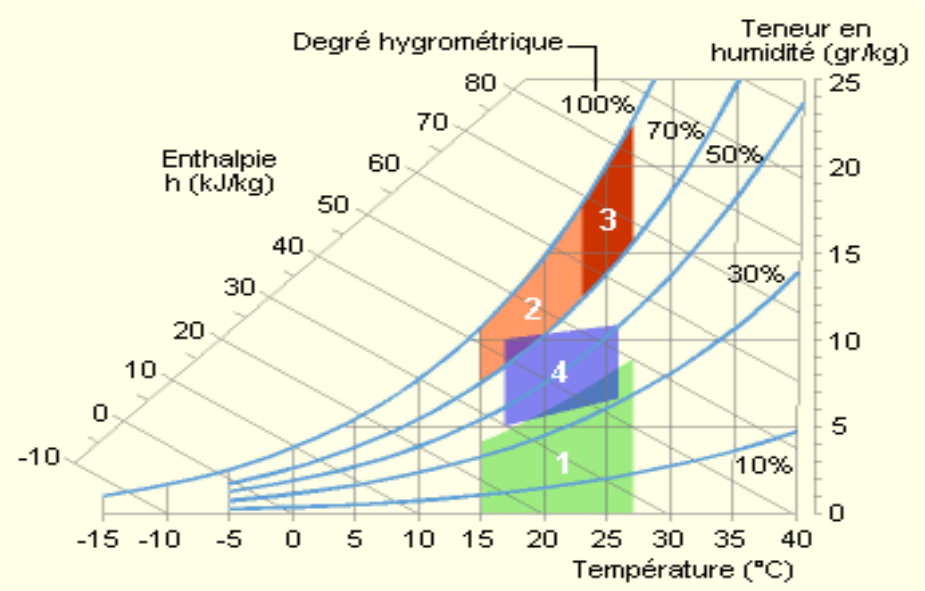


Figure I.8 : Effets de l'humidité relative sur les polluants biologiques et la santé intérieure.[9]

La figure (I.6) suivante montre comment l'humidité en dehors de cette plage affecte la santé et la qualité de l'air intérieur. Une humidité basse (inférieure à 30%) augmente l'irritation des muqueuses, la sécheresse et la propagation de la poussière en suspension dans l'air, ce qui peut entraîner des maladies respiratoires. Quant à l'humidité élevée (au-dessus de 70 %), elle crée un environnement propice à la prolifération des bactéries, des champignons, des acariens, et même à l'activation de réactions chimiques nocives.[9]

Maintenir l'humidité dans cette plage non seulement améliore le confort humain, mais contribue également à réduire les absences liées aux maladies, et constitue l'un des principes fondamentaux de la conception environnementale appropriée dans les bâtiments à faible consommation d'énergie.

I.4.2.3 Confort et vitesse de l'air

La vitesse de l'air, et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu, est un facteur important dans l'évaluation du confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Elle influence le transfert de chaleur par convection et favorise l'évaporation de la sueur, ce qui contribue à modifier la sensation thermique de l'homme.

Dans des conditions normales, la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment est considérée comme non gênante si elle ne dépasse pas 0.2 m/s. Cependant, cette limite varie selon la saison et la nature de l'activité. En hiver, l'air en mouvement peut provoquer une

sensation d'inconfort (courants d'air), tandis qu'en été, il est apprécié pour son effet rafraîchissant.

Pour comparaison, marcher à une vitesse de 1 km/h crée un courant d'air équivalent à environ 0,3 m/s sur le corps.

Les réponses physiologiques varient en fonction de la vitesse de l'air et de la saison, comme le montrent les tableaux suivants :

Tableau I.1 : L'effet de la vitesse du vent en hiver sur le confort thermique[9]

Vitesse résiduelle (m/s)	Réaction humaine	Type d'installation ou contexte
0 à 0,08 m/s	Plaintes quant à la stagnation de l'air.	Aucune.
0,13 m/s	Situation idéale.	Installation de grand confort.
0,13 à 0,25 m/s	Situation agréable, mais à la limite du confort pour les personnes assises en permanence.	Installation de confort.
0,33 m/s	Inconfortable, les papiers légers bougent sur les bureaux.	Grandes surfaces et magasins.
0,38 m/s	Limite supérieure pour les personnes se déplaçant lentement.	Grandes surfaces et magasins.
0,38 à 0,5 m/s	Sensation de déplacement d'air important.	Installations industrielles et usines où l'ouvrier est en mouvement.

Le tableau (I.1) ci-dessus montre l'effet des faibles vitesses de l'air à l'intérieur des bâtiments pendant l'hiver sur le confort des individus. À des vitesses très faibles (< 0,1 m/s), les individus peuvent ressentir une absence de circulation de l'air, tandis que des vitesses plus élevées peuvent devenir inconfortables, en particulier pour les personnes assises en permanence. Le tableau montre les limites de confort associées aux différents types d'utilisation (bureaux, magasins, usines).

Tableau I.2 : Refroidissement perçu selon la vitesse de l'air en conditions estivales[9]

Vitesse de l'air [m/s]	Refroidissement équivalent [°C]
0,1	0
0,3	1
0,7	2
1,0	3
1,6	4
2,2	5
3,0	6
4,5	7
6,5	8

Le tableau (I.2) montre la relation entre la vitesse de l'air et la sensation de refroidissement en été. Par exemple, un courant d'air à une vitesse de 1 m/s équivaut à une sensation de baisse de température d'environ 3 degrés Celsius. Ces données sont utiles pour comprendre comment compenser l'absence de climatisation dans certains bâtiments en renforçant la ventilation naturelle ou en utilisant des ventilateurs.

Tableau I.3 : Vitesse du vent selon l'échelle de Beaufort[9]

Force Beaufort	Nature du vent	Vitesse (m/s)	Vitesse en km/h
0	Calme	–	–
1	Air léger	1.5	5.4
2	Brise légère	3	10.8
3	Brise douce	5	18
4	Brise modérée	7	25
5	Brise fraîche	9	32.4
6	Brise forte	11	39.6
7	Vent modéré	13	47
8	Vent frais	15	54
9	Vent fort	18	65
10	Grand vent	21	76
11	Tempête	28	100
12	Ouragan	45	160

Le tableau (I.3) fournit une référence pour mesurer la vitesse du vent extérieur en se basant sur l'échelle de Beaufort, qui est une échelle utilisée pour caractériser le vent de l'état de calme complet (calme) à celui des ouragans (ouragan). Cette échelle aide à estimer l'effet du vent sur la ventilation naturelle, en particulier lors de la conception des ouvertures d'air ou de la détermination des emplacements des entrées dans les bâtiments.

I.4.2.4 Confort, activité, habillement

De nombreux facteurs influencent la sensation de confort thermique d'une personne à l'intérieur des bâtiments, parmi lesquels le niveau d'activité physique et la qualité des vêtements. Plus l'effort fourni est important, plus la chaleur produite par le corps augmente, ce qui nécessite d'ajuster la température ambiante pour éviter la sensation de chaleur ou d'inconfort**.**

L'effort physique se mesure en unités de "met" (taux métabolique), tandis que l'isolation thermique des vêtements se mesure en unités de "clo "qui représentent la capacité.

En équilibrant la chaleur générée par l'activité physique et l'isolation fournie par les vêtements, on peut atteindre la zone de confort thermique. Ces valeurs sont utilisées dans les modèles thermiques (comme PMV/PPD) pour déterminer les conditions idéales dans les bâtiments.

I.5. La performance énergétique dans le contexte algérien

I.5.1 La consommation énergétique en Algérie (2023)[10]

La consommation nationale d'énergie, incluant les pertes, a atteint 72,2 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) en 2023, enregistrant ainsi une hausse de 3,2 % par rapport à 2022.

Cette augmentation est principalement due à la hausse de la consommation finale (+2,1 %), suivie par les industries énergétiques (+7,1 %), les pertes (+11,5 %), et enfin les industries non-énergétiques (+2,5 %).

En termes de structure, aucun changement significatif n'a été observé entre 2022 et 2023 : la consommation finale demeure dominante avec 75 %, suivie par les industries énergétiques (12 %), les pertes (6,4 %) et les industries non énergétiques (6,4 %).

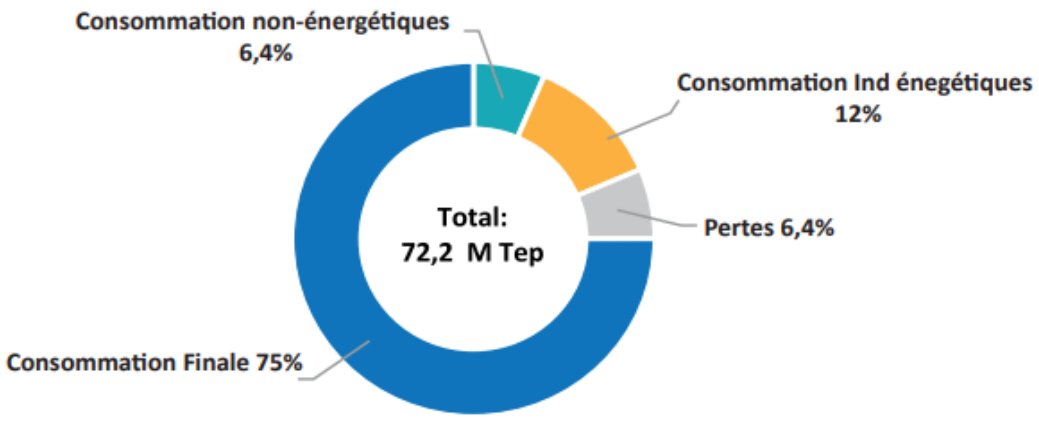


Figure I.9 : Structure de la consommation d'énergie en Algérie[10]

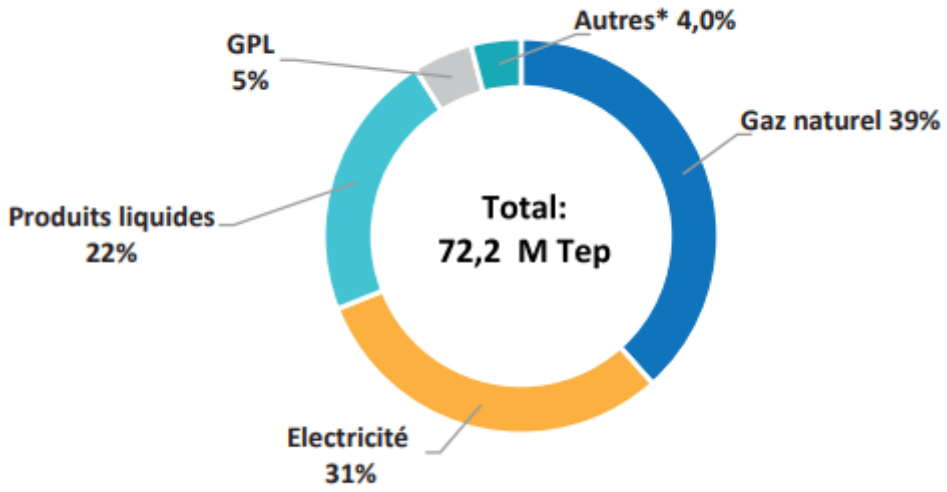


Figure I.10 : Structure de la consommation par forme d'énergie en Algérie [10]

I.5.2 Analyse par secteur de la demande énergétique en Algérie [10]

Selon les statistiques en Algérie de 2023, la consommation finale d'énergie par secteur d'activité montre une répartition relativement stable, mais marquée par certaines évolutions notables :

- Une baisse de 1,9 % dans le secteur des ménages et autres, passant de 25,2 à 24,7 Mtep, tirée principalement par une réduction dans le résidentiel (-3 %).
- Une hausse de 5,1 % dans le secteur des transports, atteignant 16,1 Mtep, expliquée par l'augmentation de la demande en carburants routiers.
- Une hausse de 6,3 % dans le secteur industriel et du BTP, atteignant 13,4 Mtep, soutenue par la reprise économique dans les industries ISMME et les matériaux de construction.

La structure globale reste dominée par le secteur des ménages et autres (46 %), suivi des transports (30 %), puis du secteur industrie/BTP (25 %).

Cette répartition démontre l'importance stratégique de la performance énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires, qui représentent à eux seuls près de la moitié de la consommation finale nationale.

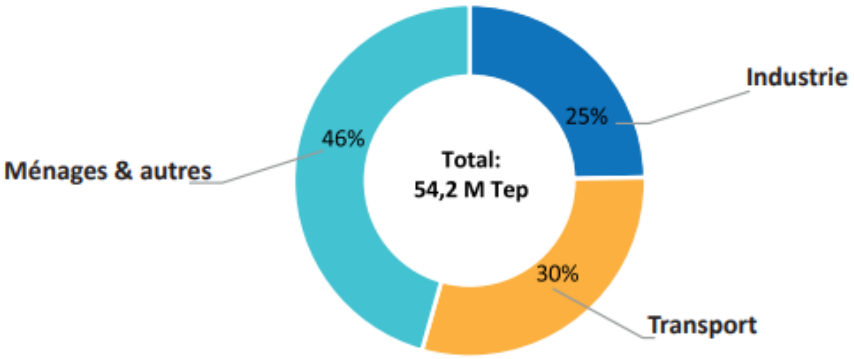


Figure I.11 : Structure de la consommation finale d'énergie par Secteur en Algérie [10]

I.5.3 Les défis liés à la performance énergétique dans le secteur de la construction en Algérie

Malgré les orientations officielles vers la rationalisation de la consommation d'énergie et la promotion de la construction durable, le secteur de la construction en Algérie continue de faire face à plusieurs défis qui entravent l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments.

Parmi les défis les plus marquants :

- Faible application des réglementations et des normes thermiques (comme RTN 2016), malgré l'existence d'un cadre juridique clair.
- Le manque de sensibilisation et de formation professionnelle dans les domaines de l'isolation, de la conception climatique et des équipements à haute efficacité.
- La grande dépendance aux énergies fossiles dans les systèmes de chauffage et de refroidissement, et l'absence d'une intégration systématique des énergies renouvelables.
- L'absence d'incitations financières et de programmes incitatifs qui permettent de généraliser les solutions technologiques économes en énergie.
- La diversité des climats géographiques en Algérie (semi-Ar paranoïa, désertique, continental...) Ce qui nécessite des approches locales précises.

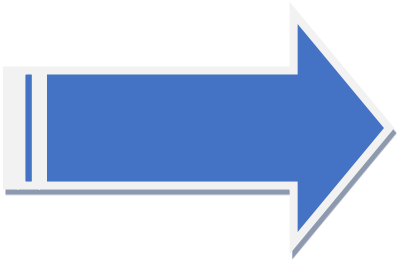
La chercheuse KHARCHI Razika du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) a confirmé que le secteur de la construction en Algérie est l'un des plus consommateurs d'énergie, en raison de l'adoption de méthodes de construction traditionnelles, de la faible culture énergétique des acteurs, ainsi que de l'absence d'outils d'évaluation et de surveillance efficaces pour la performance des bâtiments.[11]

Elle estime que l'amélioration de la performance énergétique nécessite « une révision complète de la conception du bâtiment, allant de son enveloppe thermique à ses systèmes techniques, en passant par le comportement de ses utilisateurs ».

I.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de poser le cadre théorique de l'étude en abordant les concepts fondamentaux liés à la performance énergétique et au confort thermique dans les bâtiments. L'importance de l'amélioration de l'efficacité énergétique a été soulignée, en particulier dans le contexte algérien, où le secteur de la construction représente une part importante de la consommation nationale d'énergie.

Nous avons également abordé les facteurs influençant le confort thermique, tels que la température, l'humidité, la vitesse de l'air, le niveau d'activité et la qualité des vêtements, ainsi que les indicateurs utilisés pour mesurer la performance énergétique. La situation énergétique en Algérie et les défis structurels auxquels le secteur de la construction est confronté ont également été mis en lumière.



Chapitre II

Présentation de projet

II.1 Introduction

Ce chapitre présente les données de base relatives au projet étudié, qui ont été adoptées dans le processus de modélisation et de simulation thermique.

La présentation commence par l'emplacement géographique du bâtiment, puis par les caractéristiques architecturales qui déterminent sa forme générale et l'organisation de ses espaces.

Ensuite, les conditions climatiques spécifiques à la zone d'étude sont présentées, puis enfin les caractéristiques thermiques approuvées des composants du bâtiment.

II.2 Paramètres Géographiques

BERROUAGHIA est une commune située dans la wilaya de Médéa, dans la partie nord de l'Algérie. Elle est considérée comme un pôle industriel important, avec ses principales usines, l'unité de production de pompes et d'équipements agricoles (POVAl) ainsi que la société d'électricité de BERROUAGHIA (SKB).

D'un point de vue géographique, BERROUAGHIA se situe à environ 90 kilomètres au sud de la capitale algérienne, dans la région des Hauts Plateaux, et se distingue par sa position entre les collines et les plaines fertiles.

La commune est délimitée :

- Au nord : Commune D'EL-AMRIA (Wilaya de Blida).
- Au sud : Commune de SGHOUAN (Wilaya de Médéa).
- À l'est : commune de BENI SLIMANE (Wilaya de Médéa).
- À l'ouest : commune de OUZERA (wilaya d'Aïn Defla).

Le logiciel METEONORM (version 8.2) nous donne la description du site suivant :

• Superficie : Environ 169 km2

• Altitude : 937 m au-dessus du niveau de la mer

• Coordonnées géographiques :

Latitude : 36.135° Nord
Longitude : 2.927° Est

• Zone climatique : A

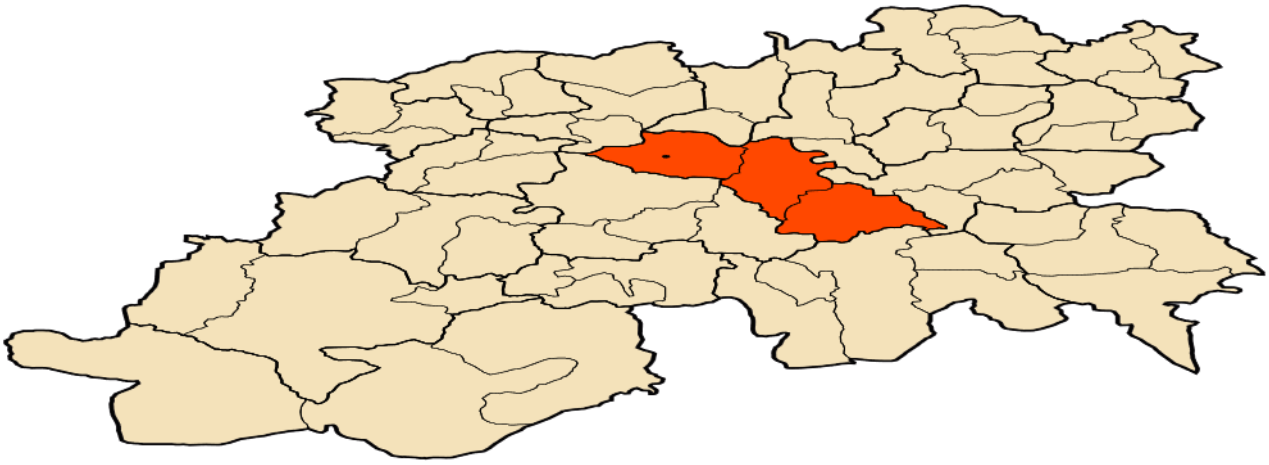


Figure II.1 : Localisation géographique de la commune de BERROUAGHIA dans la wilaya de Médéa.[12]

II.3 Paramètres Géométriques

Le bâtiment étudie dans ce travail est le dernier étage d'un immeuble administratif, d'une superficie de 243 mètres carrés et d'un périmètre de 62 mètres. Il se compose de quatre bureaux, d'une salle de réunion, d'une salle d'attente, de couloirs et d'une salle de bain, avec une hauteur de plafond de 3 mètres.

