

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلكايد - تلمسان

جامعة تلمسان

Université Aboubakar Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique

Par : Kacemi Fatima Zohra/ Bouraoui Fatiha Marwa.

Sujet

***Analyse comparative des systèmes d'isolation thermique sous
différentes conditions météorologiques***

Soutenu publiquement, le / /, devant le jury composé de

Mr BEGAG Abdelaziz	Grade MCA	université de Tlemcen	Président
Mme SICHAIB Amel	Grade MAA	université de Tlemcen	Examinatrice
Mme BENAHMED Lamia	Grade MCA	université de Tlemcen	Encadrante

Remerciements

*Nous exprimons avant tout notre profonde gratitude à **Allah Tout-Puissant**, qui nous a accordé la santé, la Volonté et la patience nécessaires pour mener à bien nos études et accomplir ce travail de recherche.*

*Nos sincères remerciements Vont à **Madame BENAHMED Lamia**, notre encadrante, pour avoir assuré la direction de ce mémoire. Sa disponibilité, sa rigueur scientifique, sa patience et la qualité de ses conseils ont été d'un grand apport tout au long de ce travail. Grâce à son encadrement attentif, nous avons pu acquérir des connaissances précieuses et développer nos compétences.*

Nous exprimons également notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants du Département de Génie Mécanique pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre cursus universitaire.

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury Mr **BEGAG Abdelaziz** et Mme **SICHAIB Amel** qui nous font l'honneur d'examiner ce mémoire et d'apporter leurs remarques et suggestions enrichissantes.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à **nos familles** pour leur soutien moral et matériel constant tout au long de notre parcours universitaire, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.*

Dédicace

À mes très chers parents, aucune parole ne saurait exprimer ma profonde gratitude. Merci pour votre soutien inconditionnel, vos sacrifices, votre patience et vos prières qui ont été ma force et ma motivation. Ce travail est le fruit de vos efforts. Que dieu vous protège accordez santé, bonheur et longue vie.

À mes très chers frères, mes piliers et mes premiers soutiens au quotidien. Merci pour votre présence constante, votre amour et vos encouragements dans les moments de doute comme de joie. Je vous souhaite une vie remplie de réussite et de sérénité.

À mon encadrante, mme Benahmad Lamia, qui m'a accompagnée durant ces quatre années avec dévouement et bienveillance. Je lui adresse mes plus sincères remerciements pour les efforts précieux qu'elle a consacrés à mon encadrement.

À tous mes enseignants, merci pour la qualité de votre enseignement, vos précieux conseils, votre patience et le savoir que vous nous avez transmis avec professionnalisme tout au long de mon parcours universitaire.

À mes plus chères amies, mes âmes sœurs et mes refuges dans les moments difficiles. Merci pour votre amour, votre écoute et votre soutien sans limite. Chaque rire et chaque mot réconfortant ont illuminé mon parcours. Que notre amitié reste éternelle

Fatiha Marwa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail À mes très chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, le respect et la reconnaissance que je vous porte. Merci pour votre soutien inconditionnel, vos sacrifices, vos encouragements constants et vos prières qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes chers frères **Walid Mohammed** et **Sidahmed** En témoignage de mon affection fraternelle et de ma profonde gratitude pour votre soutien et vos encouragements. À ma chère sœur **Asmaa Kawther** avec toute mon affection, mon estime et mes Vœux de réussite et de bonheur.

À toute la famille KACEMI Pour leur soutien, leur affection et leur présence à mes côtés.

À mes ami(e)s et à tous mes camarades d'études, Pour les moments de partage, d'entraide et de soutien durant ces années universitaires.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. J'espère que ce mémoire constituera une modeste contribution et qu'il pourra être utile aux futurs étudiants dans leurs travaux et recherches.

Avec toute ma gratitude.

Fatima zohra

Résumé

Ce mémoire porte sur l'analyse comparative des systèmes d'isolation thermique appliqués aux bâtiments sous différentes conditions climatiques. Face à l'augmentation de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment et aux enjeux environnementaux actuels, l'amélioration de la performance thermique d'enveloppe bâtie constitue une solution efficace pour réduire les besoins énergétiques et améliorer le confort des occupants. Cette étude s'appuie sur une analyse bibliographique des concepts fondamentaux de la thermique du bâtiment, des mécanismes de transfert de chaleur ainsi que des principales techniques et matériaux d'isolation thermique. Une modélisation numérique d'un bâtiment résidentiel a été réalisée afin d'évaluer l'impact de différents scénarios d'isolation sur les besoins en chauffage et en climatisation. Les simulations thermiques ont permis de comparer les performances énergétiques de plusieurs solutions d'isolation et d'analyser leur comportement sous diverses conditions climatiques. Les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité de l'isolation thermique dans la réduction des déperditions de chaleur, l'amélioration du confort thermique intérieur et la diminution de la consommation énergétique globale du bâtiment.

Mots-clés Isolation thermique, performance énergétique, bâtiment résidentiel, simulation thermique, consommation énergétique, chauffage, climatisation, efficacité énergétique.

Abstract

This thesis presents a comparative analysis of thermal insulation systems applied to buildings under different climatic conditions. In the context of increasing energy consumption in the building sector and growing environmental concerns, improving the thermal performance of building envelopes has become an effective strategy for reducing energy demand and enhancing indoor thermal comfort. The study is based on a literature review covering the fundamental concepts of building thermal behavior, heat transfer mechanisms, and the main thermal insulation techniques and materials. A numerical model of a residential building was developed to evaluate the impact of different insulation scenarios on heating and cooling energy requirements. Thermal simulations were conducted to compare the energy performance of several insulation solutions and to assess their behavior under I Various climatic conditions. The results demonstrate the effectiveness of thermal insulation in reducing heat losses, improving indoor thermal comfort, and decreasing overall building energy consumption.

Keywords Thermal insulation, energy performance, residential building, thermal simulation, energy consumption, heating, cooling, energy efficiency.

الملخص

يتناول هذا البحث دراسة تحليلية مقارنة لأنظمة العزل الحراري المطبقة على المباني تحت ظروف مناخية مختلفة. ونظرًا للارتفاع المستمر في استهلاك الطاقة بقطاع البناء والتحديات البيئية المتزايدة، أصبح تحسين الأداء الحراري لغلاف المبنى من أهم الحلول للحد من الاستهلاك الطاقوي وتحقيق الراحة الحرارية داخل المباني. اعتمدت الدراسة على مراجعة نظرية للمفاهيم الأساسية للحرارة في المباني وآليات انتقال الحرارة، بالإضافة إلى دراسة أهم تقنيات ومواد العزل الحراري المستخدمة في قطاع البناء. كما تم إعداد نموذج عددي لمبنى سكني بهدف تقييم تأثير عدة سيناريوهات للعزل الحراري على احتياجات التدفئة والتبريد. أجريت محاكاة حرارية لمقارنة الأداء الطاقوي لمختلف حلول العزل وتحليل سلوكها في ظروف مناخية متنوعة. وأظهرت النتائج أن العزل الحراري يساهم بشكل فعال في تقليل الفوائد الحرارية وتحسين الراحة الحرارية الداخلية وخفض الاستهلاك الإجمالي للطاقة داخل المبنى.

الكلمات المفتاحية: العزل الحراري، الأداء الطاقوي، المباني السكنية، المحاكاة الحرارية، استهلاك الطاقة، التدفئة، التبريد، الكفاءة الطاقوية.

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
Résumé	iv
Introduction générale.....	1

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Introduction	4
I. 1. Définition et importance de la performance énergétique	4
I. 1. 1 Consommation Énergétique	5
I. 1. 2. Déperdition thermique	8
I. 1. 3. Efficacité énergétique	9
I. 2. Importance d'optimisation thermique dans la réduction des coûts énergétiques	10
I. 2. 1. Définition	10
I. 2. 2. Importance de l'optimisation thermique	11
I. 2. 2. 1. Rationalisation des coûts et résilience structurelle	11
I. 2. 2. 2. Lutte contre inefficace et déperditions de ressources	11
I. 3. Facteurs Clés Influent sur la Performance Énergétique	12
I. 3. 1. Coefficient de Transmission Thermique	12
I. 3. 2. Résistance thermique	13
I. 3. 3. Évaluation des ponts thermiques	13
I. 3. 4. Performances des fenêtres et vitrages	14
I. 3. 5. Efficacité des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC)	14
I. 4. Transfert de chaleur dans les parois	14
I. 4. 1. Conduction	16
I. 4. 2. Convection	17
I. 4. 3. Rayonnement	19
I. 5. Enveloppe du bâtiment	20

I. 5. 1. Définition	20
I. 5. 2. Composants de l'enveloppe du bâtiment	21
I. 5. 2. 1. Murs	21
I. 5. 2. 2. Isolation thermique	21
I. 5. 2. 3. Fenêtres	21
I. 5. 2. 4. Toiture	22
I. 5. 3. Rôle principale de l'enveloppe de bâtiment	23
I. 6. Influence des matériaux et de l'isolation thermique	23
I. 7. Concepts fondamentaux de la thermique du bâtiment	24
I. 7. 1. Définition confort thermique	24
I. 7. 2. Facteurs environnementaux influençant le confort thermique	24
Conclusion.....	27

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Introduction	29
II. 1. Techniques d'isolation	29
II. 1. 1. Murs	29
II. 1. 1. 1. Isolation des murs par l'intérieurs	29
II. 1. 1. 2. Isolation des murs par l'extérieurs	30
II. 1. 1. 3. Comparaison entre l'isolation intérieure et extérieure	31
II. 1. 2. Plancher	32
II. 1. 2. 1. Isolation par le haut	32
II. 1. 2. 2. Isolation par le bas	32
II. 1. 2. 3. Comparaison entre l'isolation par le haut et par le bas	33
II. 1. 3. Toiture	33
II. 1. 3. 1. Isolation de la toiture par l'intérieure	33
II. 1. 3. 2. Isolation de la toiture par l'extérieure	34
II. 2. Techniques innovantes	34

