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

Contribution à l'optimisation de la consommation énergétique dans les bâtiments

Présentés par :

Mr. CHAREF Mohammed Abdelaziz

Mr. BENGUERMIT Mahmoud

Proposés et Dirigés par :

Dr. REZRAZI Ahmed

Promotion 2024-2025

REMERCIEMENTS

*Avant tout, nous remercions **Allah** le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'études.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de L'université de MEDEA.

*Notamment à notre promoteur **Dr. REZRAZI AHMED** d'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillés, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.*

J'exprime mes remerciés aussi aux membres du jury pour avoir accepté de faire partie de notre jury.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à réaliser ce travail.

Mes vives salutations

CHAREF Mohammed Abdelaziz

BENGUERMIT Mahmoud

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À ceux qui me sont les plus chers,

À mes chers parents, symboles de sacrifice et de soutien,

À mes frères et sœurs bien-aimés,

*À ma chère famille "**CHAREF**",*

À mes fidèles amis,

Et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.

À vous tous, mes sincères remerciements et toute ma gratitude.

CHAREF Mohammed Abdelaziz

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Aux Être qui me sont les plus chères au monde

Mes très chers parents

Aux mes frères et mes chères sœurs

*Ma famille " **BENGUERMIT**"*

Mes amis

Tous ceux qui ont contribué à la résussite de ce travail.

BENGUERMIT Mahmoud

RESUME

Cette étude évalue la performance thermique d'une maison implantée à Dar El Beïda, au sein de la capitale algérienne, bâtie conformément aux normes nationales en utilisant des matériaux locaux. Une modélisation numérique a été réalisée grâce au logiciel TRNSYS 16, permettant d'étudier en détail l'influence de l'isolation thermique sur la consommation énergétique du bâtiment, principalement pour le chauffage et la climatisation. Les résultats obtenus indiquent qu'une amélioration de l'isolation thermique peut conduire à une diminution de la consommation d'énergie pouvant atteindre 78 % par rapport aux bâtiments traditionnels. Par ailleurs, l'étude inclut une évaluation technico-économique qui démontre un retour sur investissement de cinq ans pour l'isolation du bâtiment, générant une économie estimée à 4 millions de dinars sur 50 ans.

Mots-clés : Consommation énergétique, efficacité énergétique, bâtiment, isolation thermique, simulation, TRNSYS, étude technico-économique

ABSTRACT

This study evaluates the thermal performance of a house located in Dar El Beïda, within the Algerian capital, built in accordance with national standards using local materials. A numerical simulation was carried out using TRNSYS 16 software to analyze in detail the impact of thermal insulation on the building's energy consumption, mainly for heating and cooling. The results show that improving thermal insulation can reduce energy consumption by up to 78% compared to traditional buildings. Furthermore, the study includes a techno-economic assessment demonstrating a five-year payback period for the building's insulation, leading to an estimated saving of 4 million Algerian dinars over 50 years.

Keywords: Energy consumption, energy efficiency, building, thermal insulation, simulation, TRNSYS, techno-economic study

الملخص

تقيّم هذه الدراسة الأداء الحراري لمنزل يقع في منطقة الدار البيضاء ضمن العاصمة الجزائرية، تم بناؤه وفقًا للمعايير الوطنية باستخدام مواد محلية. تم إجراء محاكاة رقمية باستخدام برنامج TRNSYS 16 لدراسة تأثير العزل الحراري بشكل مفصل على استهلاك الطاقة في المبنى، خاصة فيما يتعلق بالتدفئة والتبريد. أظهرت النتائج أن تحسين العزل الحراري يمكن أن يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 78٪ مقارنةً بالمباني التقليدية. إضافةً إلى ذلك، تتضمن الدراسة تقييمًا تقنيًا اقتصاديًا يُظهر فترة استرجاع للتكلفة تُقدَّر بخمس سنوات لعزل المبنى، مع تحقيق وفورات متوقعة تُقدَّر بـ 4 ملايين دينار جزائري خلال 50 عامًا.

الكلمات المفتاحية: استهلاك الطاقة، الكفاءة الطاقوية، المباني، العزل الحراري، المحاكاة، TRNSYS، دراسة تقنية اقتصادية

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS I
DEDICACES II
RESUME IV
SOMMAIRE V
LISTE DES FIGURES VII
LISTE DES TABLEAUX IX
INTRODUCTION 1
CHAPITRE I Contexte Énergétique
I.1. Consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment 5
I.1.1. Consommation mondiale de l'énergie 5
I.1.2. Consommation nationale d'énergie 6
I.1.3. Consommation énergétique des bâtiments 7
I.2. Efficacité énergétique 7
I.2.1. Concepts et Enjeux 7
I.2.2. Amélioration de l'efficacité énergétique 8
I.2.3. Efficacité énergétique passive et active 8
I.3. Le transfert de chaleur 9
I.3.1. Définition de transfert de chaleur 9
I.3.2. Modes de transfert de chaleur 10
I.4. Confort thermique 12
I.4.1. Différents critères qui influencent le confort thermique 12
I.5. Isolation thermique 14
CHAPITRE II Modélisation du bâtiment d'étude
II.1. Paramètres Géographiques 23
II.2. Paramètres Géométriques 24
II.3. Paramètres Climatiques 25
II.3.1. Paramètres Climatiques externes 25
II.3.2. Paramètres Climatiques internes 27
II.3. Paramètres Thermiques 28
CHAPITRE III Outil de simulation et methodologie adoptée
III.1. Présentation de progamme utilisé 32
III.1.1. Définition TRNSYS :(Transient System Simulation) 32

III.1.2. Avantages du logiciel TRNSYS 32
III.1.3. Inconvénient du logiciel TRNSYS 33
III.1.4. La suite TRNSYS 33
III.2. Les Étapes De Simulation 33
CHAPITER IV Résultats et discussion
Introduction : 46
I. Evolution de la température ambiante dans un Bâtiment Classique 46
I.1. Bâtiment sans chauffage et climatisation 46
I.2. Bâtiment avec chauffage et climatisation : 47
II. Consommation énergétique dans un bâtiment classique 49
III. Analyse de l'influence des isolants sur la performance énergétique du bâtiment 50
IV. Influence de l'épaisseur de l'isolation dans les murs sur la consommation énergétique ... 55
IV.1. En chauffage 55
IV.2. En climatisation 57
V. Influence de l'épaisseur de l'isolation dans la toiture sur la consommation énergétique 58
V.1. En chauffage 58
V.2. En climatisation 60
VI. Influence de l'épaisseur de l'isolation dans le plancher sur la consommation énergétique 61
VI.1. En chauffage 61
VI.2. En climatisation 63
VII. Influence du type de vitrage sur la consommation énergétique 64
VII.1. En chauffage 64
VII.2. En climatisation 65
Conclusion 67
CHAPITRE V Etude technico-économique
Introduction 69
V.1. Coût de consommation 70
V.1.1 Bâtiment classique sans isolation 70
V.1.2. Bâtiment avec isolation et double vitrage 70
V.1.3. Coût d'investissement en isolation et double vitrage 71
Conclusion 73
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE 74

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Répartition de la consommation mondiale d'énergie primaire 4

Figure I.2. Répartition de la consommation énergétique mondiale par secteur 5

Figure I.3. Consommation nationale par forme d'énergie 7

Figure I.4. Stratégies clés pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments 8

Figure I.5. Combinaison de ces deux efficacités révèle la performance énergétique globale du bâtiment 9

Figure I.6. Les trois types de transfert de chaleur 10

Figure I.7. Transfert de chaleur par conduction 10

FigureI.8. Transfert de chaleur par convection 11

FigureI.9. Transfert de chaleur par rayonnement 12

Figure I.10. Garder la fraîcheur en été, conserver la chaleur en hiver 13

Figure I.11. Parois froides ou chaudes : impact sur la sensation de confort 14

Figure I.12. Répartition des températures dans une pièce chauffée 14

Figure I.13. Déperditions dans les locaux d'habitation 15

Figure II.1. Localisation géographique de la commune de Dar El Beida dans la wilaya d'Alger 24

Figure II.2. Plan architectural de la maison individuelle utilisée pour la simulation énergétique 25

Figure II.3. Variation mensuelle des températures à Dar El Beïda 27

Figure II.4. Variation des températures extrêmes journalières à Dar El Beïda 28

Figure IV.1 : Evolution de la température ambiante dans un Bâtiment Classique sans chauffage et climatisation 47

Figure IV.2 : Evolution de la température ambiante dans un Bâtiment Classique avec chauffage et climatisation. 49

Figure IV.3 : Variation de la consommation énergétique dans bâtiment sans isolation 50

Figure IV.4. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Laine de Roche" 52

Figure IV.5. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Laine de Verre" 53

Figure IV.6. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Polystyrène Expansé" 53

Figure IV.7. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Polystyrène Extrudé" 54

Figure IV.8 Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Polyuréthane" 54

Figure IV.9. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Verre Cellulaire" 55
Figure IV.10. Variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans les murs 57
Figure IV.11. Variation de la puissance de climatisation en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans les murs 58
Figure IV.12. Variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans la toiture 60
Figure IV.13. Variation de la puissance de climatisation en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans la toiture 62
Figure IV.14 Variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans le plancher 63
Figure IV.15 Variation de la puissance de climatisation en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans le plancher 65
Figure VI.16. Variation de la puissance de chauffage en fonction du type de vitrage 66
Figure IV.17. Variation de la puissance de climatisation en fonction du type de vitrage 67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. Paramètres géométriques principaux du bâtiment étudié 26
Tableau II.2. Données climatiques mensuelles de la commune de Dar El Beïda 27
Tableau II.3. Caractéristiques de construction des murs extérieurs sans isolation 29
Tableau II.4. Caractéristiques de construction des murs extérieurs avec isolation 29
Tableau II.5. Caractéristiques de construction des murs intérieurs 30
Tableau II.6. Caractéristiques de construction du plancher sans isolation 30
Tableau II.7. Caractéristiques de construction du plancher avec isolation 30
Tableau II.8. Caractéristiques de construction de la toiture sans isolation 31
Tableau II.9. Caractéristiques de construction de la toiture avec isolation 31
Tableau II.10. Caractéristiques de construction des vitres et des porte 31
Tableau IV.1. Caractéristiques des isolants 52
Tableau V.1. Coût de consommation pour un bâtiment sans isolation 71
Tableau V.2. Coût de consommation pour un bâtiment avec isolation et double vitrage 71
Tableau V.3. Coût d'investissement lié à l'installation des isolants et du double vitrage 72

INTRODUCTION

L’optimisation de la consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels constitue aujourd’hui un impératif stratégique, tant pour répondre aux enjeux climatiques que pour garantir la viabilité économique des projets immobiliers. Dans un contexte marqué par une demande énergétique croissante, une pression accrue sur les ressources fossiles et une volatilité des prix de l’énergie, les professionnels du secteur doivent intégrer des solutions innovantes et durables dès la conception des bâtiments. Cette approche ne se limite plus à la simple fonctionnalité des logements, mais intègre une dimension systémique, alliant efficacité énergétique, réduction de l’empreinte carbone et amélioration du bien-être des usagers. Les réglementations thermiques de plus en plus strictes, soulignent cette transition vers une construction responsable. Ainsi, l’enjeu dépasse la simple performance technique : il s’agit d’adopter une vision holistique où chaque décision – isolation, ventilation, choix des matériaux, intégration d’énergies renouvelables – contribue à un équilibre entre durabilité, rentabilité et qualité d’usage.

Dans ce contexte, adopter des stratégies visant à réduire la consommation énergétique tout en maintenant, voire en améliorant, la qualité de vie à l’intérieur des logements devient un objectif prioritaire. Cette démarche s’inscrit dans une logique de transition énergétique, portée par des solutions passives, comme l'isolation avancée et les matériaux intelligents, permettent de diminuer les besoins énergétiques de base. Parallèlement, les systèmes intelligents de gestion optimisent l'utilisation des équipements en fonction des conditions réelles d'occupation et des paramètres environnementaux. Cette synergie entre enveloppe performante et régulation dynamique crée un écosystème énergétique efficient, où chaque kilowattheure est utilisé de manière optimale.Ces systèmes permettent une meilleure anticipation des besoins, une régulation plus fine des équipements, et une adaptation en temps réel aux conditions climatiques et aux usages.

L’un des outils les plus puissants dans cette quête d'efficacité est la simulation énergétique des bâtiments**,** qui permet de modéliser le comportement thermique d’un bâtiment avant même sa construction ou dans le cadre de rénovations. Grâce à elle, il devient possible d’analyser l’impact de nombreux paramètres – orientation du bâtiment, isolation, vitrages, apports solaires, inertie thermique, etc. – sur les besoins en chauffage, climatisation et électricité.

Ainsi, la simulation ne se limite pas à une simple évaluation ; elle devient un outil d'aide à la décision, permettant de comparer différentes options, de prévoir les économies potentielles, et de guider les choix technico-économiques des concepteurs, promoteurs et investisseurs.

Dans cette étude, nous avons pour ambition de contribuer à cette dynamique en proposant une démarche structurée et rigoureuse d'optimisation de la consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels, en particulier dans le contexte climatique algérien. Cette démarche repose sur une approche à la fois globale et ciblée, articulée autour de cinq chapitres complémentaires, chacun apportant un éclairage spécifique sur les différentes dimensions du projet :

Le premier chapitre est un chapitre introductif présent une vision d'ensemble de la problématique énergétique aux niveaux mondial, national et local. Il aborde également les concepts clés liés à la performance énergétique des bâtiments, les indicateurs de confort thermique, les phénomènes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement), ainsi qu'un inventaire détaillé des matériaux isolants disponibles, leurs propriétés physiques et leurs domaines d'application.

Et le deuxième chapitre expose les fondements nécessaires à la modélisation thermique d'un bâtiment. Y sont détaillés les paramètres géographiques du site étudié, les caractéristiques géométriques de l'enveloppe bâtie, les conditions climatiques extérieures et intérieures, ainsi que les propriétés thermiques des matériaux utilisés. Cette étape est cruciale pour garantir la fiabilité des simulations à venir.

Pour le troisième chapitre est consacré à la méthodologie de simulation adoptée, avec une présentation approfondie du logiciel TRNSYS. Ce dernier, reconnu pour sa flexibilité et sa puissance, permet de réaliser des simulations dynamiques, intégrant une multitude de scénarios énergétiques et de configurations de systèmes.

Dans le quatrième chapitre**,** nous avons présenté les résultats des simulations, en mettant en évidence l'impact des différentes solutions d'optimisation testées (isolation renforcée, vitrages performants, orientation optimisée, ventilation naturelle, etc.). Une analyse critique et comparative permet de dégager les meilleures pratiques selon différents critères : efficacité, coût, faisabilité.

Et concernant le cinquième et dernier chapitre propose une étude technico-économique, évaluant la rentabilité des mesures proposées. Les calculs de retour sur investissement (ROI), d'amortissement, et d'économies d'énergie à long terme y sont détaillés, offrant une vision complète des bénéfices économiques des choix techniques retenus.

L’étude se conclut par une synthèse des principaux enseignements tirés de notre démarche, ainsi que par une série de recommandations concrètes destinées à guider les futures recherches et les projets de construction ou de rénovation. Ces recommandations prennent en compte les spécificités climatiques de l’Algérie, les contraintes locales, et les opportunités offertes par les technologies disponibles sur le marché.

CHAPITRE I

Contexte Énergétique

I.1. Consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment

I .1.1. Consommation mondiale de l'énergie

La consommation mondiale d'énergie primaire s'est élevée à 619,6 exajoules (EJ) en 2023, soit près de 2% de plus qu'en 2022, déjà une année record (et environ 5% de plus qu'en 2019, niveau pré-Covid).

Précisons que la consommation énergétique en Europe a baissé de près de 2,2% l'an dernier tandis que celle dans la région Asie-Pacifique a augmenté de presque 5% (+ 6,5% pour la Chine, qui compte pour plus d'un quart de la consommation mondiale).

La consommation d'énergie par habitant s'est quant à elle élevée à 77 GJ par habitant en moyenne en 2023 (+ 1,1% par rapport à 2022), avec des différences très fortes d'une région à une autre (14,3 GJ par habitant en Afrique en 2023, contre 230 GJ en Amérique du Nord) [1].

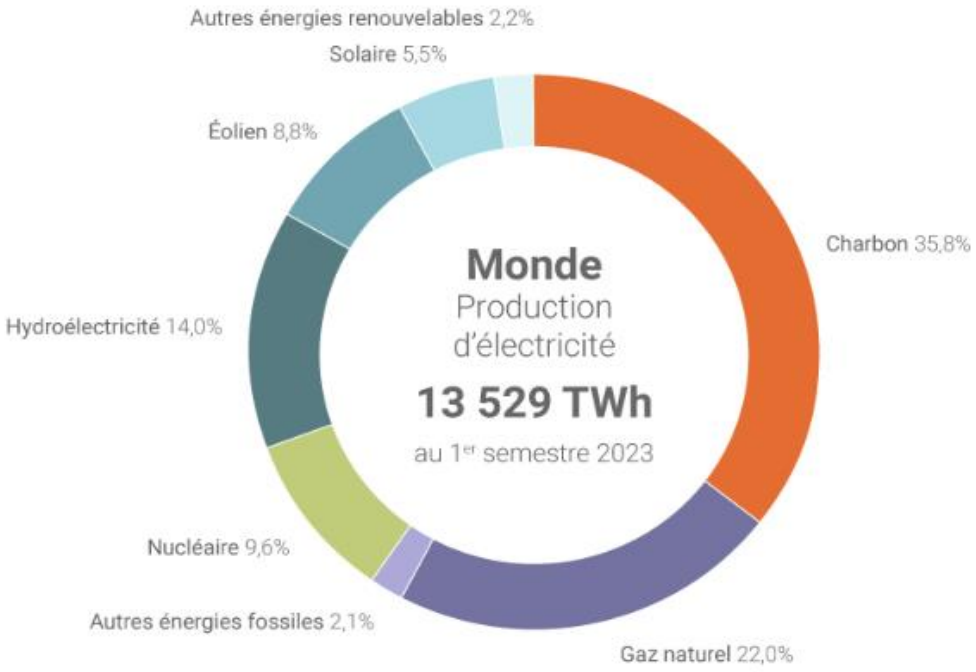


Figure I.1. Répartition de la consommation mondiale d'énergie primaire

Le secteur mondial du bâtiment a consommé 44 % de la consommation totale d'énergie, ce qui comprend la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation, le chauffage de l'eau, l'éclairage, la cuisine, les appareils électroménagers et d'autres charges.

La construction de bâtiments a contribué à une augmentation de 6 % de la consommation finale d'énergie estimée à l'échelle mondiale, compte tenu de la production fournie par ce secteur [1].

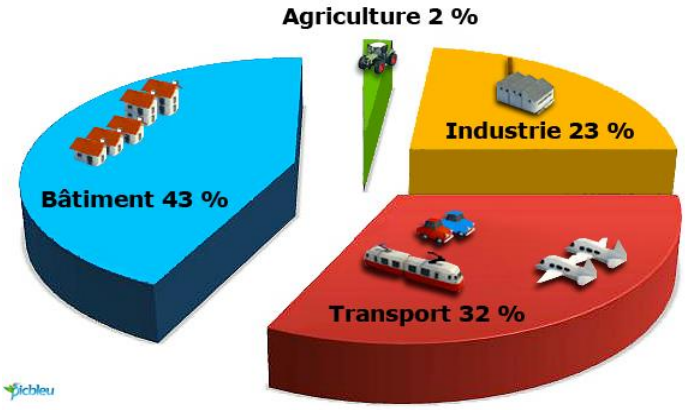


Figure I.2. Répartition de la consommation énergétique mondiale par secteur [1]

I.1.2. Consommation nationale d'énergie

La consommation d'énergie en Algérie a connu une augmentation significative ces derniers temps, en raison du niveau de vie de la population et du développement social et économique.

En raison du besoin toujours croissant de confort, comme la climatisation, on développe et on masque les effets d'un chauffage réduit, et on dit ainsi que le niveau de vie augmente.

Une consommation énergétique élevée entraîne une augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, mais il en va de même du fait que les bâtiments constituent la principale source de consommation d'énergie.

Le secteur de la construction est le plus grand consommateur d'énergie finale par rapport aux autres secteurs, avec une consommation qui a triplé au cours des trois dernières décennies et qui devrait doubler du même facteur d'ici la fin de 2025.

L'investissement le plus important doit donc être dans la conception architecturale efficace du bâtiment, compatible avec son environnement [2].

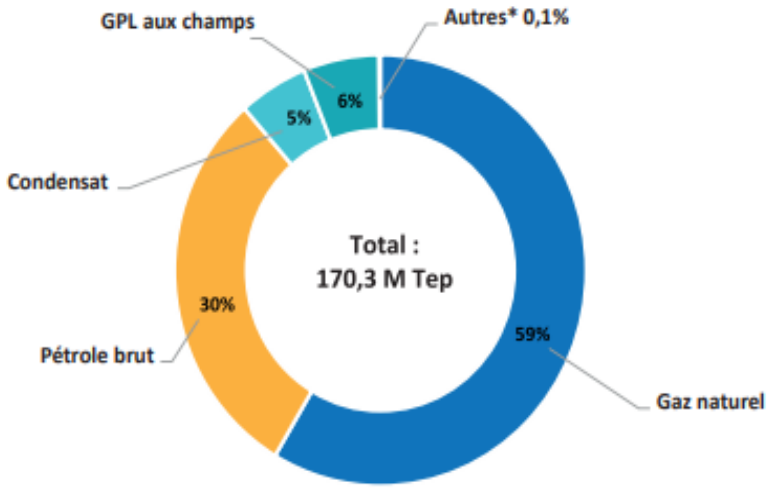


Figure I.3. Consommation nationale par forme d'énergie [2]

La structure de la production d'énergie primaire commerciale reste dominée par le gaz naturel à hauteur de 59%, suivie par le pétrole (30%), comme illustré dans le graphe ci-après :

I.2.3. Consommation énergétique des bâtiments

La consommation énergétique de la construction (la consommation énergétique des bâtiments) forme une bonne part de la consommation énergétique mondiale. Le secteur de la construction consomme jusqu'à 40 % de toute l'énergie et contribue jusqu'à 30 % des émissions annuelles mondiales de gaz à effet de serre. Étant donné la croissance massive de la construction neuve dans les économies en transition et l'inefficacité du parc immobilier existant dans le monde, si rien n'est fait, les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments vont plus que doubler au cours des 20 prochaines années [3].

Cette énergie est utilisée à de nombreuses fins, notamment :

• Chauffage et/ou refroidissement, pour assurer un climat intérieur confortable.
• Circulation de fluides tels que l'air (ventilation), l'eau (eau chaude, chauffage).
• Transports (ascenseurs dans les immeubles).
• Éclairage.
• Communications (téléphone, radio, télévision).
• Cuisines

Dans les climats tempérés et froids, il est nécessaire d'augmenter la température intérieure des bâtiments pour le chauffage. En revanche, dans les climats plus chauds, il faut abaisser la température intérieure des bâtiments pour refroidir et assécher l'air [3].

I.2. Efficacité énergétique

I.2.1. Concepts et Enjeux

Il existe de nombreuses définitions de l'efficacité énergétique, notamment :

C'est le rapport entre le service rendu (performance, produit, énergie, confort, service) et l'énergie qui lui est allouée. On peut également dire qu'il s'agit du rapport énergétique entre la quantité d'énergie fournie et la quantité d'énergie absorbée.

Il s'agit de réduire la quantité d'énergie nécessaire pour le même service à la source et de mieux utiliser l'énergie avec une qualité de vie constante.

Plus les pertes sont faibles et meilleure est l'efficacité énergétique, moins le système énergétique consomme d'énergie, que ce soit pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la climatisation, l'éclairage ou tout autre type de besoin énergétique de la maison.

L'objectif de tout concept d'efficacité énergétique est de consommer moins et mieux avec le même confort thermique [4].

I.2.2. Amélioration de l'efficacité énergétique

Afin d'améliorer l'efficacité énergétique, nous suivons les étapes indiquées dans la figure :

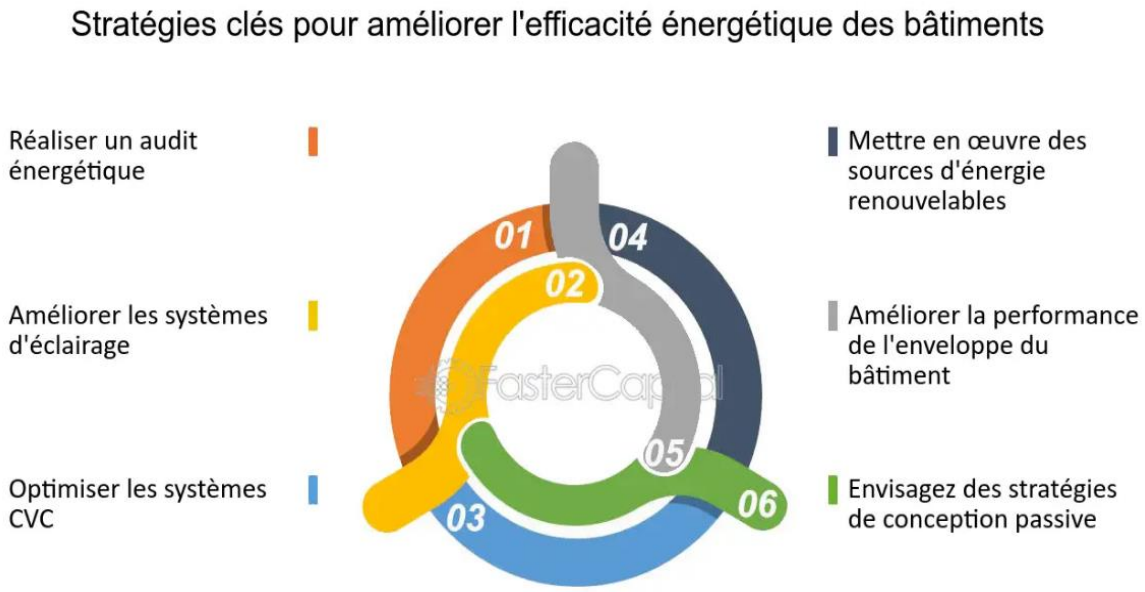


Figure I.4. Stratégies clés pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments [16]

L'efficacité énergétique doit également être améliorée en termes de :

• Réduire les besoins liés au bâtiment lui-même.