Le plan architectural de ce bâtiment est illustré dans la figure (II.2) ci-dessous :

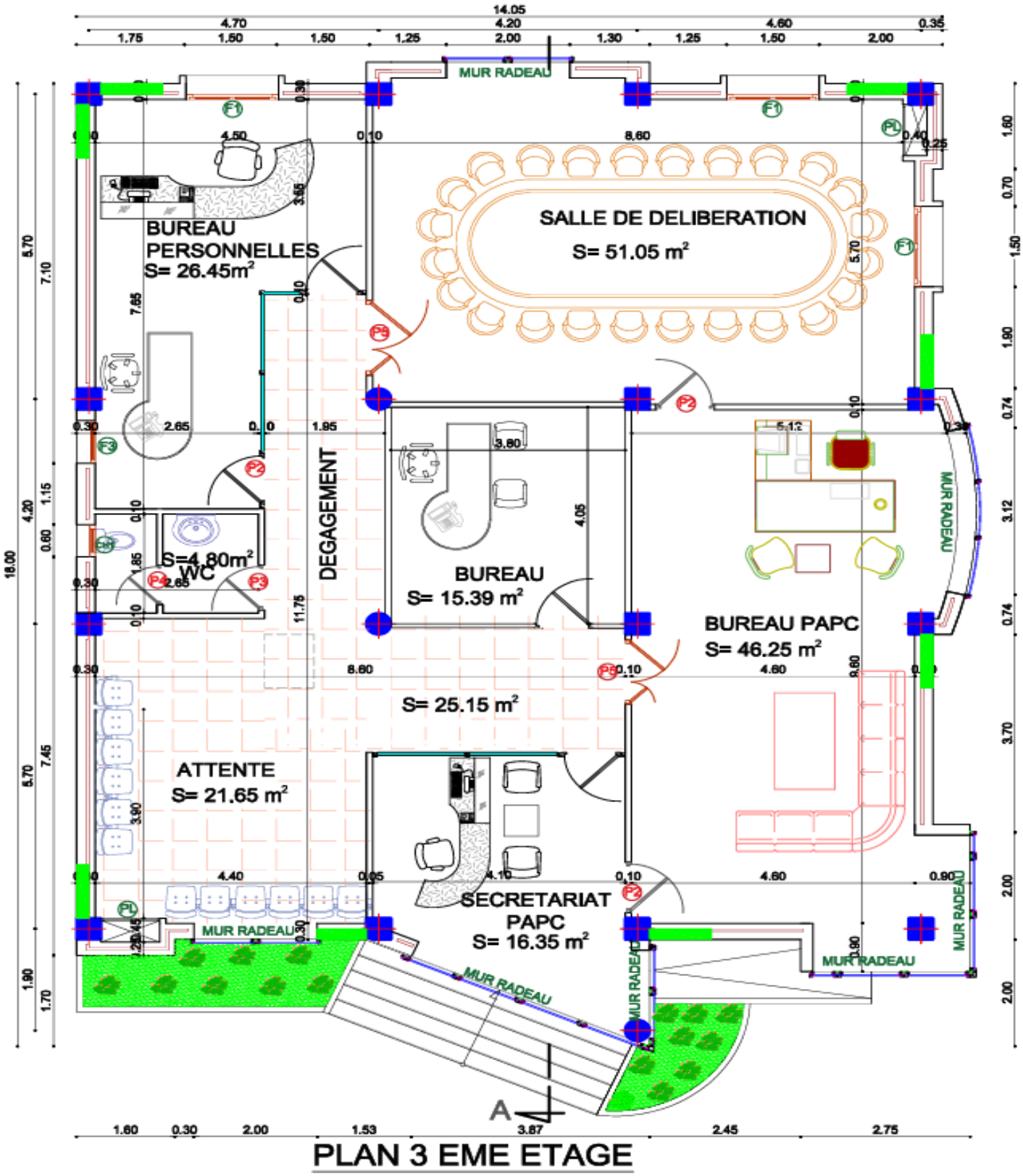


Figure II.2 : Le plan architectural de ce bâtiment

Tableau II.1 : Paramètres géométriques principaux du bâtiment

N°	Locaux	S_L [m²]	V_L [m³]	S_M [m²]				S_V[m²]				S_P [m²]
				N	S	O	E	N	S	O	E	
1	**Salle de délibération**	51.05	153.15	19.55	23.95	15.21	14.85	2.25/4	/	/	2.25	1.89
2	**Bureau personnelles**	26.45	79.35	11.25	7.95	20.7	21.06	2.25	/	2.25	/	1.89
3	**Bureau PAPC**	46.25	138.75	11.91	9.8	25.05	18.56	/	4	/	6.24/4	1.89
4	**Bureau**	15.39	46.17	11.4	9.51	12.15	12.15	/	/	/	/	1.89
5	**Secrétariat PAPC**	16.35	49.05	10.41	9.95	9.36	15.36	/	/	/	4	2.35
6	**Attente**	21.65	64.95	/	13.2	11.7	9.36	/	4	/	/	/
7	**WC**	4.8	14.4	7.95	7.95	5.19	3.66	/	/	0.36	/	1.89
8	**Dégagement**	25.15	75.45	3.15	/	14.37	13.82	/	/	/	/	/

S_L : surface de local.

S_M : surface des murs.

S_V : surface des vitres.

S_P : surfaces des portes.

V_L : volume du local.

II.4 Paramètres Climatiques

II.4 .1 Paramètres Climatiques externes

Donné de METEONORM 8.2.0 du site BERROUAGHIA :

La commune de BERROUAGHIA se situe dans la wilaya de Médéa, cette région fait partie de la zone climatique A (latitude 36.135° Nord, longitude 2.927° Est) qui se caractérise par un hiver froid et un été chaud et humide.

Tableau II.2 : Données climatiques mensuelles de la commune de Berrouaghia [13]

	Gh **KWh/m²**	Bn **KWh/m²**	Dh **KWh/m²**	Ta ° C	Td **° C**	FF **m/s**
Janvier	80	128	27	8.5	3.9	2.3
Février	92	106	40	9.1	3.7	2.7
Mars	136	145	52	12.5	5.3	3
Avril	164	152	68	15.4	7.3	3.1
Mai	195	166	84	19.7	9.7	3.3
Juin	216	194	81	25.5	11.9	3.4
Juillet	221	203	80	29.3	13	3.2
Août	202	197	69	28.6	13.7	3.1
Septembre	153	152	60	23.8	12.8	2.9
Octobre	124	147	47	19.7	10.4	2.3
Novembre	84	115	35	12.7	7	2.2
Décembre	74	124	26	9.7	4.9	2.1
Année	1738	1828	669	17.9	8.6	2.8

Gh : Irradiation solaire globale horizontale [W/m²]

Bn : Irradiation solaire directe normale [W/m²]

Dh : Irradiation solaire diffus sur un plan horizontal [W/m²]

Ta : Température de l'air [°C]

Td : Température du point de rosée [°C]

FF : Vitesse du vent [m/s]

II.4.1 Les températures

Les températures varient entre 6º et 33º en moyenne tout au long de l'année, en été les températures varient entre 25º et 33º tandis qu'en hiver elles oscillent entre 6º et 22º.

Comme l'indique le graphe suivant :

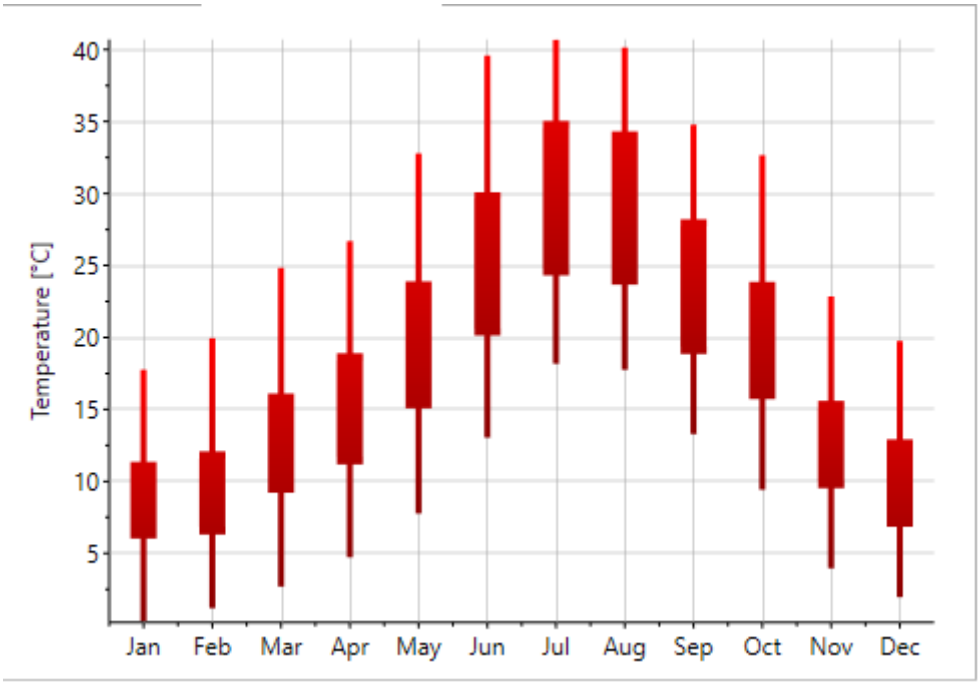


Figure II.3 : Variation mensuelle des températures à Berrouaghia **[13]**

L'évolution des températures journalières maximales et minimales sur une année complète pour la commune de Berrouaghia est illustrée dans le graphique suivant :

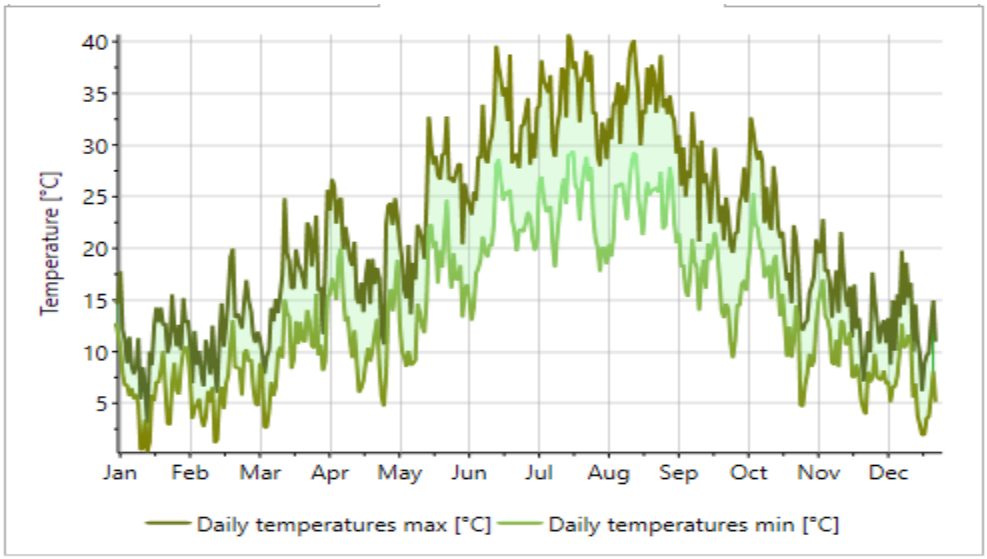


Figure II.4 : Variation des températures extrêmes journalières à Berrouaghia[13]

II.4.2 L'ensoleillement

Avec une durée d'ensoleillement moyenne de 10 heures par jour et un rayonnement de 220 kwh/m². Le mois de juillet constitue le plus grand gisement de l'année en termes d'irradiation solaire.

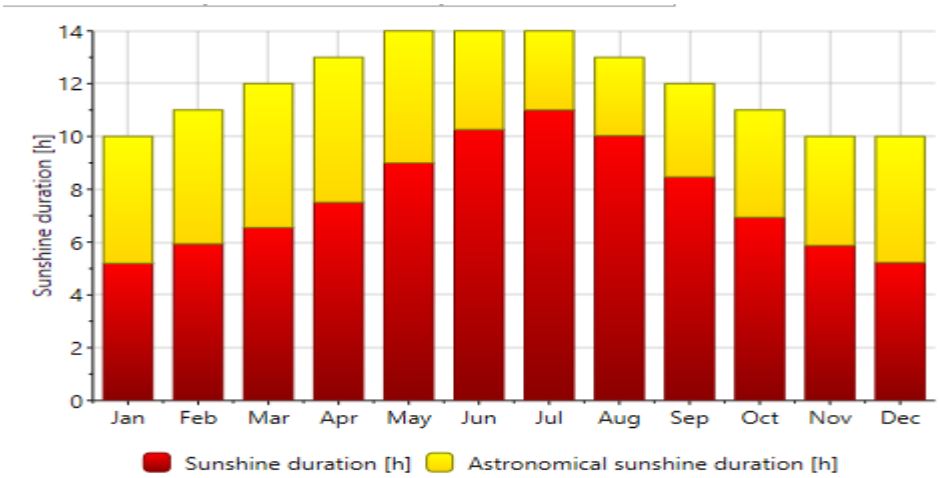


Figure II.5: durée d'ensoleillement [13]

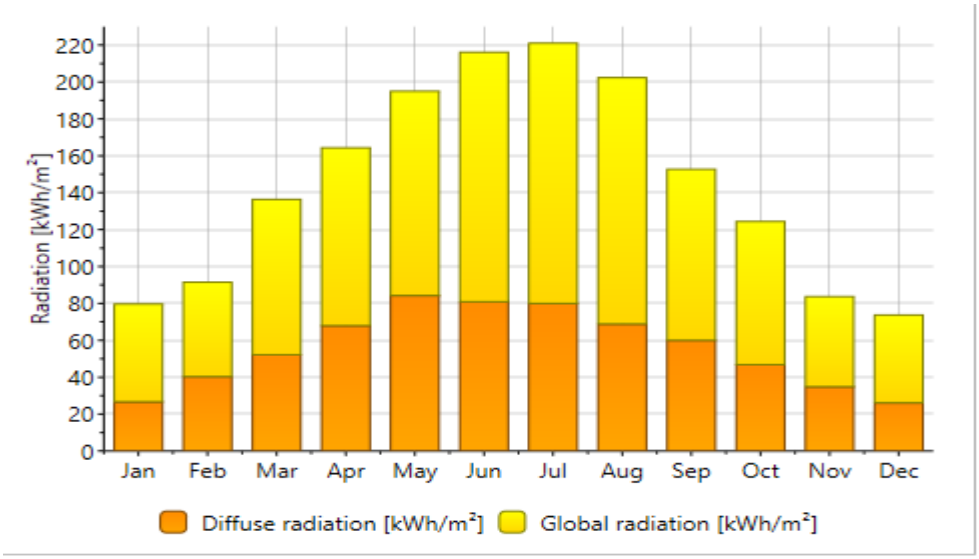


Figure II.6 : Irradiation Solaire mensuelle**[13]**

II.4.2. Paramètres Climatiques internes

Selon le Document Technique Réglementaire algérien (DTR), les conditions intérieures de référence sont fixées à :

• 21 °C et 50 % d'humidité en hiver pour le calcul des besoins de chauffage

• 24 °C et 50 % d'humidité en été pour dimensionner les systèmes de climatisation et évaluer les apports de chaleur admissibles.

II.5 Paramètres Thermiques

- **Mur extérieur sans isolation**

Tableau II.3 : Caractéristiques de construction des murs extérieurs sans isolation [14]

Construction	**Epaisseur [m]**	**λ [W /m °C]**	**R [m²°C/ W]**	**∑R [m²°C/ W]**	**K [W/m2°C]**
			Été / Hiver	**Été / Hiver**	**Été / Hiver**
Air extérieur	-	-	0.04/0.06		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.01		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Brique	0.1	0.88	0.11	1.51 / 1.54	0.66 / 0.65
Lame d'air	0.1	0.09	1.11		
Brique	0.1	0.88	0.11		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.01		
Air intérieur	-	-	0.10/0.11		

- **Mur extérieur avec isolation intérieure**

Tableau II.4 : Caractéristiques de construction des murs extérieurs avec isolation intérieur [14]

Construction	**Epaisseur [m]**	**λ [W /m °C]**	**R [m²°C/ W]**	**∑R [m²°C/ W]**	**K [W/m2°C]**
			Été / Hiver	**Été / Hiver**	**Été / Hiver**
Air extérieur	-	-	0.04/0.06		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.01		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Brique	0.1	0.88	0.11	4.31/4.33	0.232/0.230
Lame d'air	0.1	0.09	1.11		
Brique	0.1	0.88	0.11		
Mortier en ciment	0.02	2.1	2.8		
Polyuréthane	0.07	0.025	0.01		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.10/0.11		
Air intérieur	-	-			

- **Mur extérieur avec isolation par l'extérieur**

Tableau II.5 : Caractéristiques de construction des murs extérieurs avec isolation par l'extérieur **[14]**

Construction	**Epaisseur [m]**	**λ [W /m °C]**	**R [m²°C/ W]**	**∑R [m²°C/ W]**	**K [W/m2°C]**
			Été / Hiver	**Été / Hiver**	**Été / Hiver**
Air extérieur	-	-	0.04/0.06		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.01		
Polyuréthane	0.07	0.025	2.8		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Brique	0.1	0.88	0.11	4.31/4.33	0.232/0.230
Lame d'air	0.1	0.09	1.11		
Brique	0.1	0.88	0.11		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.01		
Air intérieur	-	-	0.10/0.11		

Mur intérieur

Tableau II.6 : Caractéristiques de construction des murs intérieurs**[14]**

Construction	**Epaisseur [m]**	**λ [W /m °C]**	**R [m²°C/ W]**	**∑R [m²°C/ W]**	**K [W/m2°C]**
			Été / Hiver	**Été / Hiver**	**Été / Hiver**
Air intérieur	-	-	0.10 / 0.11		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.01		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01	0.35 / 0.37	2.86 / 2.70
Brique	0.1	0.88	0.11		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Enduit en Plâtre	0.015	1.38	0.01		
Air intérieur	-	-	0.10 / 0.11		

- **Plancher d'un étage supérieur**

Tableau Ⅱ.7:Caractéristiques de construction du plancher [14]

Construction	**Epaisseur [m]**	**λ [W /m °C]**	**R [m²°C/ W]**	**∑R [m²°C/ W]**	**K [W/m2°C]**
			Été / Hiver	**Été / Hiver**	**Été / Hiver**
Carrelage	0.01	1.70	0.006		
Mortier en ciment	0.02	2.10	0.010	0.139 / 0.219	7.19 / 4.57
Dalle béton lourd	0.15	1.80	0.083		
Plafond (plâtre)	0.01	0.25	0.040		
Air intérieur	-	-	0.17/0.08		

- **Toiture sans isolation**

Tableau II.9 : Caractéristiques de construction de la toiture sans isolation [17]

Construction	**Epaisseur [m]**	**λ [W /m °C]**	**R [m²°C/ W]**	**∑R [m²°C/ W]**	**K [W/m2°C]**
			Été / Hiver	**Été / Hiver**	**Été / Hiver**
Air extérieur	-	-	0.16 / 0.09		
Gravier	0.05	1.99	0.025		
Etanchéité multicouche	0.02	0.16	0.125		
Feuille bitumineuse	0.005	0.49	0.010	1.024/0.964	0.976 / 1.037
Forme de pente en béton	0.05	1.04	0.048		
Béton armé	0.1	1.69	0.059		
Hourdis	0.2	1.32	0.152		
Lame d'air	0.3	0.09	0.333		
Placo BA23	0.023	0.32	0.072		
Air intérieur	-	-	0.04 / 0.05		

- **Toiture avec isolation**

Tableau II.10 : Caractéristiques de construction de la toiture avec isolation **[14]**

Construction	**Epaisseur [m]**	**λ [W /m °C]**	**R [m²°C/ W]**	**∑R [m²°C/ W]**	**K [W/m2°C]**
			Été / Hiver	**Été / Hiver**	**Été / Hiver**
Air extérieur	-	-	0.16 / 0.09		
Gravier	0.05	1.99	0.025		
Etanchéité multicouche	0.02	0.16	0.125		
Feuille bitumineuse	0.005	0.49	0.010	3.491/3.431	0.286 / 0.291
Forme de pente en béton	0.05	1.04	0.048		
Béton armé	0.1	1.69	0.059		
Hourdis	0.2	1.3	0.152		
Polyuréthane	0.07	0.025	2.8		
Placo BA23	0.023	0.32	0.072		
Air intérieur	-	-	0.04 / 0.05		

- **Vitrage et portes**

Tableau II.11 : Caractéristiques de construction des vitres et des portes**[14]**

Type	**K [W/m². °C]**
Simple vitrage	5.68
Double vitrage	1.4
Portes extérieur	5.80
Portes intérieur	3.5

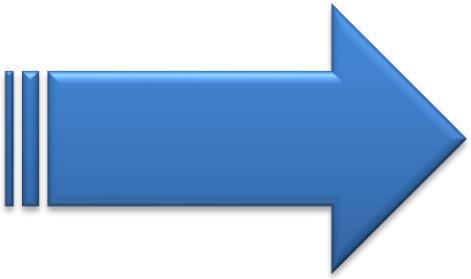
II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail notre projet, qui consiste en l'analyse de la performance énergétique d'un bâtiment administratif situé en Algérie à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS.

Nous avons décrit les différentes composantes de l'enveloppe du bâtiment, telles que les murs extérieurs et intérieurs, la toiture et le plancher, en mettant en avant leurs caractéristiques thermiques. Trois cas d'étude ont été définis : sans isolation, avec isolation intérieure, et avec isolation extérieure, dans le but de comparer leurs performances en matière de besoins de chauffage et de refroidissement.

Les températures de confort ainsi que les horaires de fonctionnement des systèmes thermiques ont également été fixés, afin de préparer rigoureusement la simulation.

Cette description précise du bâtiment constitue une base essentielle pour garantir la fiabilité des résultats. Elle nous permettra, dans le prochain chapitre, d'établir une méthodologie claire pour simuler le comportement énergétique du bâtiment en fonction des différentes configurations d'isolation thermique.



Chapitre III

Modélisation

III.1. Introduction

La modélisation thermique des bâtiments est un outil essentiel pour analyser la performance énergétique, car elle permet de simuler les interactions entre les composants du bâtiment et l'environnement extérieur et d'étudier la consommation d'énergie dans des conditions spécifiques. Par conséquent, ce processus est désormais nécessaire pour des bâtiments économes en énergie, donc respectueux de l'environnement.