II. 2. 1. Isolants biosourcés	34
II. 2. 2. Matériaux composites	39
II. 3. Performances des isolants	44
II. 3. 1. Propriétés thermiques d'un isolant	44
II. 3. 2. Comparaison entre isolants modernes et traditionnels	46
II. 3. 2. 1. Isolants moderne	47
II. 3. 2. 2. Isolants traditionnels (biosourcés/naturels)	47
II. 4. Propriétés Thermiques des Matériaux	47
II. 4. 1. Matériaux couramment utilisés	47
II. 4. 1. 1. Brique	47
II. 4. 1. 2. Béton	50
II. 4. 1. 3. Bois	52
II. 4. 2. Nouveaux matériaux	54
II. 4. 2. 1. Bétons légers	54
II. 5. Impact sur la Performance Énergétique	59
II. 5. 1. Rôle de l'inertie thermique	59
II. 5. 2. Effets des matériaux sur le confort thermique et la consommation énergétique	60
Conclusion	61

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Introduction	63
III. 1. Présentation de la wilaya de Tlemcen	63
III. 1. 1. Présentation de la commune de Remchi	63
III. 2. Présentation de l'Entité Étudiée	64
III. 2. 1. Fiche technique du bâtiment	64
III. 2. 2. Contexte géographique et climatique	64
III. 2. 3. Enveloppe du bâtiment et les différentes variantes d'étude	66
III. 2. 4. Objectifs de l'étude	66

III. 2. 5. Donnés de température de la commune de Remchi	66
III. 2. 6. Caractéristiques des portes	67
III. 2. 7. Caractéristiques des fenêtres	67
III. 2. 8. Caractéristiques géométriques des éléments porteurs	67
III. 3. Calculs des déperditions	68
III. 3. 1. Avant isolation	68
III. 3. 1. 1. Planchers	68
III. 3. 1. 2. Poutres longitudinales	70
III. 3. 1. 3. Poutres transversales	70
III. 3. 1. 4. Poteaux	70
III. 3. 2. Après isolation intérieure	72
III. 3. 2. 1. Planchers	73
III. 3. 2. 2. Poutres longitudinales	74
III. 3. 2. 3. Poutres transversales	75
III. 3. 3. Après isolation extérieure	76
III. 3. 3. 1. Plancher	76
III. 4. Besoins en chauffage et en climatisation	79
III. 4. 1. Degré –jour de chauffage et de climatisation	80
III. 4. 2. Calculs des besoins en chauffage et en climatisation	81
III. 5. Bilan de puissance	83
III. 5. 1. Pour la saison d’été	83
III. 5. 2. Pour la saison d’hiver	86
III. 6. Consommation trimestrielle d’électricité et du gaz	88
III. 7. Estimation de la facture	89
III. 7. 1. Pour l’été	90
III. 7. 2. Pour l’hiver	91
III. 8. Evaluation de l’efficacité énergétique (étude comparative avant et après isolation)	93

Conclusion.....	94
Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation numérique	
Introduction	97
IV. 1. Outils et logiciels utilisés	97
IV. 2. Description des scénarios étudiés	99
IV. 3. Procédure de simulation sous OpenStudio	99
IV. 3. 1 Configuration du fichier météorologique	99
IV. 3. 2 Géométrie du bâtiment	100
IV. 3. 3. Visualisation tridimensionnelle du modèle	101
IV. 4. Configuration des matériaux dans l'interface de simulation	101
IV. 4. 1 Zones thermiques	102
IV. 4. 2. Modélisation du système de traitement d'air	103
IV. 4. 3. Programmation des scénarios de fonctionnement (Schedules)	104
IV. 4. 4. Définition des charges internes (Electric Equipment)	106
IV. 5. Résultats du cas de référence (sans isolation)	106
IV. 5. 1 Besoins en chauffage et en climatisation	112
IV. 5. 2 Consommation des équipements électriques	113
IV. 6. Simulation du bâtiment avec isolation thermique intérieure (ITI)	116
IV. 6. 1. Propriétés thermiques des matériaux isolants	117
IV. 6. 2. Analyse des nouveaux résultats de consommation	117
IV. 6. 3. Besoins en chauffage et en climatisation	118
IV. 7. Simulation du bâtiment avec isolation thermique extérieure (ITE)	120
IV. 7. 1 Propriétés thermiques des matériaux isolants	120
IV. 7. 2. Analyse des nouveaux résultats de consommation	121
IV. 7. 3. Besoins en chauffage et en climatisation	121
IV. 8. Comparaison de la consommation énergétique selon le type d'isolation	123
Conclusion	126

Conclusion générale	128
Références bibliographiques	131

Listes des figures

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Figure I. 1 : Consommation mondiale d'énergie primaire par énergie.	6
Figure I. 2 : Structure de la consommation nationale d'énergie	7
Figure I. 3 : Structure de la consommation finale d'énergie par Secteur d'activité.	7
Figure I. 4 : Principales sources de déperdition.	8
Figure I. 5 : Quatre piliers de la performance énergétique en entreprise.	10
Figure I. 6 : Évaluation des économies réelles après une action d'amélioration énergétique.	11
Figure I. 7: Indice de Performance Énergétique (IPÉ).	13
Figure I. 8: Schéma des résistances thermiques.	13
Figure I. 9 : Classements de vitrages.	14
Figure I. 10 : Sens de transfert de chaleur.	15
Figure I. 11 : Transfert de chaleur dans une maison.	15
Figure I. 12 : Transfert de chaleur par conduction.	16
Figure I. 13 : Schéma de la convection forcée pour refroidissement estival.	18
Figure I. 14 : Schéma de la convection forcée et pour chauffage hivernal.	18
Figure I. 15 : Convection naturelle de l'air dans une pièce chauffée.	19
Figure I. 16 : Façade face au soleil.	19
Figure I. 17 : Mur d'une maison en brique.	21
Figure I. 18 : Isolation thermique par l'extérieur.	21
Figure I. 19 : Fenêtre double vitrage en PVC.	22
Figure I. 20 : Toiture en tuiles.	22
Figure I. 21 : Composition de matériaux biosourcés pour le bâtiment.	24
Figure I. 22 : Évolution de la température intérieure d'une pièce	24
Figure I. 23 : Modes de transmission chaleur entre le corps humain	25
Figure I. 24 : Diagramme de l'air humide.	26
Figure I. 25 : Impact de la rugosité du terrain et de la hauteur sur la vitesse du vent	26

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Figure II. 1 : Isolation d'un mur par l'intérieure.	30
Figure II. 2 : Isolation d'un mur par l'extérieure.	31
Figure II. 3 : Comparaison entre l'isolation intérieure et l'isolation extérieure.	31
Figure II. 4 : Isolation du plancher par le haut.	32
Figure II. 5 : Isolation du plancher par le bas.	33

Figure II. 6 : Isolation de toiture par l'intérieure.	33
Figure II. 7 : Isolation de toiture par l'extérieure.	34
Figure II. 8 : Un rouleau de laine de lin	35
Figure II. 9 : Laine de chanvre	35
Figure II. 10 : Panneaux de liège expansé.	37
Figure II. 11 : Laine de bois.	38
Figure II. 12 : Laine de <i>mouton</i>	38
Figure II. 13 : Panneaux isolant sous vide.	40
Figure II. 14 : Béton en chanvre.	41
Figure II. 15 : Béton d'anas de lin.	41
Figure II 16 : Isolant polyuréthane.	43
Figure II. 17 : Polystyrène expansé.	43
Figure II. 18 : Schéma des résistances thermique d'une paroi multicouche.	46
Figure II. 19 : Pile de briques modernes, faites d'argile et de sable.	48
Figure II. 20 : Brique pleine.	49
Figure II. 21 Brique creuse 16 tours 200x200x300mm.	49
Figure II. 22 : Brique mono mur avec isolation intégrés.	49
Figure II. 23 : Brique en terre cuite.	50
Figure II 24 : Mise en œuvre d'un béton léger isolant pour une toiture	50
Figure II. 25 : Texture macroscopique d'un béton à granulats ordinaires	51
Figure II. 26 : Béton lourd comme barrière structurelle et thermique.	51
Figure II. 27 : Illustration de la structure interne du bois.	52
Figure II. 28 : Pose de panneaux de fibres de bois semi-rigides sur une charpente bois.	54
Figure II 29 : Texture macroscopique d'un béton léger	55
Figure II. 30 : Béton de granulat léger.	55
Figure II. 31 Structure d'une bille d'argile expansée après traitement thermique.	56
Figure II. 32 : Schématisation des phases de stockage thermique par un MCP.	58
Figure II. 33 : Cycle de stockage et de restitution de la chaleur par inertie thermique.	60

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Figure III. 1 : Plan du bâtiment étudié AutoCAD	65
Figure III. 2 : Répartition de la consommation d'électricité des équipements en été	86
Figure III. 3 : Répartition de la consommation électrique mensuelle en hiver.	87
Figure III. 4 : Analyse comparative des besoins électrique estivaux	88
Figure III. 5 : Impact d'isolation sur la consommation de gaz en période hivernale.	89

Figure III. 6 : Evolution des paramètres thermiques et financiers avant et après isolation.	93
--	----

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation numérique

Figure IV. 1 : Configuration du fichier météorologique sous OpenStudio	100
Figure IV. 2 : Plan du bâtiment et répartition des zones sous OpenStudio	100
Figure IV. 3 : Vue 3D du bâtiment modélisé sous OpenStudio	101
Figure IV. 4 : Interface de saisie des propriétés thermophysiques des matériaux	101
Figure IV. 5 : Configuration des zones thermiques et affectation des systèmes HVAC	102
Figure IV. 6 : Schéma de la boucle de traitement d'air et des composants de distribution. .	103
Figure IV. 7 : Définition des périodes de chauffage	104
Figure IV. 8 : Définition des périodes de climatisation.	105
Figure IV. 9 : Configuration des charges électriques internes (Éclairage et Équipements). .	106
Figure IV. 10 : Taux d'occupation des locaux (occ).	109
Figure IV. 11 : Profils horaires du niveau d'activité métabolique (act).....	109
Figure IV. 12 : Profils horaires d'utilisation de l'éclairage (lights)	110
Figure IV. 13 : Profils horaires d'utilisation des équipements électriques (epp)	110
Figure IV. 14 : Température de consigne de chauffage (heating).	111
Figure IV. 15 : Température de consigne de refroidissement (cooling).	111
Figure IV. 16 : Consommation énergétique (kWh).....	112
Figure IV. 17 : HVAC (chauffage et climatisation).	113
Figure IV. 18 : Modélisation des parois Intégration de l'isolation (Laine de verre)	117
Figure IV. 19 Consommation énergétique (kWh) après isolation intérieure.	118
Figure IV. 20 : HVAC (chauffage, et climatisation).	119
Figure IV. 21 : Profil de fraction de consommation horaire d'Eau Chaude Sanitaire (DHW).	120
Figure IV. 22 : Configuration des propriétés thermophysiques du panneau de polyuréthane	121
Figure IV. 23 : Consommation énergétique (kWh) après isolation extérieure (ITE).....	122
Figure IV. 24 HVAC (chauffage, et climatisation).	123
Figure IV. 25 : Évaluation sectorielle par poste d'usage	125
Figure IV. 26 Bilan macroscopique global et efficacité systémique.....	125