• Améliorer les équipements techniques et la gestion des bâtiments.

• Le comportement de l'utilisateur doit être inclus.

I.2.3. Efficacité énergétique passive et active

Il existe deux types fondamentaux d'efficacité énergétique solutions dites « passives » et solutions dites « actives ».

I.2.3.1 Efficacité énergétique passive

Cette solution d'efficacité énergétique passive agit pour réduire la consommation énergétique de ses équipements, matériaux ou bâtiments grâce à de meilleures performances internes [4].

Il peut s'agir d'équipements d'isolation, de chauffage et de ventilation, etc.

I.2.3.2. Efficacité énergétique active

L'efficacité énergétique active concerne l'organisation, la gestion énergétique et la gestion technique des bâtiments (GTB), dans le but d'optimiser les flux et les ressources en ne consommant que l'énergie nécessaire [4].

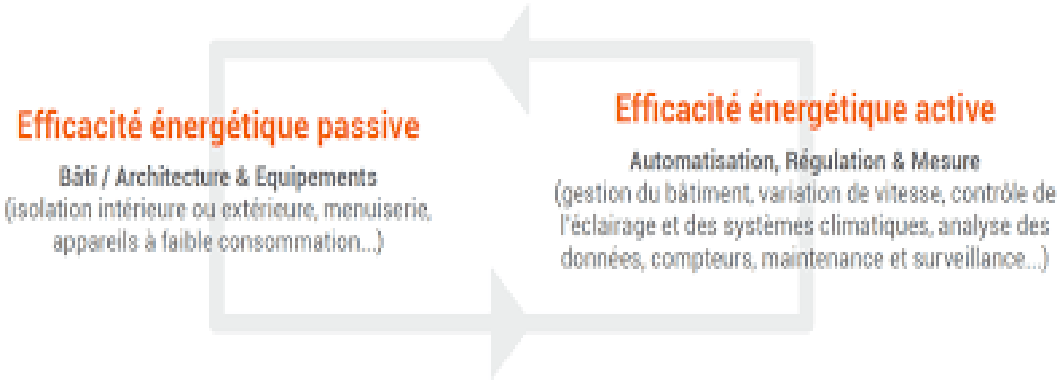


Figure 1.5. combinaison de ces deux efficacités révèle la performance énergétique globale du bâtiment [4]

I .3. Le transfert de chaleur

I.3.1. Définition de transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est défini comme le transfert d'énergie thermique d'une zone à une autre en raison d'une différence de température.

La thermodynamique nous permet de prédire la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec la transition externe d'un état d'équilibre à un autre.

Il existe trois types de transfert de chaleur Conduction, Convection et rayonnement. [5]

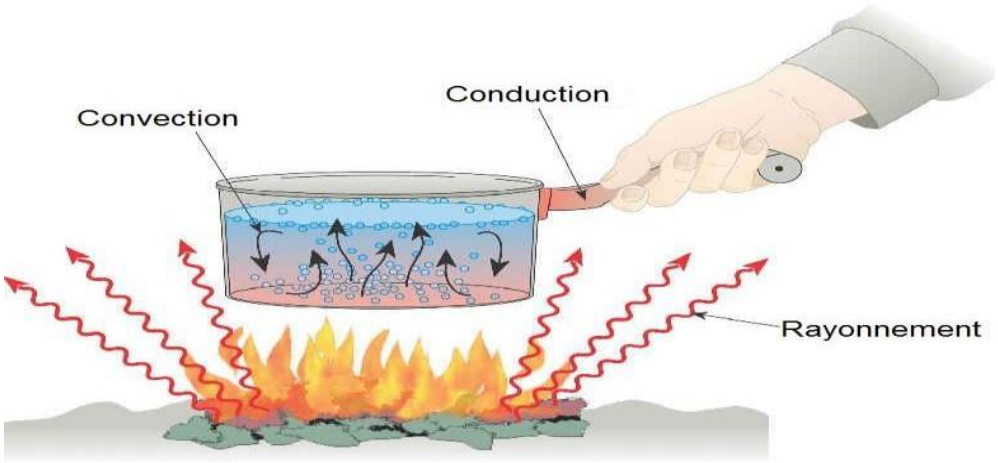


Figure 1.6. Les trois types de transfert de chaleur [5]

I.3.2. Modes de transfert de chaleur

I.3.2.1. Conduction

Il est scientifiquement connu comme le transfert de chaleur dans un milieu sans mouvement de matière sous l'influence d'une différence de température.

La propagation de la chaleur par conduction au sein du corps se fait selon deux mécanismes transport par électrons libres et transport par vibrations des molécules.

Ce type de transfert de chaleur, appelé théorie de conduction, repose sur l'hypothèse que la densité de flux est proportionnelle au gradient de température [6].

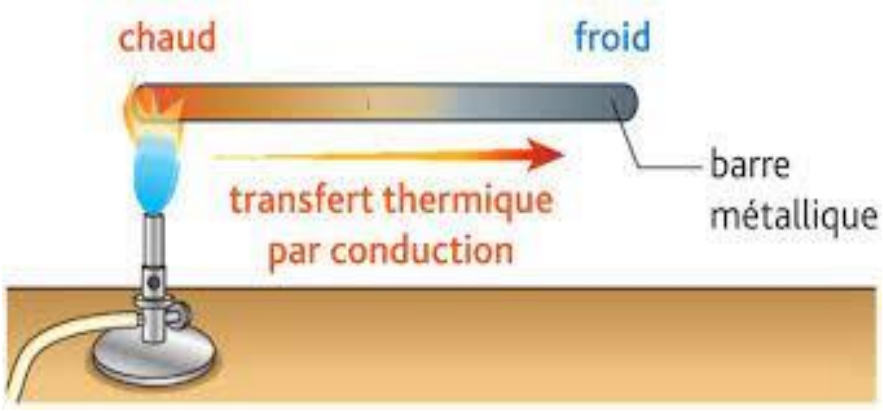


Figure 1.7. Transfert de chaleur par conduction [6]

I.3.2.2. Convection

Ce processus se produit par le transfert de chaleur entre un solide et un liquide, où l'énergie est transférée en déplaçant le liquide.

C'est un phénomène qui se produit lorsqu'un liquide se déplace par rapport à des éléments fixes, ce mouvement est dû aux différences de densité résultant des gradients de température. [5].

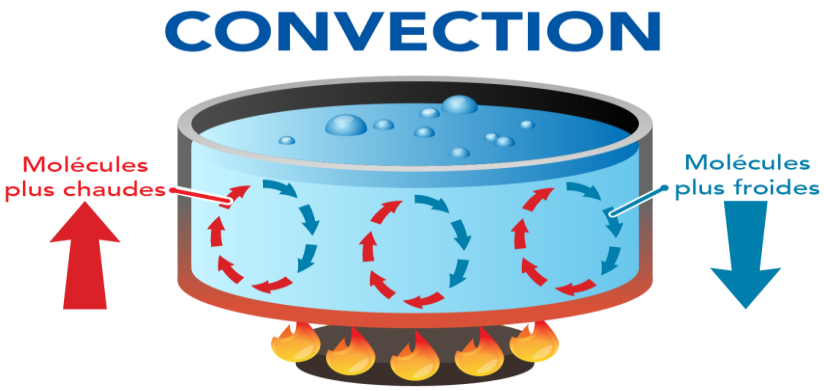


Figure1.8. Transfert de chaleur par convection [6]

I.3.2.2.1. Convection naturelle

La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide et qui crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide. Toute autre cause de mouvement de molécule d'air telle que les ventilateurs est éliminée.

I.3.2.2.2. Convection forcée

La convection forcée est un type particulier de transfert de chaleur dans lequel les fluides sont forcés de se déplacer, afin d'augmenter le transfert de chaleur.

Le transfert thermique à partir d'une surface à la température d'un fluide à la température par la convection.

I.3.2.2.3. Convection mixte

La convection mixte correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcée) quand les vitesses d'écoulement, fictives, dues aux deux types de convections sont considérées séparément, du même ordre de grandeur. [7]

I.3.2.3. Rayonnement thermique

Le rayonnement thermique représente, avec la convection et la conduction, l'un des phénomènes physiques qui autorisent le transfert de chaleur. Son signe particulier : il ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel intermédiaire et peut donc transporter de la chaleur à travers le vide. Ainsi, c'est grâce au rayonnement thermique que le Soleil nous transmet, presque instantanément, sa chaleur. [6]

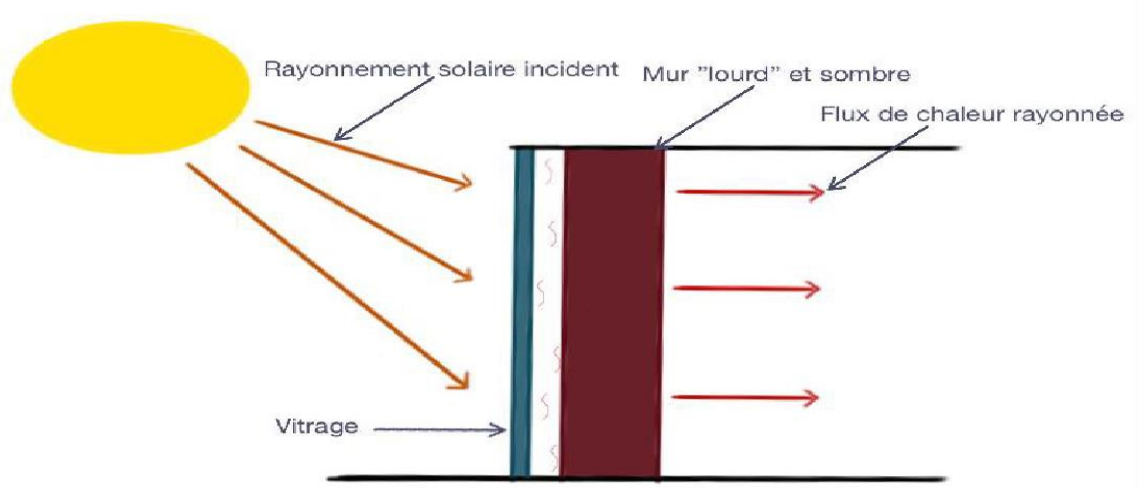


Figure1.9. Transfert de chaleur par rayonnement [6]

I.4. Confort thermique

Le confort thermique fait référence à la sensation ou à l'état dans lequel les occupants d'un bâtiment connaissent un équilibre ou une régularité entre les deux extrémités (haute/basse) de la température interne.

C'est une évaluation subjective de la perception de l'atmosphère thermique et reflète son sentiment de neutralité par rapport à un environnement thermique donné.

Le maintien du confort thermique pour les occupants d'un bâtiment ou d'une autre enceinte est l'un des objectifs les plus importants des concepteurs de CVC (chauffage, ventilation et climatisation) [9].

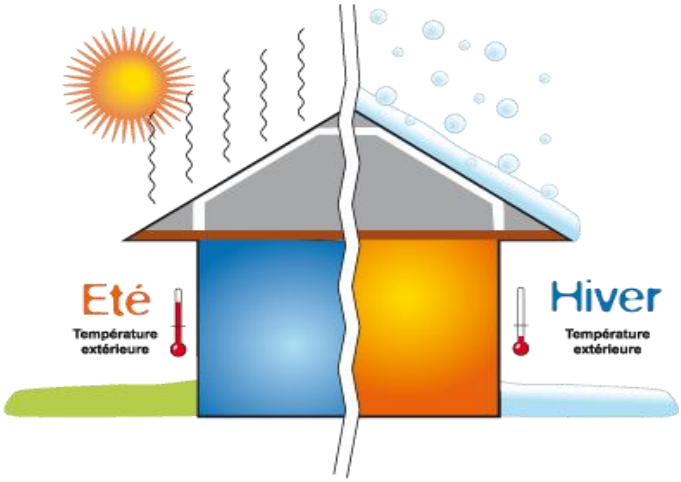


Figure I.10. Garder la fraîcheur en été, conserver la chaleur en hiver [9].

I.4.1. Différents critères qui influencent le confort thermique

A. Température ambiante (ou de consigne)

La température de confort thermique est généralement comprise entre 19°C et 20°C dans un espace intérieur. Une élévation de consigne de 1°C au-delà de 20°C peut induire une surconsommation énergétique estimée à environ 7 %, en raison de l'augmentation des besoins de chauffage.

Afin d'optimiser la performance énergétique, il est recommandé de programmer une réduction automatique de la température de consigne de 2 à 3°C durant les périodes d'inoccupation ou pendant la nuit, via un système de régulation thermique performant (thermostat programmable ou régulation centralisée) [10].



B. Température des parois

La température des parois a une grande influence sur la température ressentie. Pour calculer simplement la température ressentie, il faut faire la moyenne entre la température des parois et la température ambiante. Par exemple, pour une température d'ambiance de 20°C :

- Cas n°1 : Température de paroi de 16°C : la température ressentie sera de 18°C
- Cas n°2 : Température de paroi de 19°C : la température ressentie sera de 19,5°.

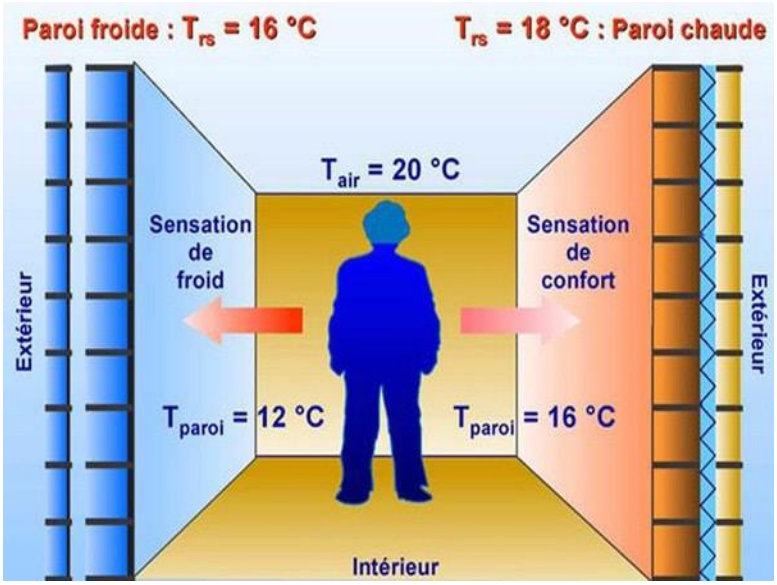


Figure I.11. Parois froides ou chaudes : impact sur la sensation de confort

C. Les mouvements d'air

Les mouvements d'air accentuent les échanges de chaleur par convection. Par exemple, quand la météo affiche une température réelle de 0°C, la température ressentie peut être de -7°C sous l'effet du vent. L'homme perçoit les mouvements d'air à partir d'une vitesse de 0.2m/s (0,7 km/h). Pour éviter ces flux d'air, on peut mettre en place une ventilation mécanique qui assure une vitesse de l'air assez faible. Cette vitesse est plus difficile à gérer dans le cas d'une ventilation naturelle [10].

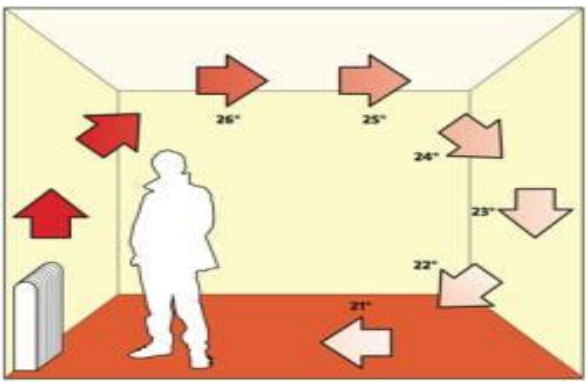


Figure I.12. Répartition des températures dans une pièce chauffée

D. L'occupant

En fonction de sa sensibilité, de son activité et de sa tenue, l'occupant va également avoir une influence sur le confort thermique. Plus l'occupant a une activité physique soutenue et plus il est habillé chaudement, plus la température de consigne pourra être faible. La sensibilité de chacun est également à prendre en compte [10].

I.5. Isolation thermique

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid [11].

L'isolation thermique est utilisée dans nombreux domaines notamment le bâtiment. La chaleur s'échappe d'une maison mal isolée selon un ratio de :

- 30% par les combles et toiture.
- 25% par les murs.
- 10-15% par les vitres et fenêtres.
- 7-10% par les sols.

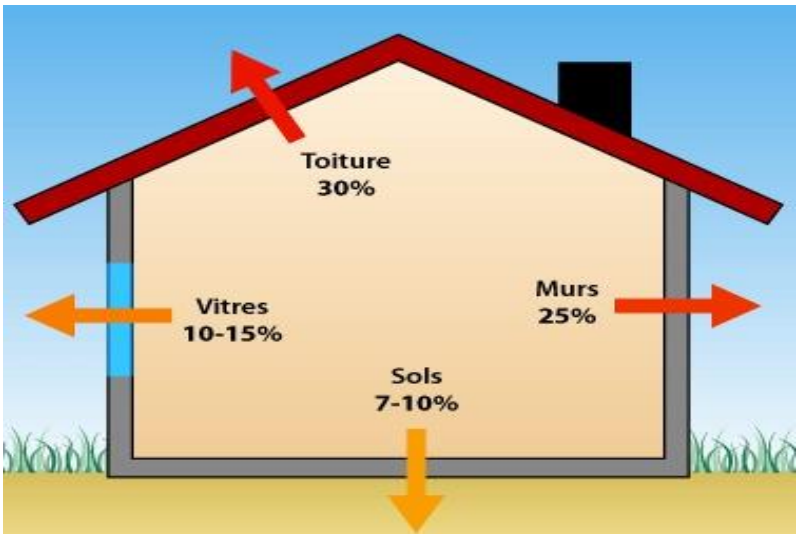


Figure I.13. Déperditions dans les locaux d'habitation [11]

Il y a deux façons de réaliser l'isolation de sa toiture, des combles ou encore des murs par l'intérieur ou par l'extérieur :

- L'isolation thermique par l'intérieur : est bien sûr la plus souvent choisie.
- Elle demande moins de travaux, elle coûte moins cher et peut être réalisé par vos soins si vous êtes bricoleurs et que vous avez déjà posé une isolation.
- Mais son inconvénient majeur est à prendre en considération : vous allez perdre en surface habitable.

- Il faut donc bien réfléchir avant d'opter pour ce type de pose.
- L'isolation thermique par l'extérieur : est beaucoup plus complexe à mettre en place et doit être réalisée par un professionnel.
- L'astuce est de profiter par exemple d'avoir à refaire votre façade pour en profiter pour isoler vos murs ou d'avoir des travaux de toiture prévus pour saisir l'occasion d'isoler vos combles [11].

I.7.1. Différents types d'isolants

Un isolant thermique se doit de répondre à toutes les exigences proposées par une architecture, un environnement donné et un confort de vie souhaité. Tous les isolants n'ont pas les mêmes propriétés, et certains sont mieux adaptés suivant les situations rencontrées.

a) La cellulose

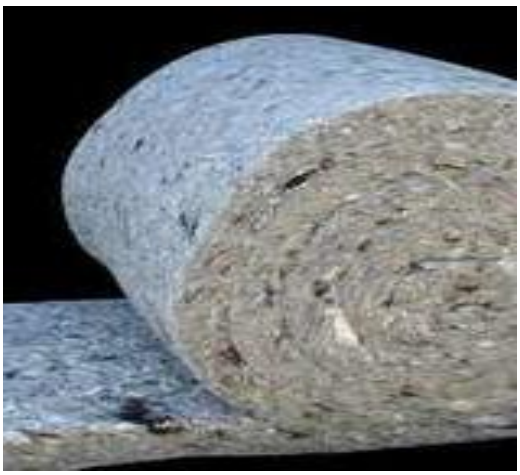


La cellulose provient du papier recyclé, qui lui-même vient du bois. Ce recyclage demande peu d'énergie. Le papier est broyé afin d'être défibré, puis floconné et enfin il est mélangé à du sel de bore afin de l'ignifuger et de le rendre résistant aux insectes [11].

Domaines d'utilisation

La ouate de cellulose sous forme de panneau ou en vrac, est utilisée comme isolant thermique des murs, planchers, combles perdus, rampants. Sa mise en œuvre est adaptée aussi bien pour des constructions traditionnelles que dans la construction neuve [11].

b) La laine de coton



Le coton est la plus importante fibre Végétale naturelle produite dans le monde.

Il représente la première fibre textile mondiale. Les vêtements usagés sont collectés par conteneurs, triés puis défibrés. Les fibres obtenues sont fixées par passage dans un fourà170°C. La laine de textile est généralement composée de 70 % de coton, de15%delaineetde15% de polyester.

La laine de coton est lavée, effilochée puis ignifugée et traitée contre les rongeurs, insectes et moisissures. Elle peut être mélangée à de la laine de mouton ou du Polyester pour servir de liant entre les fibres. Sa densité en fait un isolant thermique très Performant. De plus, il reste très économe en consommation d'eau et d'énergie lors de sa fabrication [11].

Domaines d'utilisation

Il est utilisé comme matériau d'isolation des combles, murs, rampants, des toitures et des planchers.

c) Le chanvre



Le chanvre est une plante annuelle d'origine végétale utilisée de puis près de 1000ans en France. Le chanvre est un matériau qui peut être mis en œuvre seul ou avec d'autres matériaux comme le lin, la chaux, le sable, la terre, le béton… La laine de chanvre est issue de la fibre contenue dans la tige.

La paille de chanvre est séchée et découpée, pour former des tranches de différentes tailles. Les fibres de chanvre sont ensuite défibrées mécaniquement, affinées, calibrées puis thermos liés avec d'autres fibres servant de liant. La cuisson en four à 1300°C permet aux fibres naturelles et synthétiques de se coller entre cloisons et plafonds [11].

Domaines d'utilisation

La laine de chanvre peut être utilisée comme isolant à part entière, en complément d'isolation ou bien pour l'isolation phonique uniquement. Dans la restauration des bâtiments anciens ou dans la construction neuve pour : l'isolation sous toiture, combles rampants et murs (rouleaux et panneaux), l'isolation des sols.

d) Le lin



Le lin est une plante naturelle souple et fine cultivée traditionnellement en plaine. C'est une plante originaire d'Orient et facilement renouvelable. Le lin est semé de la mi-mars à la mi-avril et sa durée de végétation est de 100 jours. Durant la moisson, le lin n'est pas coupé mais arraché puis séché in situ pendant 3 à 8 semaines : le rouissage. Les fibres de lin sont ensuite cardées, thermos liés puis aiguilletées afin de former des panneaux semi-rigides et Souples composés de 60% de fibres de lin et 40 % de fibres polyester [11].

Domaines d'utilisation

Il sert à la réalisation de cloisons, de doublages et de murs à ossature bois panneaux, d'isolant toiture et combles, de laine, de murs porteurs, de béton.

e) Le liège expansé



Le liège expansé ou « liège noir » est issu du chêne liège de méditerranée d'au moins 30 ans d'âge. Pour sa fabrication, seule l'écorce est utilisée. La récolte se fait tous les 7 ou 8 ans [11].

Une fois l'écorce du chêne liège récoltée, elle est réduite en granules. Ces dernières sont chauffées à300° C avec de la vapeur d'eau pour qu'elles se dilatent et s'agglomèrent entre elles Les granules de l'écorce du liège se collent alors grâce à l'action de leur propre résine (la subérine). Il est utilisé depuis plus de 150 ans en isolation thermique.

Domaines d'utilisation

Le liège expansé s'utilise aussi bien dans la construction neuve que dans la restauration de bâtiments traditionnels. On l'utilise pour les murs et les combles ainsi que pour l'isolation des sols, sous dalles, des planchers, des doubles cloisons. Pour les supports de couverture et pour les rampants, on utilise ra le liège expansé sous forme de panneau rigide [11]

f) La laine de bois

Le bois comme isolant se présente également sous différentes formes : laine de bois (panneau Semi-rigide, en vrac…), panneau de fibres de bois rigides ou encore des (fibres de bois avec enrobage de plâtre et ciment).



Les déchets des scieries sont la matière première du panneau de bois. Les fibres sont pressées et séchées pour donner des produits à fibres tendres ou dures. La fabrication se fait naturellement, produit ajouté. Ces panneaux peuvent être posés pour la toiture et les murs [11].

Domaines d'utilisation

Les panneaux de laine de bois s'utilisent dans la restauration des bâtiments traditionnels et dans les constructions neuves : pour l'isolation des murs par l'intérieur ou l'extérieur, des plafonds, des combles et des planchers [11].

g) Le liège expansé



Le liège expansé ou « liège noir » est issu du chêne liège de méditerranée d'au moins 30 ans d'âge. Pour sa fabrication, seule l'écorce est utilisée. La récolte se fait tous les 7 ou 8 ans.