III.2. Outils de simulation thermique

Les programmes de simulation énergétique sont des outils numériques utilisés pour modéliser les bâtiments et les systèmes thermiques dans le but d'analyser la performance thermique et la consommation d'énergie. Parmi les programmes les plus connus, on trouve

Energy Plus : Le logiciel Energy Plus est un outil puissant conçu pour relever les défis complexes de l'analyse et de la simulation énergétiques dans les bâtiments. Développé par le Département américain de l'énergie (DOE), ce logiciel offre une plateforme complète pour évaluer la performance énergétique de différents types et conceptions de bâtiments.[15]

Design Builder : Design Builder combine la modélisation 3D rapide des bâtiments et la simulation dynamique de l'énergie grâce à sa facilité d'utilisation unique. Grâce à cette caractéristique, il est considéré comme un outil logiciel unique pour la création et l'évaluation des conceptions de bâtiments.[16]

III.3. TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation) est un environnement de simulation complet et extensible pour la simulation transitoire de systèmes, y compris les bâtiments à zones multiples. Il est utilisé par des ingénieurs et des chercheurs du monde entier. Valider de nouveaux concepts énergétiques, des systèmes simples d'eau chaude domestique à la conception et simulation des bâtiments et de leurs équipements, y compris les stratégies de contrôle, le comportement des occupants, systèmes d'énergie alternative (éolien, solaire, photovoltaïque, systèmes à hydrogène), etc.

III.3.1. Les avantages

- Approche modulaire, il est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de système thermique à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).

- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.

- Documentation vaste sur les sous-programmes y compris explications, usages usuels, équations de base.

- Définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.[17]

III.3.2. Les inconvénients

Un inconvénient de TRNSYS est que l'intégration conviviale des méthodes de contrôle complexes et de dimensionnement optimal du système fait défaut**.**

III.3.3. La suite TRNSYS

TRNSYS se compose d'une suite de programmes : le TRNSYS Simulation Studio, le moteur de simulation (TRNDll.dll) et son exécutable (TRNExe.exe), l'interface visuelle de saisie des données de construction (TRNBuild.exe), et l'Éditeur utilisé pour créer des programmes redistribuables autonomes connus sous le nom de applications TRNSED (TRNEdit.exe).[18]

III.3.3.1. TRNSYS Simulation Studio

L'interface visuelle principale est le TRNSYS Simulation Studio (anciennement connu sous le nom de IISiBat). De là, vous pouvez créer des projets en glissant-déposant des composants dans l'espace de travail, en connectant les rassembler et définir les paramètres globaux de la simulation.

Le Simulation Studio enregistre les informations du projet dans un fichier de projet Trnsys (*.tpf). Lorsque vous exécutez une simulation, le Studio crée également un fichier d'entrée TRNSYS (fichier texte contenant toutes les informations sur la simulation mais sans informations graphiques).[18]

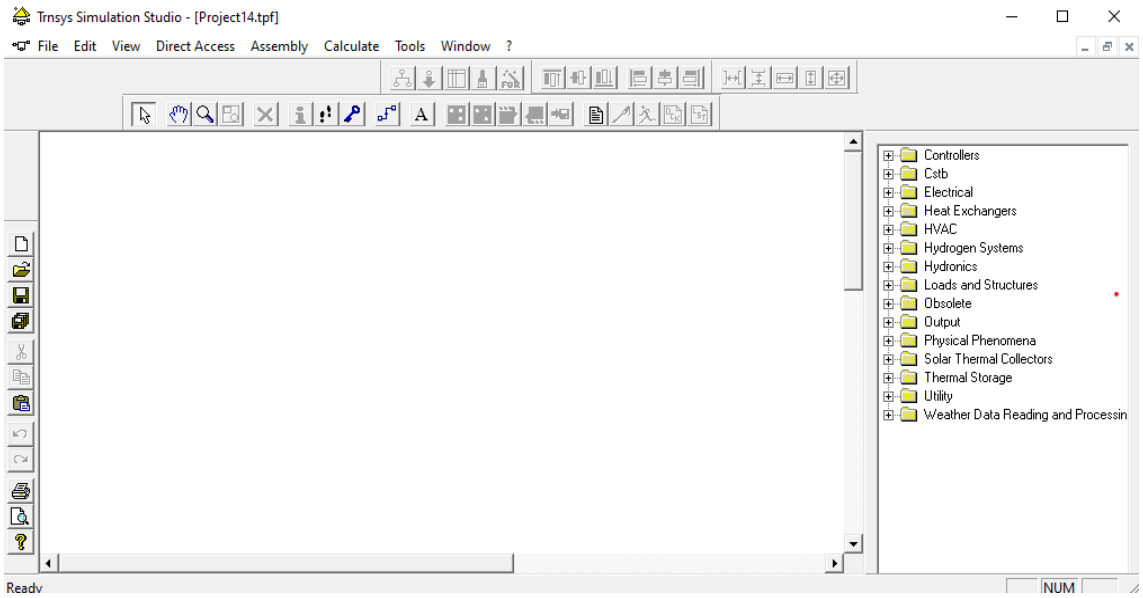


Figure III.1 : Interface du logiciel TRNSYS.**[19]**

III.3.3. TRNBuild

TRNBuild (anciennement connu sous le nom de Prebid) est l'outil utilisé pour saisir les données d'entrée pour les bâtiments à zones multiples. Cela vous permet de spécifier tous les détails de la structure du bâtiment, ainsi que tout ce qui est nécessaire pour simuler le comportement thermique du bâtiment, tel que les propriétés optiques des fenêtres, le chauffage et horaires de refroidissement, etc.[18]

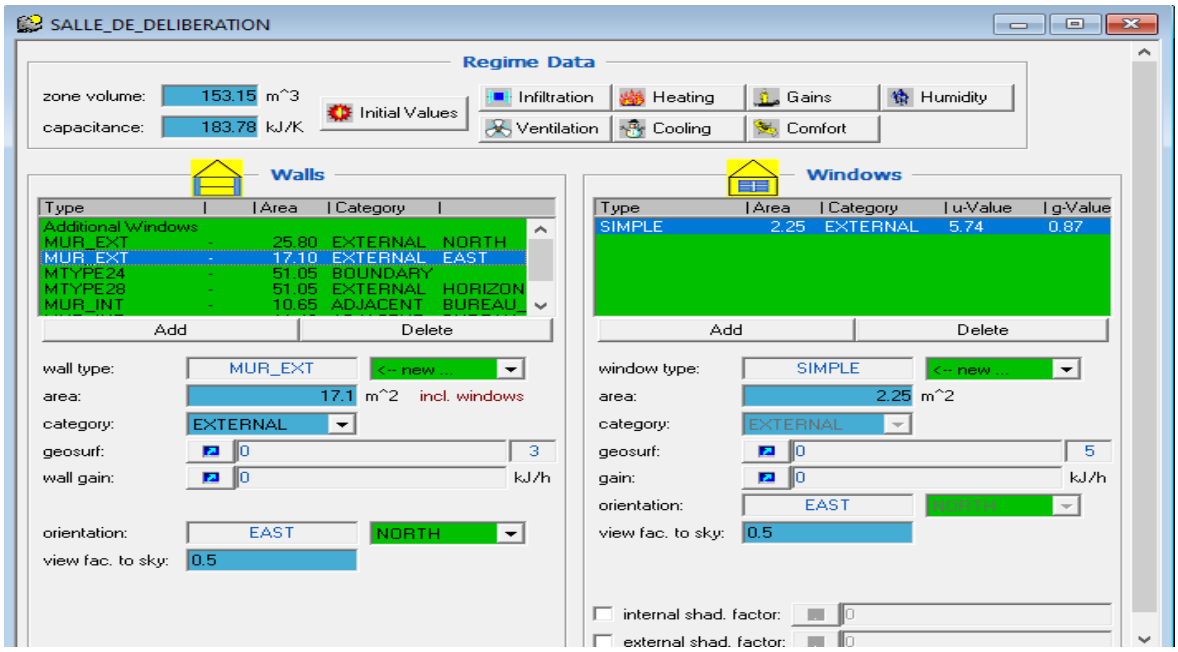
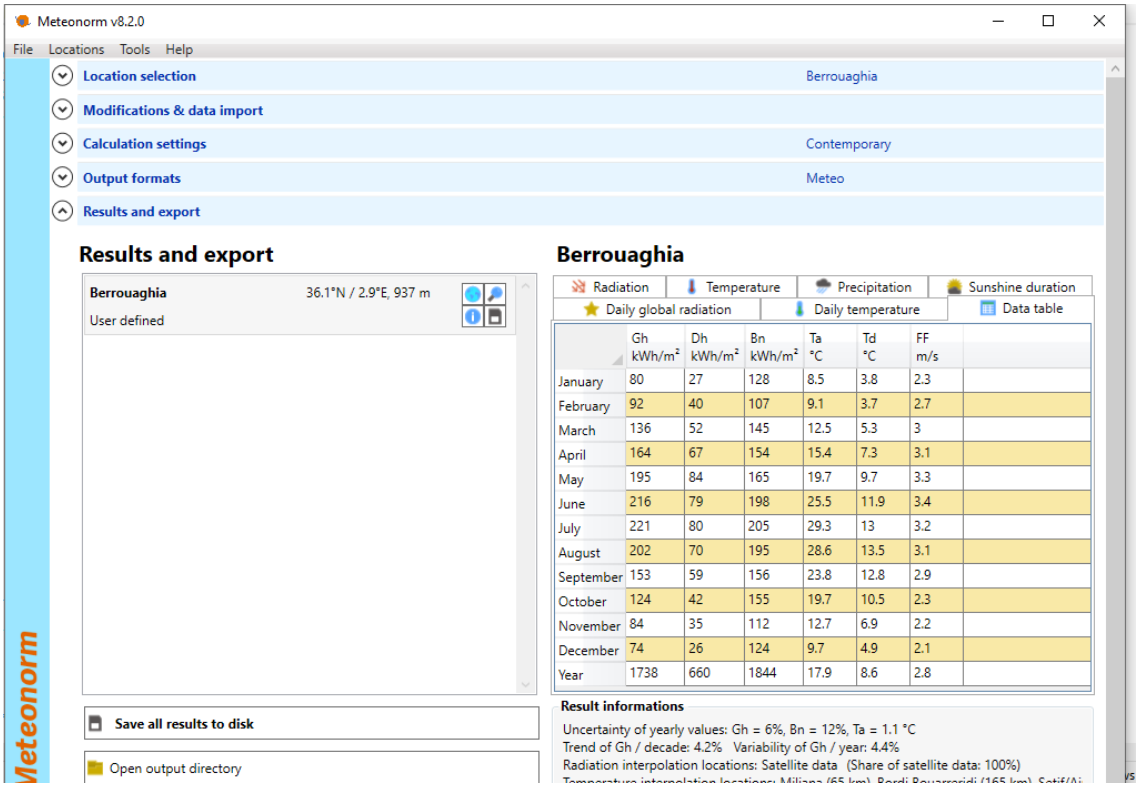


Figure III.2 **:** Interface du logiciel TRNBuild.[19]

III.4. METEONORM

Météonorm est une base de données météorologiques contenant des données climatologiques pour des applications d'ingénierie solaire en tout point du globe. Les résultats sont des années typiques générées stochastiquement à partir de moyennes mensuelles interpolées à long terme. Ils représentent une année moyenne de la période climatologique sélectionnée, selon les paramètres de l'utilisateur. Ainsi, les résultats ne représentent pas une année historique réelle, mais une année hypothétique qui représente statistiquement une année typique à l'endroit sélectionné.[13]



	Gh kWh/m²	Dh kWh/m²	Bn kWh/m²	Ta °C	Td °C	FF m/s
January	80	27	128	8.5	3.8	2.3
February	92	40	107	9.1	3.7	2.7
March	136	52	145	12.5	5.3	3
April	164	67	154	15.4	7.3	3.1
May	195	84	165	19.7	9.7	3.3
June	216	79	198	25.5	11.9	3.4
July	221	80	205	29.3	13	3.2
August	202	70	195	28.6	13.5	3.1
September	153	59	156	23.8	12.8	2.9
October	124	42	155	19.7	10.5	2.3
November	84	35	112	12.7	6.9	2.2
December	74	26	124	9.7	4.9	2.1
Year	1738	660	1844	17.9	8.6	2.8

Figure III.3 : interface de logiciel Meteonorm (8.2). [13]

III.5. Simulation du projet

Pour commencer notre projet on doit passer par TRNSYS studio, dans cette partie il existe plusieurs étapes à suivre.

Pour lancer l'assistant de création de projet, nous sélectionnons File / New, puis nous choisissons "Création de projet (multizone)".

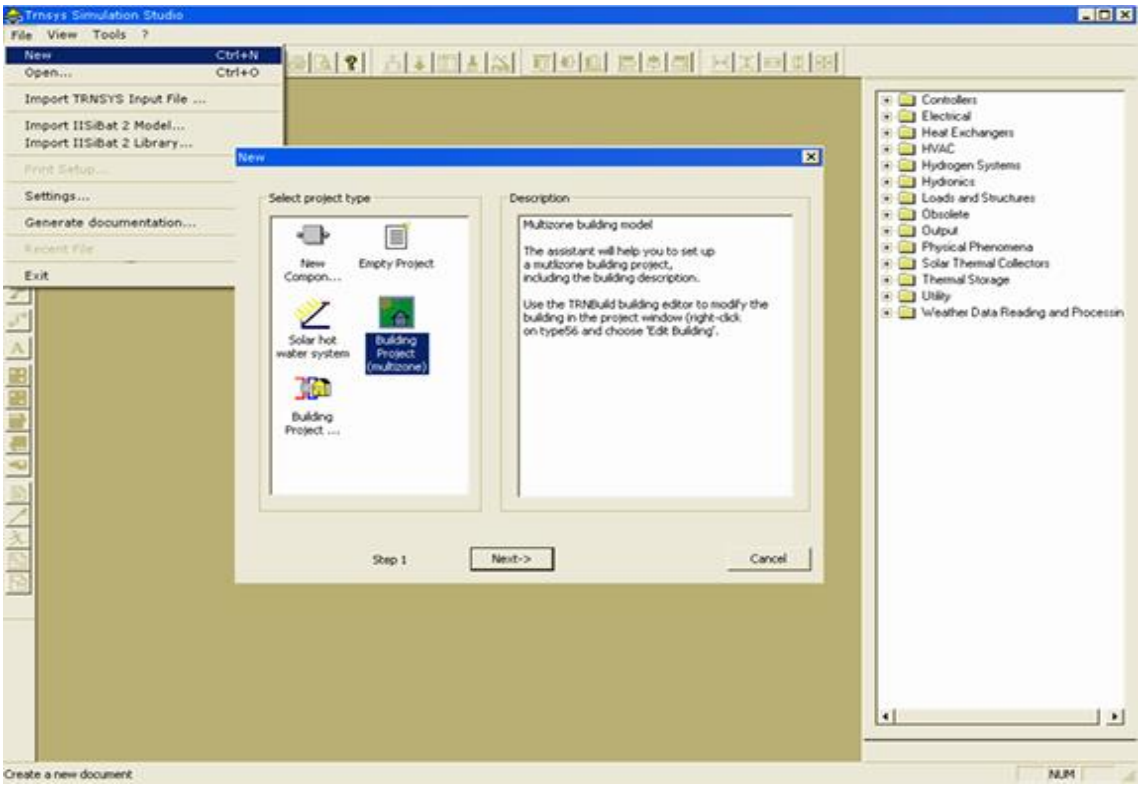


Figure III.4 : Étape 1 : Lancement de l'assistant de bâtiment

La première étape pour déterminer le bâtiment est de créer des zones thermiques et d'informer le processeur des zones adjacentes à d'autres. Cela se fait en utilisant un plan de grille. Cliquer sur une cellule de la grille créera une zone à cet emplacement.

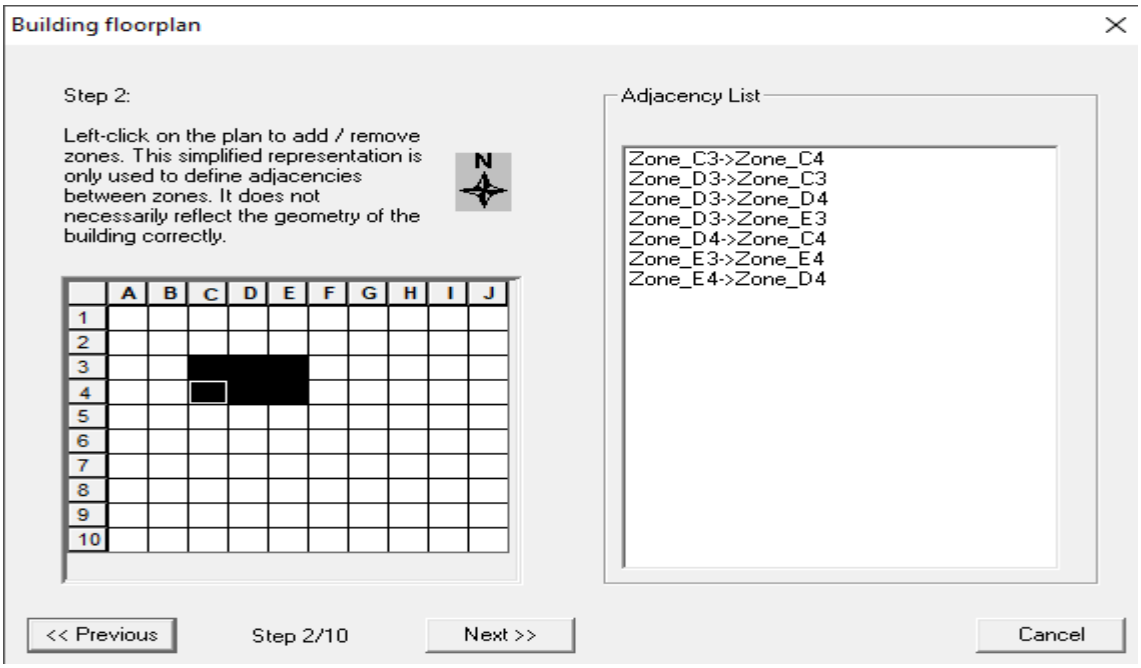


Figure III.5 : Étape 2 : définition des zones dans l'assistant de bâtiment.

La troisième étape consiste à entrer les dimensions de chaque salle : la longueur, la largeur et la hauteur, afin que le logiciel calcule automatiquement le volume.

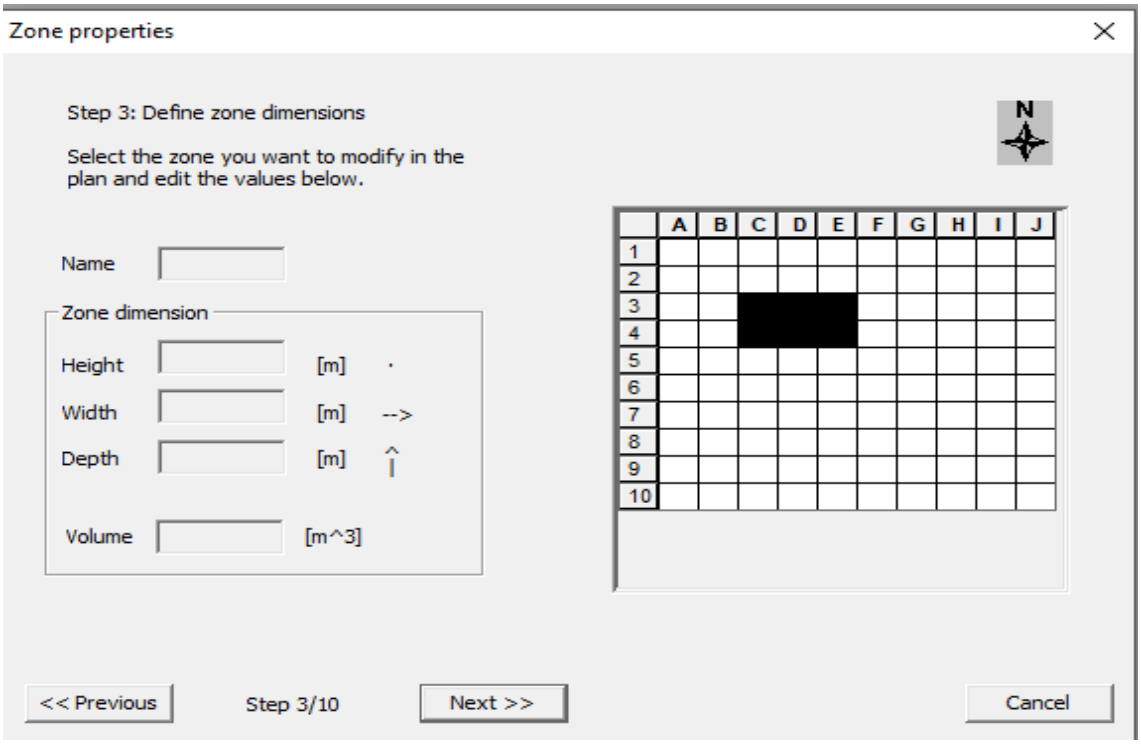


Figure III.6 : Étape 3 : Dimensions des salles.

Nous pouvons ensuite définir le pourcentage de verre pour chaque côté du bâtiment (pour le répartir uniformément entre toutes les zones) et un angle de rotation global pour le bâtiment (par rapport à la direction du vrai nord). Nous choisissons également un fichier de données météorologiques. Tous ces paramètres peuvent être modifiés ultérieurement, une fois le projet créé.