Listes des Tableaux

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Tableau I. 1 : Domaine de consommation énergétique dans le bâtiment.....	5
Tableau I. 2 : Consommation nationale par agrégat.	6

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Tableau II. 1 : Comparaison entre l'isolation intérieure et extérieure.	32
Tableau II. 2 : Critères de performances de la laine de lin.	35
Tableau II. 3 : Critères de performances de la laine de chanvre.	36
Tableau II. 4 : Critères de performances de liège expansé.	37
Tableau II. 5 : Critères de performances de la laine de bois.	38
Tableau II. 6 : Critères de performances de la laine de mouton.	39
Tableau II. 7 : Propriétés thermiques de quelques isolants.	46
Tableau II. 8 : Comparatif technique des propriétés thermiques et acoustiques des isolants modernes	47
Tableau II. 9 : Comparatif technique des propriétés thermiques et acoustiques des isolants traditionnels.	47
-Tableau II. 10 : Présente l'évolution de la Conductivité thermique des blocs de béton à granulats ordinaires en fonction de leur masse volumique.	51
Tableau II. 11 : Présente l'évolution de la Conductivité thermique du béton lourd	52
Tableau II. 12 : Bois et dérivés de bois.	53
Tableau II. 13 : Blocs de béton d'argile expansé.	56
Tableau II. 14 : Blocs de béton avec d'autres granulats légers.	57

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Tableau III. 1 : Température moyenne de la commune de Remchi.	66
Tableau III. 2 : Caractéristiques des portes.	67
Tableau III. 3 : Caractéristiques des fenêtres.	67
Tableau III. 4 : Composants et caractéristiques de toiture (sans isolation).	68
Tableau III. 5 : Composants et caractéristiques du plancher bas (sans isolation).	69
Tableau III. 6 : Composants et caractéristiques des murs de façade (sans isolation).	70
Tableau III. 7 : Composants et caractéristiques des poutres longitudinales.	70
Tableau III. 8 : Composants et caractéristiques des poteaux.	71
Tableau III. 9 : Déperdition surfaciques vers l'extérieur(avant isolation)	71
Tableau III. 10 : Composants et caractéristiques du Toiture (après isolation).	73
Tableau III. 11 : Composants et caractéristiques du plancher bas (après isolation).	73

Tableau III. 12 : Composants et Caractéristiques de la paroi extérieure en ITI.....	74
Tableau III. 13 : Composants et caractéristiques des poutres longitudinales (après isolation).	74
Tableau III. 14 : Composants et caractéristiques des poteaux (après isolation).	75
Tableau III. 15 : Déperditions surfaciques vers l'extérieur (après isolation).	75
Tableau III. 16 : Composants et caractéristiques du Toiture (après isolation).	76
Tableau III. 17 : Composants et caractéristiques du plancher bas (après isolation).	77
Tableau III. 18 : Composants et caractéristiques des murs extérieurs(après isolation).	77
Tableau III. 19 : Composants et caractéristiques des poutres longitudinales (après isolation).	78
Tableau III. 20 : Composants et caractéristiques du plancher bas (après isolation extérieure).	78
Tableau III. 21 : Déperditions surfaciques vers l'extérieur (après isolation extérieure).	79
Tableau III. 22 : Calcul du nombre de degrés jours mensuel (Dj).	80
Tableau III. 23 : Calcul besoins en chauffage et en climatisation annuel (avant isolation)....	81
Tableau III. 24 : Besoins en chauffage et en climatisation mensuelle (avant isolation)	81
Tableau III. 25 : Besoins en chauffage et en climatisation annuel (après isolation intérieure	82
Tableau III. 26 Besoins en chauffage et en climatisation mensuelle (après isolation intérieure)	82
Tableau III. 27 : Besoins en chauffage et en climatisation annuelle (après isolation extérieure	82
Tableau III. 28 : besoins en chauffage et en climatisation mensuelle (après isolation extérieure).....	82
Tableau III. 29 : Consommation d'électricité pour la saison d'été avant isolation.....	83
Tableau III. 30 : Consommation d'électricité pour la saison d'été (après isolation intérieure).	84
Tableau III. 31 : Consommation d'électricité pour la saison d'été (après isolation extérieure).	85
Tableau III. . 32 : Consommation du gaz pour la saison d'été.	85
Tableau III. 33 : Consommation mensuelle d'électricité des équipements en été.	86
Tableau III. 34 : Consommation d'électricité pour la saison d'hiver.	86
Tableau III. 35 : Consommation mensuelle d'électricité des équipements en hiver	87
Tableau III. 36 : Consommation du gaz pour la saison d'hiver (avant et après isolation).....	87
Tableau III. 37 : Consommation trimestrielle d'électricité pour l'été avant et après isolation	88

Tableau III. 38 : Consommation trimestrielle d'électricité pour l'hiver	88
Tableau III. 39 : Consommation trimestrielle du gaz en hiver avant et après isolation.....	89
Tableau III. 40 : Coût d'électricité pour la saison d'été (avant isolation).....	90
Tableau III. 41 : Coût d'électricité pour la saison d'été (après isolation intérieure).	90
Tableau III. 42 : Coût d'électricité pour la saison d'été (après isolation extérieure).	90
Tableau III. 43 : Coût du gaz pour la saison d'été.	91
Tableau III. 44 Coût d'électricité pour la saison d'hiver	91
Tableau III. 45 : Coût du gaz pour la saison d'hiver avant isolation.	91
Tableau III. . 46 : Coût du gaz pour la saison d'hiver après isolation intérieure.	92
Tableau III. 47 Coût du gaz pour la saison d'hiver après isolation extérieure.....	92
Tableau III. . 48 : Bilan comparatif avant et après isolation thermique	93

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation numérique

Tableau IV. 1 : Synthèse des surfaces du bâtiment simulé	106
Tableau IV. . 2 : Synthèse des coefficients K par type de paroi (Cas de référence) simulé..	107
Tableau IV. 3 : Propriétés thermo-physiques des fenêtres simulées	108
Tableau IV. 4 : Consommation énergétique annuelle (simulation).....	112
Tableau IV. 5 : Validation de la puissance installée par zone (Cas de référence)	113
Tableau IV. 6 : Consommation d'électricité pour la saison d'été (avant isolation) (Simulation)	116
Tableau IV. 7 : Consommation d'électricité pour la saison d'hiver (avant isolation) (Simulation).....	116
Table IV. 8 : Caractéristiques des isolants intégrés dans le modèle.....	117
Tableau IV. 9 : Comparaison entre les résultats théoriques et numériques".	118
Tableau IV. 10 : Consommation énergétique annuelle (simulation).....	118
Tableau IV. 11 : Caractéristiques des isolants intégrés dans le modèle (Configuration ITE)	120
Tableau IV. 12 : Valeurs des coefficients de transmission thermique globale des parois de l'enveloppe (Variante ITE) calculées par OpenStudio	121
Tableau IV. 13 : Usage énergétique annuel après isolation thermique extérieure (ITE)	121
Tableau IV. 14 : Comparaison des consommations énergétiques annuelles.....	123

Nomenclature :

Symbole	Désignation	Unité
Dp	Coefficient de déperditions du bâtiment	W/K
Kbât	Coefficient global de transmission thermique	W/m ² ·K
Sdép	Surface totale de déperdition thermique	m ²
R	Coefficient de pertes par renouvellement d'air	W/m ³ ·K
Vh	Volume habitable	m ³
U	Coefficient de transmission thermique	W/m ² ·K
Rth	Résistance thermique	m ² ·K/W
e	Épaisseur du matériau	m
λ	Conductivité thermique	W/m·K
Q	Flux thermique	W
Φ	Densité de flux thermique	W/m ²
T	Température	°C ou K
ΔT	Différence de température	K ou °C
h	Coefficient de convection	W/m ² ·K

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur du bâtiment est l'un des plus gros consommateurs d'énergie à l'échelle mondiale et nationale. La consommation d'énergie crée d'importants enjeux environnementaux et des exigences réglementaires.

L'objectif scientifique et technique de ce mémoire est de réaliser une analyse comparative des systèmes d'isolation thermique sous différentes conditions climatiques. A travers une méthodologie générale de recherche structurée, ce travail vise à évaluer l'efficacité de diverses techniques et matériaux d'isolation afin d'améliorer la performance thermique globale des bâtiments.

L'organisation du travail se fait en quatre chapitres qui sont à la fois complémentaires et progressifs :

- Le **Chapitre 1** : dresse un état de l'art complet sur la performance thermique des bâtiments. Il définit les concepts fondamentaux (consommation, déperditions) et analyse les facteurs clés influençant l'enveloppe bâtie, tels que les transferts de chaleur et l'impact des matériaux.

- Le **Chapitre 2** : est dédié à l'étude approfondie des matériaux et des techniques par l'intérieur et l'extérieur, tout en intégrant des solutions innovantes comme les isolants bio sourcés et les matériaux à changement de phase. Enfin, il évalue l'impact de ces propriétés sur l'inertie thermique, le confort des usagers et la consommation énergétique globale.

- Le **Chapitre 3** : établit le cadre méthodologique et la description du cas d'étude. Il présente en détail le bâtiment résidentiel soumis à l'Évaluation et définit les données climatiques. Ce chapitre intègre une étude détaillée et une comparaison de trois cas distincts (**bâtiment non isolé, avec isolation intérieure, et avec isolation extérieure**), en analysant précisément l'impact de chaque configuration sur la consommation énergétique ainsi que sur la facture d'électricité et de gaz en période hivernale et estivale.