Une fois l'écorce du chêne liège récoltée, elle est réduite en granules. Ces dernières sont chauffées à300° C avec de la vapeur d'eau pour qu'elles se dilatent et s'agglomèrent entre elles Les granules de l'écorce du liège se collent alors grâce à l'action de leur propre résine (la subérine). Il est utilisé depuis plus de 150 ans en isolation thermique [11].

Domaines d'utilisation

Le liège expansé s'utilise aussi bien dans la construction neuve que dans la restauration de bâtiments traditionnels. On l'utilise pour les murs et les combles ainsi que pour l'isolation des sols, sous dalles, des planchers, des doubles cloisons. Pour les supports de couverture et pour les rampants, on utilise ra le liège expansé sous forme de panneau rigide [11].

h) Laine de mouton



La Laine de mouton est un matériau naturel transformé, reconnu pour ses propriétés isolantes, tant sur le plan thermique que phonique. Elle est issue de la laine de moutons d'élevage, dont la qualité est supérieure à celle des moutons sauvages, en raison de la longueur plus importante de leurs fibres. Après la tonte, la laine est soigneusement lavée pour éliminer les impuretés, puis elle est triée, cardée (démêlée), et façonnée sous forme de matelas.

L'isolant en laine de mouton est généralement composé de 80 % de fibres de laine et de 20 % de fibres de polyester thermofusibles, notamment lorsqu'il est présenté sous forme de panneaux ou de rouleaux [11].

Domaines d'utilisation

La laine de mouton est utilisée aussi bien dans la rénovation de bâtiments anciens que dans les constructions neuves. Elle se présente sous différentes formes selon usage :

- En panneaux semi-rigides pour assurer l'isolation acoustique des sous-planchers.
- En rouleaux pour isoler les combles, les rampants de toiture ou encore les parois verticales.
- En vrac, soufflée à l'aide d'une souffleuse-cardeuse, pour l'isolation des combles et des espaces creux dans la construction.

i) Laine de plume de canards



Issu de matières animales, l'isolant à base de plumes de canard est reconnu pour ses propriétés thermiques. Il est composé majoritairement de plumes (70 %), auxquelles s'ajoutent 20 % de fibres polyester thermofusibles,10 % de laine de mouton. Les plumes sont d'abord soigneusement lavées, dégraissées, puis traitées contre les champignons et les mites.

La laine de mouton, également nettoyée, dégraissée et débarrassée de ses éléments organiques, est ajouté à la composition, l'ensemble est ensuite lavé et séché. Les fibres de polyester thermofusibles permettent l'assemblage des différents composants : sous l'effet de la chaleur, elles assurent le liage des fibres entre elles [11].

Domaines d'utilisation

La laine de plumes de canard est employée aussi bien dans les constructions neuves que dans la rénovation de bâtiments anciens.

Elle convient à différents types d'ouvrages, notamment l'isolation des combles non habitables, posée directement sur le plancher, l'isolation des dalles ou entre les solives, l'isolation des plafonds, des murs et des sols, les habitations à ossature bois.

j) La laine de roche



La laine de roche est fabriquée à partir de la roche diabase, fondue puis transformée en fibres. Ces fibres sont ensuite assemblées à l'aide de résines synthétiques polymérisées pour former des rouleaux ou des panneaux, disponibles en plusieurs degrés de rigidité et avec

différentes finitions de surface. Sa composition est hétérogène, ce qui peut varier selon le procédé de fabrication [11].

Domaines d'utilisation

La laine de roche est une isolation utilisée dans de nombreux éléments de construction, tels que les murs et cloisons, les toitures, combles perdus ou aménagés, les planchers, les cheminées, les bardages, les gaines techniques [11].

k) La laine de verre



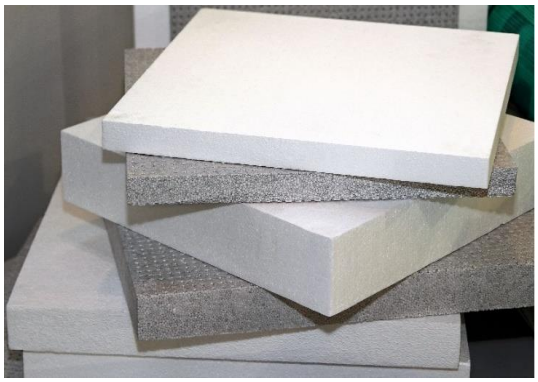
La laine de verre est fabriquée à partir de la fusion de verre recyclé et de sable quartzeux. Les fibres obtenues sont ensuite traitées avec un agent hydrofuge, puis assemblées à l'aide d'un liant thermodurcissable pour former des rouleaux ou des panneaux.

Ces produits se déclinent en plusieurs niveaux de rigidité et avec diverses finitions de surface. Contrairement à la laine de roche, la laine de verre présente une composition homogène.

Domaines d'utilisation

La laine de verre st employée pour l'isolation des murs, des cloisons, des toitures, des combles perdus ou aménagés, ainsi que des planchers [11].

l) Le polystyrène expansé



Le polystyrène expansé est produit en faisant gonfler du styrène, un hydrocarbure, à la vapeur d'eau, ce qui lui donne une structure à pores ouverts.

En revanche, le polystyrène extrudé est traité avec un agent gonflant sous pression, ce qui crée une structure à pores fermés. Ce matériau se décline sous plusieurs formes : en vrac, en panneaux ou en éléments préfabriqués [12].

Domaines d'utilisation

Les panneaux de polystyrène utilisés pour les toitures plates sont recouverts sur les deux faces d'un revêtement synthétique ou d'un voile de verre bitumé. Ce traitement facilite leur liaison avec les couches inférieures et supérieures du système de toiture [13].

m) Polystyrène extrudé



Fabriqué de manière similaire au polystyrène expansé, le polystyrène extrudé est un matériau léger, il peut servir de support pour la faïence lorsqu'il est renforcé par une armature en fibre de verre. De plus, il offre d'excellentes performances en isolation thermique [12].

Domaines d'utilisation

Présenté sous forme de panneaux de couleur bleue, le polystyrène extrudé est principalement utilisé pour l'isolation des toitures plates et des sols [13].

n) Le polyuréthane



Le polyuréthane est un isolant synthétique constitué de cellules alvéolaires issues d'une réaction chimique. Sous forme rigide, il est utilisé en panneaux, qui peuvent être nus ou revêtus de bitume ou d'aluminium pour l'isolation des bâtiments.

Il peut également être appliqué sous forme de mousse, par remplissage ou injection directe. Grâce à sa polyvalence, cette forme est particulièrement adaptée à la rénovation de bâtiments anciens [12].

Domaines d'utilisation

Sous forme de panneaux, le polyuréthane est utilisé pour l'isolation des chapes et l'isolation thermique par l'extérieur. Lorsqu'il est appliqué en mousse, il sert également à calfeutrer les joints ou à isoler les tuyaux à l'aide de manchons [13].

CHAPITRE II

Modélisation du bâtiment d'étude

II.1. Paramètres Géographiques

Dar El Beida est une commune située à l'est de la capitale Alger, en Algérie. Intégrée à la wilaya d'Alger, elle constitue un pôle urbain, administratif et industriel important dans la région.

Sur le plan géographique, Dar El Beida se trouve à environ 15 kilomètres à l'est du centre-ville d'Alger, dans la plaine fertile de la Mitidja, encadrée par les montagnes du Tell au sud et la mer Méditerranée au nord.

La commune est délimitée :

- à l'ouest par Bordj El Kiffan (anciennement Le Château d'Eau),
- au nord par la mer Méditerranée,
- à l'est par Aïn Taya et La Marsa,
- au sud par Bab Ezzouar et Oued Smar.

Informations générales

- Superficie : Environ 32 km²
- Altitude : Entre 20 m et 50 m au-dessus du niveau de la mer
- Coordonnées géographiques :
  - Latitude : 36,713° Nord
  - Longitude : 3,213° Est
- Zone climatique : A

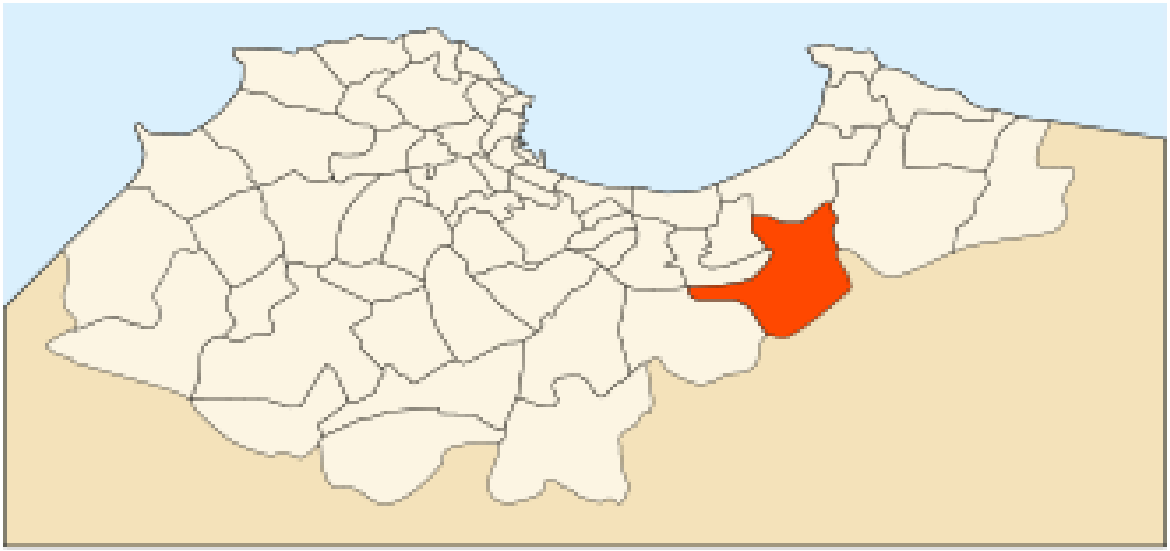


Figure II.1. Localisation géographique de la commune de Dar El Beida dans la wilaya d'Alger

II.2. Paramètres Géométriques

Le bâtiment étudié est une maison individuelle d'une surface habitable de 115 m² et d'un périmètre de 43 mètres. Il se compose de trois chambres, une cuisine, un salon, un hall, et une salle de bain, avec une hauteur sous plafond de 3 mètres.

La figure ci-dessous présente le plan architectural de cette habitation.

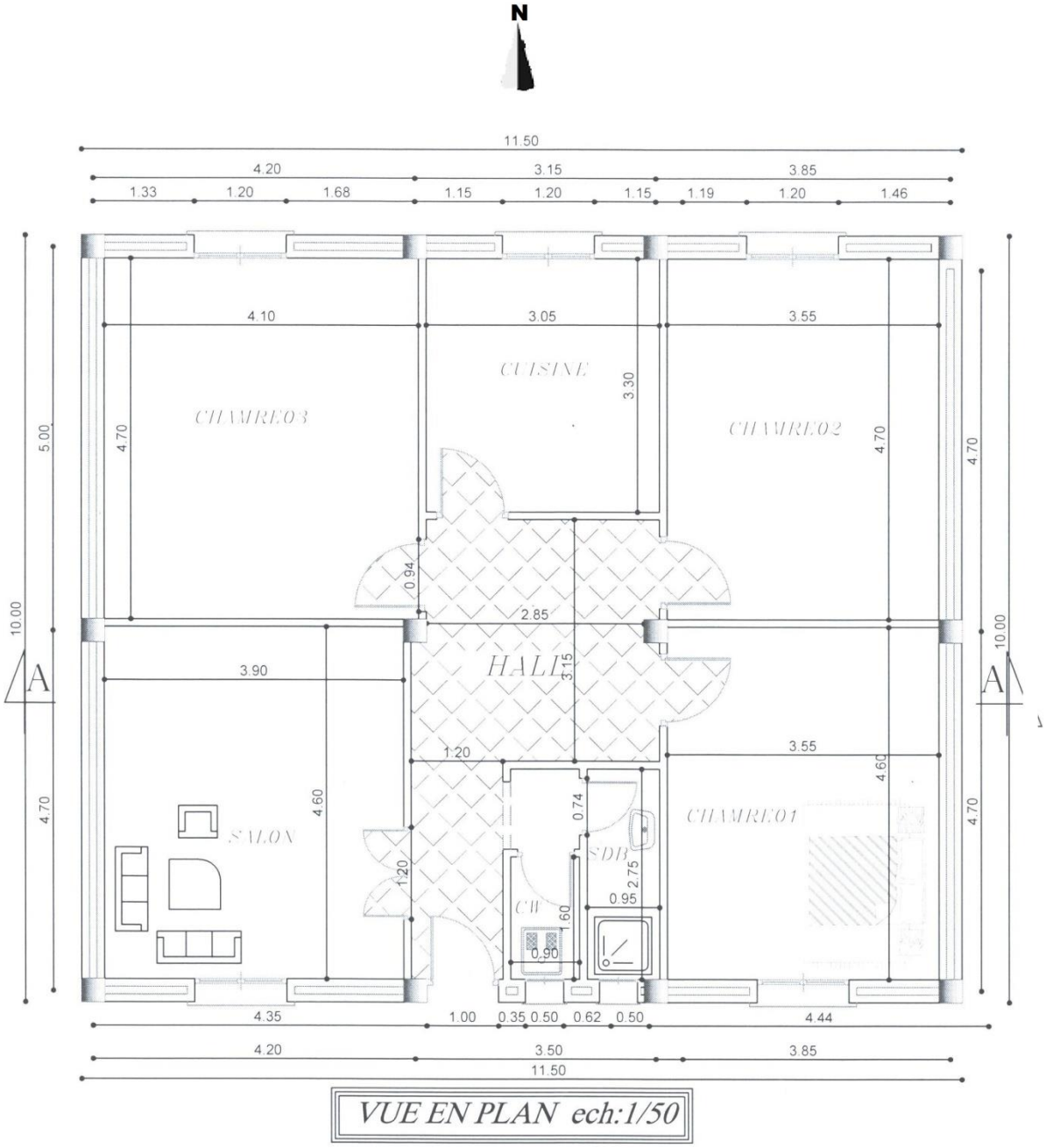


Figure II.2. Plan architectural de la maison individuelle utilisée pour la simulation énergétique

Le tableau ci-après synthétise les paramètres géométriques essentiels du bâtiment étudié.

N°	Locaux	S_L [m^2]	V_L [m^3]	S_M[m^2]				S_V[m^2]				S_P [m^2]
				N	S	O	E	N	S	O	E	
01	Chambre1	16,33	48,99	10,65	8,85	11,732	13,8	/	1,8	/	/	2,068
02	Chambre2	16,685	50,055	8,95	10,65	12,032	14,1	1,8	/	/	/	2,068
03	Chambre3	19,27	57,81	10,5	12,3	12,032	14,1	1,8	/	/	/	2,068
04	Cuisine	10,065	30,195	7,35	7,082	9,9	9,9	1,8	/	/	/	2,068
05	Salon	17,94	53,82	11,7	9,9	13,8	11,16	/	1,8	/	/	2,64
06	SDB	2,6125	7,8375	2,85	2,6	5,31	8,25	/	0,25	/	/	1,628
07	WC	1,44	4,32	1,072	2,45	4,8	4,8	/	0 ,25	/	/	1,628
08	Hall	12,4575	37,3725	6,482	1,4	13,142	11,946	/	/	/	/	2,2

Tableau II.1. Paramètres géométriques principaux du bâtiment étudié

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.3. Paramètres Climatiques

II.3.1. Paramètres Climatiques externes

Dar El Beida bénéficie d'un climat méditerranéen, avec :

- des étés chauds et secs, où les températures varient généralement entre 28°C et 35°C,
- des hivers doux, avec des températures comprises entre 8°C et 17°C,
- Une humidité modérée a élevée, accentuée par la proximité de la mer.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes mensuelles des paramètres météorologiques de la commune de Dar El Beïda, incluant l'irradiation solaire, la température de l'air, l'humidité relative ainsi que la vitesse du vent.

Mois	Gh	Bn	Dh	Ta	Td	RH	FF
	[W/m2]	[W/m2]	[W/m2]	[°C]	[°C]	[%]	[m/s]
Janvier	78	90	41	11.7	6.6	71	2.4
Février	113	104	66	13.3	6.8	64	2.5
Mars	151	114	83	14.0	9.0	72	2.7
Avril	203	158	102	16.3	10.7	69	3.0
Mai	238	175	120	17.8	13.7	77	3.0
Juin	274	210	128	22.0	16.2	70	3.1
Juillet	272	201	130	25.8	19.0	66	3.1
Août	235	171	116	25.3	19.4	70	2.9
Septembre	194	152	101	23.2	17.5	70	2.8
Octobre	137	123	72	19.1	14.9	77	2.3
Novembre	89	89	49	14.6	10.2	75	2.5
Décembre	77	107	35	11.9	7.8	76	2.6
Année	172	141	87	17.9	12.6	71	2.7

Tableau II.2. Données climatiques mensuelles de la commune de Dar El Beïda

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]

RH : Humidité relative [%]

FF : Vitesse du vent [m/s]

Le graphique ci-dessous représente l'évolution mensuelle des températures de la commune de Dar El Beïda, exprimée en degrés Celsius (°C), sous forme de diagramme en boîte. Ce type de représentation permet de visualiser la distribution statistique des températures mensuelles, incluant les valeurs minimales, maximales et médianes.

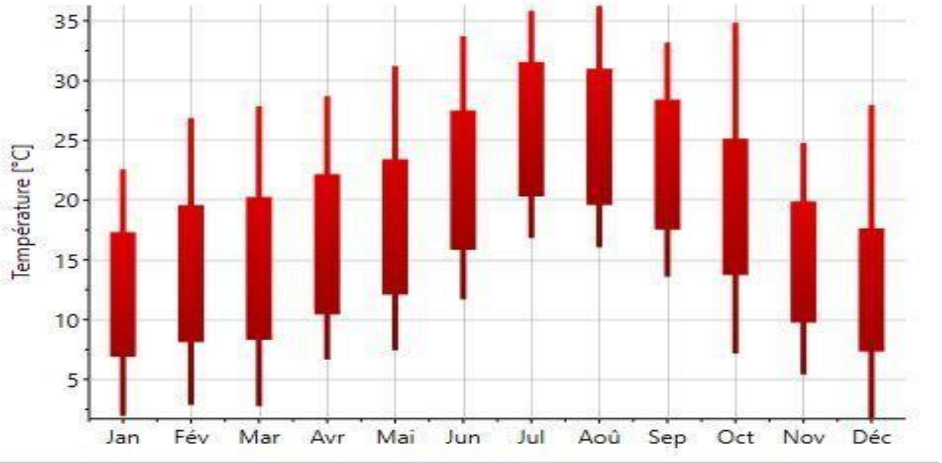


Figure II.3. Variation mensuelle des températures à Dar El Beïda

Cette analyse thermique mensuelle est essentielle dans le cadre d'une simulation énergétique, car elle permet de déterminer avec précision les périodes critiques de consommation énergétique liées à la climatisation et au chauffage, et d'optimiser les stratégies de gestion thermique passive et active du bâtiment.

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

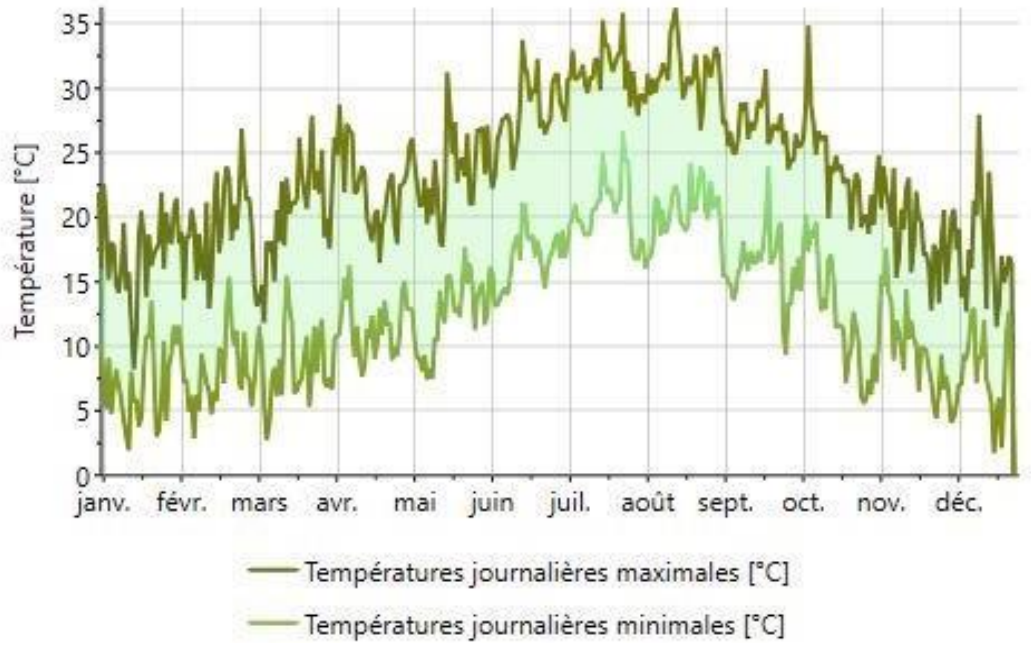


Figure II.4. Variation des températures extrêmes journalières à Dar El Beïda

Ce type de représentation est crucial pour le paramétrage des simulations énergétique, notamment pour :

- La détermination des profils de charge thermique journalière.
- L'optimisation du dimensionnement des systèmes de CVC (chauffage, ventilation et climatisation).
- La planification des stratégies d'isolation et de protection solaire.

II.3.2. 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.3. Paramètres Thermiques

- **Mur extérieur sans isolation**

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	0.01	1.38	0.01		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Brique	0.1	0.88	0.11		
Lame d'air	0.1	0.09	1.11	1.51 / 1.54	0.66 / 0.65
Brique	0.1	0.88	0.11		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Enduit en Plâtre	0.01	1.38	0.01		
Air intérieur	-	-	0.10/0.11		

Tableau II.3. Caractéristiques de construction des murs extérieurs sans isolation

- **Mur extérieur avec isolation**

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	0.01	1.38	0.01		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Brique	0.1	0.88	0.11	1.62 → 6.50	0.62 → 0.154
Laine de roche	0.05 → 0.25	0.041	1.22 → 6.1	/	/
Brique	0.1	0.88	0.11	1.65 → 6.53	0.61 → 0.153
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Enduit en Plâtre	0.01	1.38	0.01		
Air intérieur	-	-	0.10/0.11		

Tableau II.4. Caractéristiques de construction des murs extérieurs avec isolation

- **Mur intérieur**

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	0.01	1.38	0.01		
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Brique	0.1	0.88	0.11	0.35 / 0.37	2.86 / 2.70
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.01		
Enduit en Plâtre	0.01	1.38	0.01		
Air intérieur	-	-	0.10 / 0.11		

Tableau II.5. Caractéristiques de construction des murs intérieurs

- **Plancher sans isolation**

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
Sol	0.005	0.06	0.083		
Pierre	0.06	1.38	0.043		
Béton lourd	0.15	1.69	0.089		
Sable	0.05	1.99	0.025	0.336 / 0.426	2.98 / 2.35
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.010		
Carrelage	0.01	1.7	0.006		
Air intérieur	-	-	0.08 / 0.17		

Tableau II.6. Caractéristiques de construction du plancher sans isolation

- **Plancher avec isolation**

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
Sol	0.005	0.06	0.083		
Pierre	0.06	1.38	0.043		
Béton lourd	0.15	1.69	0.089		
Sable	0.05	1.99	0.025	1.556 → 10.092	0,643 → 0,099
Laine de roche	0.05 → 0.40	0.041	1.22 → 9.76	/	/
Mortier en ciment	0.02	2.1	0.010	1.646 → 10.182	0,608 → 0,098
Carrelage	0.01	1.7	0.006		
Air intérieur	-	-	0.08 / 0.17		

Tableau II.7. Caractéristiques de construction du plancher avec isolation

- **Toiture sans isolation**

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		
Forme de pente en béton	0.05	1.04	0.048	1.024 / 0.964	0.976 / 1.037
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		

Tableau II.8. Caractéristiques de construction de la toiture sans isolation

- **Toiture avec isolation**

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		
Forme de pente en béton	0.05	1.04	0.048	1.911 → 10.451 / 1.851 → 10.391	0.523 → 0.096 / 0.540 → 0.096
Béton armé	0.1	1.69	0.059		
Hourdis	0.2	1.32	0.152		
Laine de roche	0.05 → 0.4	0.041	1.22 → 9.76		
Placo BA23	0.023	0.32	0.072		
Air intérieur	-	-	0.04 / 0.05		

Tableau II.9. Caractéristiques de construction de la toiture avec isolation

- **Vitrage et portes**

Type	K [W/m². °C]
Simple vitrage	5.68
Double vitrage	1.4
Portes extérieur	5.8
Portes intérieur	3.5

Tableau II.10. Caractéristiques de construction des vitres et des porte

CHAPITRE III

OUTIL DE SIMULATION ET METHODOLOGIE ADOPTEE

III.1. Présentation de programme utilisé

III.1.1. Définition TRNSYS :(Transient System Simulation)

TRNSYS est un environnement de simulation complet et évolutif pour la simulation transitoire de systèmes, y compris les bâtiments multizones. Il est utilisé par les ingénieurs et les chercheurs du monde entier pour valider de nouveaux concepts énergétiques, depuis les simples systèmes de chauffage de l'eau domestique jusqu'à la conception et la simulation de bâtiments et de leurs équipements, y compris les stratégies de contrôle, le comportement des occupants, les systèmes d'énergie renouvelable (éoliennes, solaires, photovoltaïques, systèmes à hydrogène), et plus encore.