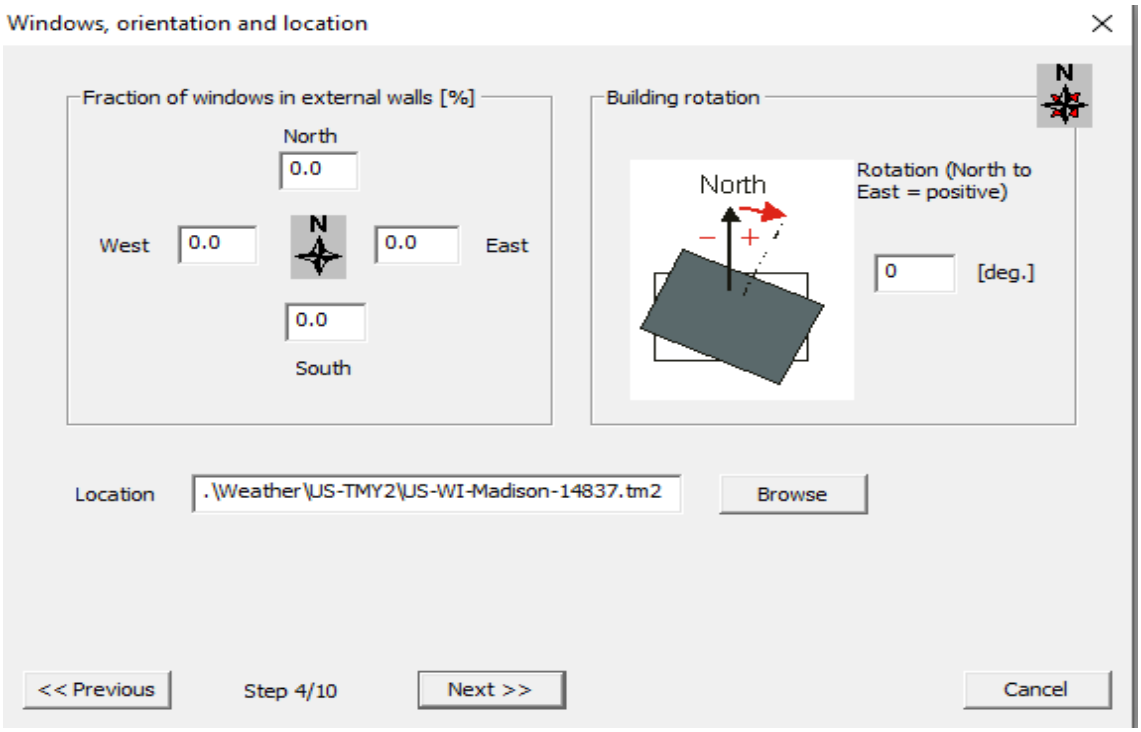


Figure III.7: Étape 4 : Orientation du bâtiment et du verre .

Nous pouvons maintenant définir l'infiltration et la ventilation, qu'elle soit mécanique ou naturelle.

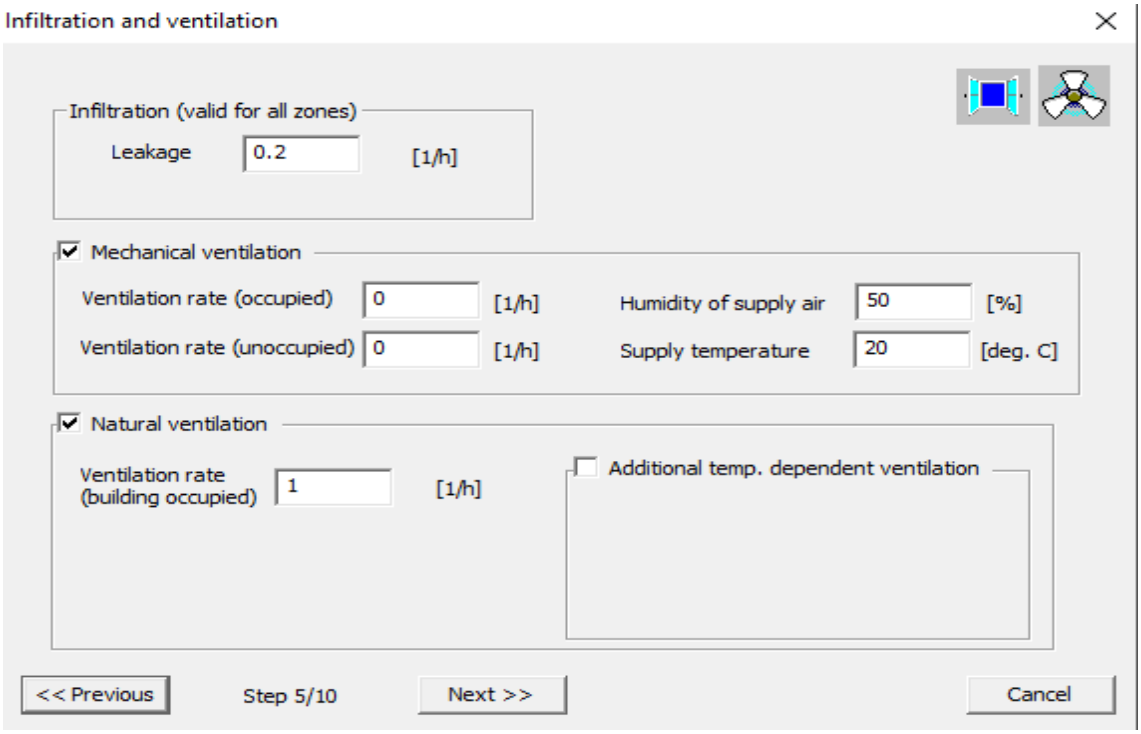


Figure III.8: infiltration et ventilation.

Cette étape permet d'ajouter les systèmes de chauffage et de climatisation utilisés dans notre simulation. Elles sont actuellement désactivées, mais nous pouvons les activer plus tard.



Figure III.9 : Étape 6 : Chauffage et Climatisation.

Les gains internes, nous pouvons les définir plus tard.

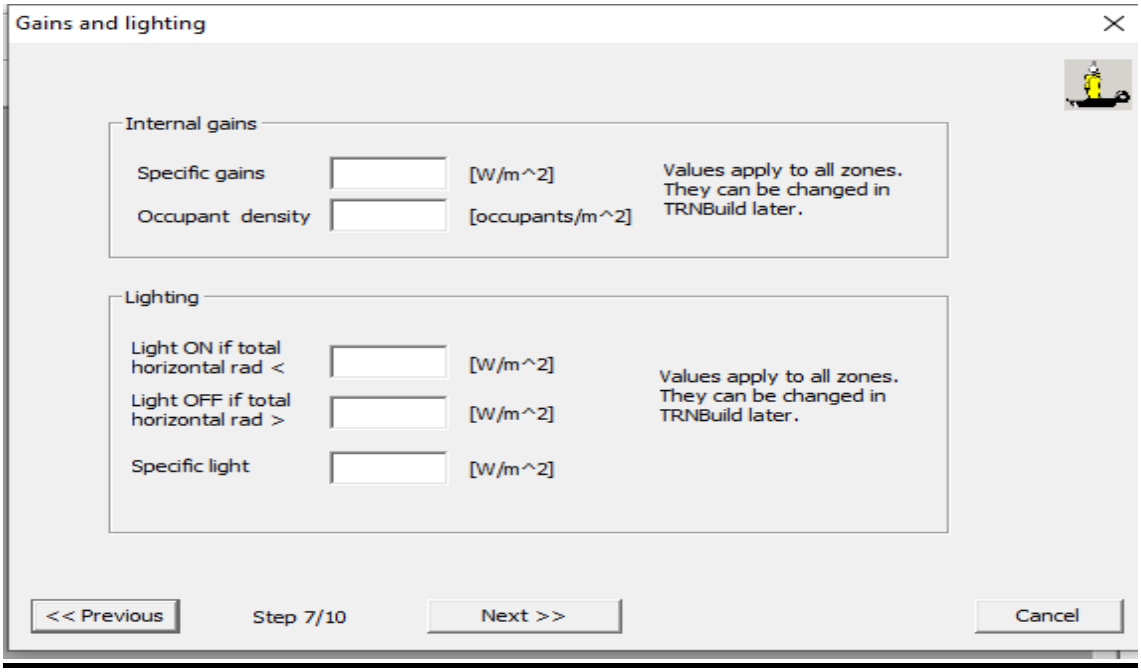


Figure III.10 : Étape 7 : Les gains internes**.**

Nous pouvons maintenant générer un projet TRNSYS. Le processeur de bâtiments créera un projet TRNSYS et un fichier de description du bâtiment (.bui). Il appelle TRNBuild pour créer les fichiers associés au bâtiment, puis ouvre le projet créé dans le studio**.**

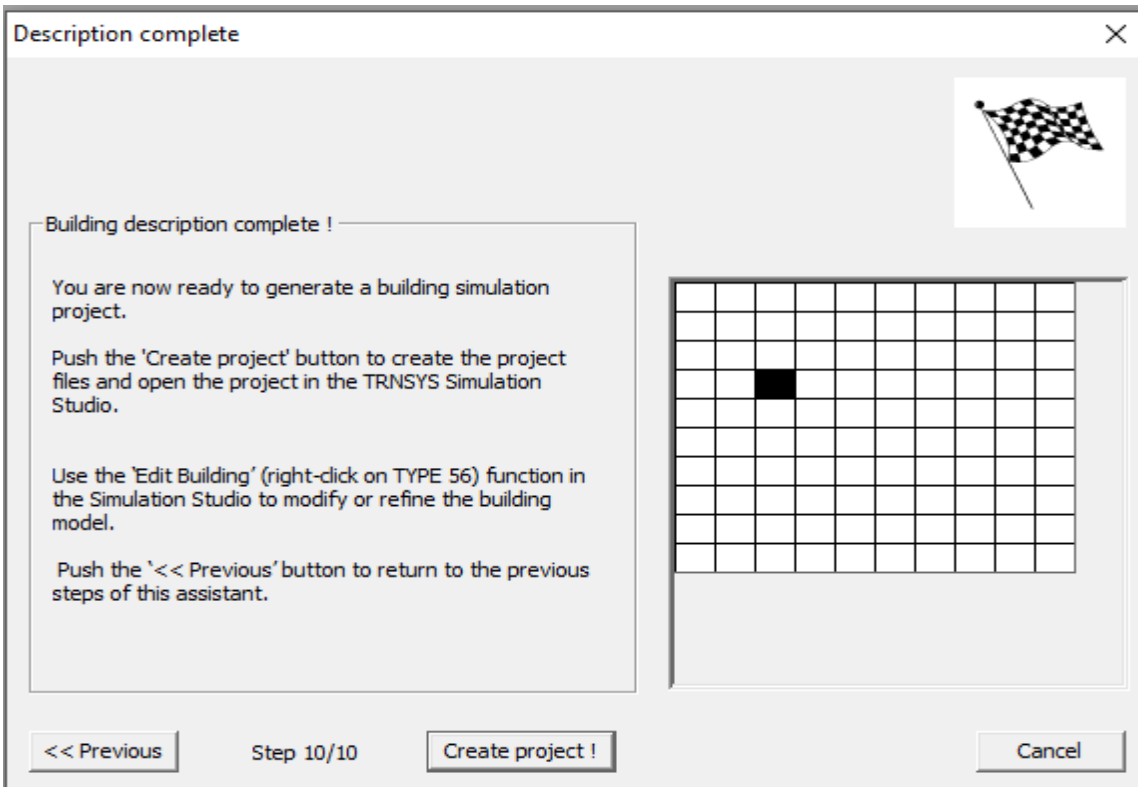


Figure III.11 : La dernière étape est la génération du projet TRNSYS.

Le projet TRNSYS créé par le processeur de bâtiments contient tous les composants nécessaires et les connexions ont été créées automatiquement.

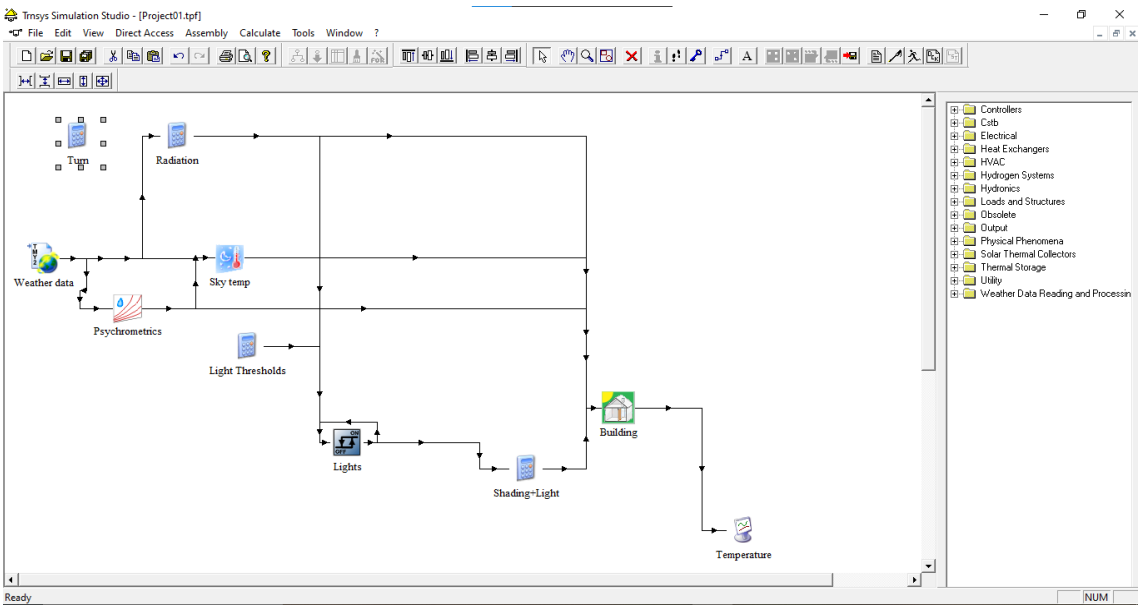


Figure III.12 : Le projet final TRNSYS créé par l'assistant de bâtiment**.**

Dans la fenêtre de démarrage du projet, nous saisissons quelques informations générales sur le projet, nous définissons les orientations des murs requises par le bâtiment décrit, ainsi que certaines caractéristiques de base des matériaux, nous affichons la liste des entrées requises de type 56, et nous choisissons les sorties souhaitées de type 56.

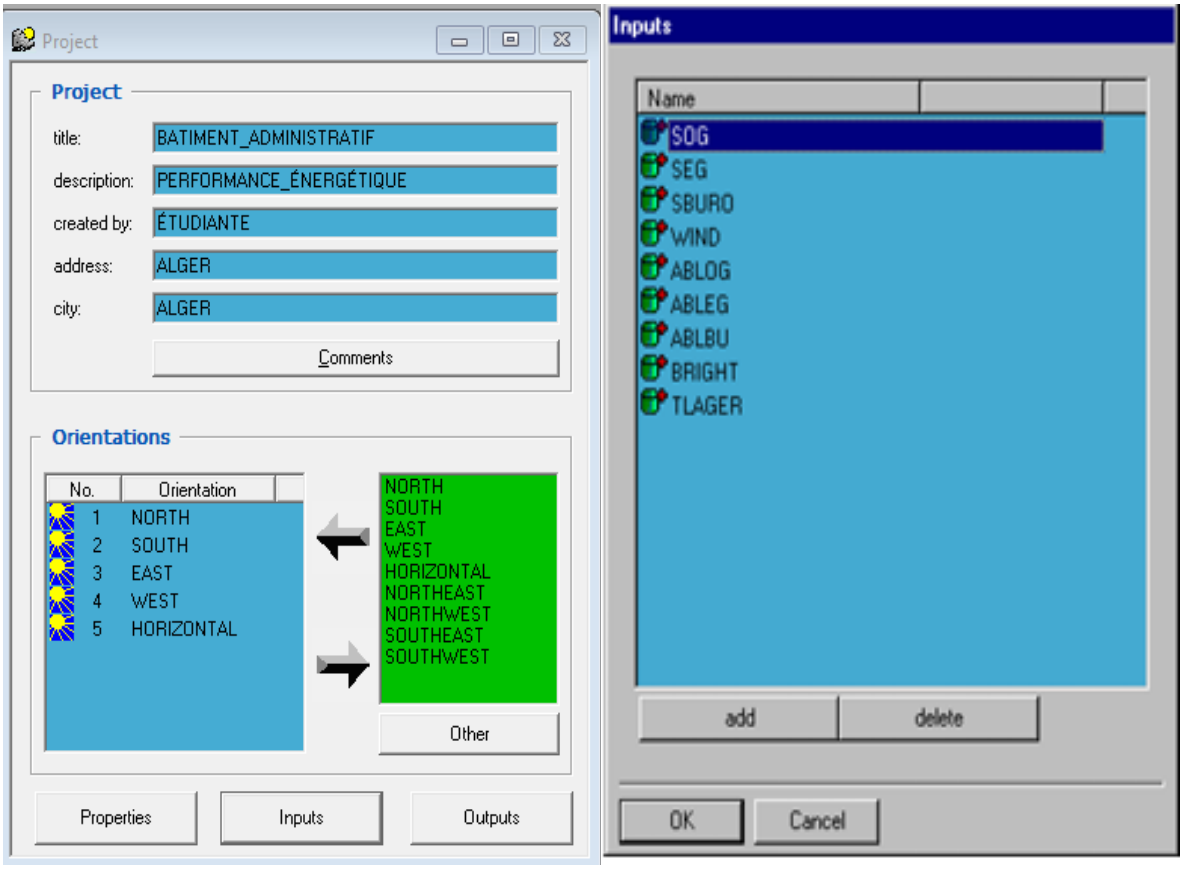


Figure III.13 : La fenêtre d'INITIALISATION DU PROJET et la fenêtre des ENTRÉES.

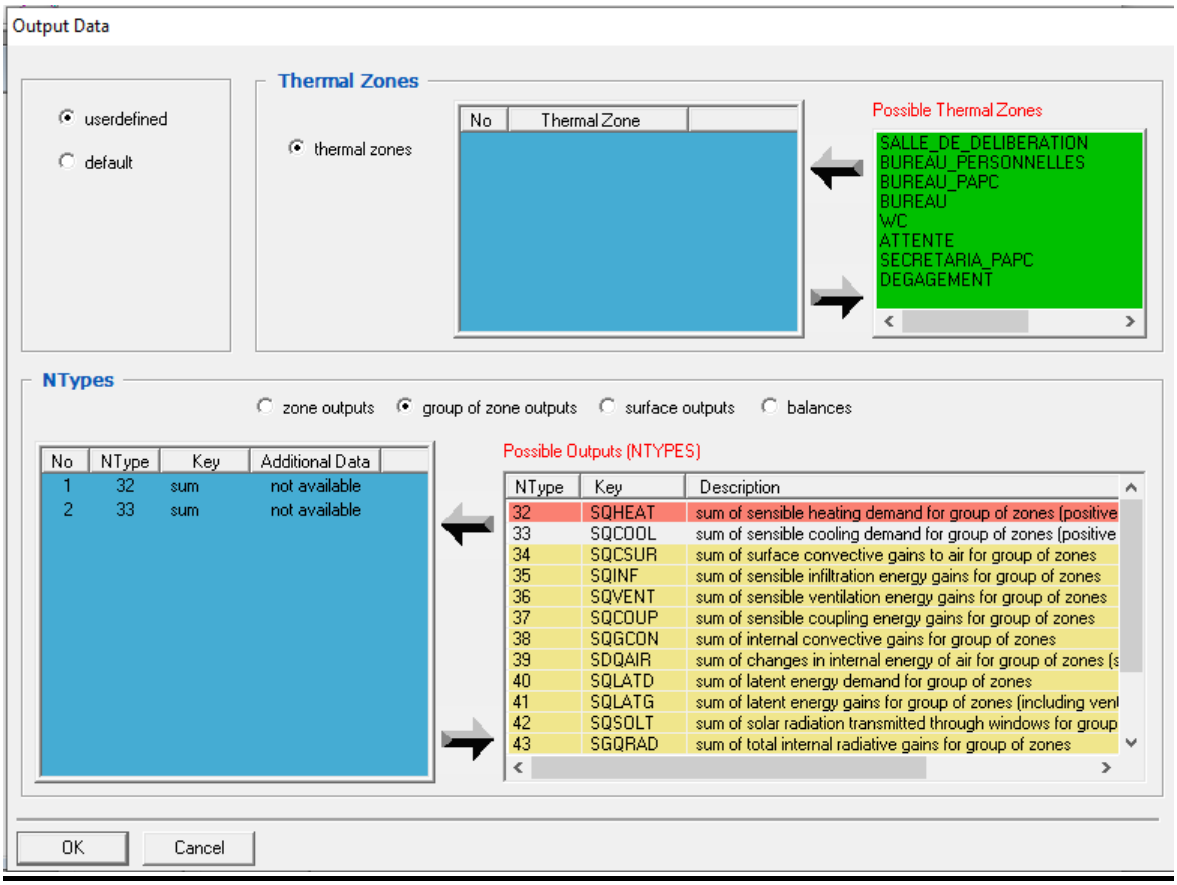


Figure III.14 : La fenêtre de SORTIE.

La fenêtre ZONE contient toutes les informations décrivant une zone thermique du bâtiment comme indiqué dans la figure (III.15). Pour ajouter une nouvelle zone, nous cliquons sur (Add zone) sous la liste des zones. Une zone active peut être supprimée en cliquant sur (Delete Active zone) sous la liste des zones. De plus, nous pouvons utiliser le gestionnaire de zone en cliquant avec le bouton droit de la souris. Pour ouvrir une zone existante, nous cliquons sur le nom de la zone dans le gestionnaire de zones.

Les données décrivant une zone peuvent être divisées en quatre parties principales :

a) les données de régime requises,

b) les murs de la zone

c) les fenêtres de la zone et données sur l'équipement optionnel et spécifications de fonctionnement, y compris l'infiltration, ventilation, refroidissement, chauffage, gain et confort.