- Le **Chapitre 4** : présente les résultats de simulation et leur interprétation. Il analyse l'impact des solutions d'isolation thermique sur la performance énergétique du bâtiment à travers une comparaison détaillée des consommations énergétiques avant et après isolation. Ce chapitre met également en évidence l'efficacité des techniques d'isolation intérieure et extérieure en termes de réduction des besoins en chauffage et en climatisation ainsi que d'amélioration de l'efficacité énergétique globale du bâtiment.

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Introduction

Dans un contexte de transition énergétique mondiale, la maîtrise de la consommation des bâtiments est devenue un enjeu stratégique majeur. Les statistiques récentes montrent une dynamique préoccupante la consommation nationale d'énergie a progressé de **3,8 %** entre 2023 et 2024, atteignant un total de **74 892 K Tep**. Au cœur de ce bilan, la consommation finale représente la part prépondérante avec **76,1 %** du total, affichant une hausse nette de **5,1 %** en seulement un an. Ces chiffres soulignent l'urgence d'optimiser l'efficacité énergétique des infrastructures pour stabiliser la demande globale. La performance énergétique d'un édifice repose sur une synergie complexe entre ses systèmes actifs et son enveloppe passive. Elle englobe cinq postes fondamentaux le chauffage, le refroidissement, la Ventilation mécanique, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et l'éclairage artificiel. L'objectif de l'optimisation thermique est donc de garantir le confort des occupants tout en minimisant les besoins de production et de distribution de chaleur ou de froid. Ce chapitre dresse un état de l'art des concepts fondamentaux de la thermique du bâtiment. Nous définirons d'abord les notions clés d'efficacité et de déperdition, avant d'analyser les phénomènes physiques de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) qui s'opèrent au travers de l'enveloppe. Enfin, nous explorerons l'influence déterminante des matériaux et des techniques d'isolation sur la réduction des coûts énergétiques et l'amélioration de l'empreinte environnementale du bâtiment.

I. 1. Définition et importance de la performance énergétique :

Le concept de performance énergétique d'un bâtiment est étroitement lié à celui d'efficacité énergétique. Cette dernière indique le rapport entre **l'énergie utile au sein de l'édifice et l'énergie totale absorbée par ses systèmes**. Quant à la performance énergétique, elle fournit une référence pour quantifier la consommation d'énergie du bâtiment sur une période d'un an, offrant ainsi la possibilité d'établir des objectifs de réduction énergétique tout en garantissant le confort thermique des occupants. Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité énergétique du parc immobilier représente l'un des défis principaux dans la lutte contre le changement climatique [1].

D'après la directive européenne 2010/31/UE, la performance énergétique d'un édifice désigne la quantité d'énergie calculée ou mesurée pour répondre aux besoins typiques liés à une utilisation normale du bâtiment, incluant notamment le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage. (Voir Tableau 1. 1).

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

En outre, la structure, les infrastructures et les systèmes techniques du bâtiment exercent une influence cruciale sur sa consommation d'énergie. Parmi les facteurs déterminants, citons en premier lieu la géométrie de l'édifice, qui englobe ses dimensions globales, sa compacité, son interaction avec l'environnement direct ainsi que la distribution des espaces intérieurs [1]. Deuxièmement, l'enveloppe du bâtiment joue un rôle majeur. Elle comprend l'ensemble des composants séparant l'ambiance intérieure de l'environnement extérieur (murs extérieurs, surfaces vitrées des façades, planchers et toiture) et régit directement les déperditions thermiques ainsi que les apports solaires. En troisième lieu, les matériaux de construction dictent le comportement thermique de la structure, notamment à travers leur conductivité et leur inertie thermique [1]

Tableau I. 1 : Domaine de consommation énergétique dans le bâtiment

Poste de consommation	Description technique / Objectif
Chauffage	Génération et acheminement de la chaleur.
Refroidissement	Génération et acheminement du froid (climatisation).
Ventilation	Renouvellement et qualité de l'air intérieur.
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	Production et distribution d'eau chaude domestique.
Éclairage	Gestion des sources lumineuses artificielles.

I. 1. 1 Consommation Énergétique :

La consommation énergétique d'un bâtiment correspond à la quantité d'énergie totale absorbée par ses différents équipements et systèmes techniques pour assurer son fonctionnement. Cela englobe notamment les systèmes de chauffage, de climatisation, de ventilation, d'éclairage ainsi que les appareils électro-domestiques. Cette consommation est quantifiée de manière standardisée en **kWh/m²an** [2]. L'évaluation de la performance énergétique d'un logement s'effectue généralement au moyen d'une étiquette environnementale, classant le bâti sur une échelle allant de **A (logement à haute performance énergétique)** à **G (logement énergivore)**. Cette classification permet de mesurer directement l'empreinte environnementale et les émissions de gaz à effet de serre d'une construction à l'échelle globale [2].

La classification énergétique d'un bâtiment est déterminée par son niveau de consommation énergétique. Les réglementations thermiques actuelles ont été renforcées afin de réduire drastiquement les consommations et d'imposer, pour les constructions à haute performance, un seuil cible ne dépassant pas **50 kWh/m²an**. L'objectif principal de ces normes est de limiter de manière significative les émissions de **CO₂** dans l'atmosphère [2].

À l'échelle globale, la consommation mondiale d'énergie primaire a atteint 172 821 TWh en 2022, ce qui représente une hausse de 71 % par rapport à 1990. Les énergies fossiles constituent encore la majorité du **mix** énergétique primaire mondial (81 % en 2022). Leur utilisation connaît

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

une progression légèrement moins rapide que la demande globale (+ 69 % depuis 1990), en raison de la croissance plus modérée des produits pétroliers. Ces derniers ont enregistré une augmentation de 39 % durant cette période, une dynamique bien inférieure à celle du charbon (+ 85 %) et du gaz naturel (+ 107 %) [2].

Parallèlement, depuis 1990, l'exploitation de la biomasse et des déchets a progressé de 56 %, représentant 9 % du mix énergétique primaire en 2022. **L'énergie hydraulique** a enregistré une hausse de 103 % (soit 2,5 % du mix en 2022), tandis que le nucléaire a progressé de 33 % (constituant 4,7 % de la consommation d'énergie primaire en 2022). Enfin, la consommation des autres énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermie) a été multipliée par 12, atteignant une part de **3,1 %** du mix mondial [3].

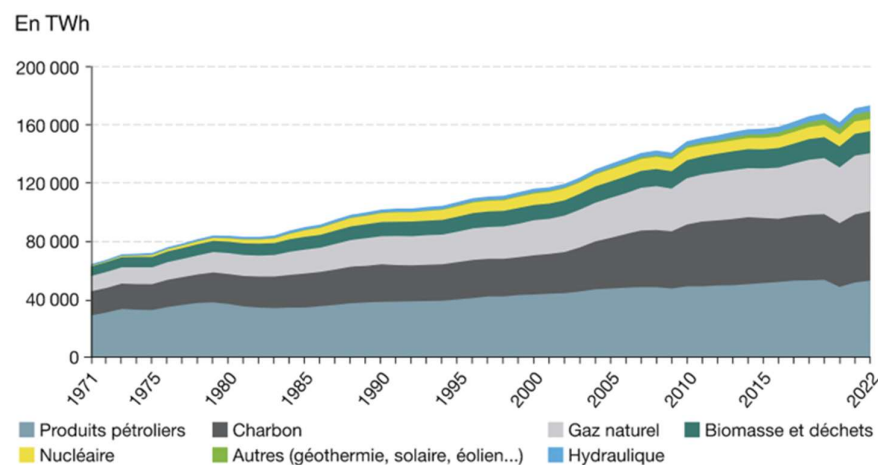


Figure I. 1 : Consommation mondiale d'énergie primaire par énergie. [4]

En Algérie, la consommation d'énergie à l'échelle nationale (incluant les pertes) a grimpé à **74,9 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep)**, ce qui représente une augmentation de 3,8 % comparativement à l'année précédente. Cette progression est principalement tirée par la hausse de la consommation finale (+5,1 %), suivie par celle du secteur de l'énergie et des industries énergétiques (+0,5 %) [5].

Tableau I. 2 : Consommation nationale par agrégat.

Postes de Consommation	2023	2024	Variation (%)
Consommation Finale	54 204	56 982	+ 5,1 %

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Secteur Industriel Énergétique	8 735	8 783	+ 0,5 %
Usages Non-Énergétiques	4 605	4 490	- 2,5 %
Pertes de système	4 639	4 638	- 0,02 %
Total national	72 183	74 892	+ 3,8 %

Entre 2023 et 2024, la structure de la consommation énergétique nationale n'a pas subi de modifications notables. La consommation finale demeure largement prédominante, représentant 76 % du total, suivie par les consommations propres au secteur de l'énergie (12 %), les pertes de transformation et de transport (6 %) et enfin les usages non énergétiques (6 %) [4], comme précisé ci-dessous

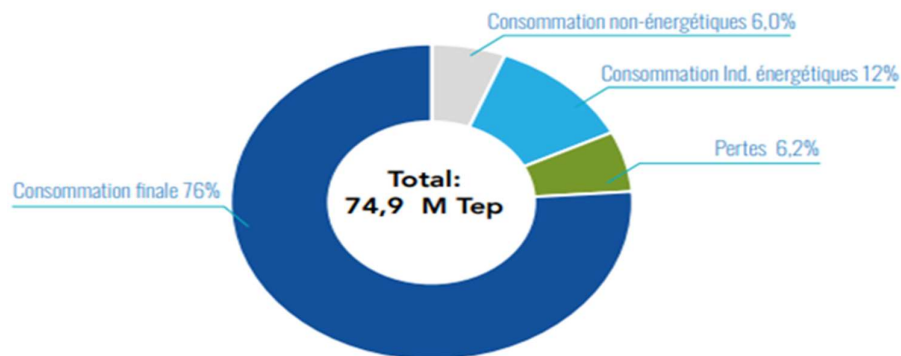


Figure I. 2 : Structure de la consommation nationale d'énergie [5]