L'interface ouverte et facile à utiliser de TRNSYS a été un facteur clé de son succès au cours des 25 dernières années. Cela simplifie l'extension des modèles existants pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs.

L'architecture basée sur DLL permet aux utilisateurs et aux développeurs externes d'ajouter facilement des modèles de composants personnalisés, en utilisant tous les langages de programmation courants (C, C++, PASCAL, FORTRAN, etc.). De plus, TRNSYS peut être facilement interfacé avec de nombreuses autres applications, soit pour le pré- ou le post-traitement, soit via des appels interactifs pendant la simulation (par exemple, Microsoft Excel, Matlab, COMIS, etc.) [14].

Les applications TRNSYS incluent :

- Systèmes d'énergie solaire (solaire thermique et photovoltaïque).
- Bâtiments à faible consommation d'énergie et systèmes CVC avec des caractéristiques de conception avancées (ventilation naturelle, chauffage/refroidissement des dalles, doubles façades, etc.).
- Systèmes d'énergie renouvelable.
- Cogénération, piles à combustible.
- Tout ce qui nécessite une simulation dynamique.

III.1.2. Avantages du logiciel TRNSYS

- Il s'agit d'un programme simple permettant de modéliser une gamme de systèmes thermiques à différents niveaux et conditions de complexité.
- L'accès à la source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants non inclus dans la bibliothèque d'origine.

- Documentation complète pour les sous-routines, y compris les explications, les utilisations courantes et les équations de base.
- Définition très flexible de la période de simulation : choisissez le pas de temps, le début et la fin de la simulation [14].

III.1.3. Inconvénient du logiciel TRNSYS

- Courbe d'apprentissage requise : l'utilisation de TRNSYS nécessite une courbe d'apprentissage pour maîtriser les fonctionnalités du logiciel et utiliser efficacement tous ses composants.
- Temps de simulation : la simulation de systèmes électriques complexes peut nécessiter des ressources informatiques importantes et prendre beaucoup de temps, en particulier pour les périodes de simulation prolongées.
- Coût : TRNSYS est un logiciel commercial et son acquisition peut représenter un investissement financier pour les utilisateurs.
- Besoin de données précises : Il est essentiel d'obtenir des données précises sur les composants du système, les conditions environnementales et les charges électriques, ce qui peut nécessiter des efforts supplémentaires pour collecter et intégrer ces données [15].

III.1.4. La suite TRNSYS

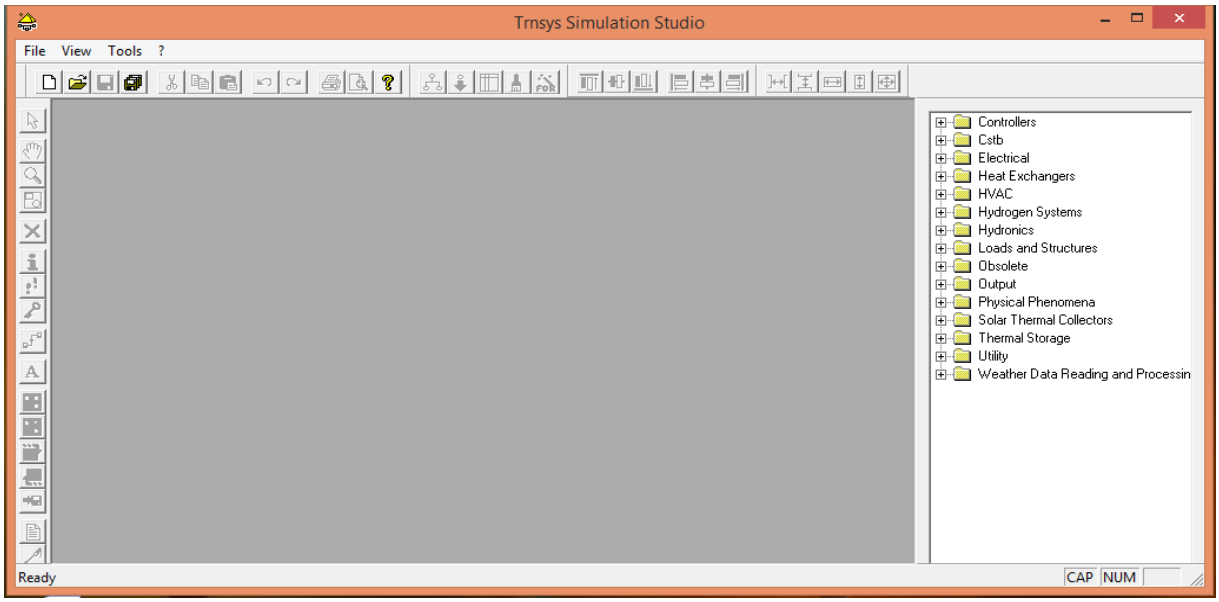
TRNSYS se compose d'une suite de programmes : le studio de simulation TRNSYS, le moteur de simulation (TRNDll.dll) et son exécutable (TRNExe.exe), l'interface visuelle de saisie des données de construction (TRNBuild.exe) et l'éditeur permettant de créer des programmes redistribuables autonomes appelés applications TRNSED (TRNEdit.exe) [14].

III.2. Les Étapes De Simulation

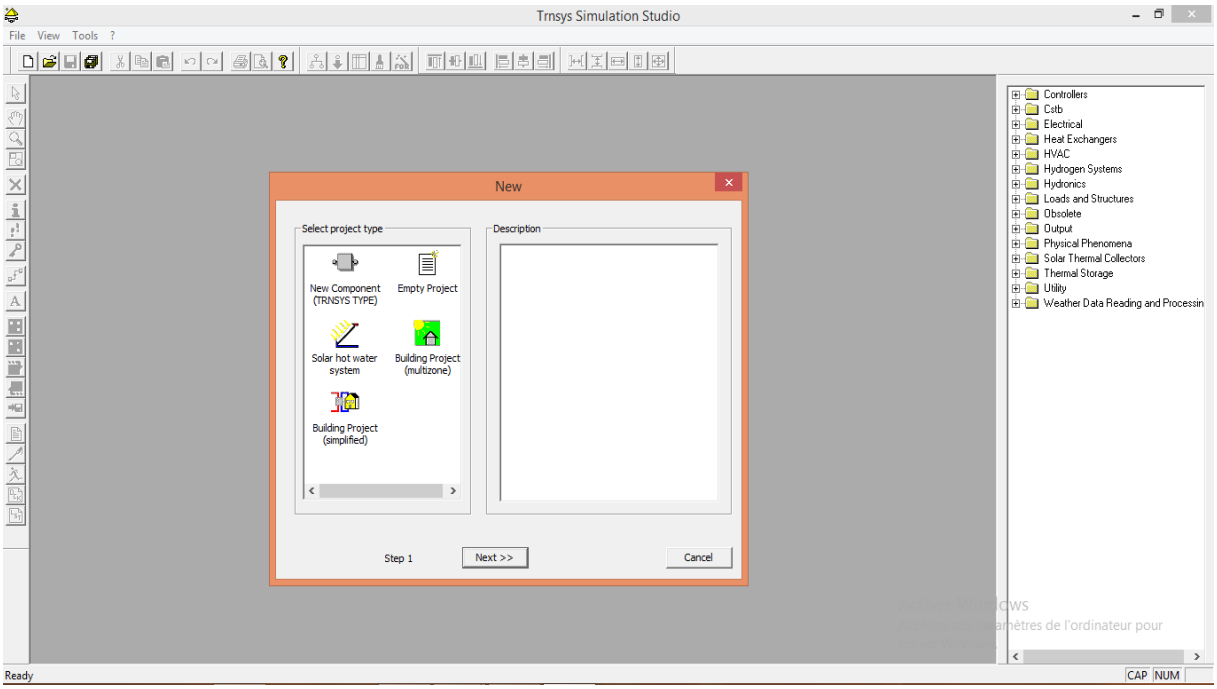
Nous allons décrire dans ce qui suit les différentes étapes de simulation :

1ère étape : Lancement du programme et création du projet

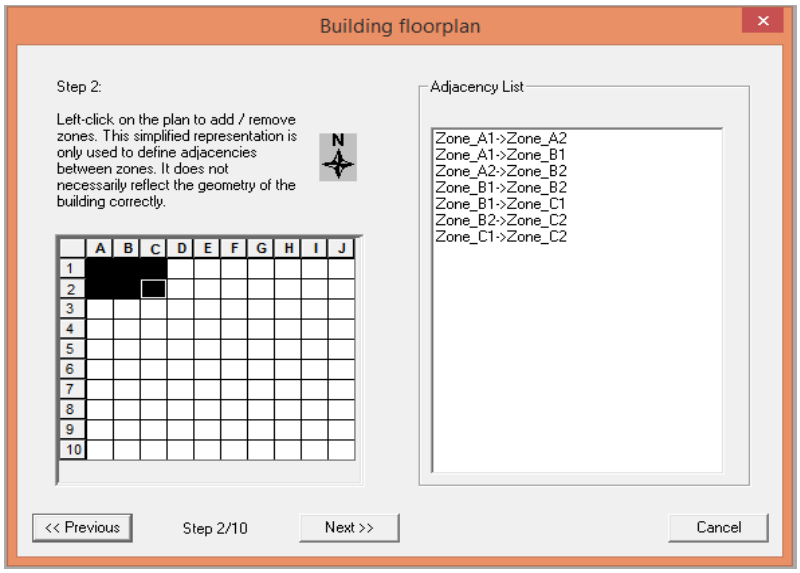
Pour démarrer le processus de simulation de bâtiment dans TRNSYS, nous ouvrons une nouvelle fenêtre, « file / New ».



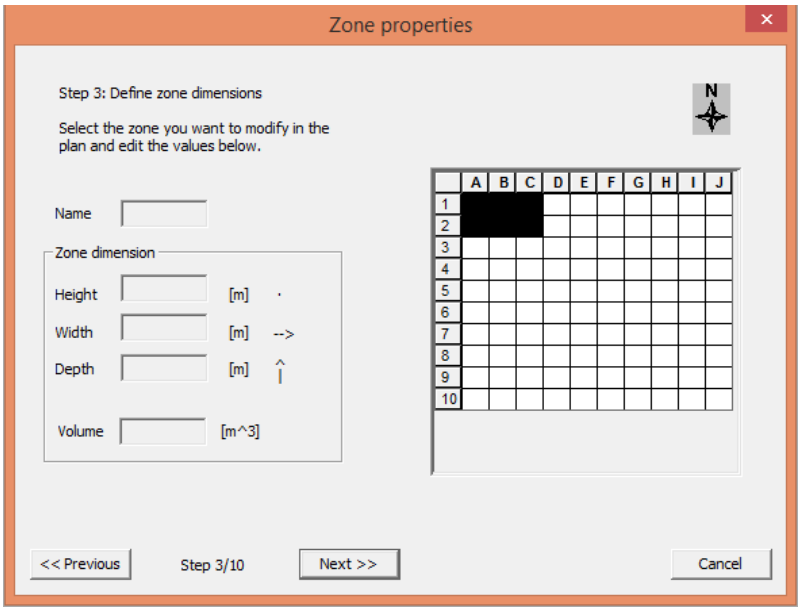
Ensuite, nous devons choisir le type de projet que nous souhaitons modéliser. Dans notre cas, on s'intéresse a simuler un bâtiment à plusieurs zones thermiques (Building Project multizone).



L'étape suivante permet de créer une configuration simplifiée de zones thermiques pour un bâtiment multizone



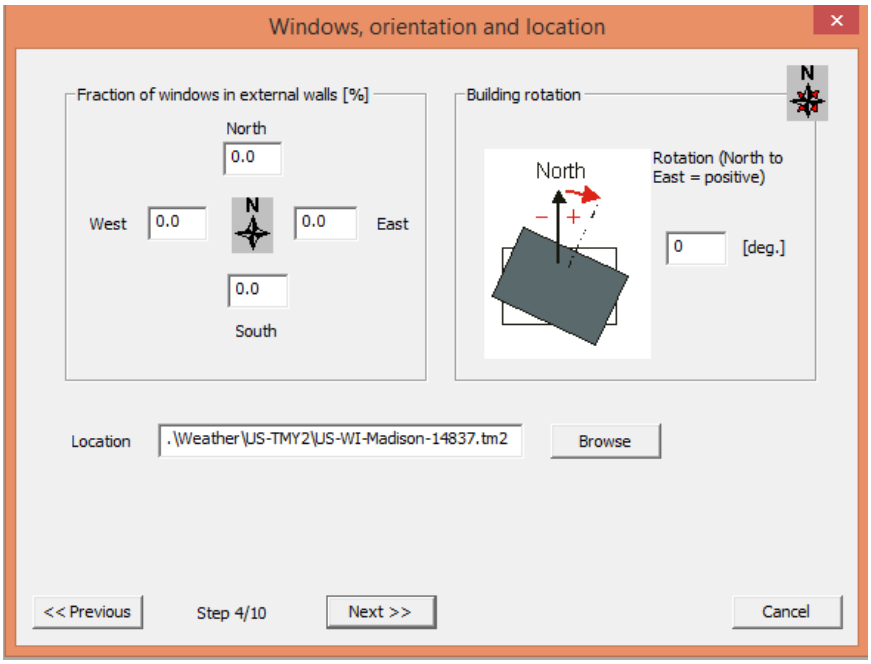
Après cela, nous définissons les dimensions géométriques de chaque zone (hauteur, largeur, profondeur) afin de calculer automatiquement sa surface et son volume, ce qui est essentiel pour la simulation du bilan thermique.



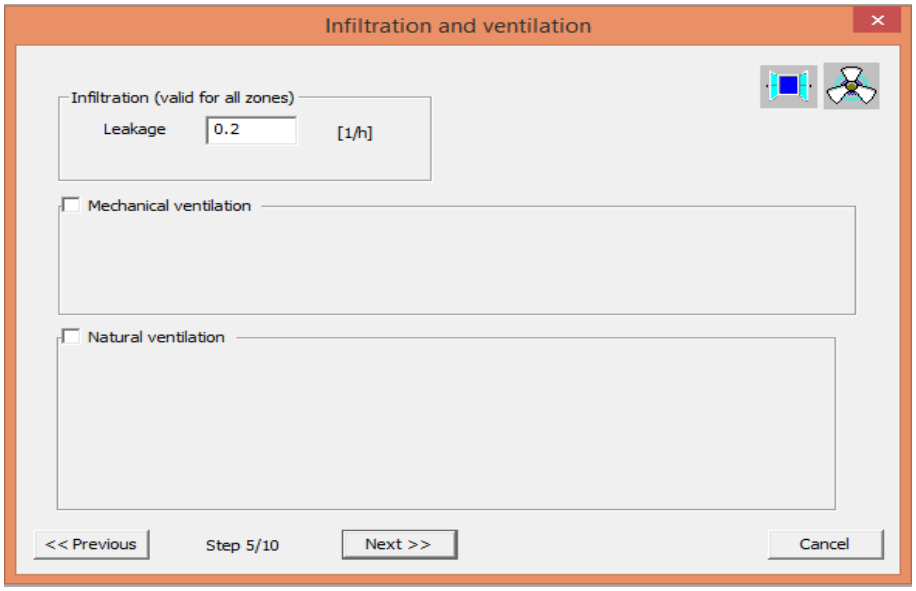
La prochaine étape contient une configuration de :

- La proportion de fenêtres sur chaque façade (Nord, Sud, Est, Ouest)
- L'orientation du bâtiment (rotation par rapport au Nord géographique)
- La localisation climatique (fichier météo pour la simulation énergétique)

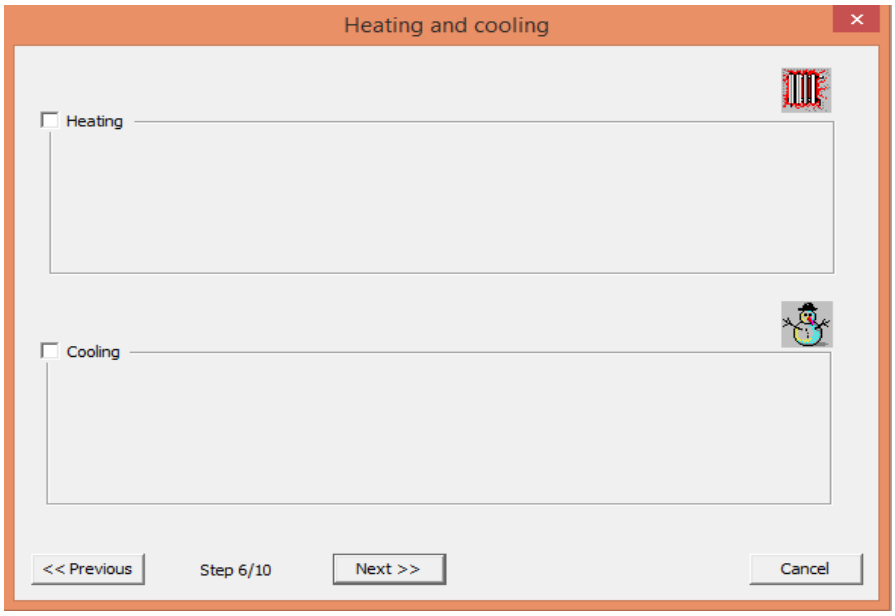
Nous tenons à mentionner que le fichier météorologique de la ville "Dar el Beïda " est utilisé pour simuler le comportement thermique de notre bâtiment. Ce fichier contient généralement des données climatiques horaires sur l'ensemble de l'année (soit 8 760 heures), incluant la température extérieure, l'humidité relative, le rayonnement global et direct, ainsi que la vitesse, la direction du vent et la pression atmosphérique.



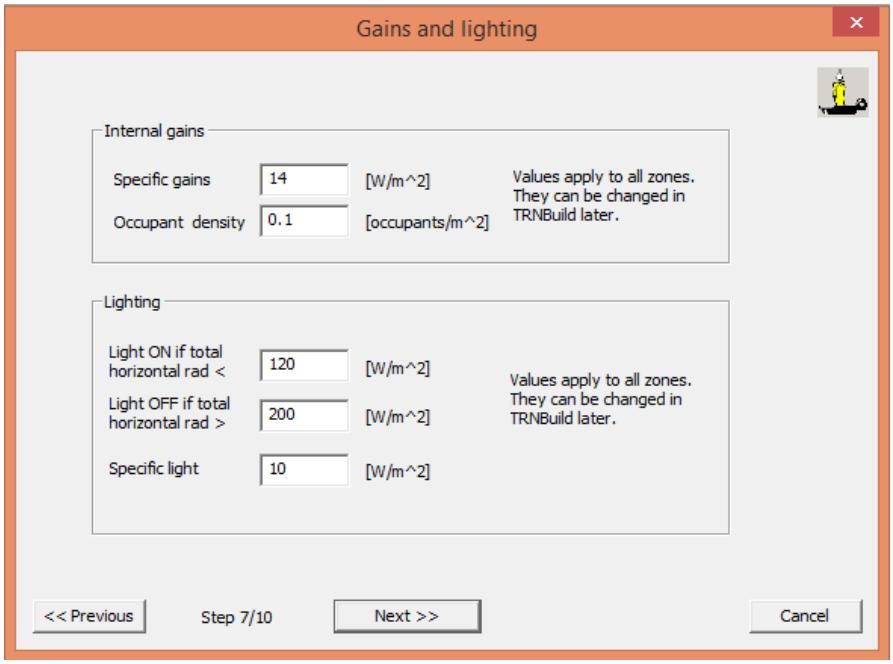
Ici, nous établissons un taux d'infiltration d'air de 0.2 [1/h] signifie que 20 % du volume d'air intérieur est remplacé par de l'air extérieur chaque heure à cause de fuites non contrôlées (portes, fenêtres mal isolées, fissures…). La zone pour définir un système de ventilation mécanique contrôlée (VMC), non remplie ici.



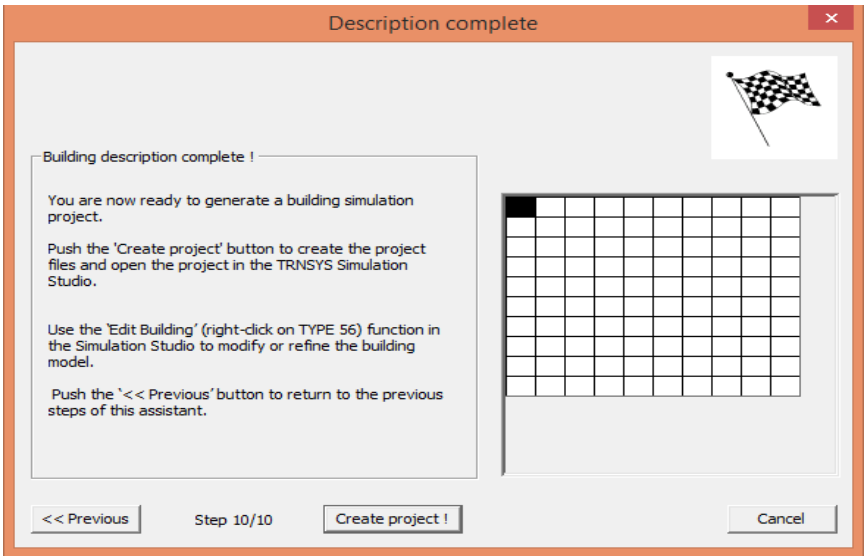
Cette étape permet d'ajouter les systèmes de chauffage et de climatisation utilisés dans votre simulation. Elle est également désactivée pour l'instant, et nous pouvons les réactiver plus tard.



Des données relatives aux gains internes, représentant la chaleur dégagée à l'intérieur du bâtiment par les occupants, les équipements ou l'éclairage, peuvent être ajoutées. Ces valeurs s'appliquent par défaut à toutes les zones du bâtiment, mais peuvent être modifiées ultérieurement dans TRNBuild afin de permettre une modélisation plus précise pour chaque zone.

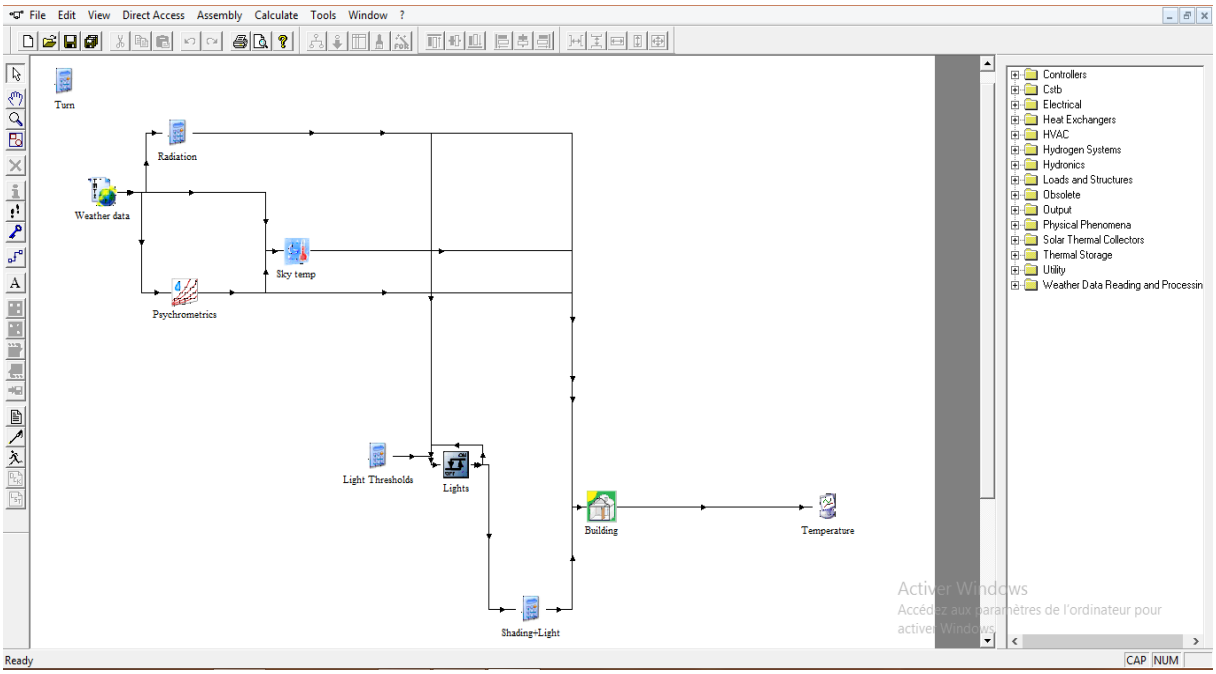


Cette fenêtre indique l'achèvement de l'assistant de configuration utilisé dans TRNBuild pour définir la description de notre bâtiment.