Pour notre projet, nous utilisons des murs sans isolation et des fenêtres à simple vitrage. Ensuite, nous remplaçons les fenêtres par des fenêtres à double vitrage ainsi que des murs avec isolation intérieure ou extérieure dans les étapes suivantes.

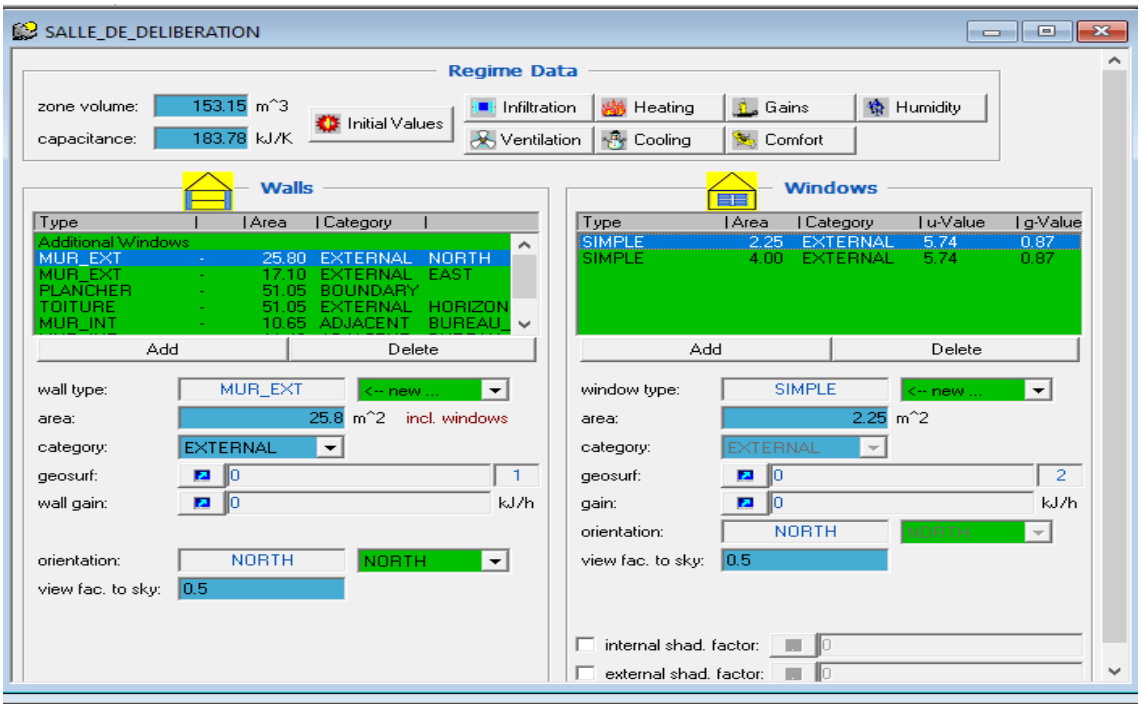


Figure III.15 : 1 : La fenêtre de ZONE.

Après avoir cliqué sur le bouton de l'infiltration dans la fenêtre de la zone, une boîte de dialogue s'ouvre comme indiqué dans la figure (III.16). Nous activons l'infiltration et définissons le type pour la zone en sélectionnant un type prédéfini ou un nouveau type dans le menu déroulant.

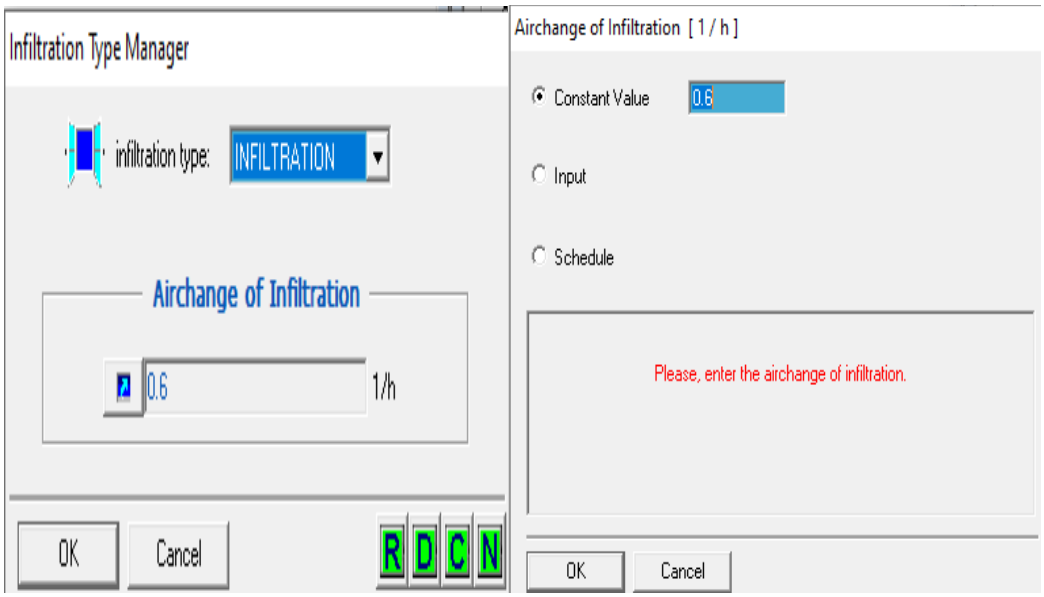


Figure III.16 : La fenêtre de l'infiltration.

Après avoir cliqué sur le bouton de ventilation dans la fenêtre de la zone, une boîte de dialogue s'ouvre comme indiqué dans l'illustration. Nous ajoutons des types de ventilation en sélectionnant un type prédéfini ou un nouveau type dans le menu déroulant.

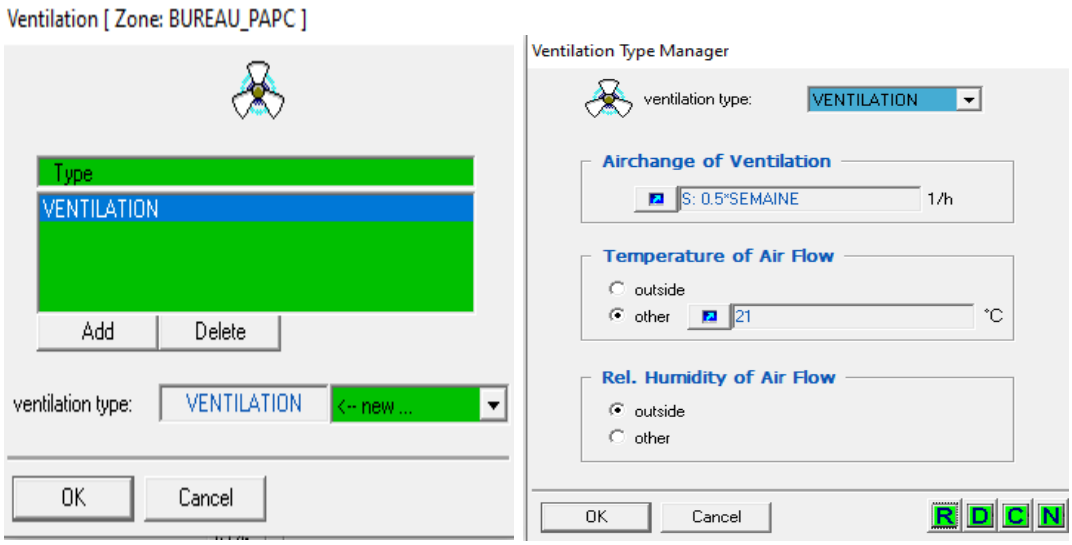


Figure III.17 : la fenêtre de ventilation.

Après avoir cliqué sur le bouton de chauffage dans la fenêtre de la zone, une boîte de dialogue s'ouvre comme indiqué dans la figure (III.18). Nous activons le contrôle de chauffage et définissons le type de chauffage pour la zone en choisissant un type prédéfini ou un nouveau type dans la liste déroulante.

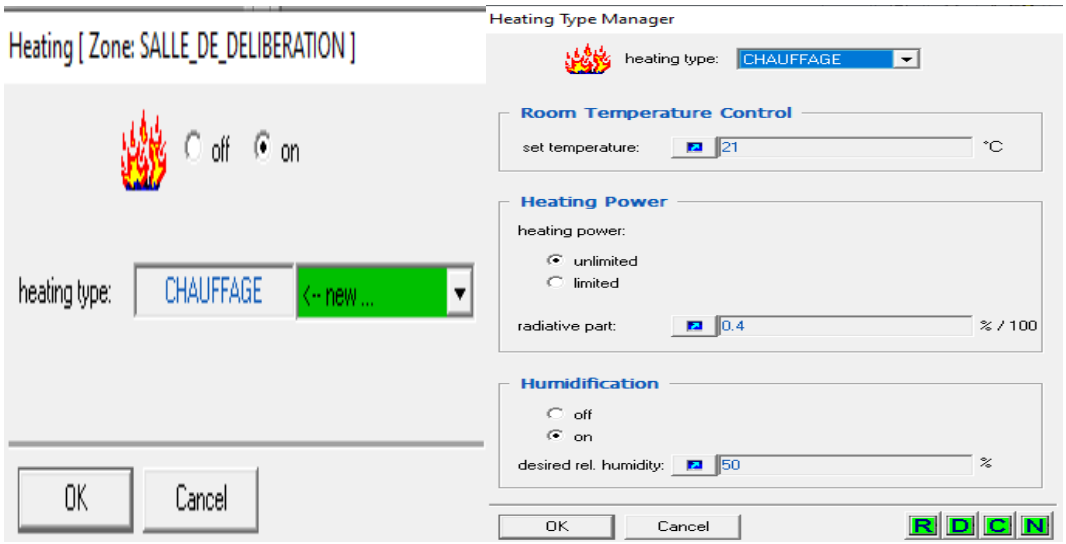


Figure III.18 : la fenêtre de chauffage.

Pour définir un contrôle de climatisation optimal, nous appuyons sur le bouton de climatisation. Nous pouvons activer le contrôle de climatisation et définir le type pour la zone en choisissant un type prédéfini ou un nouveau type dans le menu déroulant.

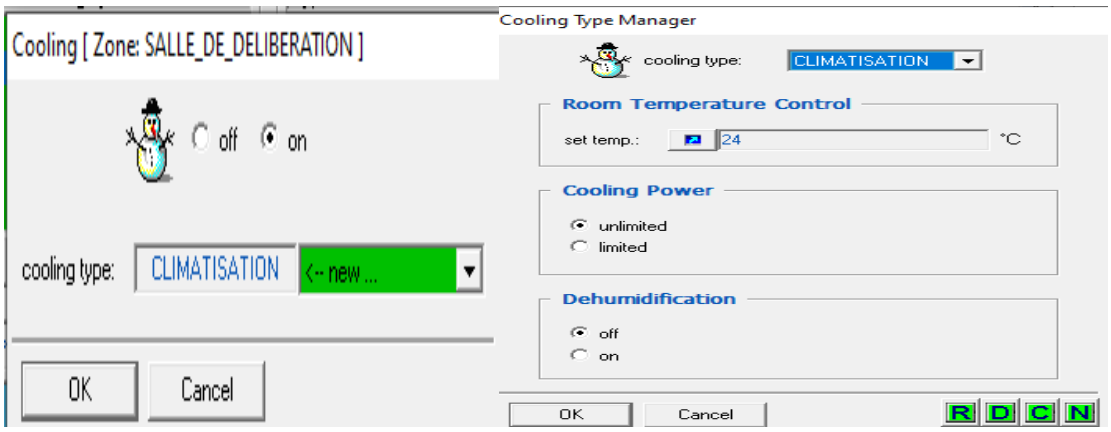


Figure III.19 : la fenêtre de climatisation.

III.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le programme utilisé dans la simulation énergétique, en expliquant les étapes de préparation d'un modèle thermique correspondant au bâtiment étudié. Les avantages et les inconvénients du programme TRNSYS, choisi pour sa flexibilité et sa capacité à représenter des systèmes thermiques complexes, ont également été abordés.



CHAPITRE IV

Résultants et discussions

IV.1. Introduction

Le processus de l'étape de modélisation du bâtiment administratif et s'assurer que toutes les données techniques et thermiques nécessaires ont été entrée dans le programme TRNSYS, nous avons effectué une simulation annuelle pour juger sa performance énergétique dans des conditions de climat spécifiques. Le présent chapitre est réservé pour la présentation et l'analyse des résultats obtenus de la simulation de la performance énergétique du bâtiment administratif à l'aide du programme TRNSYS en mettant l'accent particulier sur les besoins de chauffage et de refroidissement. Les différentes configurations ayant été adopté pour évaluer la performance du bâtiment, sont résumés en quatre configurations comme suit :

1 Il est à noter l'état de base sans isolation complète
2 L'état d'isolation extérieure.
3 L'état d'isolation intérieure.
4 L'état d'isolation intérieure avec l'utilisation de la technique de double-vitrage pour les fenêtres

Cette comparaison vise à déterminer l'impact de chaque type de technique d'isolation sur la réduction de la charge énergétique liée au chauffage et à la climatisation, d'améliorer l'efficacité énergétique à l'intérieur du bâtiment. Les différences entre les configurations seront également analysées.

IV.2. L'isolation thermique

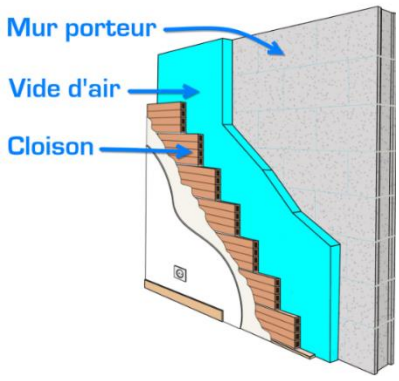
IV.2.1. Définition

L'isolation thermique est un procédé utilisé optimiser la déperdition de la chaleur entre le milieu intérieur et le milieu extérieur (où l'environnement). Elle joue un rôle déterminant dans la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments en maintenant une température agréable à l'intérieur, quelles que soient les conditions extérieures.

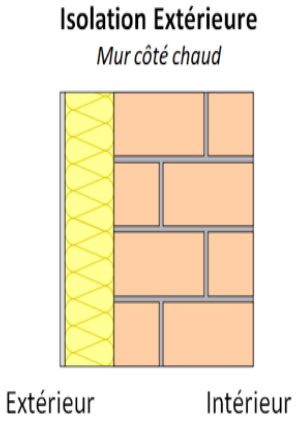
L'isolation thermique d'un système énergétique désigne l'ensemble des techniques utilisées pour limiter les déperditions de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été. Elle est essentielle, car elle contribue directement à la réduction de la consommation énergétique et à l'amélioration du confort thermique. En optimisant les besoins en chauffage et en climatisation, l'isolation diminue également les émissions de gaz à effet de serre. Elle joue ainsi un rôle important dans la lutte contre le changement climatique. [20]

IV.2.2 Les différents types de configuration d'isolation

*Par l'âme d'air



* par l'extérieur



* par l'intérieur

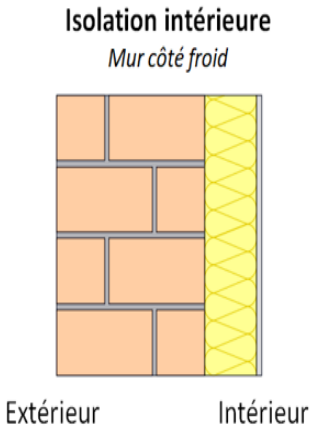


Figure IV.1 : les différents types de configurations d'isolations. [21]. [22]

➢ **Isolation par l'ame d'air**

Tableau IV.1 : Avantages et inconvénients de l'isolation par l'ame d'air.[**26**]

😊 Avantages	☹ Inconvénients
*Elle convient aux murs poreux tels que les pierres jointoyées à la chaux, la pierre tendre ou encore le torchis. *Elle convient aussi aux murs exposés régulièrement aux intempéries, dans les régions dont la zone climatique est caractérisée par les pluies battantes, les embruns marins et les vents de pluie en général. *L'isolation intérieure ou extérieure des murs, mais aussi l'isolation du sol et l'isolation des combles peuvent bénéficier d'une lame d'air isolante. *Une lame d'air isolante prévient l'humidité et contribue à la fois à l'isolation phonique et à l'isolation thermique des murs ou de la toiture de votre habitation ; *Une bonne isolation thermique vous fait faire des économies d'énergie en consommant moins pour votre chauffage *En faisant appel à un professionnel RGE (reconnu garant de l'environnement) pour vos travaux d'isolation des murs, vous vous ouvrez le droit à des aides à la rénovation énergétique ; *Cette méthode présente l'avantage pour votre professionnel d'être facile et rapide à mettre en place ; *Elle est aussi moins onéreuse que d'autres techniques d'isolation des murs	*Oublier ou délaisser une paroi risque de générer des ponts thermiques et des ponts acoustiques ; *Si l'opération est généralement facile pour votre professionnel, certaines configurations peuvent induire de la difficulté, et certaines parois murales ne sont pas du tout adaptées. *Dans certains cas d'isolation par l'extérieur, la présence d'une lame d'air d'isolation vient entraver et diminuer les performances thermiques. *Tous les matériaux isolants ne conviennent pas, d'autant plus lorsque l'exposition à l'humidité et aux intempéries est élevée.

➢ **Isolation par l'extérieur**

Tableau IV.2 : Avantages et inconvénients de l'isolation extérieur**.[23]**

☺ Avantages	☹ Inconvénients
*Continuité de l'isolant, impliquant la présence de moins de nœuds constructifs *Contrôle de la pose aisé *Utilisation de la masse thermique des murs (inertie) pour la régulation du climat intérieur *Comportement hygrothermique favorable *Faible risque de condensation *Revêtement de façade homogène *Protection du mur contre le gel/les fissurations *Possibilité d'un phasage des travaux (travail façade par façade) *Pas de perte de surface/volume habitable -Finitions intérieures conservées *Pas d'obligation de quitter le bâtiment pendant les travaux *Pas de nécessité de déplacer les radiateurs, prises, etc. présents sur les parois intérieures *Améliore l'aspect en cas de revêtement abimé	*Problème d'alignement de façade au droit des gouttières, mitoyens, etc. (demande de permis d'urbanisme) * *Adaptation/déplacement des éléments en façade (gouttière, débords de toiture, seuils, battées, etc.) * *Remplacement des seuils, retours de baies à isoler* *Ébrasements des fenêtres plus importants *Isolation dans le sol : attention aux impétrants *Conflit possible avec les aménagements extérieurs *En logements collectifs, dans la plupart des cas, la rénovation de l'immeuble est effectuée pour l'ensemble de la copropriété*

➢ **Isolation par l'intérieur**

Tableau IV.3 : Avantages et inconvénients de l'isolation intérieur.[24]

😊 Avantages	☹ Inconvénients
*économies d'énergie, *meilleur confort thermique et acoustique, *suppression de la condensation sur les parois froides, *rapidité et facilité de mise en œuvre, *contribue à la revalorisation du logement en cas de vente ou de location.	Les inconvénients de l'isolation thermique par l'intérieur sont surtout occasionnés durant le chantier. Il faut généralement vider les pièces et refaire entièrement la décoration. Le plan électrique doit également être modifié. La surface habitable peut se trouver réduite.

IV.3. Interprétation des résultats

IV.3.1. Analyse des besoins en chauffage

IV.3.1.1. Configuration Sans isolation

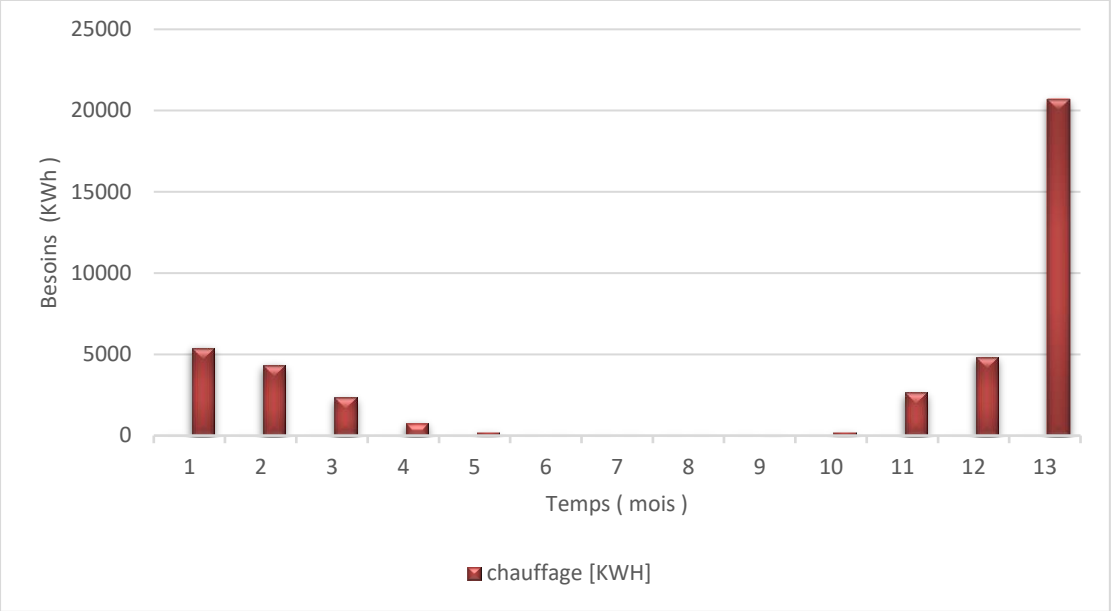


Figure IV.2 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment à configuration sans isolation**.**

La figure (IV.2) représente un graphique montrant les besoins de chauffage mensuels du bâtiment dans son état original, c'est-à-dire sans aucun type d'isolation thermique.