Le secteur « Ménages & autres » domine toujours la structure de la consommation finale avec une part de 45%, suivi par le secteur des transports qui représente 30% et enfin, le secteur « Industrie et BTP » qui détient 25%. [4], Cela est clairement représenté dans le graphique suivant

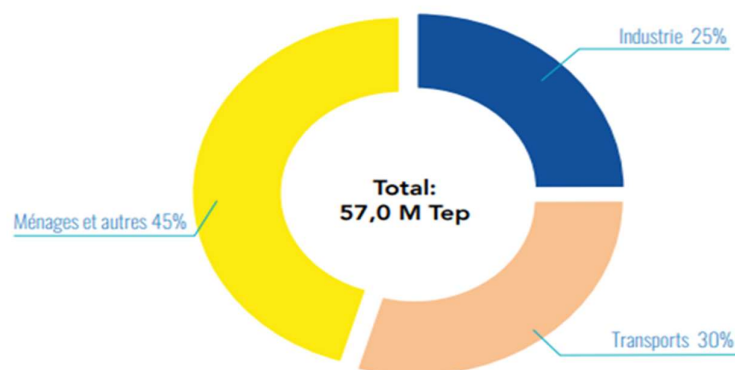


Figure I. 3 : Structure de la consommation finale d'énergie par Secteur d'activité. [5]

I. 1. 2. Déperdition thermique :

Les déperditions thermiques sont la chaleur qui sort d'une pièce ou d'un ensemble de pièces à travers les murs et par le Renouvellement de l'air, pour une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Elles sont exprimées en watts pour chaque degré Celsius ($W/^{\circ}C$). [6]

Les déperditions thermiques représentent le flux de chaleur s'échappant d'un volume chauffé ou climatisé vers l'environnement extérieur sous l'effet d'une différence de température, s'exprimant soit sous la forme d'un coefficient quantifié en watts par degré Celsius ($W/^{\circ}C$), soit en watts (W) lorsqu'il s'agit du transfert thermique total de base calculé sous des conditions intérieures et extérieures nominales. Ce flux thermique global s'effectue principalement par trois vecteurs majeurs, à savoir la transmission surfacique à travers les parois opaques et vitrées délimitant l'enveloppe architecturale telles que les murs extérieurs, la toiture, le plancher bas et les menuiseries vitrées, la transmission linéique au niveau des ponts thermiques qui se situent aux nœuds constructifs où la continuité de l'isolation est interrompue comme les liaisons d'angles, les jonctions d'inter planchers ou les contours de baies, et enfin le renouvellement d'air par le biais des infiltrations parasites et de la ventilation mécanique indispensable au maintien de la qualité de l'air intérieur [6].

La chaleur se dissipe à

- 30% à travers le toit
- 20% via la ventilation
- 20% par les façades extérieures
- 15% grâce aux fenêtres
- 10% du plancher inférieur
- 5% dû aux ponts thermiques. [7]

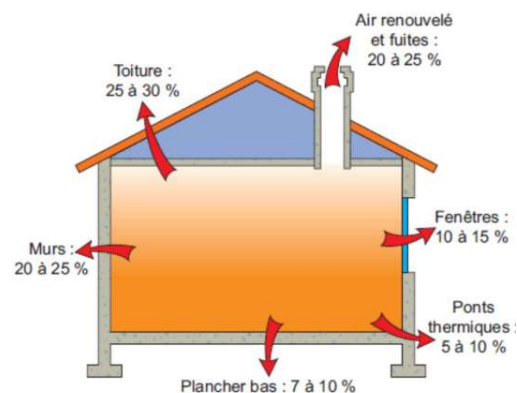


Figure I. 4 : Principales sources de déperdition. [8]

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

La Méthode de calcul (basé sur le coefficient $K_{bât}$ [W/m^2K]) de la puissance minimale requise pour le chauffage. Cette opération doit être effectuée en deux étapes

- identifier le coefficient de pertes, dénommé D_p , associé au bâtiment ;
- considérer l'intervalle maximal de températures. [7]

Exemple :

Calcul de la Valeur du coefficient de déperditions du bâtiment (D_p) en intégrant la ventilation du bâtiment

$$D_p [W/K] = K_{bât} [W/m^2K] \times S_{dép} [m^2] + R [W/m^3K] \times V_h [m^3] \quad (I. 1)$$

Avec :

* D_p [W/K , $W/°C$] : coefficient de déperditions du bâtiment

* $K_{bât}$ [W/m^2K] : coefficient de transmission surfacique (correspond à une Valeur moyenne pour le bâtiment)

* $S_{dép}$ [m^2] : somme des surfaces des parois concernées par l'échange de chaleur

* R [W/m^3K] : coefficient de pertes par Renouvellement d'air

* V_h [m^3] : volume habitable. [9]

I. 1. 3. Efficacité énergétique :

Au cours de la première décennie du XXI^e siècle, l'efficacité énergétique est perçue comme un enjeu majeur à l'échelle internationale. C'est sous l'initiative des gouvernements que des actions visant à favoriser son progrès ont été mises en œuvre. Ils visent à relever trois défis majeurs gérer la problématique de la sécurité de l'approvisionnement énergétique en lien avec les fluctuations des coûts énergétiques, et ensuite aborder la problématique du changement climatique. [10]

La technologie va nous fournir tout ce qu'il faut pour réduire notre consommation d'énergie et répondre à nos besoins, dans le cadre de l'efficacité énergétique. La nécessité est d'avoir une température de 19°C. [10]

Grâce à l'utilisation d'hyper isolants et de systèmes thermiques de haute efficacité, on peut considérablement diminuer la quantité d'énergie requise pour maintenir notre besoin de 19°C. Il s'agit du champ de l'efficacité énergétique. Ceci sera déterminant dans la conception des édifices du futur. Elle englobe aussi bien l'isolation des édifices que la génération de chaleur efficace, l'éclairage à faible consommation d'énergie et les ordinateurs à consommation ultra-faible. [10]

Depuis deux décennies, l'efficacité énergétique a connu une avancée significative, en grande partie grâce à l'impulsion donnée en Allemagne. Cependant, il est fort possible qu'il y

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

ait des avancées remarquables dans les deux prochaines décennies. En effet, la diminution de la consommation d'énergie s'est transformée en un enjeu crucial pour la planète et est désormais perçue comme stratégique. Cette prise de conscience risque de stimuler l'innovation au sein des entreprises et des centres de recherche. Une révolution est attendue de manière imminente. Il est probable que le domaine de l'éclairage (notamment avec les LED, mais pas exclusivement...), ainsi que celui des pompes à chaleur présentant des coefficients de performance particulièrement élevés, soient déjà présents sur le marché japonais. De plus, il semblerait que les États-Unis se concentrent grandement sur les technologies à faibles émissions de carbone. Des isolants beaucoup plus efficaces devraient être opérationnels dans un laps de temps relativement court. [10]



Figure I. 5 : Quatre piliers de la performance énergétique en entreprise. [11]

I. 2. Importance d'optimisation thermique dans la réduction des coûts énergétiques :

I. 2. 1. Définition :

L'optimisation énergétique est une approche visant à réduire la consommation d'énergie des bâtiments et des processus industriels tout en maintenant ou en améliorant les performances et le confort. Cela implique la mise en place de mesures visant à optimiser l'utilisation de l'énergie, comme l'installation de systèmes de contrôle énergétique et de technologies d'isolation thermique, ainsi que la promotion de pratiques efficaces en matière d'utilisation de l'énergie. Une meilleure gestion des dépenses énergétiques. Dans un contexte de hausse constante des prix de l'énergie et d'appel à la sobriété, maîtriser ses consommations devient un impératif économique.

Grâce à l'optimisation énergétique, entreprises et copropriétés peuvent mieux comprendre et analyser leurs usages énergétiques. [12]

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Ainsi, les systèmes de suivi et de monitoring énergétique permettent de détecter en temps réel les sources de gaspillage, ou les équipements énergivores, pour une meilleure gestion de l'énergie. En outre, la transparence fournie par ces systèmes de mesure et d'analyse facilite la budgétisation des coûts énergétiques pour éviter les impondérables financiers. Flexibilité énergétique accrue De plus, l'optimisation énergétique contribue à l'augmentation de la flexibilité des parties prenantes face aux imprévus du marché de l'énergie. En effet, les bâtiments adaptés lorsqu'ils contiennent des solutions intelligentes sont en mesure de régler leur consommation en fonction de l'évolution des taux d'énergie pendant des périodes et de même façon des besoins réels. Par exemple, un système de gestion de l'énergie automatisé permet de consommer plus pendant les heures creuses où les prix sont les plus bas et de baisser les usages en autres périodes. [12]

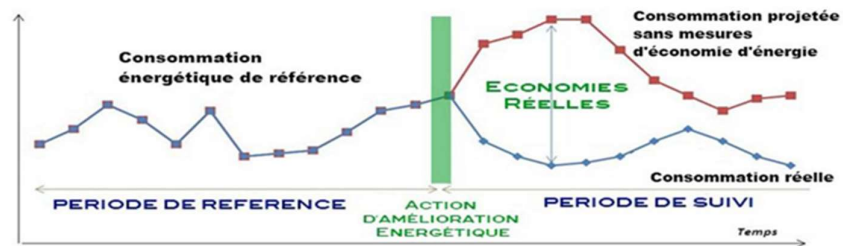


Figure I. 6: Évaluation des économies réelles après une action d'amélioration énergétique. . [13]

I. 2. 2. Importance de l'optimisation thermique :

I. 2. 2. 1. Rationalisation des coûts et résilience structurelle :

Pour l'acteur économique, le premier bénéfice réside dans la maîtrise de la facturation, notamment par la réduction des pénalités liées au dépassement de la puissance souscrite. Au-delà de l'aspect comptable, la flexibilité énergétique renforce la résilience des infrastructures. Dans un contexte d'instabilité des marchés de l'énergie, une organisation capable de moduler sa consommation limite son exposition aux risques de rupture d'approvisionnement. [12]

I. 2. 2. 2. Lutte contre inefficience et déperditions de ressources :

L'optimisation repose sur un diagnostic critique des systèmes existants. Inefficience énergétique découle généralement de quatre facteurs endogènes