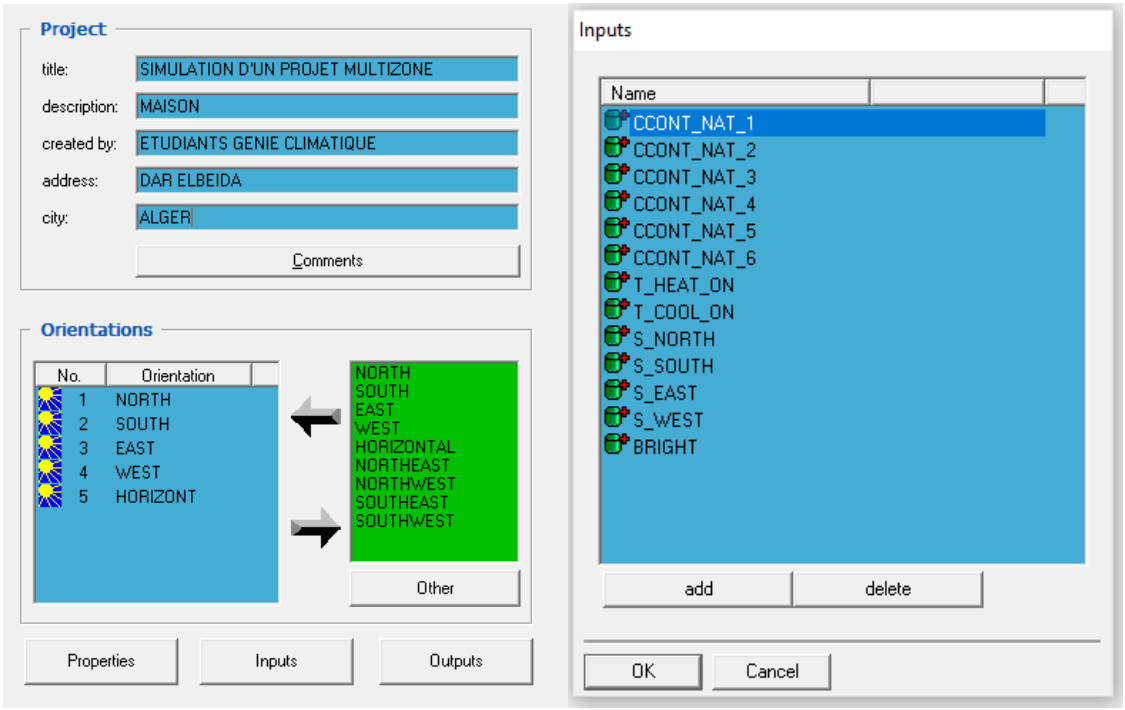
2ème étape: TRNbuild

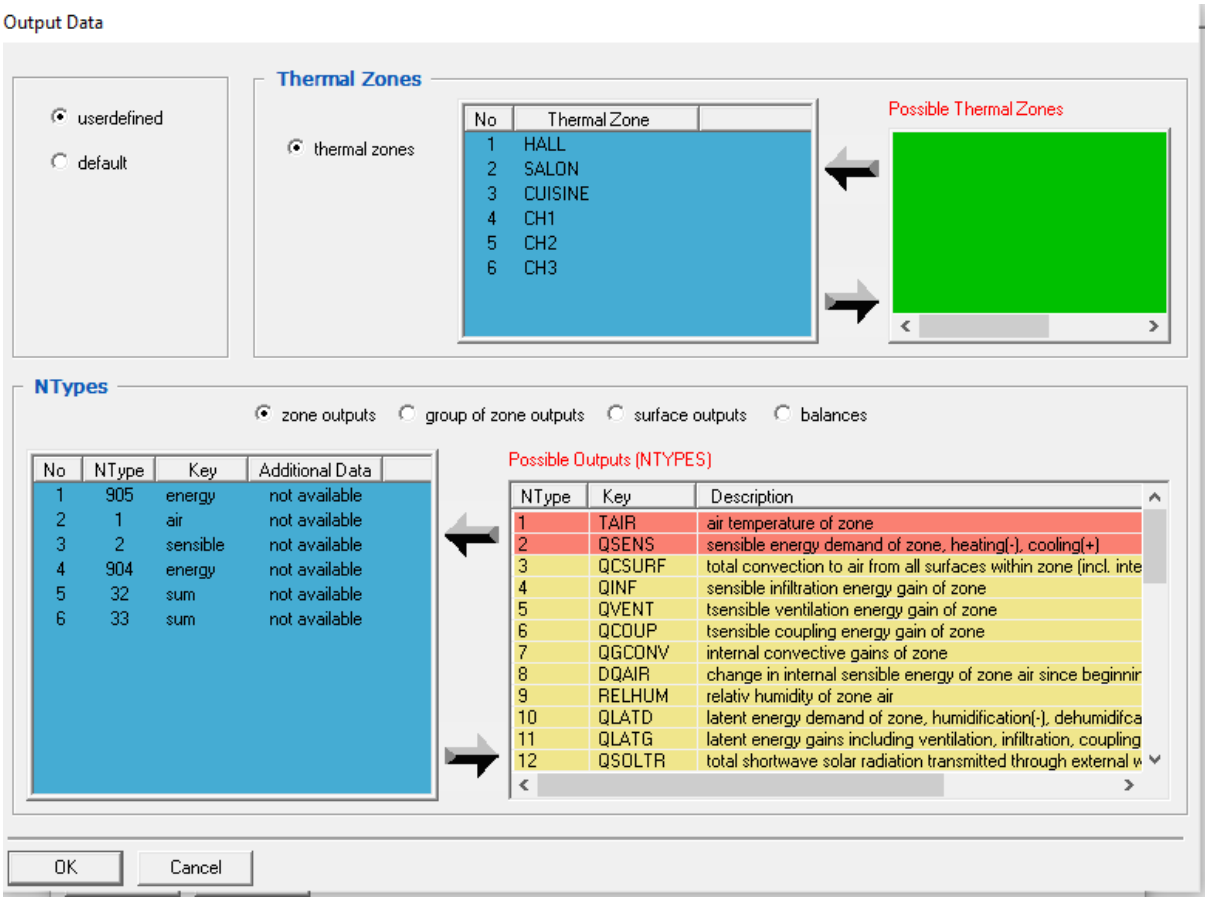
Le schéma ci-dessous représente l'assemblage de notre projet de simulation thermique dans **TRNSYS Simulation Studio**. Il comprend plusieurs composants interconnectés, chacun jouant un rôle spécifique dans la modélisation du comportement thermique du bâtiment.





Dans la fenêtre « Project », nous avons saisi quelques informations générales sur le projet, défini les ORIENTATIONS des murs requises par le bâtiment décrit, précisé certaines propriétés matérielles de base, visualisé la liste des ENTRÉES requises pour le TYPE 56 et sélectionné les SORTIES souhaitées de ce même TYPE 56.





La fenêtre ZONE contient toutes les informations décrivant une zone thermique du bâtiment, comme illustré à la figure ci-dessous.

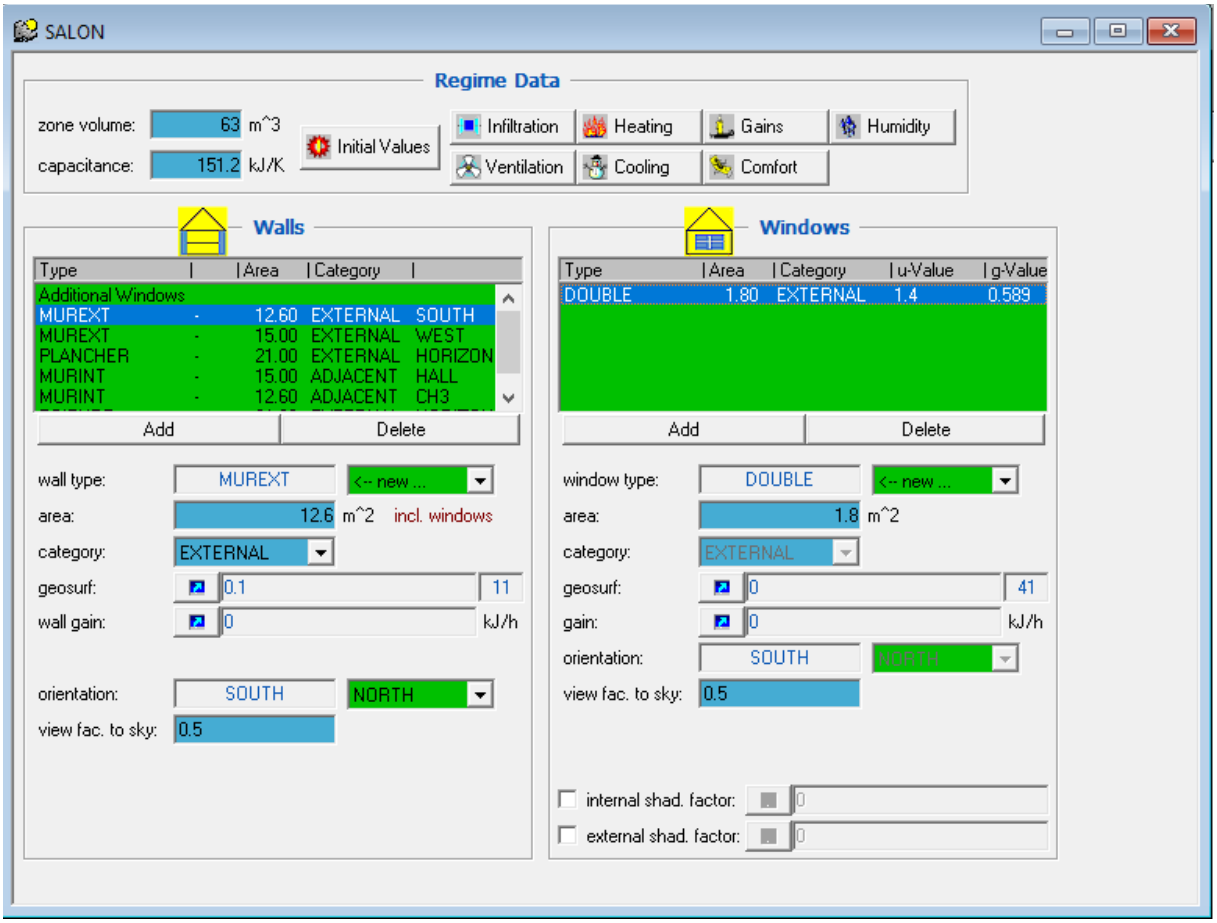
Les données décrivant une zone peuvent être divisées en quatre parties principales :

a) les DONNÉES DE RÉGIME requises,

b) les PAROIS de la zone,

c) les FENÊTRES de la zone et

d) les données des équipements optionnels et leurs spécifications de fonctionnement, notamment l'INFILTRATION, la VENTILATION, le REFROIDISSEMENT, le CHAUFFAGE, les GAINS et le CONFORT.



Les figures ci-dessous présentent respectivement les différentes couches constitutives des murs intérieurs, des murs extérieurs, du plancher et de la toiture.

Il convient de préciser que, dans le cadre de l'application de l'isolation, les matériaux isolants ont été intégrés en substitution de la couche « lame d'air » initialement prévue dans la composition des parois.

Wall Type Manager

wall type: MURINT

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	PLASTER	0.010	massive
2	CONCRETE	0.020	massive
3	BRICK	0.100	massive
4	CONCRETE	0.020	massive
5	PLASTER	0.010	massive

wall type: MUREXT

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	PLASTER	0.010	massive
2	CONCRETE	0.020	massive
3	BRICK	0.100	massive
4	LAME_AIR15	0.100	massive
5	BRICK	0.100	massive
6	CONCRETE	0.020	massive
7	PLASTER	0.010	massive

wall type: PLANCHER

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	FLOOR	0.005	massive
2	STONE	0.060	massive
3	HEAVYCONCR	0.150	massive
4	SAND	0.050	massive
5	CONCRETE	0.020	massive
6	CARRELAGE	0.010	massive

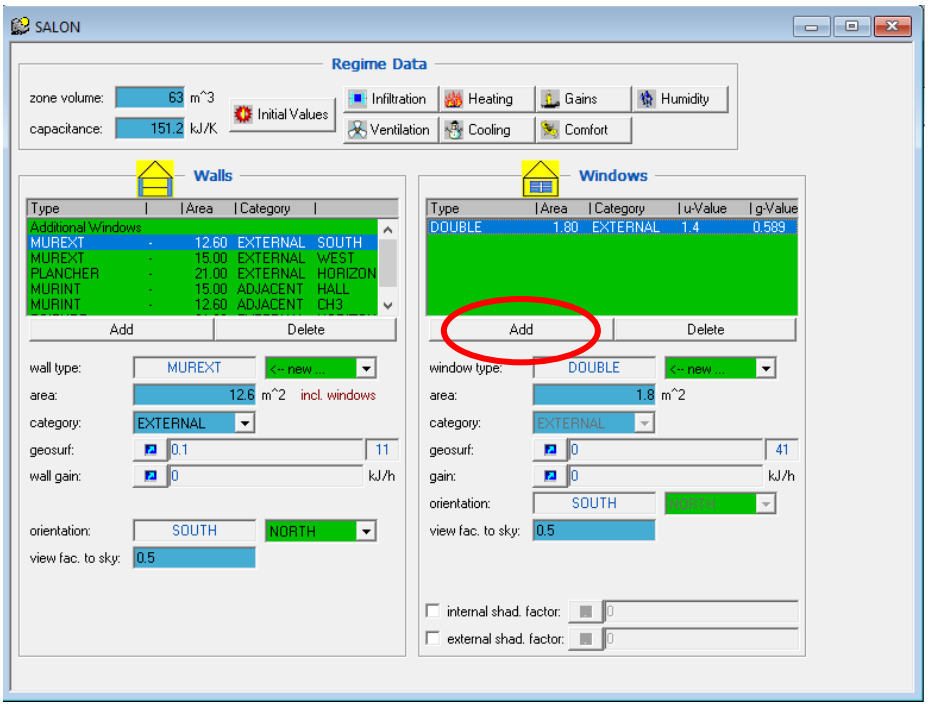
wall type: TOITURE

front / inside

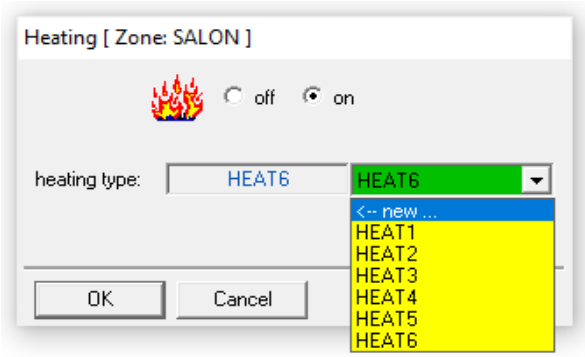
No.	Layer	Thickness	Type
2	BITUMENROO	0.020	massive
3	FEUTRE_BIT	0.005	massive
4	BÉTON_EXP	0.050	massive
5	HEAVYCONCR	0.100	massive
6	HOURD20_BÉ	0.200	massive
7	LAME_AIR15	0.300	massive
8	PLACO_BA23	0.023	massive

Les fenêtres peuvent être définies pour les murs extérieurs et adjacents, ou comme fenêtres supplémentaires sans mur associé. Si un mur extérieur ou adjacent est sélectionné dans la vue d'ensemble des murs, la partie droite de la fenêtre ZONE permet de modifier, supprimer ou ajouter des fenêtres pour ce mur. En cliquant sur une fenêtre dans la vue d'ensemble, sa définition s'affiche en dessous et peut être modifiée.

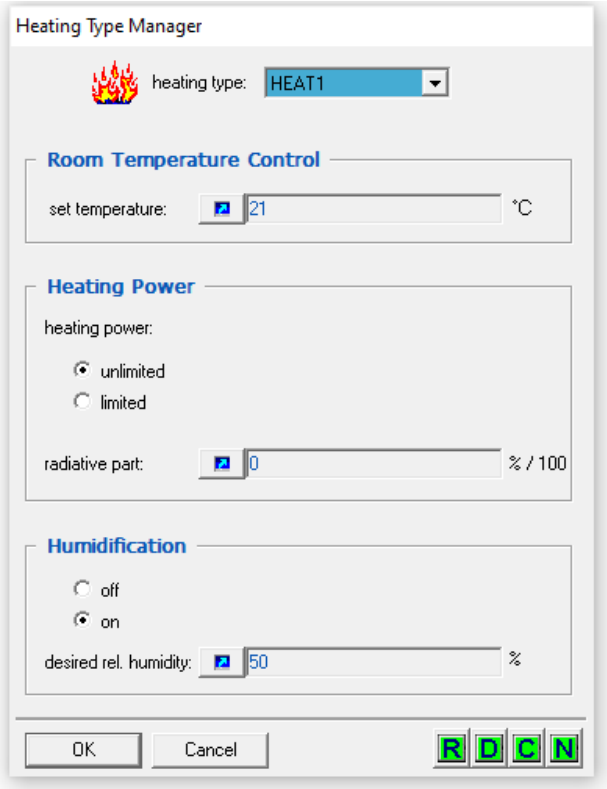
Pour notre projet, nous avons initialement utilisé des fenêtres à simple vitrage, que nous avons remplacées par des fenêtres à double vitrage lors de la dernière étape d'optimisation.



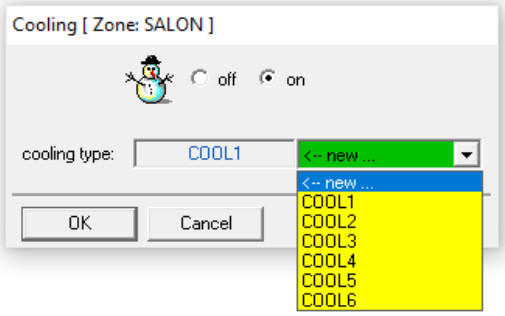
Les besoins en chauffage d'une zone soumise à une régulation idéale peuvent être évalués en définissant un type de chauffage. L'activation de cette régulation est facultative, et elle est désactivée par défaut. En cliquant sur le bouton « HEATING » dans la fenêtre ZONE, une boîte de dialogue s'affiche (voir figure ci-dessous). Il est alors possible d'activer la régulation de chauffage et de choisir un type de chauffage pour la zone, soit en sélectionnant un type existant, soit en en définissant un nouveau à partir du menu déroulant.



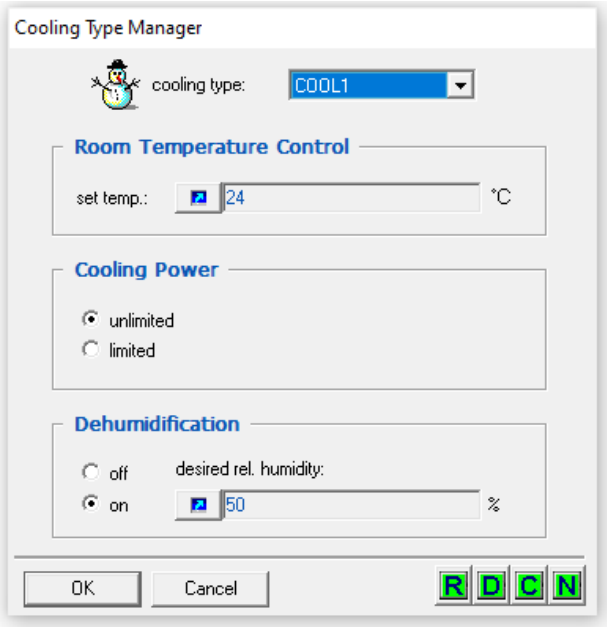
Ensuite, on doit spécifier la température de consigne de la zone, la puissance de chauffage ainsi que sa composante radiative, et enfin les paramètres liés à l'humidification de l'air. Dans notre cas, une température de consigne de 21 °C a été maintenue, avec un chauffage illimité et un taux d'humidité fixé à 50 %, conformément aux recommandations de la DTR.



De la même manière que pour le chauffage, les mêmes étapes ont été suivies pour la configuration de la climatisation.



Toujours conformément aux recommandations de la DTR dans la période estivale, la température de consigne a été fixée à 24 °C, avec une climatisation sans limitation de puissance et un taux d'humidité maintenu à 50 %.



Après avoir terminé la saisie des informations et des propriétés du bâtiment, nous enregistrons le projet dans TRNBUILD et revenons à TRNSYS pour démarrer la simulation.

Les données climatiques sont contenues dans la base de données météo mondiale Meteonorm, ce qui facilite l'exportation vers TRNSYS.

Les données relatives à la ville de Dar el beida se trouvent dans la bibliothèque de données Meteonorm.

CHAPITER IV

RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse des résultats obtenus a partir du logiciel de simulation TRNSYS dans les deux types de bâtiment (classique et à isolation thermique).

En premier lieu, nous discutons la variation de la température et de la consommation énergétique dans un bâtiment classique sans isolation puis on s'intéresse au choix de l'isolant approprie du point de vue thermique que sur l'aspect coût en faisant une comparaison entre six différents isolants. Nous examinerons ensuite l'influence du changement de l'épaisseur de l'isolant dans les différentes parois et l'usage du double vitrage sur la consommation énergétique.

I. Evolution de la température ambiante dans un Bâtiment Classique

I.1. Bâtiment sans chauffage et climatisation

La courbe ci-dessous représente l'évolution annuelle de la température ambiante dans différentes zones du bâtiment :

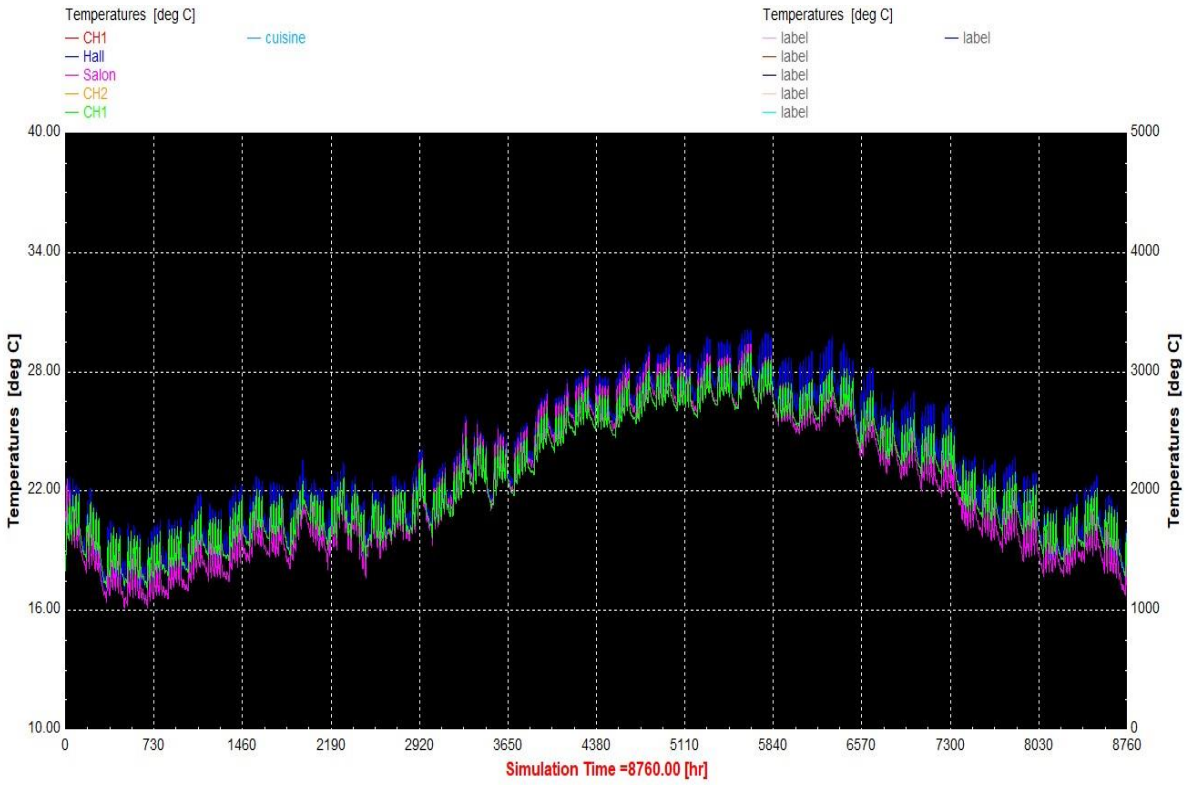


Figure IV.1 : Evolution de la température ambiante dans un Bâtiment Classique sans chauffage et climatisation

On peut voir sur le graphique des fluctuations marquées qui reflètent les variations quotidiennes des températures, avec des cycles réguliers correspondant aux alternances jour/nuit et aux saisons.

Le comportement thermique est globalement cohérent entre les pièces, mais il y a de légères différences.

La **Cuisine** (cuisine) et le **Hall** affichent des températures plus élevées que les autres zones durant la majorité du temps. **La chambre 1**, **la chambre 2** et **le Salon** ont des températures plus modérées ou plus basses.

Cela dû principalement à :

- La proximité de sources de chaleur (comme des appareils électroménagers dans **la cuisine**).
- Le non exposition au soleil et l'absence d'un contact direct avec l'extérieur pour **le Hall**.

L'activité humaine et l'ensoleillement contribuent à l'élévation des températures pendant la journée, avec des pics estivaux atteignant environ 30°C. Pendant la nuit, la température diminue progressivement en l'absence de sources de chaleur. Les températures minimales hivernales se situent entre 10 et 15°C, tandis que les autres saisons présentent des températures plus modérées avec des variations moins prononcées.

Cette analyse révèle un équilibre thermique global, tout en soulignant des opportunités d'améliorer l'efficacité en optimisant plusieurs facteurs.

I.2. Bâtiment avec chauffage et climatisation

Les résultats précédents montrent clairement qu'il n'est pas possible de maintenir la température ambiante à une température de confort stable (température intérieure recommandée) dans aucune des zones. La variation de la température ambiante intérieure suit la température extérieure. Le maintien de la température requise dans une pièce nécessite soit un apport de chaleur ou un refroidissement.