L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne numéro 13 montre la consommation annuelle totale d'énergie pour le chauffage, en kWh.

À travers la courbe, nous remarquons que les valeurs les plus élevées de chauffage sont enregistrées pendant les mois froids, en particulier janvier, février et décembre, où les valeurs dépassent 5000 kWh. Alors que le besoin de chauffage diminue considérablement pendant le reste de l'année, en particulier de mai à octobre.

La consommation annuelle totale est estimée à environ 21 000 kWh, une valeur élevée qui montre que l'absence d'isolation fait perdre facilement de la chaleur au bâtiment, entraînant une consommation énergétique importante pour garantir le confort thermique pendant l'hiver.

IV.3.1.2. Configuration avec Isolation extérieur

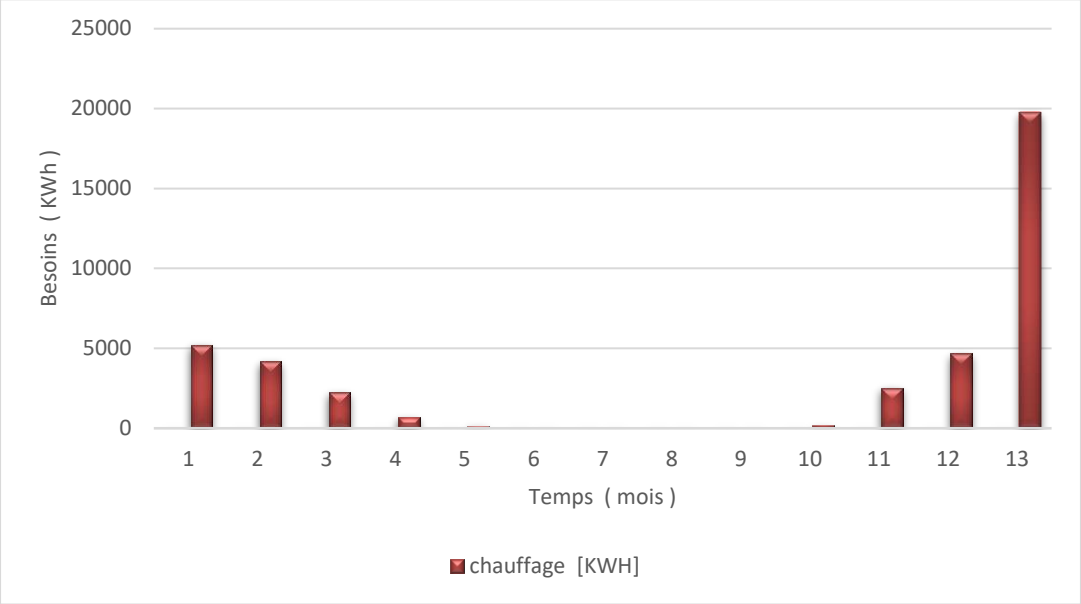


Figure IV.3 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment à configuration avec une isolation extérieur**.**

La figure (IV.3) représente un graphique illustrant les besoins de chauffage mensuels du bâtiment après l'application de l'isolation extérieure. L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne numéro 13 montre la consommation annuelle totale d'énergie pour le chauffage, en kilowattheures (kWh).

Nous remarquons à travers la courbe que la consommation reste concentrée pendant les mois d'hiver, en particulier janvier, février et décembre, mais elle est devenue moins importante par rapport à l'état initial sans isolation. En janvier, la consommation a atteint environ 5000 kWh, et en février environ 4000 kWh. Quant à la consommation annuelle totale, elle a été estimée à environ 19800 kWh.

Ces résultats montrent que l'isolation extérieure a contribué à réduire les pertes thermiques à travers les murs, ce qui a partiellement diminué la consommation d'énergie pour le chauffage, sans faire une grande différence, ce qui indique que la performance de l'isolation extérieure reste limitée si elle n'est pas accompagnée d'autres améliorations telles que les fenêtres ou le traitement des ponts thermiques.

IV.3.1.3. Configuration avec une isolation intérieur

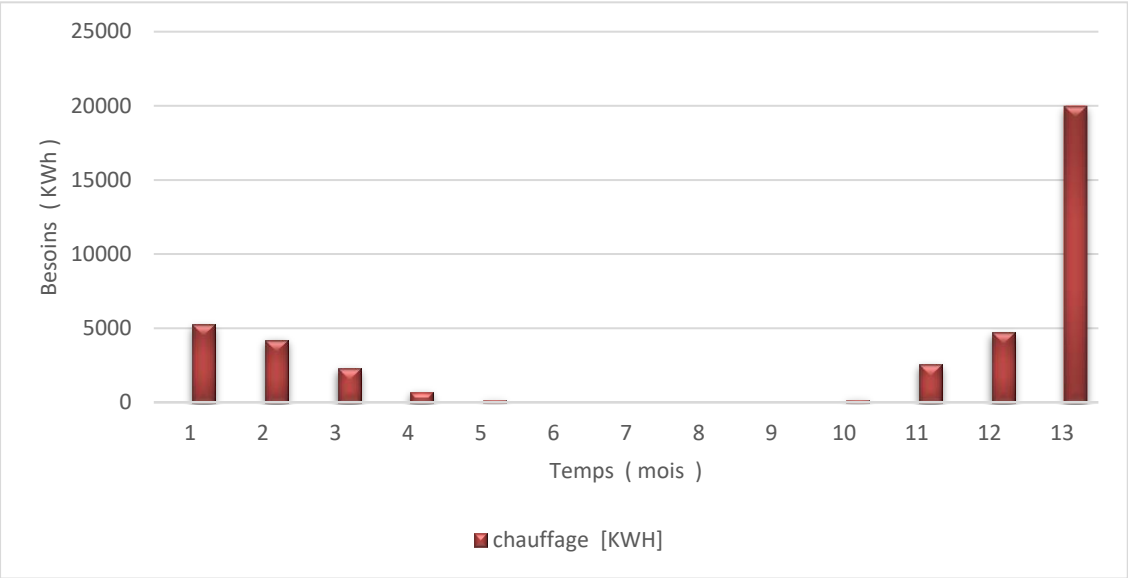


Figure IV.4 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment avec la configuration d'isolation intérieur**.**

La figure (IV.4) représente un graphique montrant les besoins de chauffage mensuels du bâtiment après l'application de l'isolation intérieure. L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne 13 montre la consommation annuelle totale d'énergie pour le chauffage, en kilowattheures (kWh).

À travers la courbe, nous remarquons que la consommation de chauffage reste élevée pendant les mois d'hiver, en particulier janvier, février et décembre, avec des valeurs proches de 5000 kWh en janvier et 4000 kWh en février. Quant à la consommation annuelle totale, elle a atteint environ 20000 kWh.

Ces résultats montrent que l'isolation intérieure contribue, tout comme l'isolation extérieure, à réduire les pertes thermiques à travers les murs, mais la différence de performance reste minime, ce qui indique que l'isolation seule ne suffit pas à améliorer de manière significative les performances hivernales sans interventions supplémentaires incluant les fenêtres ou l'amélioration du contrôle de l'humidité.

IV.3.1.4. Configuration à Double vitrage et isolation intérieur

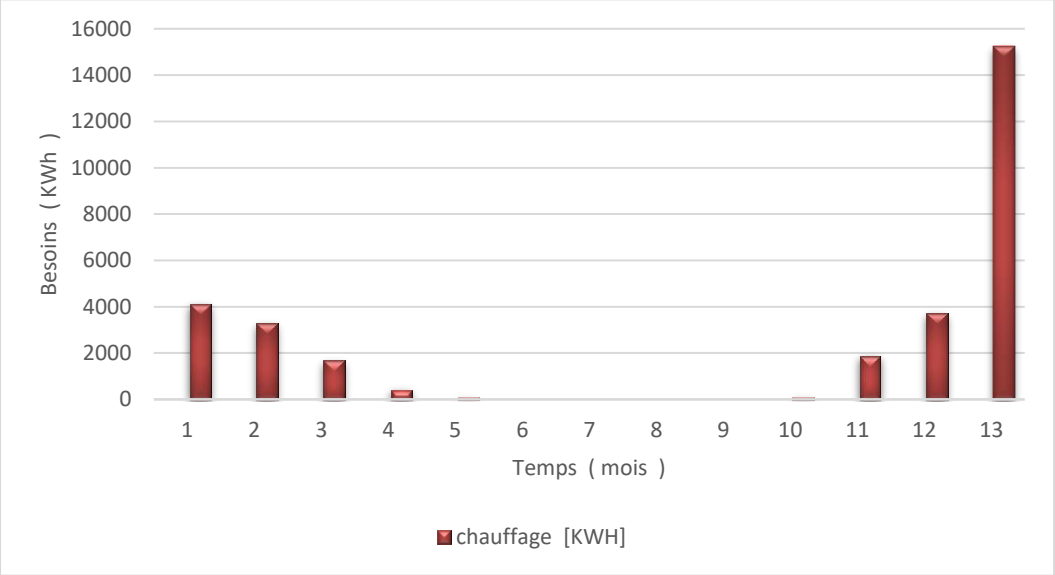


Figure IV.5 : L'évolution des besoins en chauffage dans le bâtiment avec Configuration à double vitrage et isolation intérieur**.**

La figure (IV.5) représente un graphique illustrant les besoins de chauffage mensuels du bâtiment après l'application d'une isolation thermique intérieure et le renforcement des fenêtres avec du double vitrage. L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne numéro 13 montre la consommation annuelle totale de chauffage en kilowattheures (kWh).

On observe à travers la courbe que la consommation pendant les mois d'hiver, en particulier janvier et février, a diminué par rapport aux cas précédents, atteignant environ 4000 kWh en janvier et 3200 kWh en février. Quant à la consommation annuelle totale, elle a atteint environ 15000 kWh, ce qui est bien inférieur à l'état initial.

Ces résultats montrent que la combinaison de l'isolation intérieure et de l'amélioration des fenêtres contribue efficacement à réduire la perte de chaleur, ce qui diminue la consommation d'énergie nécessaire au chauffage et améliore le confort thermique à l'intérieur du bâtiment, surtout en hiver.

IV.3.1.5. Comparaison des besoins en chauffage selon le type d'isolation

Tableau IV.4 : Comparaison des besoins en chauffage selon le type de configuration d'isolation

L'état	Les besoins annuels en chauffage (kWh)
Sans isolation	≈ 21 000
Avec isolation extérieur	≈ 19 800
Avec isolation intérieur	≈ 20 000
Isolation intérieure + double vitrage	≈ 15 000

Ce tableau (IV.4) montre que l'amélioration de l'isolation thermique, en particulier lorsqu'elle est combinée avec du double vitrage, entraîne une réduction significative de la consommation d'énergie dédiée au chauffage. Bien que la différence entre l'isolation intérieure et extérieure reste minime, la combinaison de l'isolation intérieure et du traitement des fenêtres offre les meilleures performances thermiques, réduisant ainsi les pertes thermiques et permettant une consommation d'énergie moindre.

IV.3.2 Analyse des besoins en climatisation

IV. 3.2.1 Configuration Sans isolation

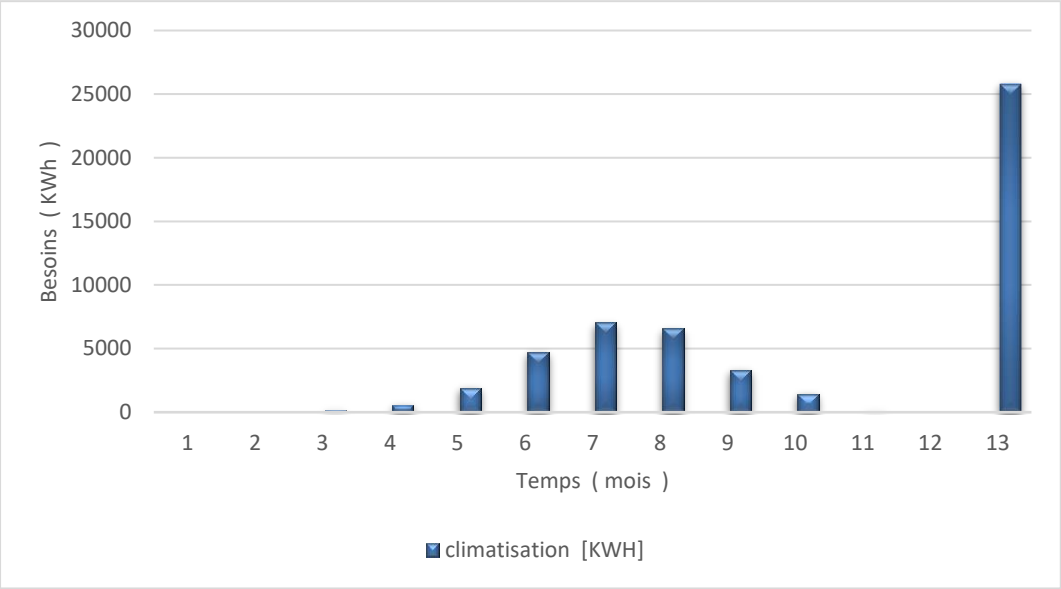


Figure IV.6 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment en l'absence d'isolation thermique.

La figure (IV.6) représente un graphique montrant les besoins de climatisation mensuels du bâtiment dans son état d'origine, c'est-à-dire sans aucun type d'isolation thermique. L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne numéro 13 représente la consommation annuelle totale d'énergie pour la climatisation, en kW

La courbe montre que la consommation augmente considérablement pendant les mois d'été, en particulier juin, juillet et août. En juin, la consommation a atteint environ 4500 kWh, puis a grimpé en juillet à 7500 kWh, et en août à 7000 kWh. Alors que les besoins restent faibles ou presque inexistants pendant le reste de l'année. Quant à la consommation annuelle totale, elle a atteint environ 25 700 kWh, ce qui est un niveau très élevé.

Ces résultats montrent que l'absence d'isolation rend le bâtiment susceptible d'absorber de grandes quantités de chaleur pendant les périodes chaudes, ce qui entraîne une forte dépendance au système de climatisation, et donc une augmentation de la consommation d'énergie.

IV. 3.2.2 Configuration avec une isolation extérieur

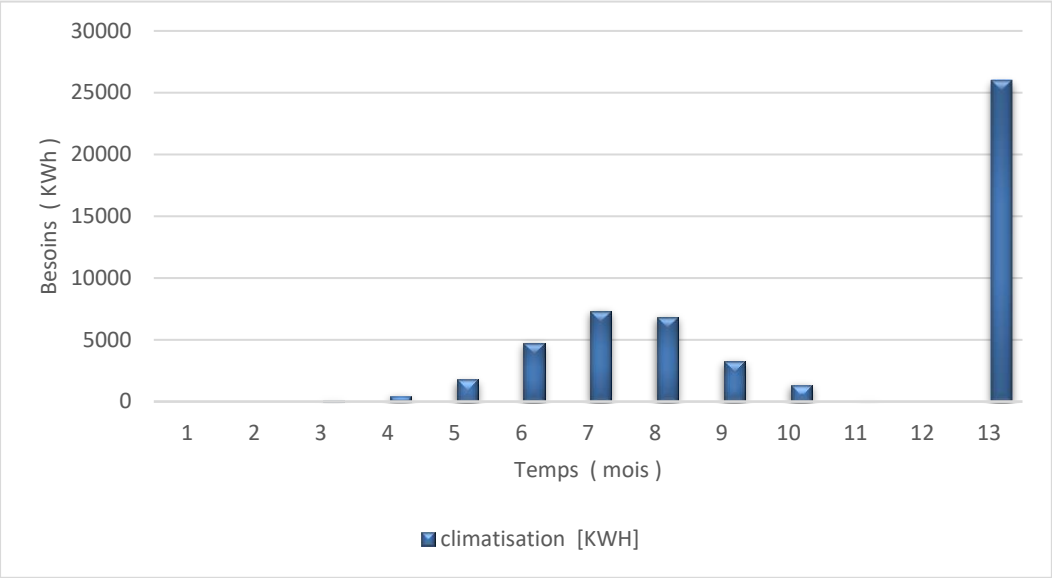


Figure IV.7 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment avec la configuration d'isolation extérieur.

La figure (IV.7) représente un graphique illustrant les besoins mensuels en climatisation du bâtiment après l'application de l'isolation extérieure. L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne numéro 13 représente la consommation annuelle totale de climatisation, en kWh.

La courbe montre que la consommation d'énergie reste élevée pendant les mois d'été, tout comme dans le cas initial. En juin, la consommation a atteint environ 4500 kWh, en juillet 7500 kWh, et en août 7000 kWh. Les besoins restent faibles ou inexistants pendant le reste de l'année.

La consommation annuelle totale est restée autour de 25 700 kWh, soit presque la même valeur enregistrée sans isolation.

Ces résultats indiquent que l'isolation extérieure n'a pas eu d'impact significatif sur la performance estivale, ce qui peut s'expliquer par le fait que la chaleur entrant dans le bâtiment provient principalement du rayonnement à travers les fenêtres ou d'une mauvaise ventilation, et non seulement des murs.

IV.3.2.3 Configuration avec isolation intérieur

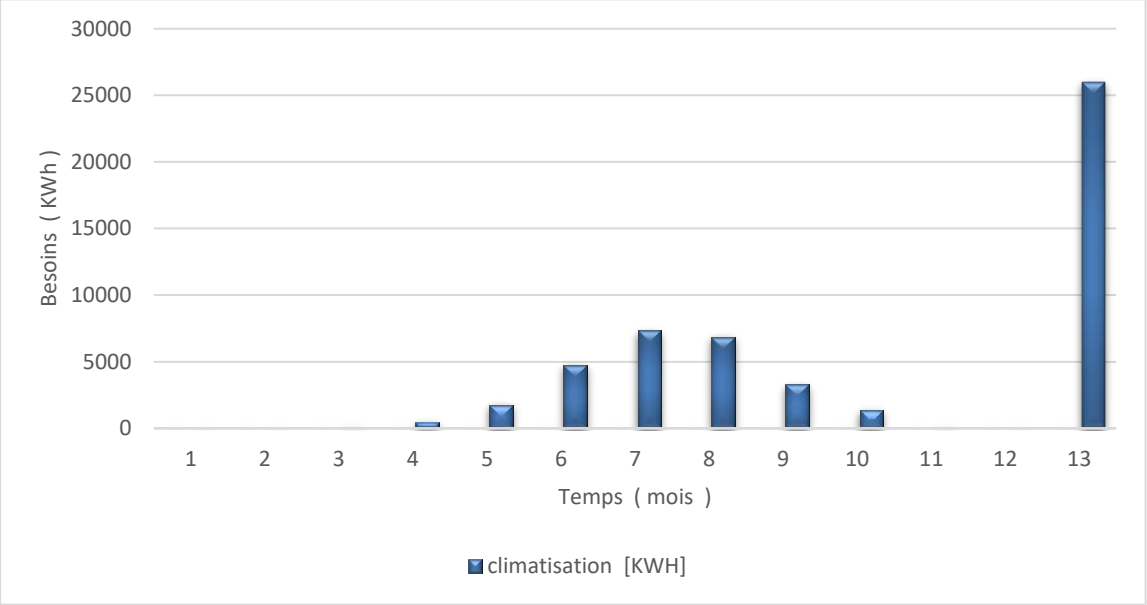


Figure IV. 8 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment avec la configuration à isolation intérieur

Le graphique (IV. 8) Un graphique montrant les besoins mensuels en climatisation du bâtiment après l'application de l'isolation intérieure. L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne numéro 13 montre la consommation annuelle totale d'énergie nécessaire pour le refroidissement, en kWh.

La courbe montre que la consommation d'énergie pendant les mois d'été est restée élevée. En juin, il a atteint environ 4500 kWh, en juillet 7500 kWh, et en août 7000 kWh. Quant aux autres mois, les besoins restent faibles ou presque inexistants.

La consommation annuelle totale est restée autour de 25 700 kWh, soit à peu près la même valeur enregistrée dans les deux cas précédents.

Ces résultats indiquent que l'isolation intérieure n'a pas été suffisante pour améliorer les performances estivales, ce qui peut s'expliquer par le fait que la chaleur résultant du rayonnement solaire à travers les fenêtres, ou la mauvaise ventilation intérieure, restent les facteurs les plus influents sur le confort thermique en été.