- La vétusté des équipements techniques
- L'obsolescence des matériaux d'isolation
- Le défaut de maintenance des réseaux
- Adaptation des comportements des usages. La correction de ces failles permet une allocation optimale des ressources, transformant le gaspillage en gain de productivité. [12]

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Le passage à l'efficacité énergétique nécessite une approche séquentielle et rigoureuse, structurée en trois phases majeures

a) Politique énergétique :

La phase initiale consiste à formaliser une Vision stratégique à long terme. Cette politique doit établir des objectifs de réduction précis (ex réduction de 20 % de l'empreinte carbone à horizon 5 ans) et s'assurer de l'adhésion des instances de gouvernance. [12]

b) Audit énergétique comme outil de diagnostic :

L'audit constitue le socle analytique de la démarche. Il permet de cartographier les flux énergétiques et d'identifier les postes les plus chronophages (chauffage, Ventilation, processus industriels). Cette analyse quantitative est indispensable pour hiérarchiser les investissements à réaliser en fonction de leur temps de retour (TRI). [12]

c) Pilotage de la donnée et plan de comptage :

L'efficacité de la stratégie repose sur la fiabilité des données collectées. La mise en place d'un plan de comptage, s'appuyant sur des compteurs communicants et un logiciel de Energy Management System (EMS), permet une segmentation fine des consommations par usage ou par zone. Cette granularité de l'information est la condition d'un pilotage proactif et d'un ajustement en temps réel des performances. [12]

I. 3. Facteurs Clés Influent sur la Performance Énergétique :

I. 3. 1. Coefficient de Transmission Thermique :

Exprimé en $W/m^2 \cdot K$, il calcule le flux de chaleur (en Watts) qui s'échappe à travers $1 m^2$ de paroi pour un écart de température de 1 Kelvin (ou $1^\circ C$) entre l'ambiance intérieure et l'extérieur. [14]

Plus la Valeur K est basse, plus la paroi est isolante, Une Valeur K faible signifie que la "barrière" contre le froid (ou la chaleur en été) est efficace. [14]

Elle permet de

-Réduire les charges : Diminuer drastiquement les besoins en chauffage l'hiver et en climatisation l'été

-Éliminer l'inconfort Supprimer : l'effet de "paroi froide" qui nuit au bien-être des occupants

-Valoriser le patrimoine : Un bâtiment avec des parois à faible Valeur K obtient un meilleur diagnostic de performance énergétique (D pE). [10]

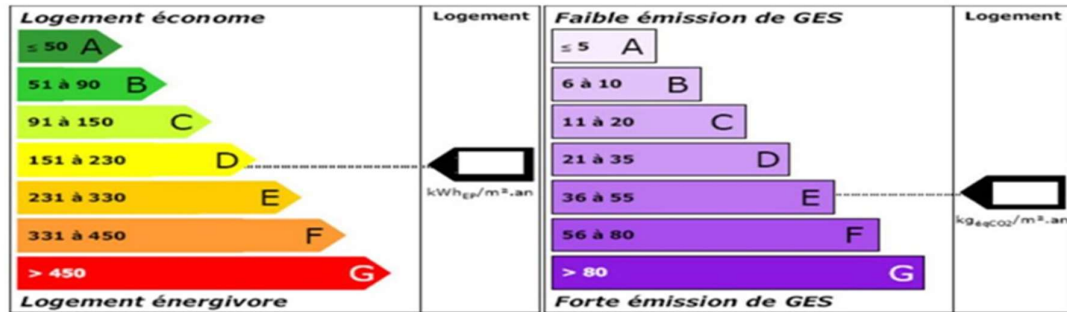


Figure I. 7: Indice de Performance Énergétique (IPÉ). [15]

I. 3. 2. Résistance thermique :

Si la valeur K mesure la fuite de chaleur, la résistance thermique exprime la capacité d'un matériau à freiner ce flux. C'est l'indicateur clé pour choisir ses isolants. [11]

La résistance thermique est l'inverse du coefficient de transmission thermique

$$R_{th} = \frac{1}{k} \quad (I. 2)$$

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (I. 3)$$

e : épaisseur du matériau en mètres

λ : conductivité thermique du matériau en W/m. K (donnée fabricant)

Elle s'exprime en m². K/W. Plus la Valeur R est élevée, plus le matériau est isolant. [16]

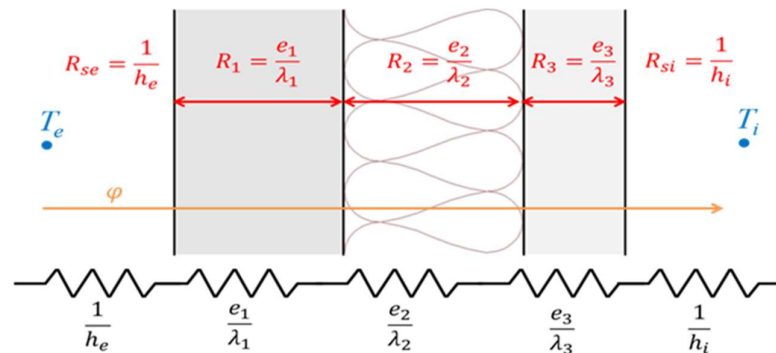


Figure I. 8 : Schéma des résistances thermiques. . [17]

I. 3. 3. Évaluation des ponts thermiques :

Les ponts thermiques sont des points faibles de l'isolation, généralement situés aux jonctions entre différents éléments du bâtiment (murs/planchers, murs/fenêtres, etc.). Ils peuvent représenter jusqu'à 20% des déperditions thermiques d'un bâtiment mal conçu.

Évaluation des ponts thermiques se fait par calcul ou par thermographie infrarouge. Leur traitement est essentiel pour optimiser la performance énergétique globale et éviter les problèmes de condensation et de moisissures. [14]

I. 3. 4. Performances des fenêtres et vitrages :

Les fenêtres sont souvent le point faible de l'enveloppe thermique d'un bâtiment. Leur performance est caractérisée par deux coefficients

Un double vitrage performant peut atteindre un k de $1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, tandis qu'un triple vitrage peut descendre jusqu'à $0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Le choix des fenêtres doit également prendre en compte leur facteur solaire pour optimiser les apports de chaleur en hiver tout en limitant les surchauffes estivales. [14]



Figure I. 9 : Classements de vitrages. . [18]

I. 3. 5. Efficacité des systèmes de chauffage, Ventilation et climatisation (CVC) :

Le triptyque Chauffage, Ventilation et Climatisation (CVC) constitue le premier poste de dépense énergétique d'un bâtiment, représentant souvent plus de 60 % de la facture totale. Optimiser ces systèmes est le levier le plus puissant pour réduire les coûts opérationnels. [14]

I. 4. Transfert de chaleur dans les parois :

Quand deux systèmes ont des températures différentes, le système plus chaud transfère de la chaleur au système plus froid. Il existe un transfert de chaleur ou échange thermique entre ces deux systèmes. On rencontre souvent cette situation dans divers contextes industriels (comme les moteurs thermiques ou électriques, les centrales énergétiques au fioul ou au gaz, l'électronique, etc.) et domestiques (par exemple, le chauffage résidentiel). Un échange d'énergie entraîne un flux thermique qui représente le mouvement de l'énergie du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Comme nous le démontrerons ultérieurement, le flux thermique caractérisé par une densité locale notée Φ est une grandeur Vectorielle. Cela signifie que ce dernier n'est pas seulement défini par son intensité, mais également par sa direction. Il est déterminé en chaque point de l'espace et se mesure en densité surfacique de puissance (W/m^2). [11]

Les principes fondamentaux du transfert thermique sont liés à la thermodynamique

Première loi de la thermodynamique Il s'agit du principe de conservation de l'énergie. Cette loi établit que le changement d'énergie interne dans un système fermé correspond à la somme du flux de chaleur qui traverse le système et de la chaleur générée par celui-ci

$$\Delta U = Q + W$$

(I. 4)

Q : Quantité de **chaleur** (ou énergie thermique) échangée par le système.

W : le travail apporté au système.

C'est le principe de base du transfert de chaleur. [19]

Deuxième principe de la thermodynamique :

Cette loi définit la direction du transfert de chaleur. Le transfert thermique se produit toujours dans la direction opposée au gradient de température, ce qui signifie que le flux de chaleur circule de la zone à plus haute température vers la zone à plus basse température. [19]

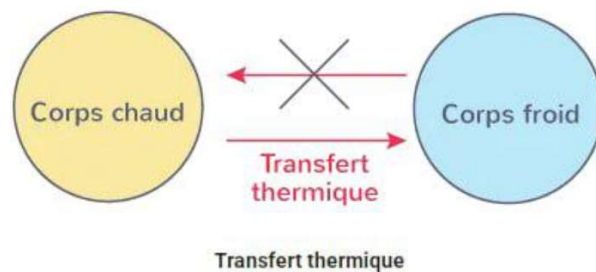


Figure I. 10 : Sens de transfert de chaleur. [20]

Loi de Newton de mouvement pour définir les paramètres de mouvement des fluides

Loi de conservation de la masse pour définir les débits

Lois élémentaires du transfert de chaleur qui sont fonctionnels du mode de transfert thermique. [19]

Il existe trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

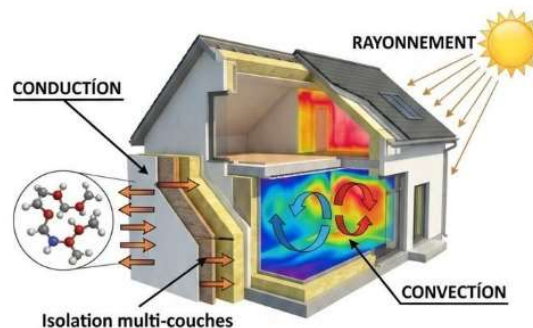


Figure I. 11 : Transfert de chaleur dans une maison. [21]

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

I. 4. 1. Conduction :

- Par contact direct c'est le mode de conduction thermique ; on chauffe l'extrémité d'une tige métallique. La tige se réchauffe. On parle de conduction lorsque la chaleur (transfert d'énergie) se diffuse sans déplacement de matière. [19]

Selon la loi de Fourier, lorsque la chaleur est transférée par conduction thermique, le flux est déterminé comme suit

$$Q = - \frac{\lambda \cdot S \cdot \partial T}{\partial X} \quad (\text{I. 5})$$