Le réglage par défaut du contrôle du chauffage et du refroidissement dans TYPE56 est OFF. Cela signifie que pour déterminer l'énergie nécessaire au chauffage ou au climatisation de chaque zone, l'option de contrôle idéale doit être activée.

Pour notre cas la température constante est fixée à 21 °C en hiver et à 24 °C en été.

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure ci-dessous :

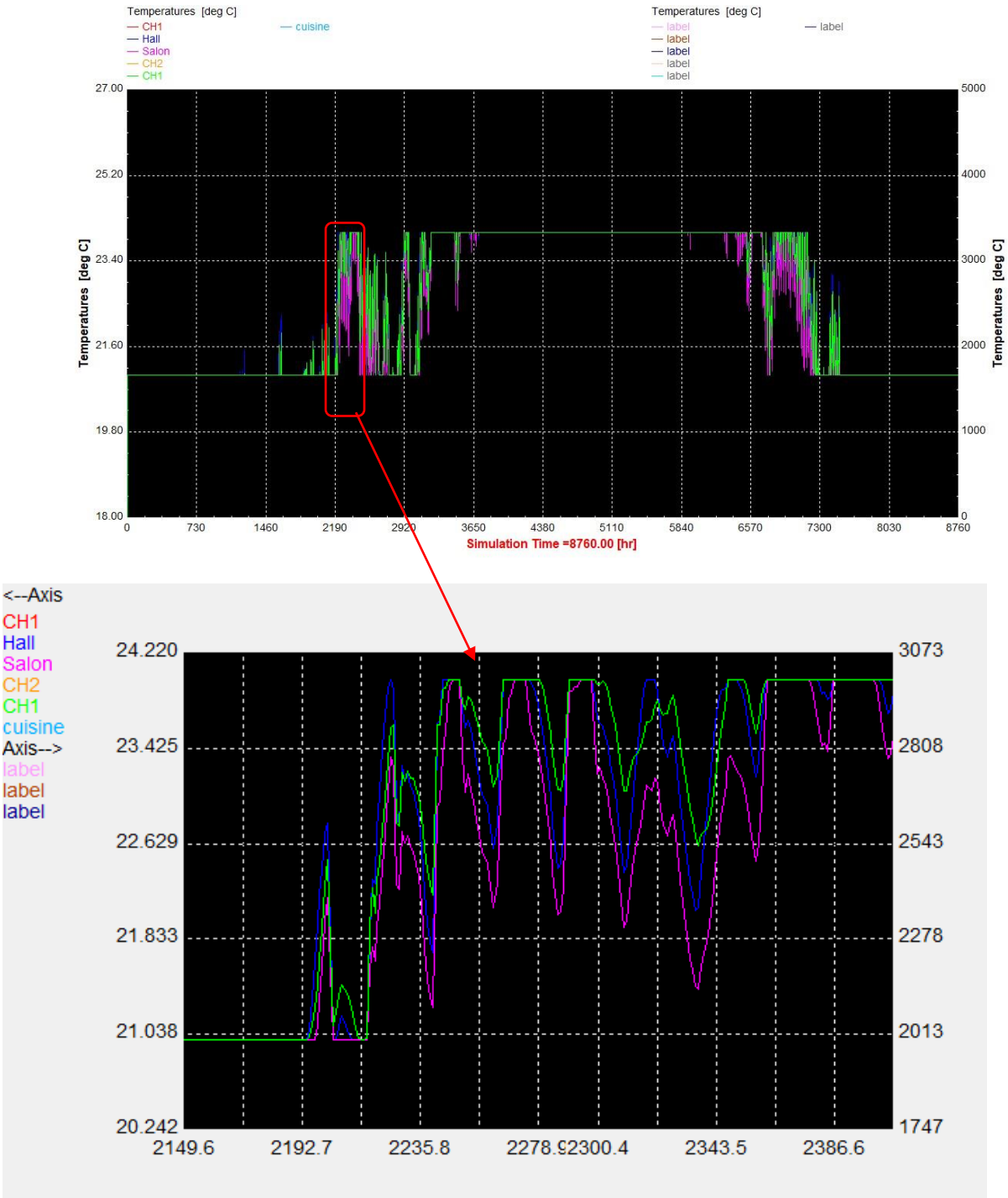


Figure IV.2 : Evolution de la température ambiante dans un Bâtiment Classique avec chauffage et climatisation.

D'après la figure, on peut observer que les températures restent quasi constantes pendant une longue période, ce qui témoigne d'un état stable du système (chauffage actif en hiver, climatisation opérationnelle en été).

Les périodes oscillantes montrent une succession de hausses et baisses brutales, en pics irréguliers. Ce comportement indique des réactions rapides du système lors d'un apport de chaleur suivi de rejets rapides. Cela est probablement dû à une mauvaise isolation du bâtiment.

II. Consommation énergétique dans un bâtiment classique

Le graphe suivant donne les besoins mensuels en chauffage et en climatisation pour notre bâtiment sans isolation

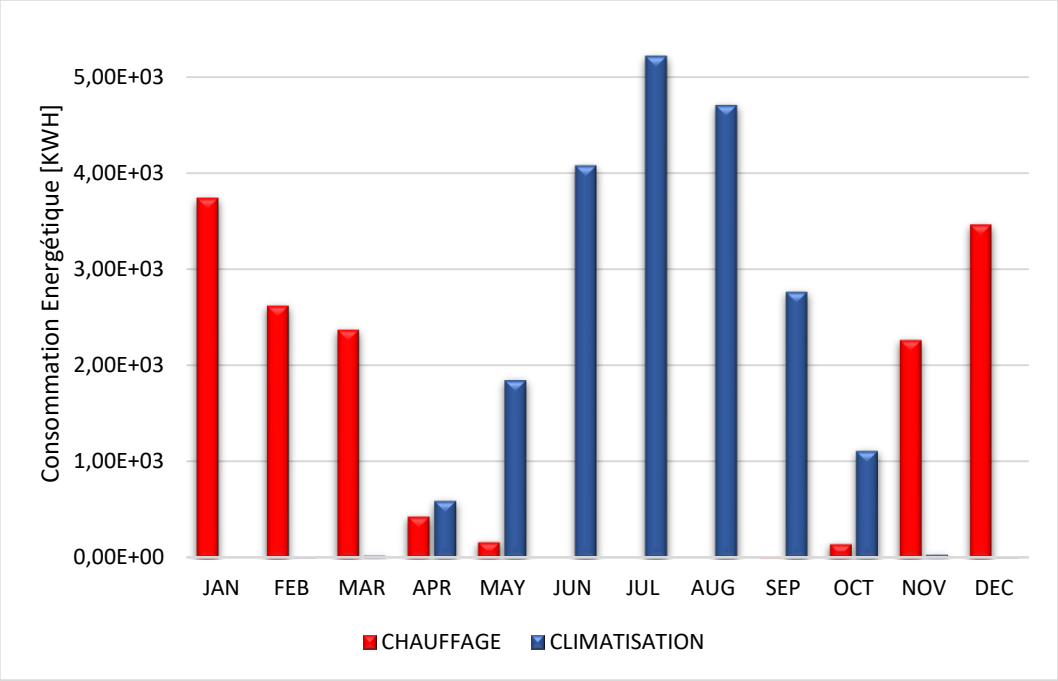


Figure IV.3 : Variation de la consommation énergétique dans bâtiment sans isolation

On observe une forte consommation de chauffage. Surtout en janvier, la consommation atteint environ 3740 kWh, en raison d'un besoin accru de chauffage dû aux basses températures. Ensuite, elle diminue progressivement de janvier à mars pour atteindre 2370 kWh tandis que la climatisation est quasiment nulle dans ces mois. La consommation diminue à 166 kWh à la fin du mois de mai, marquant le début de la période estivale. En juin, le chauffage n'est plus indispensable et nous commençons à utiliser la climatisation, ce qui fait grimper la consommation d'énergie à un pic de 5220 kWh. À la fin de l'été, la consommation totale d'énergie atteint environ 25800 kWh.

Pendant les quatre derniers mois de l'année, le chauffage est de nouveau utilisé, portant la consommation énergétique totale pour le chauffage à 15220 kWh.

D'après ces résultats, on peut conclure que :

- L'absence d'isolation thermique conduit à des besoins énergétiques très élevés, aussi bien pour le chauffage que pour la climatisation.
- On observe une forte dépendance au chauffage en hiver et à la climatisation en été, indiquant un manque d'inertie thermique et une faible performance de l'enveloppe du bâtiment.
- La transition entre saisons montre que le bâtiment ne retient ni le chaud ni le froid, ce qui augmente la consommation dans les deux sens.

III. Analyse de l'influence des isolants sur la performance énergétique du bâtiment

Les résultats précédents nous ont montré l'importance de l'isolation thermique dans la performance énergétique d'un bâtiment, en limitant les pertes de chaleur en hiver et en réduisant les surchauffes en été. Elle permet non seulement de garantir un confort thermique optimal pour les occupants, mais aussi de diminuer les consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation, et donc de réduire les factures énergétiques.

Face à la diversité des matériaux disponibles sur le marché, le choix d'un isolant adapté à une maison doit prendre en compte plusieurs critères : performance thermique (valeur λ), épaisseur, durabilité, comportement face à l'humidité, impact environnemental, coût, et facilité de mise en œuvre.

Dans ce cadre, notre étude se concentre sur l'analyse comparative de six des isolants les plus utilisés dans le bâtiment : la laine de verre, la laine de roche, le polystyrène expansé (PSE), le polystyrène extrudé (PSX), le polyuréthane (PU) et le verre cellulaire.

L'objectif est d'identifier l'isolant le plus performant et le plus adapté aux besoins spécifiques de notre habitation.

Pour comparer de manière objective les performances thermiques des six isolants sélectionnés, nous avons eu recours à une simulation dynamique à l'aide du logiciel TRNSYS.

Dans cette simulation, les murs de l'habitation ont été modifiés pour remplacer l'air initialement contenu dans leur structure par chacun des isolants étudiés, avec une épaisseur uniforme de 10 cm. Cette approche permet d'évaluer précisément l'impact de chaque matériau sur la consommation énergétique globale de la maison.

Le tableau ci-dessous récapitule les principales propriétés thermo physiques des isolants étudiés, tandis que les graphiques associés mettent en évidence l'évolution de la consommation énergétique ainsi que l'influence de chaque matériau sur les besoins en chauffage et en climatisation.

Isolant	Conductivité thermique λ [W / m°K]	Prix (da/m²)	Résistance Humidité	Résistance feu	Performance été	Performance hiver	Disponibilité
Laine de roche	0,15	1250 à 2500	Très bonne	Excellente	Moyenne	Bonne	Très bonne
Laine de verre	0,15	750 à 2250	Moyenne	Bonne	Moyenne	Bonne	Très bonne
Polystyrène Expansé	0,14	1500 à 2750	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Bonne
Polystyrène Extrudé	0,11	2000 à 3200	Faible à Moyenne	Faible	Bonne	Bonne	Bonne
Polyuréthane	0,11	1750 à 3250	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Bonne
Verre cellulaire	0,18	3750 à 6000	Excellente	Excellente	Très bonne	Bonne	Moyenne

Tableau IV.1. Caractéristiques des isolants

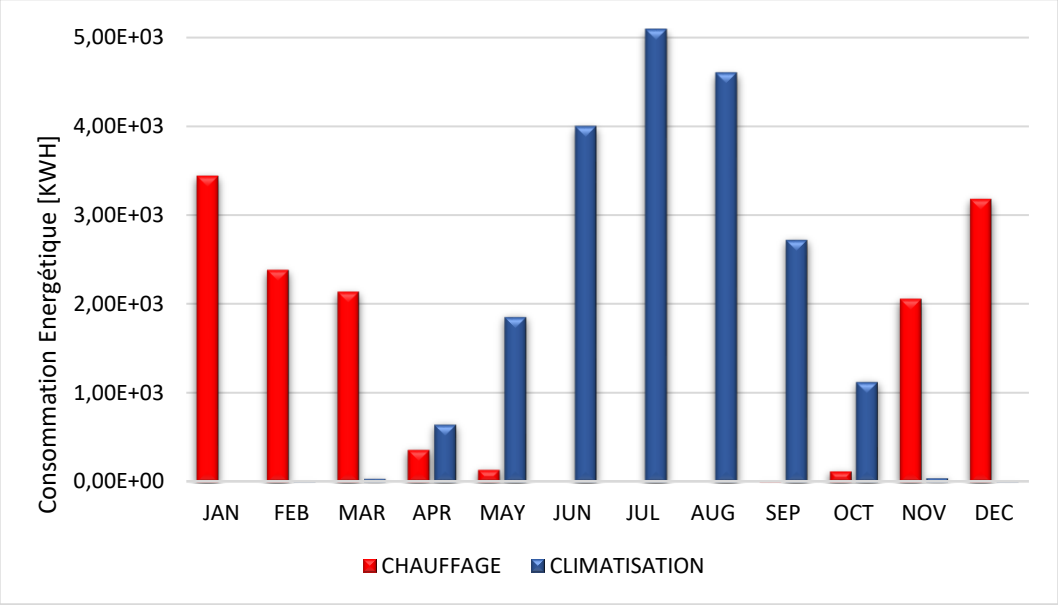


Figure IV.4. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Laine de Roche"

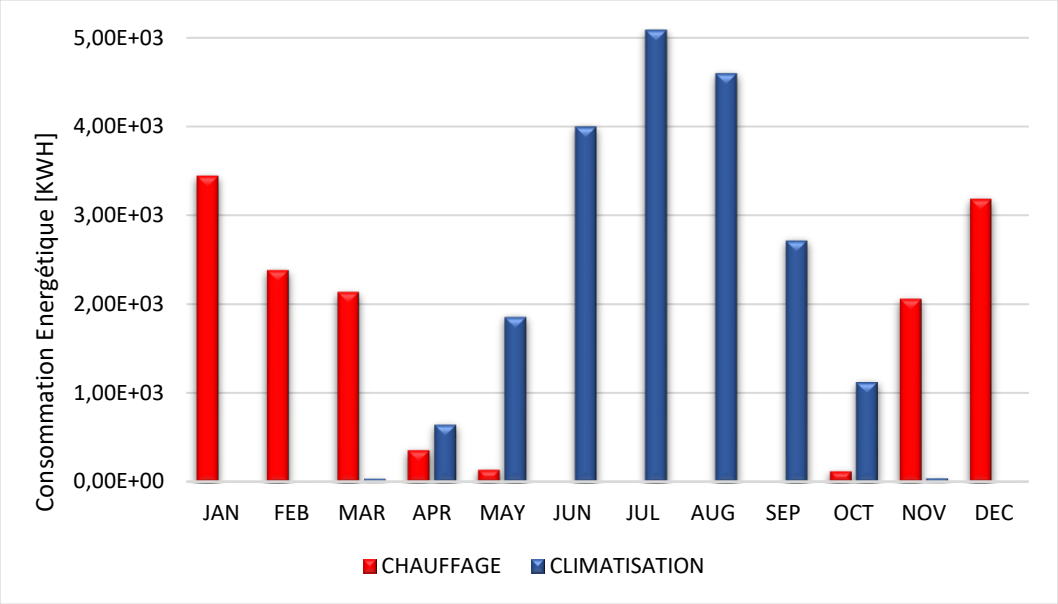


Figure IV.5. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Laine de Verre"

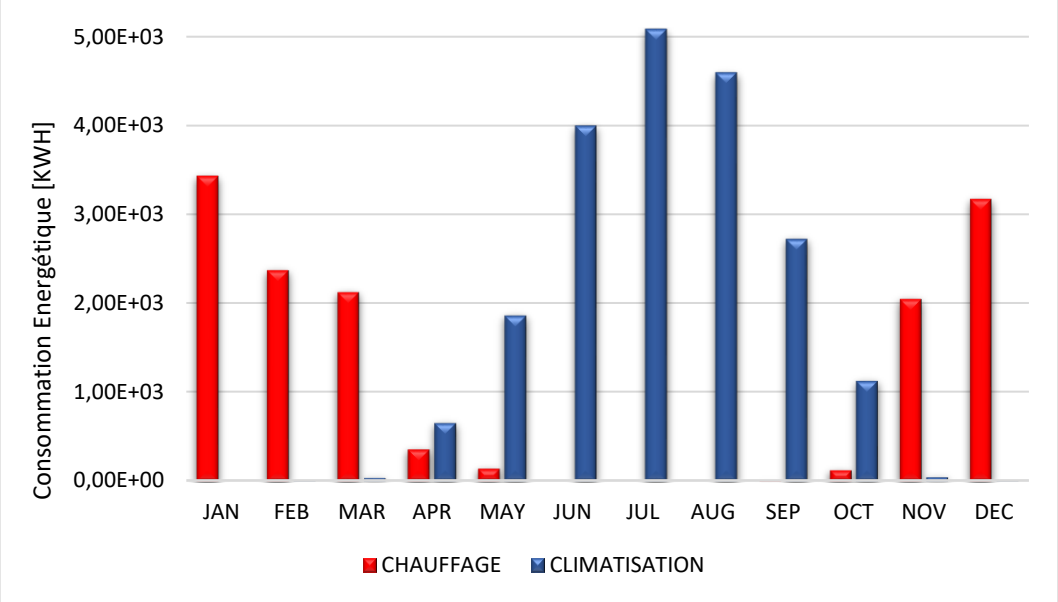


Figure IV.6. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Polystyrène Expansé"

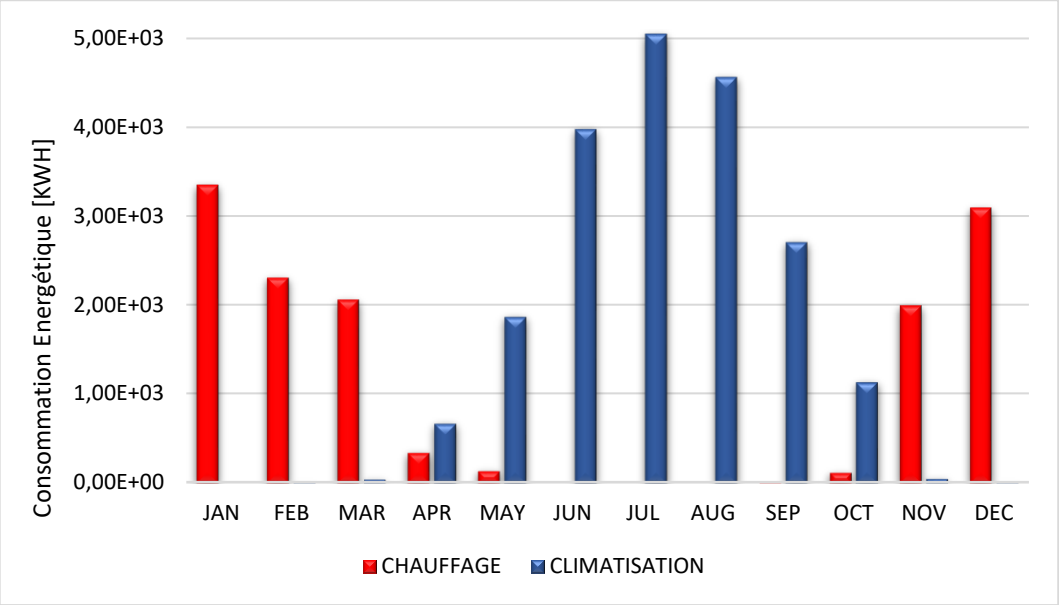


Figure IV.7. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Polystyrène Extrudé"

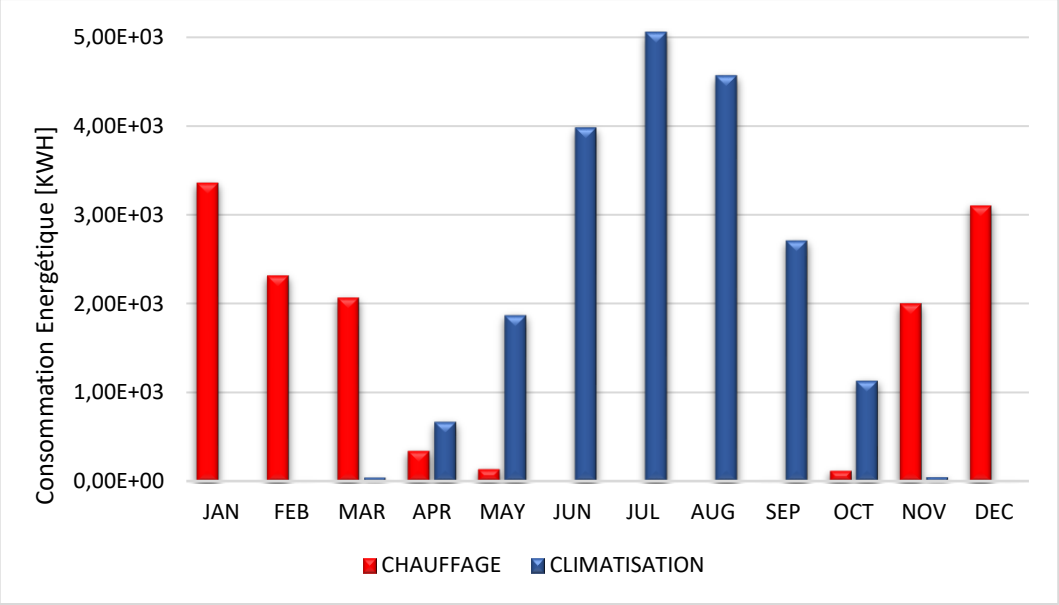


Figure IV.8 Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Polyuréthane"

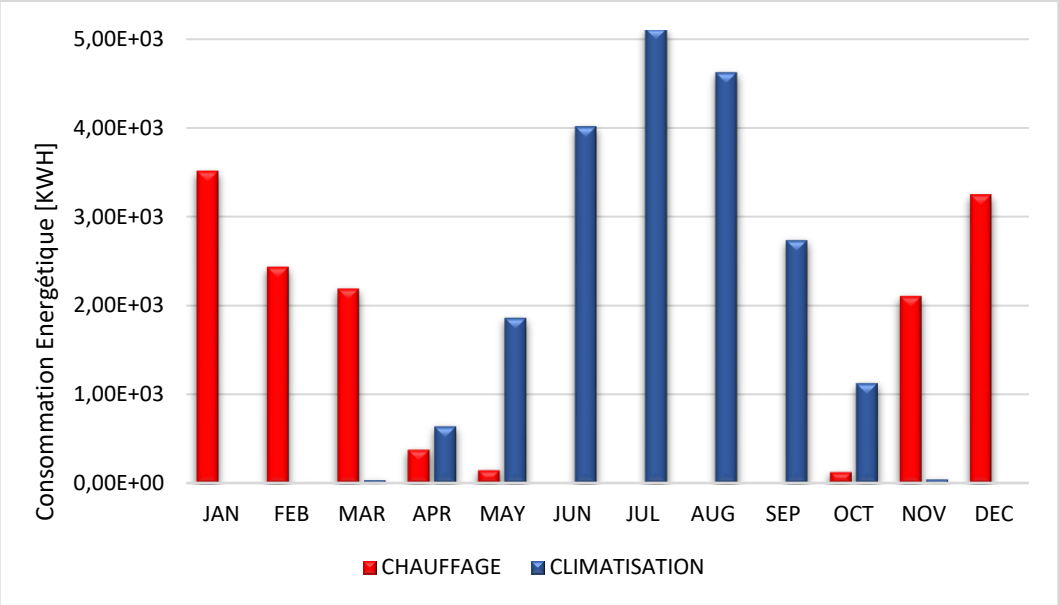


Figure IV.9. Variation de la consommation énergétique avec l'isolant "Verre Cellulaire"

On peut diviser les résultats obtenus sur deux périodes :

- **Période estivale (mai à septembre) – Climatisation**

Dans cette période, tous les isolants permettent de réduire considérablement la consommation d'énergie pour la climatisation par rapport à un bâtiment non isolée. On observe toutefois des écarts subtils :

Le polyuréthane et le polystyrène extrudé montrent une légère supériorité : la consommation atteint des niveaux plus bas en juin, juillet et août.

La laine de roche et la laine de verre présentent des performances similaires et efficaces, mais légèrement moins bonnes que les isolants synthétiques.

Le verre cellulaire, bien qu'efficace, semble légèrement plus énergivore pour la climatisation, en particulier en juillet et août.

- **Période hivernale (novembre à mars) – Chauffage**

Pendant l'hiver, on constate également une réduction significative de la consommation pour le chauffage avec tous les isolants, mais avec des performances variées :

Le polyuréthane offre ici aussi la meilleure performance, suivi de très près par le polystyrène extrudé.

La laine de roche, la laine de verre et le verre cellulaire offrent des performances correctes mais légèrement inférieures.

Le polystyrène expansé est globalement moins performant pour l'isolation contre le froid que les autres matériaux.

Globalement :

Les isolants synthétiques (polyuréthane, polystyrène extrudé) offrent les meilleures performances globales en matière de réduction de la consommation énergétique, tant pour le chauffage que pour la climatisation.

Les isolants minéraux (laine de roche, laine de verre, verre cellulaire) sont aussi efficaces mais légèrement moins performants, bien qu'ils présentent souvent un meilleur comportement en cas d'incendie et une durabilité accrue.

Le choix de l'isolant doit donc prendre en compte non seulement la performance thermique mais aussi les critères économiques, écologiques, de sécurité, de durabilité et de disponibilité, c'est pourquoi nous avons choisi **la laine de roche** comme isolant pour la suite de l'étude.