IV.3.2.4. Configuration à double vitrage et isolation intérieure

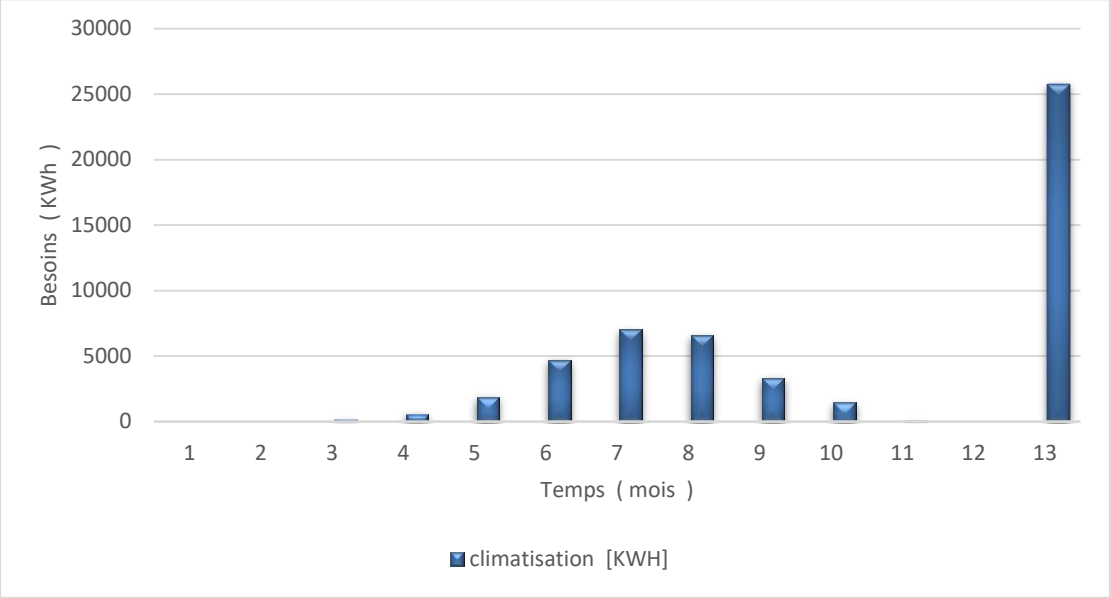


Figure IV.9 : L'évolution des besoins en climatisation dans le bâtiment avec Configuration à double vitrage et isolation intérieure**.**

La figure (IV.9) représente un graphique illustrant les besoins mensuels en climatisation du bâtiment après l'application d'une isolation intérieure et l'amélioration des fenêtres avec du double vitrage. L'axe horizontal représente les mois de l'année de 1 à 12, tandis que la colonne numéro 13 montre la consommation annuelle totale de climatisation, en kilowattheures (kWh).

La courbe montre que la consommation est restée au même rythme pendant les mois d'été, atteignant environ 4500 kWh en juin, 7500 kWh en juillet et 7000 kWh en août. Quant aux autres mois de l'année, les valeurs restent faibles ou nulles.
La consommation annuelle totale a atteint environ 25 700 kWh, soit la même valeur enregistrée dans les autres cas.

Ce résultat met en évidence que l'isolation intérieure et le double vitrage n'étaient pas suffisants pour réduire la chaleur acquise pendant l'été, ce qui confirme que le confort thermique estival ne dépend pas seulement de l'isolation, mais nécessite également d'autres interventions telles que la ventilation, l'ombrage et le contrôle du rayonnement solaire.

IV.3.2.5. Comparaison des besoins en climatisation selon le type de configurations d'isolation.

Tableau IV. 5 : Comparaison des besoins en climatisation selon le type de configurations d'isolation.

L'état	Les besoins annuels en climatisation (kWh)
Sans isolation	≈ 25 700
Avec isolation extérieur	≈ 25 700
Avec isolation intérieur	≈ 25 700
Isolation intérieure + double vitrage	≈ 25 700

Ce tableau (IV. 5) montre que la consommation d'énergie pour le refroidissement est restée constante dans tous les cas, malgré l'application de différentes solutions d'isolation. Cette répétition des résultats indique que l'isolation seule, qu'elle soit intérieure ou extérieure, et même avec l'amélioration des fenêtres, n'a pas eu d'impact réel sur la performance estivale du bâtiment.

Cela souligne l'importance d'inclure des solutions complémentaires telles que :

- ✓ Amélioration de la ventilation naturelle.
- ✓ Adoption de stores extérieurs pour les fenêtres.
- ✓ L'utilisation de matériaux moins absorbants pour la chaleur.

IV.3.2.6. Comparaison finale : Chauffage et Climatisation

Tableau IV. 6: Comparaison finale: Chauffage et Climatisation

L'état	Chauffage (kWh)	Climatisation (kWh)
Sans isolation	≈ 21 000	≈ 25 700
Avec isolation extérieur	≈ 19 800	≈ 25 700
Avec isolation intérieur	≈ 20 000	≈ 25 700
Isolation intérieure + double vitrage	≈ 15 000	≈ 25 700

À travers ce tableau (IV. 6), il est clair que l'amélioration de l'isolation thermique du bâtiment a aidé à réduire les besoins en chauffage de manière significative, en particulier lorsqu'elle est combinée avec l'isolation intérieure et le double vitrage, où la consommation annuelle la plus faible a été enregistrée.

En revanche, aucune amélioration des besoins en refroidissement n'a été enregistrée, les valeurs restant élevées et identiques dans tous les cas, ce qui confirme que l'isolation seule ne suffit pas à garantir un confort thermique en été, mais doit être renforcée par des solutions complémentaires.

IV.6. Conclusion

Pendant ce chapitre, les résultats de la simulation concernant les besoins en chauffage et en refroidissement ont été présentés et analysés dans quatre cas différents, allant de l'état initial sans isolation à l'état d'isolation intérieure accompagnée de double vitrage.

Les résultats ont montré que l'amélioration de l'isolation thermique des murs contribue à réduire les besoins en chauffage, avec un impact plus marqué lorsque l'isolation est combinée à l'amélioration des ouvertures, notamment par l'utilisation de vitrages performants.

En revanche, aucune réduction notable de la consommation n'a été constatée en période estivale. Les besoins en refroidissement sont restés élevés et quasiment identiques dans toutes les configurations étudiées, ce qui met en évidence les limites de l'isolation seule face aux apports de chaleur en été. Cela souligne l'importance de solutions complémentaires telles que la ventilation naturelle, la protection solaire et une conception bioclimatique adaptée.

De manière générale, cette simulation confirme que la performance énergétique d'un bâtiment dépend fortement de la qualité de son enveloppe thermique, mais que son comportement varie considérablement selon les saisons et les conditions climatiques spécifiques.



CHAPITRE V

Suggestions d'amélioration

V.1. Introduction

La performance énergétique d'un bâtiment est la quantité d'énergie qu'il consomme pour un niveau de confort donné et dans des conditions d'exploitations données. Elle est communément exprimée par unité d'énergie consommée par mètre carré exploitable. Cette consommation est liée : à la qualité de son enveloppe, à la performance de ses équipements énergétiques et de leur qualité d'exploitation ainsi qu'aux conditions d'occupations (jours et horaires d'occupation). L'amélioration de la performance énergétique consiste à réduire la consommation d'énergie annuelle d'un bâtiment (ou d'un logement) en chassant les consommations superflues et celles provoquées par des anomalies de conception, réalisation et d'utilisation. Tout ceci, dans le respect des critères de confort attendu par les occupants.

Cependant, l'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment va au-delà de la simple amélioration de ses caractéristiques physiques. Elle intègre également des solutions technologiques de pointe s'appuyant sur des sources d'énergie renouvelables et des systèmes intelligents capables d'adapter et de contrôler efficacement la consommation énergétique.

Dans ce contexte, ce chapitre se focalise sur à la présentation d'un ensemble de suggestions techniques susceptibles d'accroître l'efficacité énergétique du bâtiment étudié, en mettant le point sur les domaines suivants : le renforcement de l'isolation thermique, l'amélioration des performances des ouvertures vitrées, la mise en œuvre de systèmes de chauffage et de refroidissement efficaces, l'intégration de sources d'énergie renouvelables et l'utilisation de technologies intelligentes dans la gestion de l'énergie. Ces suggestions sont basées sur les conclusions des chapitres précédents et les meilleurs résultats pratiques utilisés dans la conception de bâtiments durables.

V.2. Résumé des principales conclusions.

Une simulation a été menée par le programme TRNSYS sur un bâtiment administratif, a démontré que les caractéristiques physiques et thermiques de l'enveloppe extérieure du bâtiment, ainsi que le calibre du verre utilisé et l'efficacité des systèmes de chauffage et de refroidissement jouent un rôle essentiel dans la détermination de la consommation d'énergie, quatre types de configurations ont été examinés :

Configuration 1 : Sans isolation thermique

Cet exemple a démontré les niveaux de consommation d'énergie les plus élevés, à la fois pour des niveaux de consommation d'énergie en hiver tant que pour le chauffage que pour le refroidissement en raison de la faible résistance au transfert de chaleur à travers les murs, les plafonds et les fenêtres.

Configuration 2 : Isolation extérieure

En raison de l'enveloppe isolante continue et de ses échanges thermiques réduits avec l'extérieur, l'utilisation d'une isolation extérieure a amélioré les performances thermiques du bâtiment, ce qui a entraîné une diminution significative des besoins de chauffage et une amélioration modérée des besoins de refroidissement.

Configuration 3 : Isolation intérieure

Les besoins énergétiques sont améliorés par rapport à la première configuration, mais moins efficace que l'isolation extérieure. Ceci est dû aux perturbations de l'enveloppe isolante intérieure ainsi qu'à la possibilité d'apparition de zones thermiques faibles (points thermiques).

Configuration 4 : Isolation intérieure et double vitrage.

Cette configuration était la meilleure en termes d'efficacité énergétique, car elle il combinait une meilleure isolation des fenêtres avec une diminution des déperditions thermiques à travers les murs ce qui réduisait considérablement la quantité d'énergie utilisée pour le chauffage et la climatisation.

Ces résultats montrent clairement qu'une meilleure isolation est basée sur le choix des fenêtres adaptées qui améliorent directement l'efficacité énergétique du bâtiment. Malgré leur efficacité, ces améliorations resteraient incomplètes sans l'intégration de sources d'énergie renouvelables et de technologies de contrôle intelligente, qui seront abordées ultérieurement

V.3. Propositions techniques pour l'amélioration

V.3.1 Amélioration de l'isolation thermique

L'isolation thermique d'un bâtiment fait référence au processus de maintien d'une température constante (agréable) à l'intérieur d'un bâtiment en utilisant divers matériaux, et les matériaux utilisés pour l'isolation thermique sont connus sous le nom d'isolants thermiques. Le processus de prévention du mouvement de chaleur à l'intérieur d'une structure est connu sous le nom d'isolation thermique. Une isolation thermique efficace peut permettre d'économiser de l'argent sur les coûts des services publics et améliorer la qualité de vie en minimisant le besoin de chauffage et de climatisation. La consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation des bâtiments peut être minimisée, ce qui est bénéfique pour l'environnement. L'objectif de l'isolation thermique est de réduire le mouvement de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur d'un bâtiment.

Les résultats de la simulation ont montré que l'isolation externe produisait de meilleurs résultats que l'isolation interne, car elle était continue et couvrait toute l'enveloppe extérieure, ce qui atténuait l'impact des ponts thermiques. Cependant, lorsque les conditions du site ou la réglementation interdisent le recours à l'isolation externe, l'isolation interne peut constituer une solution appropriée.

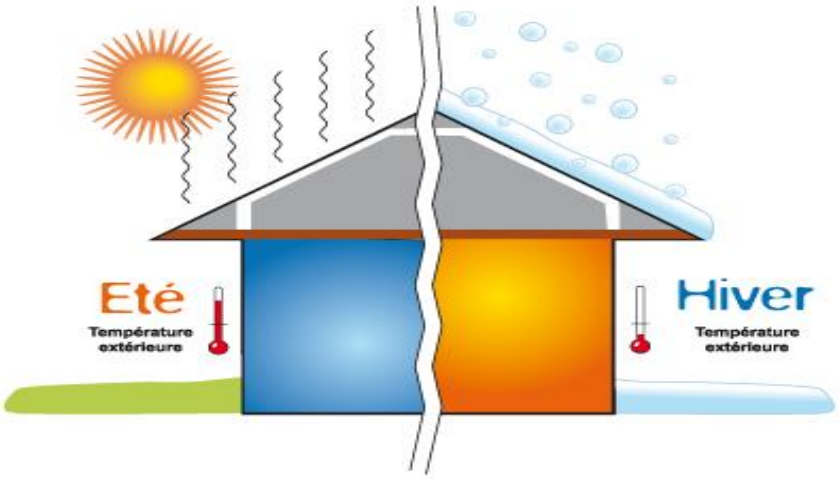


Figure V.1 : Rôle de l'isolation thermique dans la réduction du transfert de chaleur pendant les saisons d'été et d'hiver.[25]

V.3.1.1. Propositions techniques :

- Utilisation des matériaux isolants à faible conductivité thermique où :

La **conductivité thermique, notée (λ)**, est une mesure de la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Plus cette valeur est faible, le matériau est considéré comme isolant**.** Voici quelques matériaux avec de bonnes performances en conductivité thermique λ à une température T = 10 °c[26]

- Laine de verre : $\lambda \approx 0{,}032$ W/ (m.K)
- Laine de roche : $\lambda \approx 0{,}035$ W/ (m.K)
- Polystyrène expansé : $\lambda \approx 0{,}030$ W/ (m.K)
- Polyuréthane : $\lambda \approx 0{,}022$ à $0{,}025$ W/ (m.K)



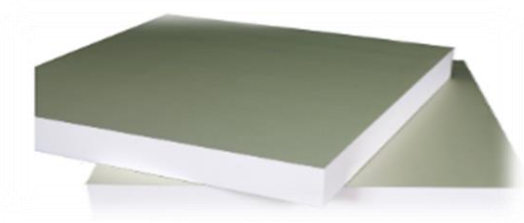
(a) Isolant en laine de verre.



(b) Isolant en laine de roche.



(c) Isolant en polystyrène expansé.



(d) Isolant en polyuréthane.

Figure V.2 : Les différentes formes d'un isolant.[27].[28]. [32] .[33]

.

Tableau V.1 : Valeurs de conductivité thermique λ de différents matériaux d'isolation à 10°C.[30]

Matériaux d'isolation	Lambda (λ) sec à 10°C en W/m. K
Fibre de bois	λ = 0.036 à 0.047
Isolant sous vide	λ = 0.005 à 0.007
Laine de chanvre	λ = 0.039 à 0.044
Laine de lin	λ = 0.037 à 0.042
Laine de mouton	λ = 0.039 à 0.042
Laine de roche	λ = 0.034 à 0.047
Laine de verre	λ = 0.030 à 0.046
Ouate de cellulose	λ = 0.038 à 0.044
Polystyrène (PSE)	λ = 0.030 à 0.038
Polystyrène (XPS)	λ = 0.029 à 0.036
Polyuréthane	λ = 0.021 à 0.028
Produits minces réfléchissants	Dépend du nombre de couches et de leur nature
Textiles recyclés	λ = 0.037 à 0.039
Verre cellulaire	λ = 0.036 à 0.050

- L'épaisseur idéale de l'isolant dépend du climat, une épaisseur de 5 à 10 cm étant recommandée dans les zones climatiques plus froides, assurez-vous que l'isolant est

correctement installé afin d'éviter les émanations d'air ou la formation de ponts thermiques.

V.3.1.2. Les effets positifs :

- ✓ Réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage jusqu'à 30%.
- ✓ Amélioration du confort thermique dans les espaces.
- ✓ Prolongation de la durée de vie des composants structurels en les protégeant des variations de température et d'humidité.

V.3.2. Amélioration des fenêtres et des ouvertures en verre

Grâce à leur coefficient de transmission thermique élevé par rapport aux murs isolés, les fenêtres jouent un rôle important dans l'efficacité énergétique des bâtiments, car elles constituent des points sensibles aux gains et aux pertes de chaleur. Par conséquent, l'amélioration de la qualité du vitrage et la conception des ouvertures sont des moyens efficaces d'accroître l'efficacité énergétique.

Les résultats de la simulation ont démontré que l'utilisation de la technique du double vitrage plutôt que du simple vitrage minimise les pertes de chaleur en hiver et diminue la surchauffe estivale. De plus, les performances peuvent être encore améliorées en choisissant des verres à faible émissivité (Low-E) ou des verres réfléchissant le rayonnement solaire sur les surfaces exposées au soleil.

V.3.2.1 Propositions techniques :

- Remplacer le verre simple par du verre double ou triple vitrage.
- Utilisation de verre Low-E pour réduire la transmission de chaleur par rayonnement.
- Fournir aux fenêtres des joints latéraux pour empêcher les fuites d'air.

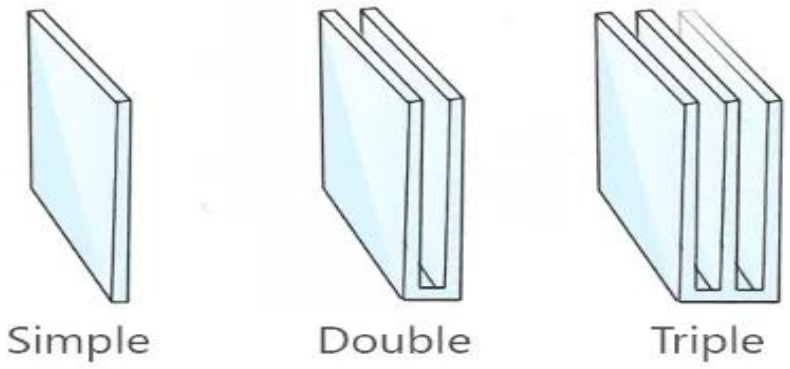


Figure V.3 : Les différents-types-de-vitrages.[31]

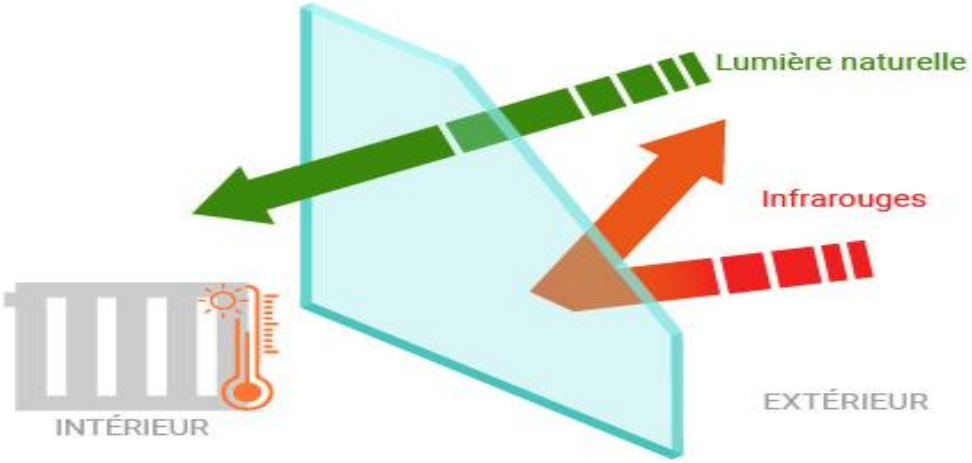


Figure V.4 : Technique de vitrage Low-E.**[32]**



Figure V.5 : Joints d'étanchéité des fenêtres latérales.[33]

V.3.2.2. Les effets positifs :

- ✓ Réduction jusqu'à 40 % de la transmission de chaleur par les fenêtres.
- ✓ Amélioration du confort visuel grâce à la réduction de l'éblouissement.
- ✓ Réduction du recours aux systèmes de chauffage et de climatisation pour réduire la consommation d'énergie**.**

V.3.3. Intégration des énergies renouvelables

Actuellement, le développement durable est devenu un besoin vital plutôt qu'un simple choix, l'intégration des énergies renouvelables dans la conception des bâtiments est une étape cruciale vers la construction de structures respectueuses de l'environnement. Selon un rapport de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), les énergies renouvelables représentent environ 43 % de la capacité de production énergétique mondiale. L'intégration des technologies solaires, éoliennes et géothermiques au tissu urbain renforce non seulement la relation à long terme entre l'homme et l'environnement, mais redéfinit également le rôle des bâtiments en transformant les structures matérielles traditionnelles en systèmes écologiques innovants et hautement performants, capables de produire de l'énergie et d'atteindre une autonomie partielle ou totale.

V.3.3.1 Propositions techniques :

- ✓ Installer des panneaux solaires pour produire de l'électricité par eux –mêmes.
- ✓ Utiliser la chaleur du soleil pour chauffer l'eau.
- ✓ Utiliser l'énergie géothermique pour le chauffage et la climatisation.



Figure V.6 : Panneaux photovoltaïques en toiture d'immeuble.[34]

V.3.3.2. Les effets positifs :

- ✓ Diminution des factures d'énergie.
- ✓ Amélioration du confort thermique.
- ✓ Réduction des émissions de carbone.
- ✓ L'indépendance pendant les périodes de pointe.

V.3.4. Intégration de technologies intelligentes et de contrôle automatisé

L'intégration des technologies intelligentes dans la conception et l'exploitation des bâtiments administratifs représentent un grand progrès technologique dans l'interaction entre le bâtiment, son environnement et ses occupants. Face au besoin croissant d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort des lieux de travail, ces nouvelles technologies gagnent en popularité pour améliorer les performances, réduire la consommation d'énergie et rendre les espaces plus agréables à utiliser.

Dans le cadre de cette étude, qui a évalué la performance énergétique d'un bâtiment administratif à l'aide du logiciel TRNSYS, l'intégration de systèmes intelligents tels que les thermostats programmables, les capteurs de mouvement, les systèmes d'éclairage intelligents et la surveillance à distance constituent l'une des recommandations les plus significatives pour diminuer la consommation énergétique du bâtiment en modes de chauffage et de refroidissement. Ces systèmes permettent également une interaction flexible avec les facteurs climatiques externes, ce qui améliore l'efficacité globale du système énergétique et réduit la charge thermique interne.