Q : le flux de chaleur

λ : le coefficient de conduction thermique (Conductivité thermique)

S : la surface d'échange

T : la température

X : l'abscisse. [19]

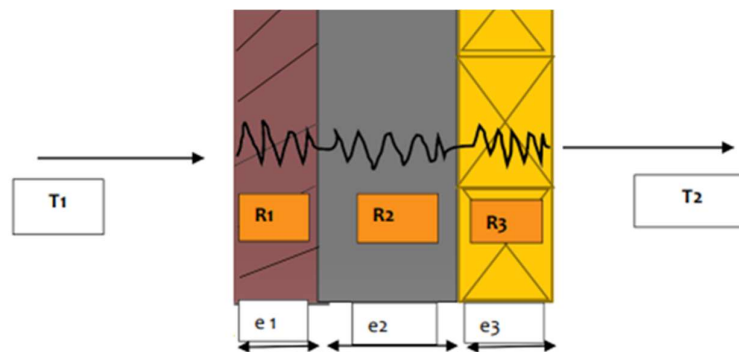


Figure I. 12 : Transfert de chaleur par conduction. . [21]

Le signe moins dans l'équation de Fourier indique le deuxième principe de la thermodynamique le transfert de chaleur se fait du point à température plus élevée vers celui à température plus basse, soit en opposition au gradient de température. Ainsi, ce symbole signifie qu'un gradient négatif de température (baisse de la température dans la direction positive de x) multiplié par le signe moins produit un flux thermique positif dans la direction positive de x. [19]

L'expression suivante donne la densité du flux de chaleur par conduction

$$Q = \frac{-\lambda \cdot \partial T}{\partial X} \quad (\text{I. 6})$$

6)

Si le régime est permanent, on a

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

$$\frac{\partial T}{\partial T} = \frac{\Delta T}{\Delta X} = \frac{(T_2 - T_1)}{e} \quad (\text{I. 7})$$

e : est l'épaisseur, donc

$$Q = \frac{-\lambda \Delta T}{\Delta X} = \frac{-\lambda \cdot S(T_2 - T_1)}{e} \quad (\text{I. 8})$$

La différence de température correspond à la température minimale soustraite de la température maximale si l'on conserve le signe négatif, autrement, on considérera la température maximale moins la plus basse en supprimant le signe positif. Il est nécessaire de dénicher une dynamique positive. [19]

La densité du flux est donc :

$$Q = -\frac{\lambda (T_2 - T_1)}{e} \quad (\text{I. 9})$$

I. 4. 2. Convection :

La convection est le transfert de chaleur associé à un mouvement. Cela se produit entre une surface solide et un liquide. La conduction et le mouvement du fluide assurent le transfert de chaleur. On peut observer la convection dans divers exemples le vent qui transporte de la chaleur, l'eau en ébullition, le ventilateur qui rafraîchit l'air environnant. . . Le transfert de chaleur par convection ne dépend pas des caractéristiques du matériau en contact avec le fluide. Cela dépend uniquement du fluide. La convection est influencée par la forme et la caractéristique de la surface. [21]

D'après la loi de Newton :

$$\Phi_{\text{conv}} = h \cdot S \cdot \Delta T \quad (\text{I. 10})$$

Φ : convié flux de chaleur par convection

S : surface d'échange

ΔT : différence de température

h : coefficient d'échange par convection [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], il dépend de plusieurs facteurs

*les propriétés physiques du fluide

*le type d'écoulement

*la température

*la surface d'échange (forme, dimension, disposition ...). [11]

La convection est un processus de transfert de chaleur qui se divise en deux sections

Convection forcée Le déplacement du fluide est déterminé par une source

Extérieure d'énergie comme une pompe, etc. [22]

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

Exemple de ventilateur de plafond **durant la saison estivale**, on a tendance à régler le ventilateur à une Vitesse supérieure. L'inclinaison des pales contraint l'air à descendre dans l'espace. Typiquement, cela indique une rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre lorsqu'on observe le ventilateur depuis dessous. Ce courant d'air descendant stimule l'évaporation de la sueur des occupants de la maison, apportant ainsi un certain rafraîchissement. [22]

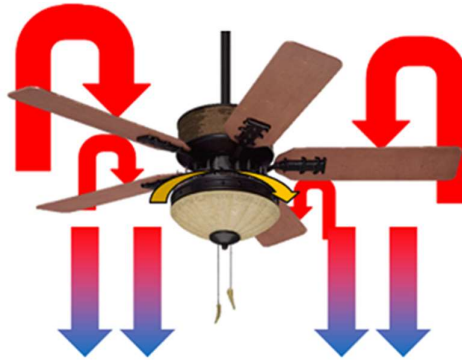


Figure I. 13 : Schéma de la convection forcée et du flux d'air pour le refroidissement estival. . [22]

Pendant l'hiver, il est nécessaire que les ventilateurs de plafond tournent dans le sens horaire afin d'extraire l'air frais vers le haut de la pièce et de propulser l'air chaud vers le bas, générant par conséquent un flux ascendant. [22]

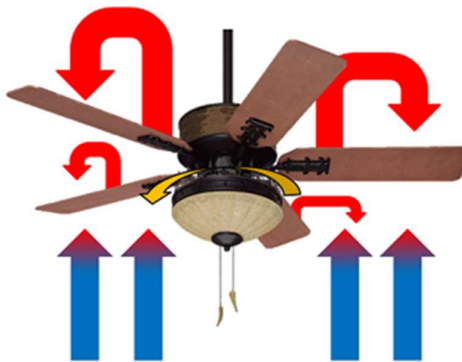


Figure I. 14 : Schéma de la convection forcée et du flux d'air pour le chauffage hivernal. . [22]

-Convection libre ou naturelle : le phénomène de transmission thermique est à l'origine du mouvement du fluide. Les variations de température induisent des gradients de densités volumiques, entraînant ainsi un déplacement du fluide.

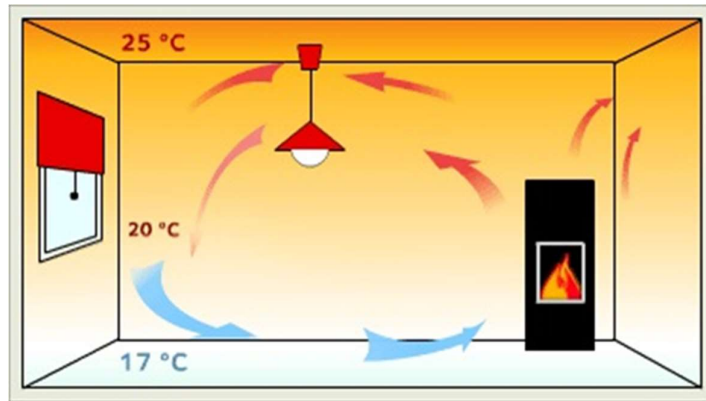


Figure I. 15: Convection naturelle de l'air dans une pièce chauffée. . [23]

I. 4. 3. Rayonnement :

Le rayonnement est un transfert de chaleur qui se réalise par l'émission et l'absorption de rayonnements électromagnétiques. Les objets chauds dégagent des radiations thermiques dans divers angles, lesquelles peuvent être captées par des objets de température plus basse. Les applications comme les fours industriels, les panneaux solaires et les radiateurs à infrarouges sont fortement concernées par le transfert de chaleur par rayonnement.

Le processus d'échange thermique par rayonnement se déroule comme suit

***Émission** : L'énergie fournie à la source est convertie en énergie électromagnétique

***Transmission** : Cette énergie électromagnétique est diffusée par la propagation des ondes et peut être absorbée par le milieu qu'elle traverse

***Réception** : le rayonnement électromagnétique incident est converti en énergie thermique (absorption). [19]

La loi de Stephan-Boltzman donne :

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{I. 11})$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$: la constante de Stefan-Boltzmann.

M : L'émittance [W/m^2]

T : la température absolue [K].

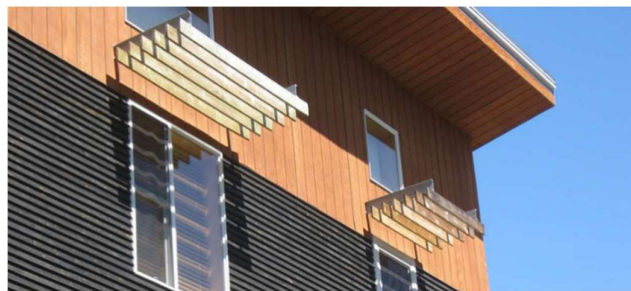


Figure I. 16 : Façade face au soleil. . [24]

I. 5. Enveloppe du bâtiment :

I. 5. 1. Définition :

L'enveloppe d'un bâtiment constitue la barrière physique entre l'environnement intérieur contrôlé d'un bâtiment et l'extérieur non contrôlé (transfert d'air, d'eau, de chaleur, de lumière et de bruit). [16]

En réalité, l'enveloppe du bâtiment doit offrir la « peau » du bâtiment. Cela signifie qu'elle doit non seulement assurer la séparation des environnements, mais également fournir une façade esthétique. À l'inverse de la superstructure ou des systèmes de services des édifices, l'enveloppe reste toujours observable, ce qui en fait un élément crucial pour les propriétaires, les résidents et le grand public. L'aspect et le fonctionnement de l'enveloppe ont un impact significatif sur l'environnement intérieur, ainsi que sur des éléments tels que le confort, l'efficacité énergétique, la durabilité, la productivité, la satisfaction et la santé de ceux qui y résident. [25]

Globalement, la fonction de séparation physique des environnements peut être subdivisée en trois sous-fonctions :

***soutien** : soutenir, résister, transférer ou autrement recevoir toute la charge structurelle imposée par les environnements intérieurs et extérieurs, l'enveloppe et le bâtiment lui-même. La structure externe, ou certaines de ses sections, peut parfois être un élément essentiel de la superstructure du bâtiment, soit par son design ou par ses performances réelles. [26]

***contrôle** : c'est-à-dire pour contrôler, freiner, réguler et/ou tempérer toutes les charges dues à la séparation des environnements intérieurs et extérieurs. Cela concerne principalement le transport de masse (pluie, air, Vapeur d'eau, polluants, etc.) et d'énergie (thermique, acoustique, feu, lumière, etc.). [26]

*** Finition** : c'est-à-dire, pour finir les surfaces à l'interface entre l'enveloppe et les environnements intérieurs et extérieurs. Les deux interfaces doivent se conformer au design, à l'esthétique, à la durabilité appropriée et aux autres critères de performance. [26]

L'enveloppe verte : comme stratégie architecturale d'efficacité énergétique dans un bâtiment Opérationnellement, il peut être décrit comme un enveloppement de bâtiment qui tient compte du contexte environnemental avec une incidence minimale, tout en préservant le bien-être humain des occupants à un coût énergétique optimal. Une enveloppe bien pensée répond au climat local. [25]

Ainsi, la stratégie centrale de l'enveloppe du bâtiment dans un contexte tropical chaud et humide est de préserver de la chaleur solaire et d'autoriser une Ventilation naturelle.