La procédure d'optimisation de l'épaisseur de l'isolant se déroule comme suit : elle commence par la détermination de l'épaisseur optimale de l'isolant au niveau des murs. Une fois cette épaisseur fixée, l'optimisation se poursuit pour la toiture, puis enfin pour le plancher. À chaque étape, l'épaisseur précédemment déterminée est conservée pour garantir la cohérence des résultats.

IV. Influence de l'épaisseur de l'isolation dans les murs sur la consommation énergétique

IV.1. En chauffage

Le graphe suivant illustre l'impact de l'épaisseur de l'isolant dans les murs sur la puissance de chauffage mensuelle et annuelle

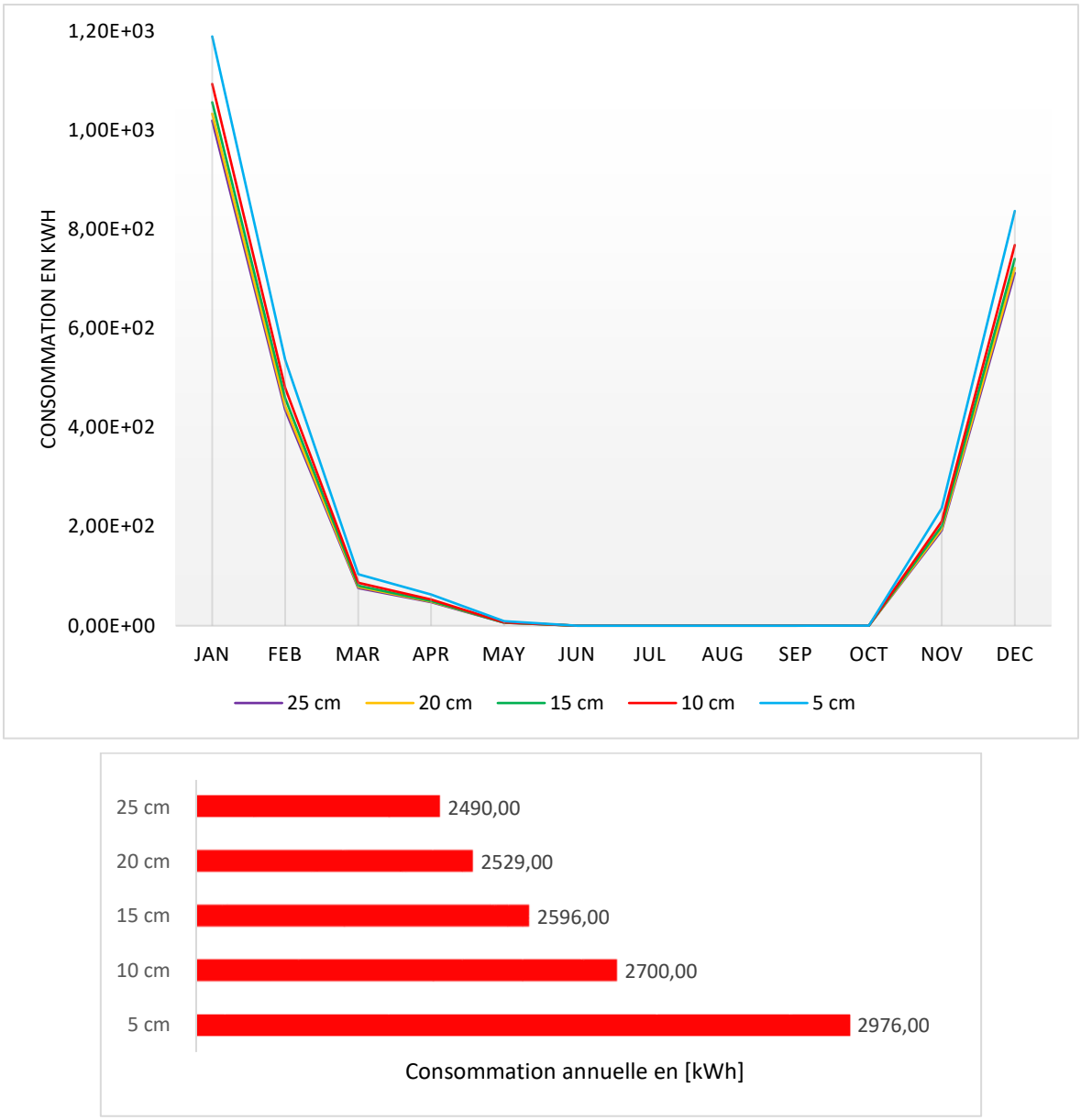


Figure IV.10. Variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans les murs

Le graphique montre clairement que l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant dans les murs permet de réduire la consommation énergétique liée au chauffage, en particulier durant les mois les plus froids (janvier, février et décembre). En effet, la courbe correspondant à une épaisseur de 25 cm affiche les plus faibles valeurs de consommation, tandis que celle de 5 cm présente les plus élevées.

Cette diminution devient toutefois moins marquée au-delà d'une certaine épaisseur. Par exemple, la différence entre 20 cm et 25 cm est relativement faible par rapport à celle entre 5 cm et 10 cm. Cela traduit une loi de rendement décroissant : les gains en économie d'énergie deviennent de moins en moins significatifs à mesure que l'épaisseur augmente.

En résumé, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant dans les murs améliore l'efficacité énergétique en période hivernale, mais au-delà de 15 cm, les bénéfices thermiques deviennent minimes, ce qui est primordial de prendre en considération ce point en ce qui concerne le coût.

IV.2. En climatisation

Le graphe suivant illustre l'impact de l'épaisseur de l'isolant dans les murs sur la puissance de climatisation mensuelle et annuelle

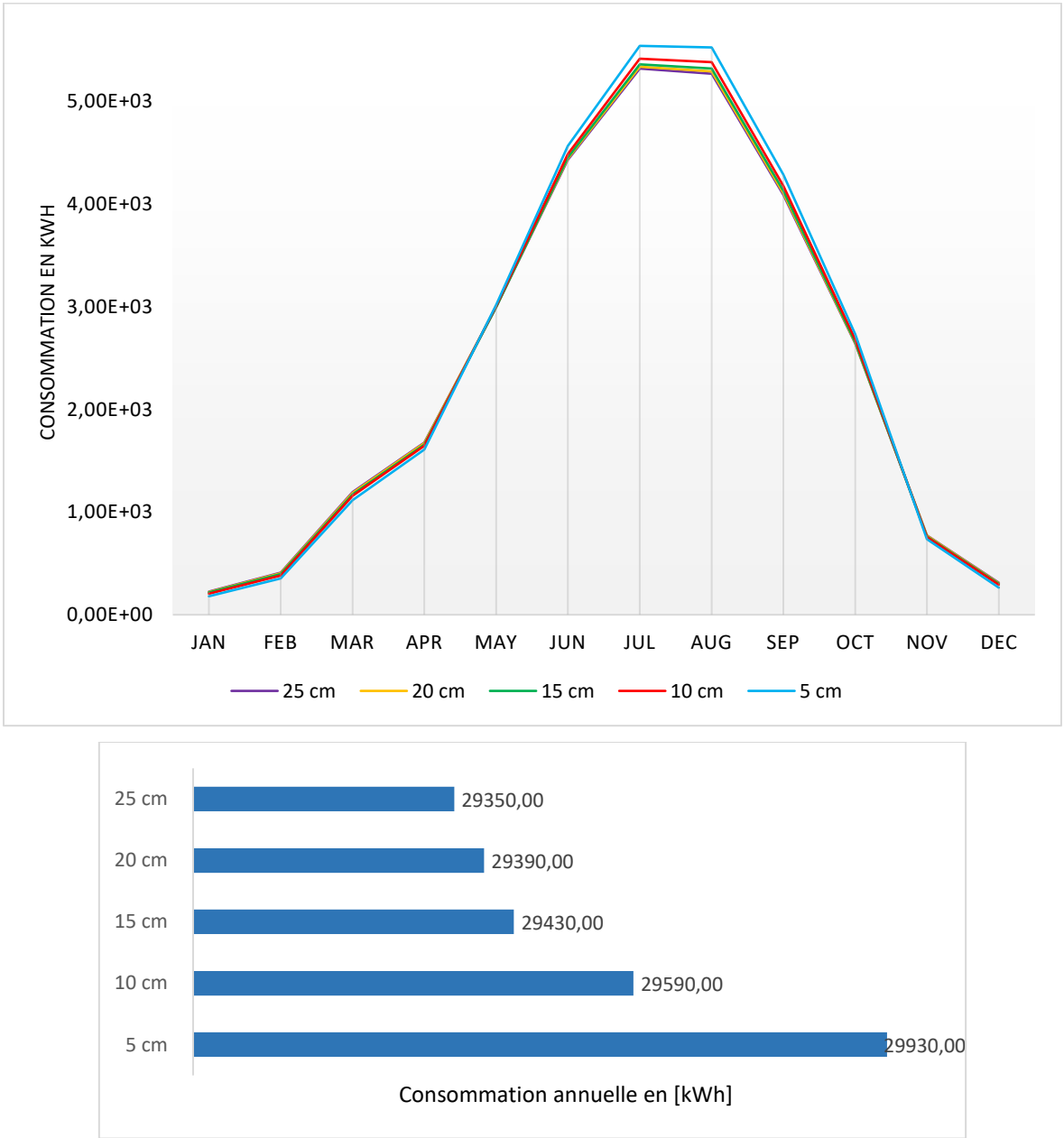


Figure IV.11. Variation de la puissance de climatisation en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans les murs.

On observe que plus on augmente l'épaisseur de l'isolant, plus la consommation en climatisation diminue. En effet, la courbe correspondant à 25 cm d'isolant est systématiquement en dessous de celle des épaisseurs plus faibles, notamment celle de 5 cm, qui enregistre les consommations les plus élevées.

Cependant, tout comme pour le chauffage, l'effet de l'augmentation de l'épaisseur devient moins significatif au-delà de 15 cm, ce qui suggère également ici une diminution du rendement marginal.

Les courbes montrent clairement qu'augmenter l'épaisseur de l'isolation réduit la consommation d'énergie, surtout pour le chauffage. Cependant, il faut prendre en compte le le coût lors du choix de l'épaisseur optimale.

On observe que la différence entre 15 cm et 25 cm est minime pour la plupart des mois, surtout dans la courbe de chauffage où les écarts de consommation deviennent négligeables au-delà de 15 cm. Pour la climatisation, l'effet est déjà limité, ce qui rend une épaisseur supérieure à 15 cm peu justifiée économiquement.

Une épaisseur d'isolation de 15 cm permet de bénéficier de plus de 90 % des performances obtenues avec 25 cm, en particulier pour le chauffage. En ce qui concerne la climatisation, l'écart entre 15 cm et 25 cm reste minime, ce qui fait que l'épaisseur de 15 cm est un choix équilibré entre l'efficacité et le coût pour les deux modes.

V. Influence de l'épaisseur de l'isolation dans la toiture sur la consommation énergétique

Dans cette étape, on va fixer l'épaisseur de l'isolant dans les murs à 15cm, et le faire varie sur la toiture de 5 à 40 cm.

V.1. En chauffage

Le graphe suivant met en évidence l'influence de l'épaisseur de l'isolant dans la toiture sur la puissance de chauffage mensuelle et annuelle

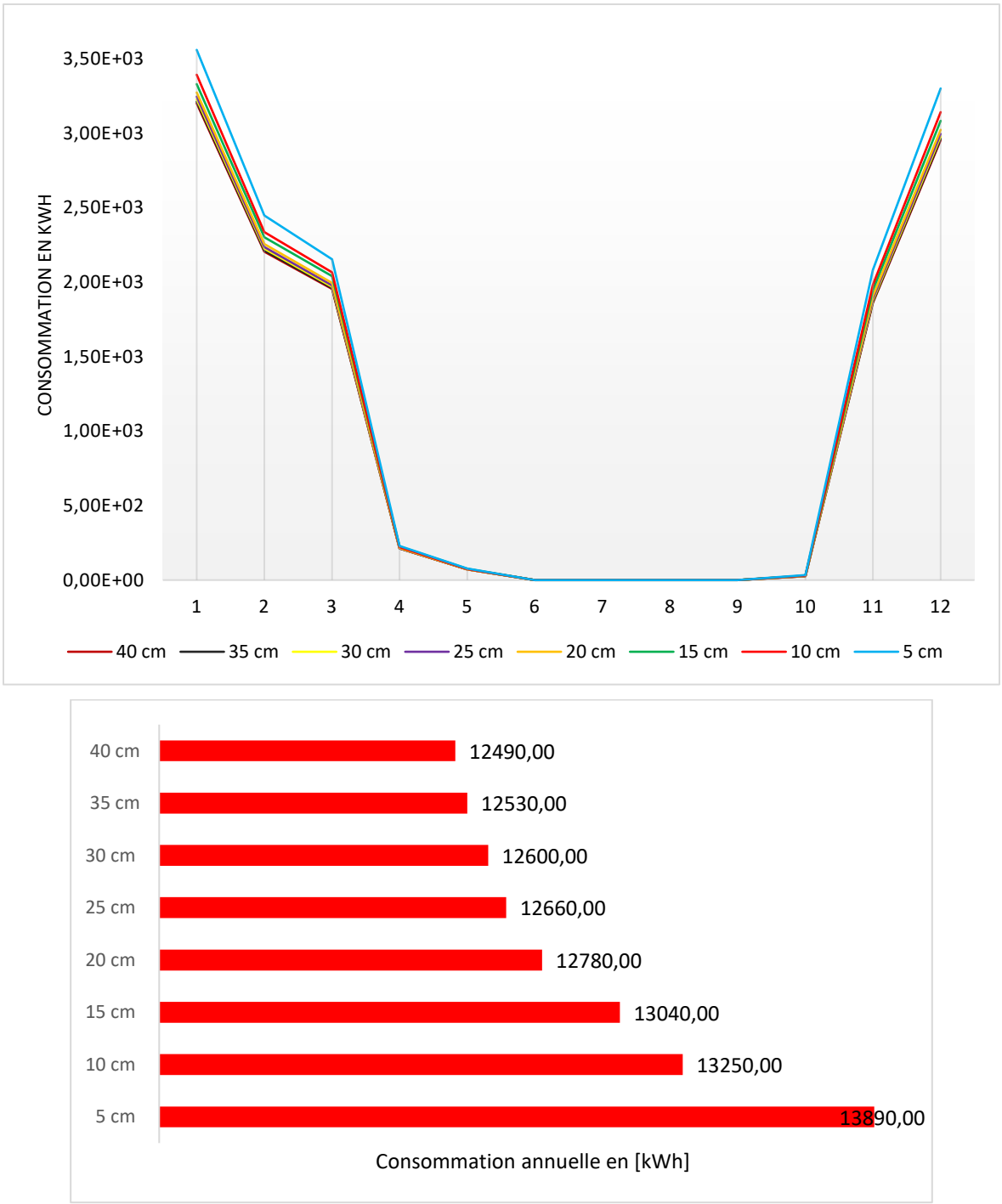


Figure IV.12. Variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans la toiture

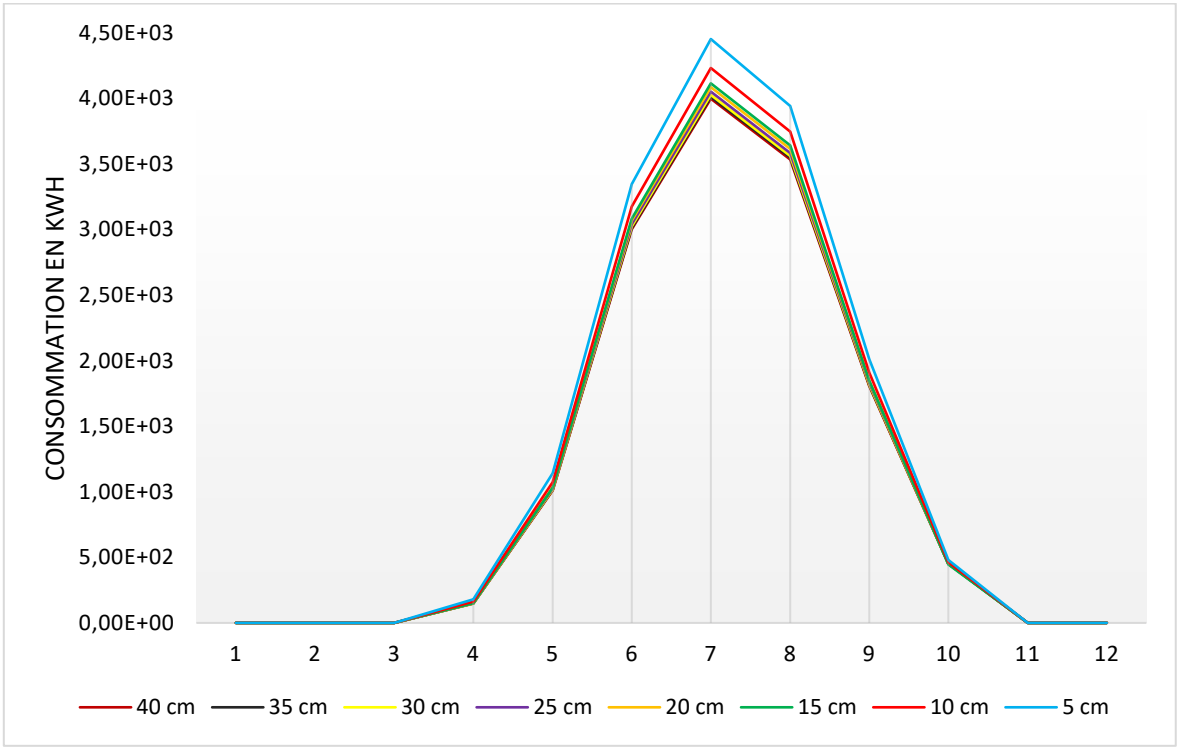
Les résultats montrent une baisse notable de la puissance de chauffage lorsque l'épaisseur de l'isolation passe de 5 cm à 40 cm. En effet, celle-ci diminue de 13900 kWh pour une épaisseur de 5 cm à 12780 kWh pour 20 cm, puis à 12500 kWh pour 40 cm.

Cependant, lorsque l'épaisseur augmente de 20 cm à 25 cm, puis de 30 cm à 40 cm, aucune réduction significative de la puissance de chauffage n'est observée.

Cela indique qu'au-delà de 20 cm, l'augmentation de l'épaisseur n'améliore pas de manière notable l'efficacité du chauffage, ce qui suggère que cet épaisseur constitue un choix optimal du point de vue énergétique et économique.

V.2. En climatisation

Le graphe suivant met en évidence l'influence de l'épaisseur de l'isolant dans la toiture sur la puissance de climatisation mensuelle et annuelle



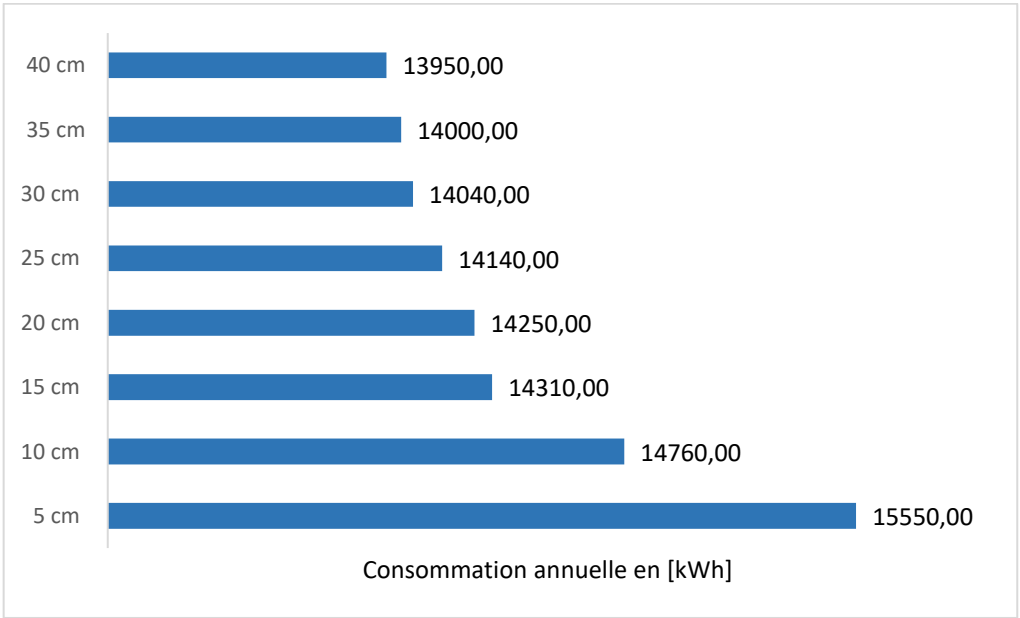


Figure IV.13. Variation de la puissance de climatisation en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans la toiture.

On observe que la consommation augmente progressivement à partir d'avril, atteint un pic entre juillet et août, puis diminue jusqu'à disparaître en novembre.

L'effet de l'épaisseur de l'isolant est particulièrement visible pendant les mois chauds. Plus l'épaisseur augmente, plus la puissance de climatisation diminue. Ainsi, une épaisseur de 40 cm permet une réduction notable de la consommation par rapport à une épaisseur de 5 cm, notamment en été où la charge thermique est la plus élevée.

Cependant, les courbes indiquent aussi qu'au-delà de 20 cm, les bénéfices deviennent marginaux. Par exemple, la différence de consommation entre 20 cm et 40 cm reste relativement faible (14 250 kWh contre 13 950 kWh), ce qui suggère un effet de saturation de l'isolation.

À 20 cm d'épaisseur, l'isolation offre la majorité de ses bénéfices, tandis qu'une augmentation supplémentaire n'apporte plus de gains énergétiques significatifs, rendant l'investissement en matériau moins rentable.

VI. Influence de l'épaisseur de l'isolation dans le plancher sur la consommation énergétique

À cette étape, l'épaisseur de l'isolant est maintenue à 15 cm pour les murs et à 20 cm pour la toiture, tandis que celle du plancher est modulée de 5 à 40 cm.

VI.1. En chauffage

Le graphique suivant illustre l'impact de l'épaisseur de l'isolant dans le plancher sur la consommation mensuelle et annuelle d'énergie liée au chauffage.

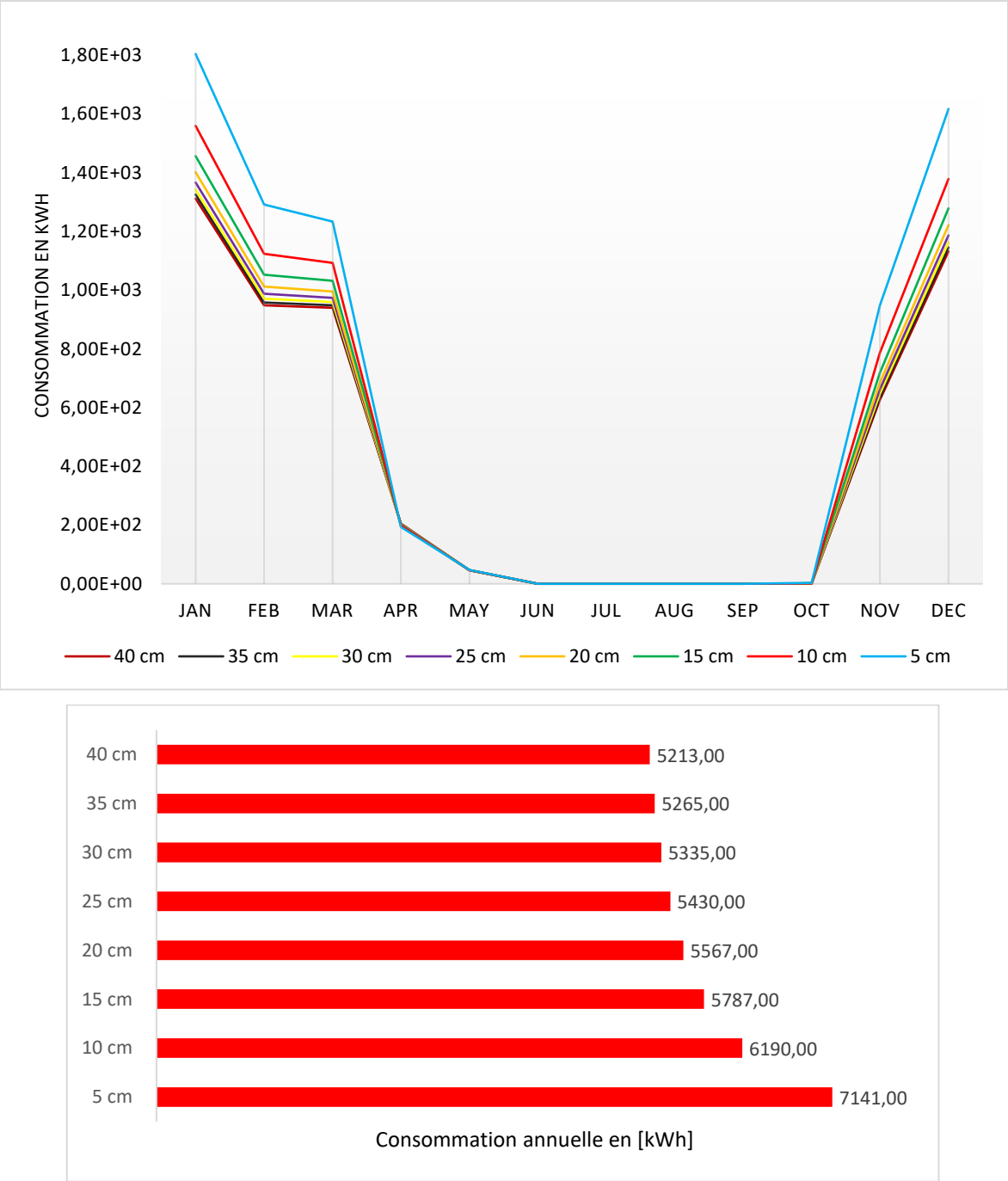


Figure IV.14 Variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans le plancher

La courbe montre une baisse notable de l'énergie thermique requise lorsque l'épaisseur de l'isolant passe de 5 cm à 40 cm.