Ces solutions constituent un élément clé d'une vision future des bâtiments en tant que systèmes dynamiques pouvant évoluer pour répondre aux besoins des utilisateurs et aux données de l'environnement qui les entoure.[35]

V.3.4.1 Propositions techniques :

- Installation de thermostats intelligents, ou « thermostats intelligents », qui régulent automatiquement le chauffage et la climatisation en fonction de l'occupation des composants et des conditions météorologiques

- Utilisation de capteurs de mouvement et de lumière : Ils empêchent l'éclairage et la climatisation inutile dans les zones ouvertes.
- Systèmes de surveillance de la consommation : Ils permettent de surveiller et d'analyser en continu la performance énergétique du bâtiment.

- Contrôle automatisé des fenêtres et rideaux : Réduit le chauffage solaire intérieur en contrôlant l'entrée du rayonnement solaire
- Système de gestion technique du bâtiment (GTB) : Il synchronise différents systèmes (chauffage, climatisation, éclairage) pour assurer un fonctionnement optimal. Système (BMS) : Il synchronise différents systèmes (chauffage, climatisation, éclairage) pour assurer un fonctionnement optimal.[35]



Figure V.7 : Thermostats intelligents.[36]



Figure V.8 : Capteurs de mouvement.[37]



Figure V.9 : Systèmes de surveillance de la consommation d'énergie.[38]



Figure V.10 : Contrôle automatique des rideaux et des fenêtres.[39]

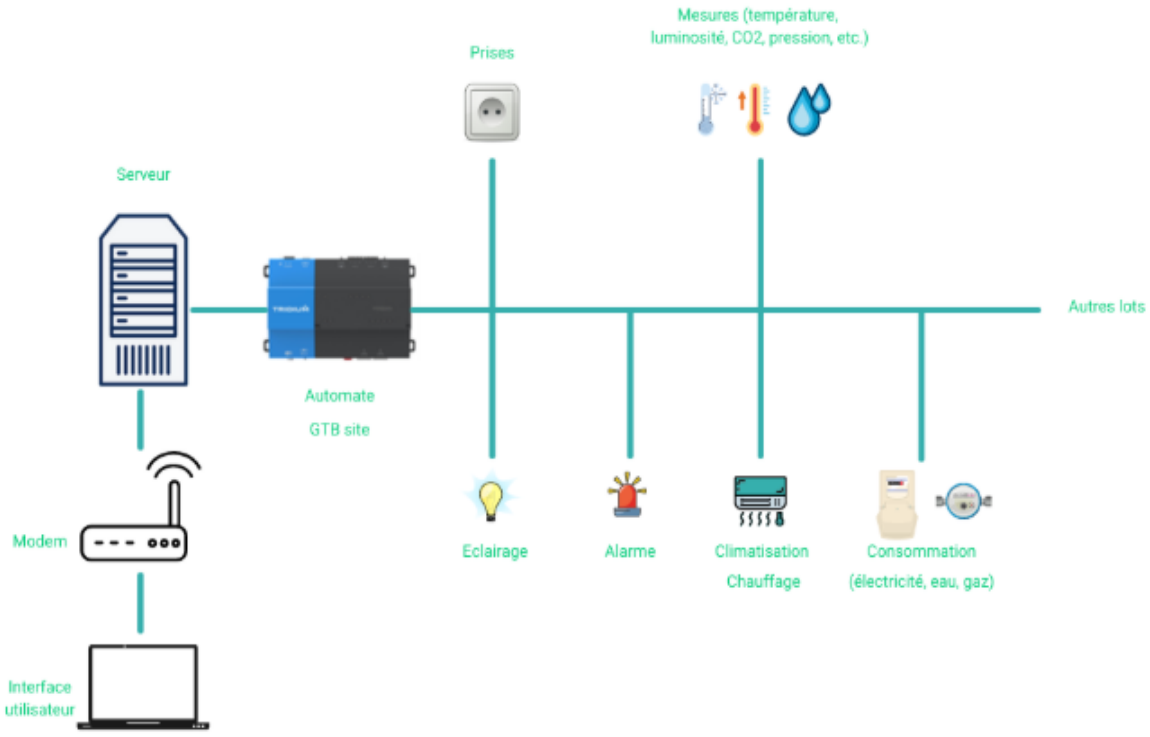


Figure V.11 : Gestion Technique du Bâtiment.[40]

V.3.4.2. Les effets positifs :

- ✓ Consommation énergétique réduite, notamment pour le chauffage et le refroidissement, ce qui est cohérent avec les résultats de la simulation TRNSYS.
- ✓ Amélioration du confort des utilisateurs grâce à des systèmes automatisés qui s'adaptent aux conditions de chaque zone du bâtiment.
- ✓ Coûts d'exploitation réduits grâce à la réduction du temps consacré à l'utilisation des équipements.
- ✓ Prolongation de la durée de vie des équipements du bâtiment grâce à un fonctionnement équilibré et non aléatoire.
- ✓ Donner au bâtiment un caractère contemporain et durable en phase avec les tendances mondiales en matière d'efficacité énergétique.

V.3.5. Exploitation de la ventilation naturelle et orientation architecturale

V. 3.5.1. Propositions techniques :

- L'idée de fenêtres opposées (ventilation croisée) permet le renouvellement de l'air naturel à l'intérieur de l'espace et réduit la dépendance aux dispositifs de climatisation

- Orientation du bâtiment et des fenêtres par rapport à la direction dominante de la ventilation : Dans la ville de Berrouaghia, on peut utiliser la ventilation d'été pour le refroidissement naturel.
- Profiter de la lumière naturelle en alignant les ouvertures avec le mouvement du soleil : Cela réduit le besoin d'éclairage artificiel tout au long de la journée.
- Ajouter des éléments d'ombrage naturels, tels que des balcons ou des arbres : Elle diminue le chauffage solaire direct sur les fenêtres et les façades en verre.
- Utiliser des fenêtres hautes pour évacuer l'air chaud : Elle encourage l'air à circuler naturellement vers le haut.

3.5.2 Les effets positifs :

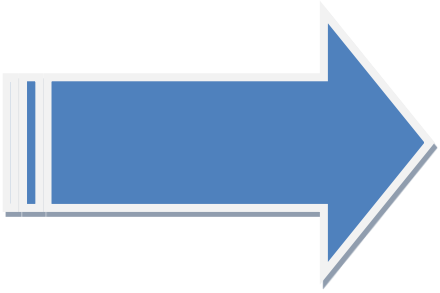
- ✓ Des besoins de refroidissement significativement réduits, comme le confirment les résultats « sans isolation » de la simulation TRNSYS.
- ✓ Une amélioration de la qualité de l'air intérieur, ce qui augmente le confort et la productivité des travailleur.
- ✓ La réduction de la dépendance aux systèmes mécaniques diminue les coûts d'exploitation et de maintenance.
- ✓ La fourniture d'un éclairage naturel gratuit allégera la pression sur le réseau électrique.
- ✓ Des solutions économiques et respectueuses de l'environnement, simples à mettre en œuvre dans les bâtiments existants

V.4. Conclusion

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments administratifs, notamment dans le contexte climatique et social local de Berrouaghia, un certain nombre de propositions techniques et environnementales ont été présentées dans ce chapitre. Les suggestions consistent à renforcer l'isolation thermique, à intégrer des sources d'énergie renouvelables, à mettre en œuvre des systèmes de contrôle intelligents, à améliorer la ventilation naturelle et à améliorer l'orientation architecturale. Les résultats de la simulation utilisant le programme TRNSYS ont démontré l'importance de ces options pour réduire considérablement les besoins de chauffage et de refroidissement. Les résultats de simulation utilisant le programme TRNSYS ont démontré l'importance de ces options pour réduire considérablement les besoins de chauffage et de refroidissement.

Aspects techniques pour englober les aspects économiques, environnementaux et sociaux. Face au changement climatique et aux pressions économiques, les bâtiments intelligents et durables ne sont plus un luxe architectural, mais une nécessité. Elles ne sont plus un élément architectural de luxe, mais plutôt une nécessité face aux pressions économiques et au changement climatique.

En fin de compte, améliorer la performance énergétique d'un bâtiment ne se limite pas à économiser de l'énergie ou à réduire les factures. Il s'agit de prendre en compte le confort et le bien-être de ceux qui y vivent au quotidien. C'est aussi une façon de respecter l'environnement, d'agir de manière responsable et de construire un avenir plus juste et prospère. Bien pensés, ces petits gestes techniques peuvent faire une grande différence. Et dans un monde en constante en évolution, construire différemment devient une belle façon de prendre soin des gens, de la planète et des générations futures.



Chapitre VI

Étude économique

VI.1. Introduction

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments n'est pas seulement une nécessité environnementale, mais aussi une question économique majeure. Dans ce chapitre, une étude économique est menée pour évaluer l'impact financier des travaux d'isolation thermique sur le bâtiment étudié. Deux configurations ont été comparés : l'état initial du bâtiment sans aucune isolation, et un état amélioré comprenant une isolation intérieure des murs accompagnée de l'utilisation de double vitrage.

VI.2. Hypothèses et données de base

Les résultats de la consommation d'énergie proviennent directement de la simulation réalisée avec TRNSYS, reflétant les besoins annuels en électricité pour le chauffage et le refroidissement. Le coût de l'électricité dépend du tarif officiel de Sonelgaz. Étant donné que la consommation dépasse 1000 kilowattheures par mois, le tarif de la quatrième tranche est appliqué, qui est : 5.4796 DA/kWh

Les deux configurations comparées sont :

- Sans isolation : bâtiment dans son état d'origine
- Avec isolation : isolation intérieure des murs + double vitrage

VI.3. Consommation annuelle et coût énergétique

Les consommations suivantes ont été obtenues :

Tableau VI.1 : Comparaison de la consommation énergétique annuelle (chauffage et climatisation).

Configurations	Chauffage (kWh)	Climatisation (kWh)	Total (kWh)
Sans isolation	21000	25700	46700
Avec isolation	15000	25700	40700

Le calcul du coût énergétique s'effectue en multipliant la consommation totale par le tarif du kWh :

- **Sans isolation :**
  - 46700×5.4796=255912 DA/an
- **Avec isolation + vitrage :**
  - 40700×5.4796=223071 DA/an

Économie réalisée :

255912−223071=32841 DA/an

VI.4. Coût de l'investissement

Tableau VI.2 : Coûts d'investissement liés à l'isolation thermique

Élément	**Surface (m²)**	**Prix unitaire (DA/m²)**	**Coût total (DA)**
Isolation des murs et de la toiture	348.25	1795.61	625098.09
Double vitrage des fenêtres	39.36	5030.25	197998.44
Total de l'investissement	—	—	**823096.53**

Ce tableau (VI.2) présente les détails des coûts liés à l'amélioration de l'enveloppe thermique du bâtiment. L'isolation des murs et le remplacement des fenêtres représentent un investissement initial important, mais il est nécessaire pour réduire la consommation d'énergie à long terme.

VI.5. Synthèse des résultats économiques

Tableau VI.3 : Synthèse économique de l'isolation thermique

Configurations	**Coût annuel de l'énergie (DA)**	**Économie annuelle (DA)**	**Coût de l'investissement (DA)**	**Temps de retour sur investissement)**
Sans isolation	255912	—	—	—
Avec isolation + double vitrage	223071	**32 841**	**823096.53**	**≈ 25.1 ans**

Ce tableau (VI.3) met en évidence le gain économique annuel résultant de l'isolation thermique, ainsi que la durée nécessaire pour amortir l'investissement initial. Malgré un coût de départ élevé, les économies réalisées chaque année rendent le projet viable à long terme.

VI.6. Conclusion

L'étude économique menée dans ce chapitre a permis de démontrer l'impact financier positif de l'amélioration de l'enveloppe thermique du bâtiment. En comparant la situation initiale, sans aucune isolation, à une solution combinant isolation intérieure et double vitrage, une réduction significative des besoins en chauffage a été observée, entraînant une économie annuelle estimée à 32 841 DA.

Bien que l'investissement initial soit relativement élevé (823 096.53 DA), le retour sur investissement, estimé à environ 25 ans, reste acceptable dans le contexte d'un bâtiment administratif à usage durable. De plus, les bénéfices indirects tels que le confort thermique amélioré, la stabilité des températures intérieures et la réduction de la consommation énergétique globale renforcent la pertinence de ce choix.

Ainsi, les résultats obtenus confirment que l'amélioration de l'isolation constitue une stratégie viable non seulement sur le plan énergétique, mais également sur le plan économique à long terme.

Conclusion et perspectives

Ce mémoire a porté sur l'analyse de la performance énergétique d'un bâtiment à caractère administratif situé dans un contexte climatique réel. À l'aide de l'outil de simulation TRNSYS, une modélisation détaillée du bâtiment a été réalisée, tenant compte de ses différentes zones, parois et systèmes techniques. L'étude a permis d'évaluer les besoins énergétiques en chauffage et en climatisation selon plusieurs configurations : sans isolation, avec isolation intérieure, avec double vitrage, et leur combinaison.

Les simulations ont clairement mis en évidence l'influence de l'enveloppe thermique du bâtiment sur sa consommation d'énergie. Les résultats montrent que l'amélioration de l'isolation thermique, notamment lorsqu'elle est combinée à l'installation de vitrages performants, permet de réduire de manière significative les besoins en chauffage. En revanche, peu d'impact a été observé sur les besoins en refroidissement, qui demeurent élevés quelle que soit la configuration.

L'analyse économique a révélé qu'en dépit d'un investissement initial conséquent, une économie annuelle notable est réalisable, conduisant à un temps de retour sur investissement d'environ 25 ans. Cela met en lumière le fait que l'efficacité énergétique ne se limite pas à une rentabilité immédiate, mais s'inscrit dans une logique plus large de durabilité, de confort intérieur accru et de réduction de l'empreinte environnementale.

En conclusion, ce travail a permis de mieux comprendre les principaux facteurs qui influencent la performance énergétique d'un bâtiment, tout en valorisant l'usage d'outils de simulation pour orienter les choix techniques et architecturaux. Il constitue une base solide pour tout projet de conception ou de rénovation visant une plus grande efficacité énergétique.

Les perspectives suivantes sont proposées :

- Étendre l'étude à d'autres typologies de bâtiments (écoles, logements, hôpitaux) pour comparer les comportements thermiques selon les usages.
- Intégrer des solutions complémentaires telles que les énergies renouvelables (photovoltaïque), les protections solaires passives, ou encore les systèmes de gestion énergétique intelligente.
- Envisager une approche dynamique tenant compte des changements climatiques à long terme et des évolutions possibles du prix de l'énergie.

Références Bibliographiques

[1] Efficacité énergétique des bâtiments : définition, solutions, chiffres 2011. https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/efficacite-energetique-et-batiments (accessed June 13, 2025).

[2] CARNEZ J. Énergie primaire, finale et utile : quelle différence ? Qualitel | Particuliers 2020. https://www.qualitel.org/particuliers/conseils/energie-primaire-finaleet-utile-comment-sy-retrouver/ (accessed June 14, 2025).

[3] Énergie primaire / énergie finale. Penser Mieux l'Énergie 2025. https://www.pensermieux.com/definitions/energie-primaire-energie-finale/ (accessed June 14, 2025).

[4] L'efficacité énergétique des bâtiments : IUE et consommation d'énergie n.d. https://brainboxai.com/fr/articles/l-efficacite-energetique-des-batiments-iue-et-consommation-d-energie (accessed June 16, 2025).

[5] Système CVC Bâtiment : guide et informations. ACCIONA Energía n.d. https://solutions.acciona-energia.fr/faq/systeme-cvc-batiment-guide-et-infos/ (accessed June 16, 2025).

[6] ouitonamaceo. Indicateurs de Performance Énergétique : Les clés pour optimiser sa consommation. Trace Software 2025. https://www.trace-software.com/fr/indicateurs-de-performance-energetique/ (accessed June 16, 2025).

[7] Lien entre performance énergétique et performance environnementale. Energie Plus Le Site n.d. https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/totem/totem-lien-performance-energetique-et-performance-environnementale/ (accessed June 16, 2025).

[8] XPair. Confort thermique - Définition. XPair n.d. https://www.xpair.com/lexique/definition/confort_thermique.htm (accessed June 16, 2025).

[9] Confort thermique : généralité. Energie Plus Le Site n.d. https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/ (accessed June 16, 2025).

[10] bilan_energetique_2023_6763e8ed2d76d.pdf n.d.

[11] Razika K. L'éfficacité énergétique dans le bâtiment n.d.

[12] berrouaghia. 2023 ويكيبيديا.

[13] Meteotest JR Stefan Müller, Michael Schmutz, Daniele Barsotti, Pascal Graf, René Cattin. Meteonorm 8.2 – Global Meteorological Database 2022.

[14] DTR (DOCUMENTTECHNIQUEREGLEMENTAIRE) n.d.

[15] Découvrez le logiciel EnergyPlus : le logiciel qui change la donne en matière de modélisation énergétique. CIET n.d. https://cietcanada.com/fr/nouvelles/decouvrez-le-logiciel-energyplus-le-logiciel-qui-change-la-donne-en-matiere-de-modelisation-energetique/ (accessed June 23, 2025).

[16] DesignBuilder Software. Altensis n.d. https://www.altensis.com/en/services/designbuilder-software/ (accessed June 23, 2025).

[17] ber15.indd n.d.

[18] Getting Started n.d.

[19] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. TRNSYS 16– Transient System Simulation Tool 2020.

[20] Isolation thermique : définition. Aide & Contact 2025. https://www.faq.enercoop.fr/hc/fr/articles/21972238531858-Isolation-thermique-d%C3%A9finition (accessed June 15, 2025).

[21] Isolation des murs : par l'intérieur ou par l'extérieur ? - Conseils Thermiques n.d. https://conseils-thermiques.org/contenu/isolation-interieure-ou-exterieure.php (accessed June 15, 2025).

[22] Inject-styrène Haute Savoie n.d. https://www.inject-styrene-74.com/ (accessed June 15, 2025).

[23] Isolation d'un mur par l'extérieur | Guide Bâtiment Durable 2025. https://guidebatimentdurable.brussels/isolation-dun-mur-lexterieur (accessed June 15, 2025).

[24] L'isolation des thermique par l'intérieur, avantages inconvénients et prix | La Prime Énergie n.d. https://www.laprimeenergie.fr/les-travaux/lisolation-thermique/lisolation-thermique-par-linterieur-avantages-inconvenients-et-prix (accessed June 15, 2025).

[25] Comment optimiser le confort d'été par SOTHOFERM. Sothoferm n.d. https://www.sothoferm.fr/projet/confort-dutilisation/le-confort-en-ete/ (accessed June 27, 2025).

[26] Conductivité et résistance thermique d'un isolant : guide n.d. https://www.toutsurlisolation.com/resistance-thermique-et-performance (accessed June 13, 2025).

[27] Le polyuréthane - Isolation France n.d. https://www.isolation-france.fr/polyurethane/ (accessed June 27, 2025).

[28] Laine de roche rouleau ROCKWOOL Varirock 035 n.d. https://benz24.fr/isolation-comble-perdu-rockwool-varirock-wls-035-panneau-isolant-en-laine-de-roche.html (accessed June 27, 2025).

[29] La laine de verre, un isolant économique - Conseils Thermiques n.d. https://conseils-thermiques.org/contenu/laine-de-verre.php (accessed June 27, 2025).

[30] Comment évaluer la performance d'un isolant ? n.d. https://www.toutsurlisolation.com/lambda-isolation-performance-thermique (accessed June 27, 2025).

[31] Type de vitrage - Paris Vitrier Service n.d. https://www.vitrier-paris.fr/type-de-vitrage/ (accessed June 27, 2025).

[32] Définition Low-E | Tout ce que vous devez savoir n.d. https://www.glassfonster.fr/content/23-low-e (accessed June 27, 2025).

[33] Guide complet du joint d'une fenêtre PVC : type, importance et installation n.d. https://www.orion-menuiseries.com/fenetres/joint-fenetre-pvc.htm (accessed June 27, 2025).

[34] XPair. Photovoltaïque - Définition. XPair n.d. https://www.xpair.com/lexique/definition/photovoltaique.htm (accessed June 27, 2025).

[35] Intégration des technologies intelligentes dans les bâtiments modernes. Dök Mimarlık 2024. https://dokmimarlik.com/fr/integration-des-technologies-intelligentes-dans-les-batiments-modernes/ (accessed June 27, 2025).

[36] Thermostats intelligents | Carrier Résidentiel. Carrier n.d. https://www.carrier.com/residential/fr/ca/products/thermostats/smart-thermostats/ (accessed June 27, 2025).

[37] Fonctionnement des capteurs de mouvement n.d. https://www.conrad.fr/fr/guides/installations-eclairage-et-domotique/fonctionnement-capteur-de-mouvement.html (accessed June 27, 2025).

[38] consommation d'énergie : comment évaluer la consommation ? 2022. https://blog.materielelectrique.com/mesurer-consommation-denergie/ (accessed June 27, 2025).

[39] Flemme d'ouvrir vos rideaux ? On a testé un robot qui le fait à votre place - Numerama n.d. https://www.numerama.com/tech/1515794-flemme-douvrir-vos-rideaux-on-a-teste-un-robot-qui-le-fait-a-votre-place.html (accessed June 27, 2025).

[40] Qu'est-ce qu'une Gestion Technique du Bâtiment (GTB) ? - Définition et fonctionnement | Calcul CEE n.d. https://www.calculcee.fr/article/gtb-definition/ (accessed June 27, 2025).