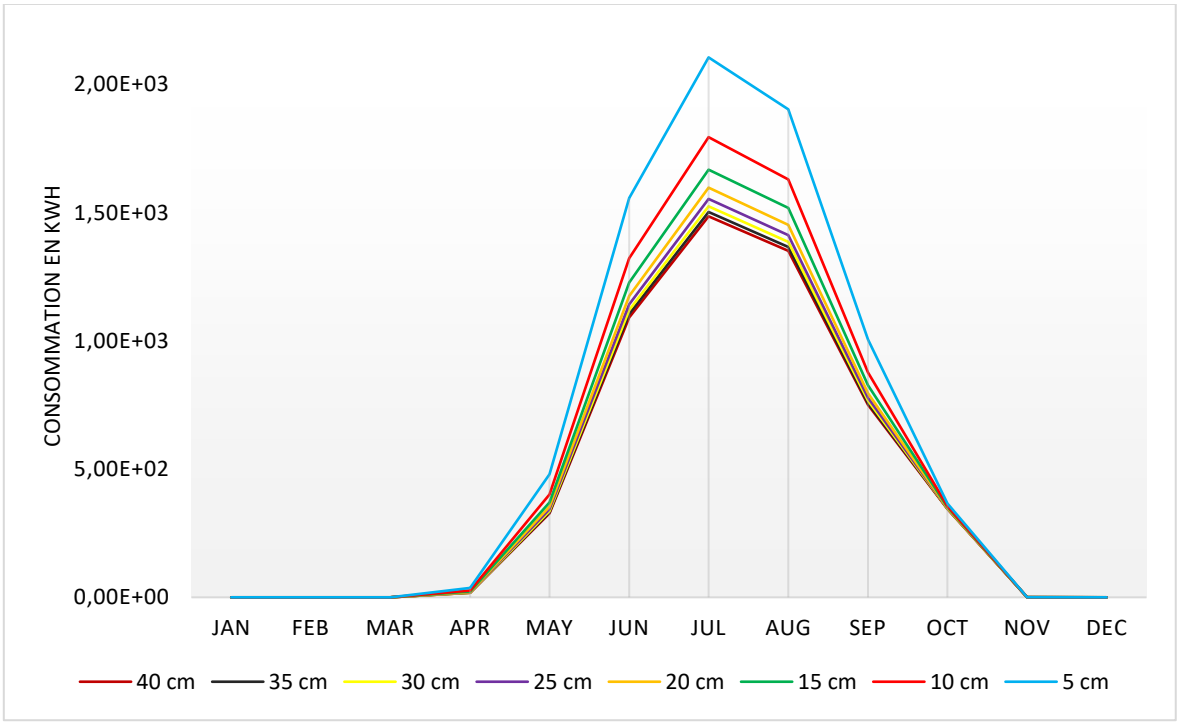
À une épaisseur de 5 cm, l'énergie thermique est d'environ 7 141 kWh. Pour une épaisseur de 15 cm, elle tombe à 5 787 kWh, soit une réduction d'environ 19 %. Au-delà de cette épaisseur, la diminution devient moins significative : la différence entre 15 cm et 40 cm n'est que de 575 kWh, ce qui ne représente qu'une économie supplémentaire d'environ 8 % par rapport à 15 cm.

Après 15 cm d'épaisseur, la réduction de l'énergie thermique devient moins marquée, ce qui indique qu'augmenter l'épaisseur de l'isolant au-delà de ce seuil n'améliore pas considérablement l'efficacité énergétique avec un coût en matériau nettement plus élevé.

Alors, l'épaisseur 15 cm représente un bon compromis technico-économique pour les besoins en chauffage.

VI.2. En climatisation

Le graphique suivant illustre l'impact de l'épaisseur de l'isolant dans le plancher sur la consommation mensuelle et annuelle d'énergie liée à la climatisation.



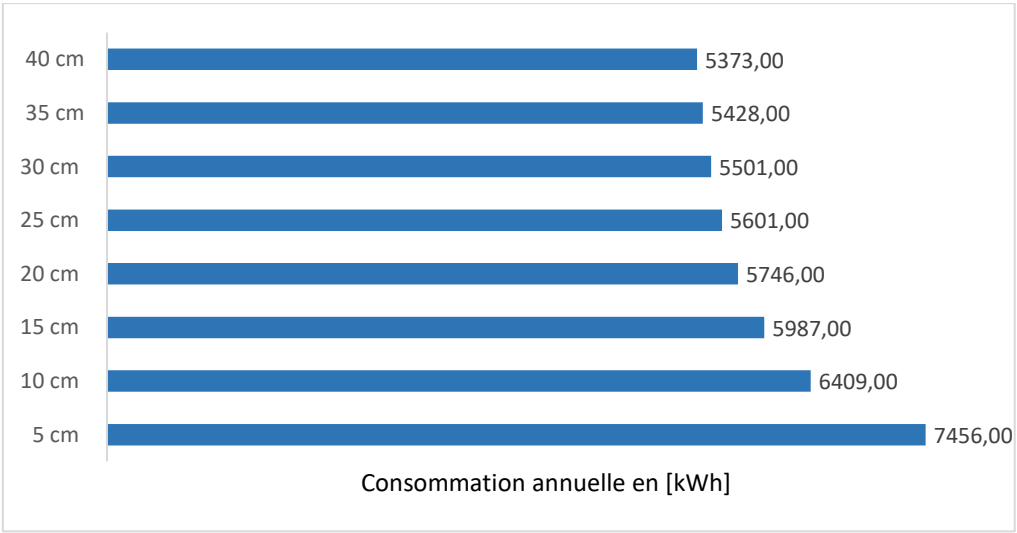


Figure IV.15 Variation de la puissance de climatisation en fonction de l'épaisseur de l'isolant dans le plancher

Une tendance similaire à celle observée pour le chauffage se manifeste : l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant entraîne une diminution de la consommation d'énergie, tant mensuelle qu'annuelle. Celle-ci passe de 7456 kWh à 5 cm à 5987 kWh à 15 cm, soit une réduction d'environ 20 %. Au-delà, la baisse devient marginale, atteignant 5373 kWh à 40 cm, ce qui ne représente qu'un gain supplémentaire d'environ 8 % par rapport à l'épaisseur de 15 cm.

Là encore, 15 cm semble être un seuil optimal, au-delà duquel l'investissement supplémentaire n'apporte que peu de bénéfices énergétiques.

Une épaisseur d'isolant de 15 cm dans le plancher est donc retenue, car elle représente un compromis optimal entre la diminution de la consommation énergétique et le surcoût lié aux matériaux isolants.

VII. Influence du type de vitrage sur la consommation énergétique

Dans cette dernière étape, l'impact du type de vitrage sur la consommation énergétique est évalué, en maintenant les épaisseurs optimales d'isolant déterminées précédemment : 15 cm pour les murs, 20 cm pour la toiture et 15 cm pour le plancher.

VII.1. En chauffage

Le graphique suivant présente la variation de la puissance de chauffage en fonction des différentes configurations de vitrage



Figure VI.16. Variation de la puissance de chauffage en fonction du type de vitrage

On observe une nette diminution de la consommation mensuelle de chauffage avec le double vitrage, en particulier durant les mois froids (janvier, février, décembre). La consommation annuelle chute de **5787 kWh** (simple vitrage) à **2834 kWh** (double vitrage), soit une réduction d'environ **51%**. Cela démontre l'efficacité du double vitrage pour limiter les pertes thermiques en hiver.

VII.2. En climatisation

Le graphique suivant présente la variation de la puissance de climatisation en fonction des différentes configurations de vitrage

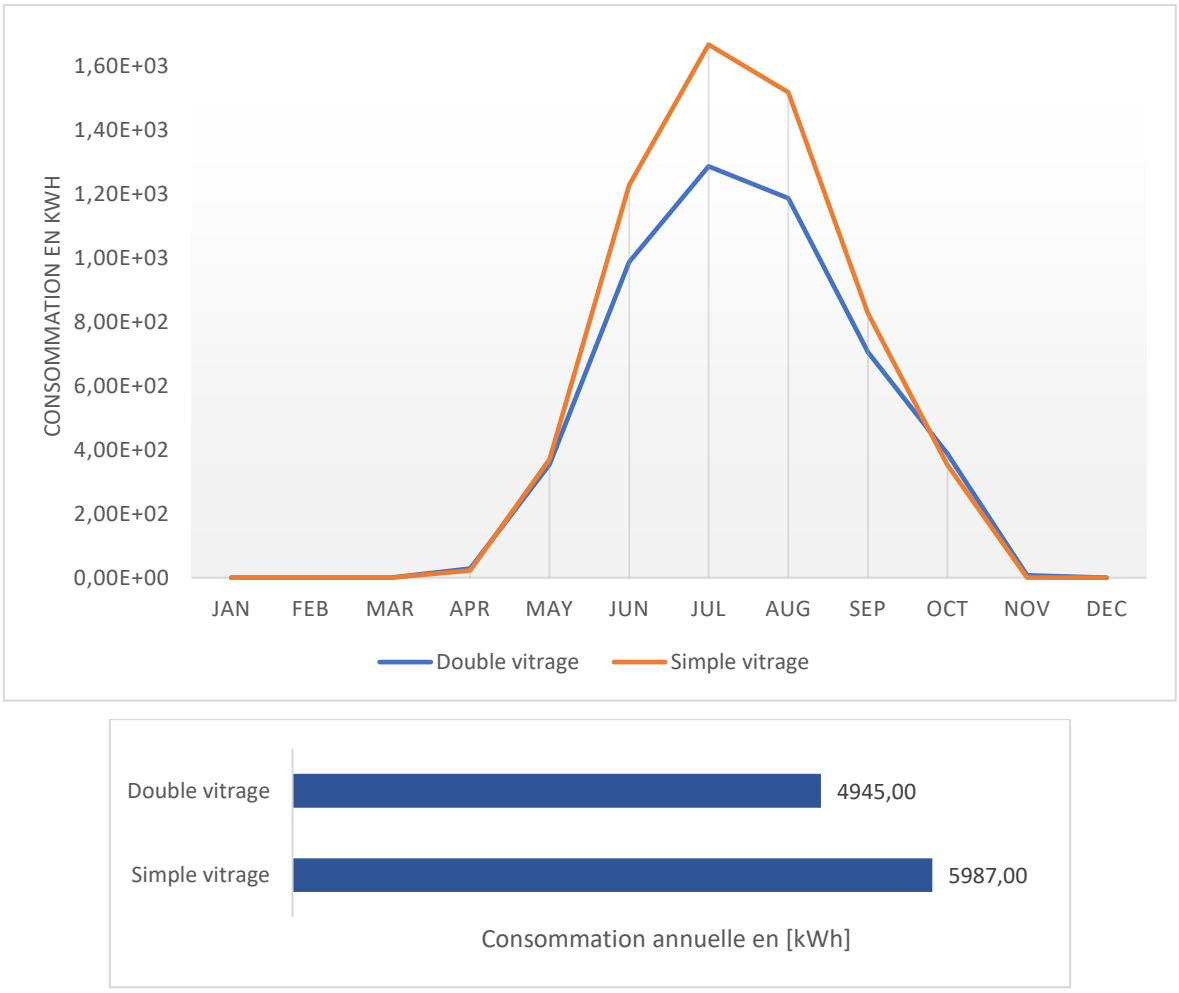


Figure IV.17. Variation de la puissance de climatisation en fonction du type de vitrage

On remarque à chaque étape, la courbe du simple vitrage est au-dessus de celle du double vitrage, ce qui indique une meilleure performance énergétique du double vitrage en période estivale. La consommation totale sur l'année est de 5987 kWh pour le simple vitrage, et 4945 kWh pour le double vitrage indiquant que ce dernier permet une réduction d'environ 17,4 % de la consommation d'énergie liée à la climatisation.

Même si l'effet du double vitrage est généralement plus connu pour ses avantages en hiver (chauffage), il offre aussi une efficacité notable en été, en réduisant les besoins en refroidissement.

L'utilisation du double vitrage constitue une mesure efficace pour réduire la consommation énergétique. Elle permet non seulement de réduire significativement la consommation annuelle mais également de diminuer les pics de puissance en été et en hiver, allégeant ainsi la charge sur les systèmes de chauffage et climatisation. En plus d'améliorer le confort thermique, il permet une économie annuelle non négligeable en énergie, contribuant à une meilleure performance énergétique globale du bâtiment.

Conclusion

Ces courbes et résultats soulignent l'importance du choix des matériaux de construction, de la qualité de l'isolation ainsi que de l'épaisseur de l'isolant pour optimiser l'efficacité énergétique, en particulier dans les bâtiments à forte demande en chauffage et en climatisation.

Dans le cadre de cette étude, le bâtiment de référence a été conçu avec une isolation en laine de roche, appliquée selon des épaisseurs optimisées : 15 cm pour les murs, 20 cm pour la toiture et 15 cm pour le plancher bas. Afin d'améliorer davantage les performances thermiques de l'enveloppe, des fenêtres à double vitrage ont été intégrées.

Ces choix ont clairement démontré une différence significative en termes de performance énergétique. En période de chauffage, la consommation énergétique est passée de 15 200 kWh pour le bâtiment de référence non isolée à 2 834 kWh pour le bâtiment optimisé, soit une réduction d'environ 81 %. De même, en période de climatisation, la consommation a été réduite de 20 400 kWh à 4 945 kWh, représentant une diminution de l'ordre de 76 %. Ces résultats confirment l'efficacité des solutions mises en œuvre en matière d'isolation thermique et de conception bioclimatique.

CHAPITRE V

Etude technico-économique

Introduction

L'étude technico-économique a pour objectif d'évaluer la pertinence des solutions d'optimisation énergétique appliquées au bâtiment étudié, en confrontant les gains énergétiques obtenus aux coûts d'investissement engagés. Elle permet ainsi de déterminer le retour sur investissement, la durée d'amortissement des travaux, ainsi que les économies annuelles générées en kWh et en dinars algériens (DZD). Cette approche offre une vision complète, intégrant à la fois l'efficacité énergétique et la viabilité financière des choix adoptés.

Cette étude nous a permet de comparer les consommations énergétiques et les coûts avant et après l'application des améliorations (isolation, vitrage) sur une durée d'exploitation de 50 ans (**durée de vie de l'isolant).**

Afin d'évaluer les coûts énergétiques liés aux besoins en chauffage et en climatisation du bâtiment étudié, les factures ont été estimées à l'aide de l'outil de simulation mis à disposition par la Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG). Ce simulateur permet de calculer avec précision les factures trimestrielles d'électricité et de gaz, en tenant compte des tarifs en vigueur et des niveaux de consommation enregistrés.

En ce qui concerne l'évaluation des dépenses d'isolation, les prix unitaires suivants ont été utilisés pour le calcul des investissements :

- **Isolant thermique (laine de roche)** : 1 250 DA/m² pour une épaisseur de 5 cm
- **Fenêtres à vitrage simple** : 13 000 DA/m²
- **Fenêtres à double vitrage** : 18 000 DA/m²

En croisant les économies annuelles d'énergie obtenues grâce à la simulation TRNSYS avec les coûts d'investissement, on peut estimer le nombre d'années nécessaires pour récupérer notre investissement. Cette approche permet de justifier, d'un point de vue économique, les choix techniques retenus.

V.1. Coût de consommation

V.1.1 Bâtiment classique sans isolation

Trimestre	Consommation Chauffage [Th]	Consommation Climatisation [kWh]	Coût Chauffage [DA]	Coût Climatisation [DA]	Total Trimestriel [DA]
T1 (Jan - Mars)	7 514,00	28,00	3 188,33	111,45	3 484,78
T2 (Avr - Juin)	515,00	6 529,00	187,61	41 216,60	42 071,22
T3 (Juil - Sept)	1,00	1 269,00	93,38	81 416,87	82 578,25
T4 (Oct - Déc)	5 056,00	1 154,00	2 010,05	6 167,71	8 512,76
Total Annuel					136 647,01
Coût sur 50 ans					6 832 350,50

Tableau V.1. Coût de consommation pour un bâtiment sans isolation

Le tableau V.1 présente la consommation énergétique trimestrielle en chauffage (exprimée en Th) et en climatisation (en kWh), ainsi que les coûts associés pour un bâtiment sans isolation. Les valeurs sont réparties par trimestre afin d'illustrer la variation saisonnière des besoins énergétiques. Le coût total annuel de consommation énergétique atteint 136 647,01 DA, ce qui représente un coût cumulé de 6 832 350,50 DA sur une période de 50 ans.

V.1.2. Bâtiment avec isolation et double vitrage

Trimestre	Consommation Chauffage [Th]	Consommation Climatisation [kWh]	Coût Chauffage [DA]	Coût Climatisation [DA]	Total Trimestriel [DA]
T1 (Jan - Mars)	1591,26	0,00	464,28	57,16	678,44
T2 (Avr - Juin)	36,52	1370,09	99,98	7 576,19	8 006,17
T3 (Juil - Sept)	0,00	3179,60	93,20	19 378,70	19 919,89
T4 (Oct - Déc)	809,78	396,02	241,70	1 704,85	2 218,55
Total Annuel					30 823,05
Coût sur 50 ans					1 541 152,50

Tableau V.2. Coût de consommation pour un bâtiment avec isolation et double vitrage

Le tableau V.2 illustre la consommation énergétique trimestrielle en chauffage (en Th) et en climatisation (en kWh), ainsi que les coûts correspondants pour un bâtiment équipé d'une isolation thermique et de double vitrage. Grâce à l'amélioration de l'enveloppe thermique du bâtiment, on constate une réduction significative des besoins énergétiques, tant en hiver qu'en été. Le coût total annuel s'élève à 30 823,05 DA, ce qui représente un coût cumulé sur 50 ans de 1 541 152,50 DA, soit une économie substantielle par rapport à un bâtiment non isolé.

On peut conclure que grâce à l'isolation thermique et au double vitrage :

- Nous avons réalisé environ 77 % d'économie sur la consommation énergétique.
- L'investissement est amorti en moins de 5 ans.
- Sur une durée de 50 ans, l'économie totale dépasse 5,2 millions de dinars.

V.1.3. Coût d'investissement en isolation et double vitrage

Élément	Surface [m²]	Épaisseur de l'isolation [cm]	Quantité d'isolant [m²]	Coût unitaire [DA/m²]	Coût total [DA]
Isolation murs	99,28	15	297,84	1250	372 300,00
Isolation toiture	92,75	20	371	1250	463 750,00
Isolation plancher	92,75	15	278,25	1250	347 812,50
Vitrage simple	14	—	—	13 000	182 000,00
Vitrage double	14	—	—	18 000	252 000,00
Total investissement					1 253 862,50

Tableau V.3. Coût d'investissement lié à l'installation des isolants et du double vitrage

Le tableau ci-dessus présente le récapitulatif des surfaces isolées, des quantités d'isolant utilisées et des coûts associés pour chaque élément du bâtiment (murs, toiture, plancher), ainsi que les coûts des vitrages. Il en résulte un investissement global de 1 253 862,50 DA pour l'amélioration thermique de l'enveloppe du bâtiment.

Conclusion

Cette analyse technico-économique a permis de dégager les résultats suivants :

- **Impact de l'isolation thermique :**
  - Elle réduit considérablement la consommation énergétique de chauffage (jusqu'à 80 %) et de climatisation (≈ 50 %).
  - Cela entraîne une baisse importante des coûts annuels.

- **Rentabilité :**
  - L'investissement initial (≈ 1,25 million DA) est amorti en 12 ans. Alors, toute économie réalisée après cette période représente un gain net.
  - À long terme (50 ans), l'économie générée est environ 4 fois supérieure à l'investissement, ce qui démontre la rentabilité technique et économique de l'isolation thermique.

À titre indicatif, ces analyses ont été effectuées en se basant sur les tarifs subventionnés par l'État, correspondant à une réduction d'environ 25 % sur la facture d'électricité et de 20 % sur celle du gaz. Par conséquent, l'adoption des tarifs réels non subventionnés mettrait davantage en évidence les bénéfices économiques des améliorations énergétiques envisagées.

Conclusion

La valorisation d'une optimisation rentable de la performance énergétique globale des bâtiments se positionne comme l'un des piliers fondamentaux des politiques énergétiques mondiales.

Ce mémoire s'est inscrit dans cette dynamique en explorant les leviers d'amélioration de la performance énergétique des constructions, à travers une approche combinant modélisation, simulation et évaluation technico-économique.

L'étude menée à l'aide du logiciel TRNSYS a permis de simuler le comportement énergétique d'un bâtiment résidentiel en conditions réelles, et d'analyser l'impact de différentes solutions d'optimisation : amélioration de l'enveloppe thermique, utilisation d'isolants efficaces, et choix de vitrages performants. Les résultats obtenus ont mis en évidence une réduction significative des besoins en chauffage et en climatisation, démontrant ainsi l'efficacité des stratégies proposées.

Par ailleurs, l'analyse technico-économique a permis de valider la rentabilité des investissements engagés, en soulignant notamment un temps de retour sur investissement raisonnable grâce aux économies d'énergie réalisées sur le long terme.

Au terme de cette étude, il ressort que **la laine de roche** constitue l'isolant thermique le plus performant, aussi bien d'un point de vue technique qu'économique. Son utilisation permet de réduire la consommation énergétique de l'ordre de **78 %**, générant ainsi une économie annuelle estimée à **105 824 DA**, soit un gain cumulé d'environ **5 291 200 DA** sur une période de 50 ans, correspondant à la durée de vie de l'isolant. Ces résultats sont obtenus pour un investissement initial de **1 253 862,50 DA**.

Ainsi, ce travail confirme que la transition vers des bâtiments à faible consommation énergétique est non seulement techniquement réalisable, mais aussi économiquement avantageuse. Il ouvre également la voie à de futures recherches, notamment sur l'intégration des énergies renouvelables, la domotique, la mise en œuvre d'un suivi régulier et d'audits énergétiques, ou encore les matériaux à changement de phase, afin de perfectionner davantage les performances énergétiques des bâtiments dans un contexte climatique comme celui de l'Algérie.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[1] B.P, (British Petroleum Company) Statistical Review of World Energy 2024– Full report.

[2] Bilan Energétique National Année 2024, Ministère de l'Energie –Algérie, Edition 2024.

[3] Djitni. A, « L'approche bâtiment à énergie positive pour la conception d'un centre d'affaire », Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma,2022.

[4] MEDAH.S, « CONTRIBUTION À L'ETUDE DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UNE MAISON SOLAIRE », Mémoire de Master, UNIVERSITÉE DE BLIDA, 2016.

[5] HADDAD Abdelkrim, « Transferts thermiques », Alger 2001.

[6] Yves JANNOT, transferts thermiques, Ecole des Mines Nancy, édition 2012.

[7] Cour BTS F.E.D De La Salle Castres « Transfert thermique. La convection ».

[8] BOUDEHANE. D, ZIADA. N, « Etude des paramètres de construction pour le confort hygrothermique dans le bâtiment à zéro consommation d'énergie (BZE). Cas des et abolissements D'enseignement supérieur dance un climat humide. », Mémoire de Master, UNIVERSITE DE JIJEL, 2019.

[9] AKCHICHE. Z, « ÉTUDE DE COMPORTEMENT D'UNE CHEMINÉE SOLAIRE EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE », Mémoire de magister, Université DE Ouargla.2011.

[10] Siteweb :https://www.faq.enercoop.fr/hc/fr/articles/21976534092050-Confort-thermique-d%C3%A9finition . Consulté le : 16-02-2025.

[11] Fiche technique sur les matériaux isolant. Pole éco construction timousin.

[12] ADIL DU LOIRET Guide isolation thermique. Espace info énergie.

[13] Info-énergie, Guide des matériaux isolants pour une isolation efficace et durable, Edition ADEME.

[14]Siteweb :https://www.mit.edu/search/?q=TRNSYS#gsc.tab=0&gsc.q=TRNSYS&gsc.page=1 . Consulté le :01-03-2025.

[15] BEGGAA. L, et GHERIER. S, IMPACT DE LA FORME ARCHITECTURALE SUR LA PERFORMANCE ENERGETIQUE. Mémoire Master. Université DE Ouargla.2019.

[16] Sitewb : https://fastercapital.com/fr/sujet/strat%C3%A9gies-pour-am%C3%A9liorer-l’efficacit%C3%A9-%C3%A9nerg%C3%A9tique-des-b%C3%A2timents.html/1 . Consulté le : 28-03-2025.

[17] Siteweb : https://www.ecozimut.com/fiches-notion/fiches-general/confort-thermique-batiments/?cn-reloaded=1. Consulté le : 27-02-2025.

[18] Siteweb : https://thermacome.fr/paroles-dexpert/plancher-ou-plafond-chauffant-que-choisir/. Consulté le : 25 -02-2025.