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

L'enveloppe du bâtiment devrait idéalement favoriser le passage du vent tout en empêchant l'intrusion de la pluie. [25]

L'intégration d'une enveloppe verte dans un édifice peut permettre une diminution passive de la consommation énergétique. [25]

I. 5. 2. Composants de l'enveloppe du bâtiment :

I. 5. 2. 1. Murs :

Il est essentiel de comprendre et d'optimiser le coefficient de transmission thermique à travers les murs pour la conception d'un bâtiment performant. Les approches de conception passive offrent un potentiel accru d'économie d'énergie et d'efficacité en diminuant la demande énergétique du système actif grâce à l'usage de l'inertie thermique et de l'isolation. [16]



Figure I. 17 : Mur d'une maison en brique. . [27]

I. 5. 2. 2. Isolation thermique :

L'isolation thermique est un matériau utilisé dans la construction qui diminue le transfert de chaleur à travers les parois du bâtiment, empêchant ainsi la chaleur d'y pénétrer. L'isolation est principalement destinée à freiner la transmission de chaleur due aux rayons solaires. Une majorité de conceptions de constructions écologiques incorporent une isolation, car celle-ci permet aux espaces du bâtiment de conserver la chaleur existante tout en empêchant une surchauffe excessive provenant de l'extérieur. [25]



Figure I. 18 : Isolation thermique par l'extérieur. . [25]

I. 5. 2. 3. Fenêtres :

Les fenêtres facilitent l'entrée de la lumière naturelle à l'intérieur des bâtiments tout en garantissant une Ventilation désirée. Le confort thermique peut être amélioré par un traitement

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

de conception des fenêtres et lucarnes, étant donné que la fenestration est un facteur clé qui influence le confort thermique humain. [25]

Des procédés de conception spécifiques, comme le vitrage des fenêtres, sont réalisables grâce à l'éventail Varié de matériaux de construction, chacun offrant des performances distinctes pour parvenir à une efficacité énergétique maximale du bâtiment. [25]

Le double Vitrage s'est imposé comme l'option essentielle pour améliorer son isolation thermique et acoustique. Divers matériaux tels que le bois, le PIVC ou l'aluminium sont employés dans la production de menuiseries.

Le double Vitrage, un genre de fenêtre, se compose de deux Vitres en Verre dont les propriétés et l'épaisseur peuvent Varier (au moins 4 mm). Ces deux vitrages sont distants l'un de l'autre par une couche, un intervalle comblé d'air ou de gaz (comme du krypton ou de l'argon). [28]



Figure I. 19: Fenêtre double vitrage en PVC. . [29]

I. 5. 2. 4. Toiture :

Il a été démontré que les toits Végétalisés sont plus efficaces pour réguler les augmentations de chaleur que les toits traditionnels. L'adoption d'un toit Végétal pourrait entraîner des économies énergétiques conséquentes en supprimant la consommation d'énergie liée au besoin de refroidissement de la climatisation, qui constitue habituellement la principale source de dépense énergétique. [25]



Figure I. 20: Toiture en tuiles. [30]

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

I. 5. 3. Rôle principale de l'enveloppe de bâtiment :

Le rôle primordial de l'enveloppe du bâtiment est de fournir une défense contre l'environnement extérieur, agissant comme une sorte de barrière entre l'espace intérieur et les éléments extérieurs.

Les éléments qui forment l'enveloppe du bâtiment comprennent les murs, les planchers, les toits, les ouvertures et les portes.

La protection contre les éléments, la capacité à résister à la chaleur, le pare-vent, l'isolation thermique ainsi que les caractéristiques lumineuses et sonores sont des éléments essentiels de l'enveloppe du bâtiment qui peuvent être jugés efficaces si certains standards sont respectés.

En outre, l'analyse de l'enveloppe du bâtiment en fonction des conditions climatiques dépend de plusieurs facteurs cruciaux tels que la direction du bâtiment, sa forme, les systèmes de refroidissement passifs, l'ombre et le Vitrage. [25]

I. 6. Influence des matériaux et de l'isolation thermique :

Les matériaux isolants exercent une influence déterminante sur la consommation énergétique des bâtiments. Une isolation thermique performante permet de réduire de manière significative les besoins en chauffage en période hivernale et en climatisation en période estivale, contribuant ainsi à une amélioration globale de l'efficacité énergétique du bâtiment. Cette réduction de la demande énergétique entraîne non seulement une diminution des coûts d'exploitation, mais également une baisse des émissions de gaz à effet de serre associées à l'usage de l'énergie. [31]

Elle est utilisée dans le bâtiment peuvent être classés en plusieurs catégories. Les isolants minéraux, tels que la laine de Verre et la laine de roche, sont largement répandus en raison de leurs bonnes performances thermiques, de leur disponibilité et de leur coût relativement modéré. Les isolants synthétiques, notamment le polystyrène expansé (PSE) et le polystyrène extrudé (XPS), présentent des conductivités thermiques faibles et une bonne résistance mécanique, bien qu'ils soient issus de ressources pétrochimiques non renouvelables. [31]

Par ailleurs, les isolants biosourcés ou naturels constituent une alternative de plus en plus étudiée dans une perspective de développement durable.

La ouate de cellulose, produite à partir de papier recyclé, se distingue par son faible impact environnemental et ses performances thermiques satisfaisantes. D'autres matériaux, tels que le liège, **la laine de mouton** ou **les fibres de bois**, offrent également de bonnes propriétés isolantes tout en présentant des avantages en termes de bilan écologique et de confort hygrothermique. [31]



Figure I. 6 : Composition de matériaux biosourcés pour le bâtiment. . [31]

I. 7. Concepts fondamentaux de la thermique du bâtiment :

I. 7. 1 Définition confort thermique :

Le confort thermique est défini comme l'état d'esprit qui exprime la satisfaction d'un individu Vis-à-Vis de son environnement thermique. Il résulte de l'interaction entre plusieurs facteurs environnementaux et personnels. [32]

I. 7. 2. Facteurs environnementaux influençant le confort thermique :

-Température de l'air : correspond à la température de l'air ambiant entourant les occupants. [21]

-Sans isolation : La température de la pièce subit de fortes fluctuations, oscillant brutalement entre environ **31,5°C** et **38,5°C**.

-Avec isolation : La température reste remarquablement stable, maintenue dans une plage étroite entre **33°C** et **34°C**, malgré les variations extérieures. [33]

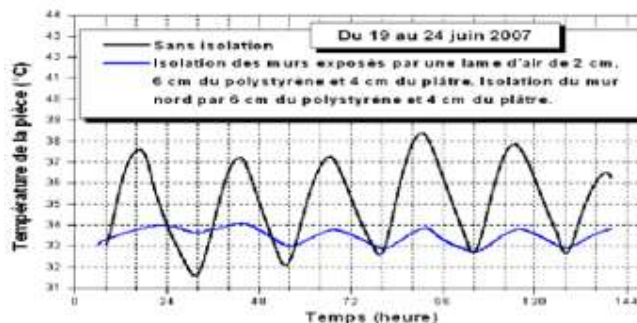


Figure I. 21: Évolution de la température intérieure d'une pièce avec et sans isolation thermique (du 19 au 24 juin 2007). . [34]

-Température radiante moyenne : liée à la température des surfaces environnantes et aux échanges thermiques par rayonnement. [33]

Chapitre I : État de l'art sur la performance thermique des bâtiments

-**Apports** : Le **rayonnement** provenant de surfaces chaudes permet de compenser ces pertes.

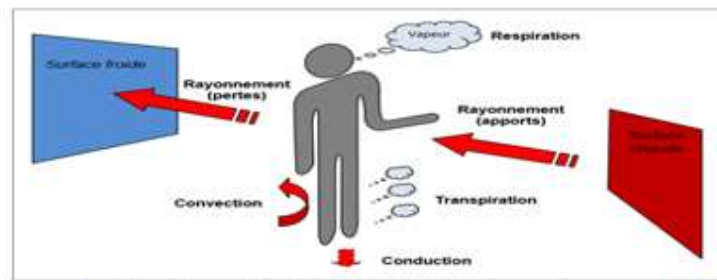


Figure I. 22 : Modes de transmission de chaleur entre le corps humain et son environnement. [33]

-**Humidité relative** : influence la capacité du corps humain à dissiper la chaleur par évaporation. [33]

-**En ambiance saturée (HR > 80 %)** : Suite à un épisode pluvieux par temps chaud, la forte concentration de Vapeur d'eau atmosphérique limite, voire empêche, l'évaporation de la sueur. Ce phénomène de saturation bloque le refroidissement naturel du corps, provoquant une sensation de moiteur et un risque de stress thermique par accumulation de chaleur interne. [33]

- **En ambiance sèche (HR < 20 %)** : À l'inverse, dans un climat de type méditerranéen, la faible pression de Vapeur d'eau favorise une évaporation rapide et efficace. La thermorégulation est optimale, rendant les températures élevées nettement plus tolérables pour l'organisme. [33]

- **Zone de neutralité hygrométrique** : Entre 30 % et 70 % d'humidité relative, l'influence de la Vapeur d'eau sur la sensation de confort devient secondaire par rapport à la température sèche de l'air. [33]

Il convient d'intégrer la production endogène de Vapeur d'eau dans les calculs de charge thermique un adulte au métabolisme réduit (activité légère) dégage en moyenne **50 g d'eau par heure**. [33]

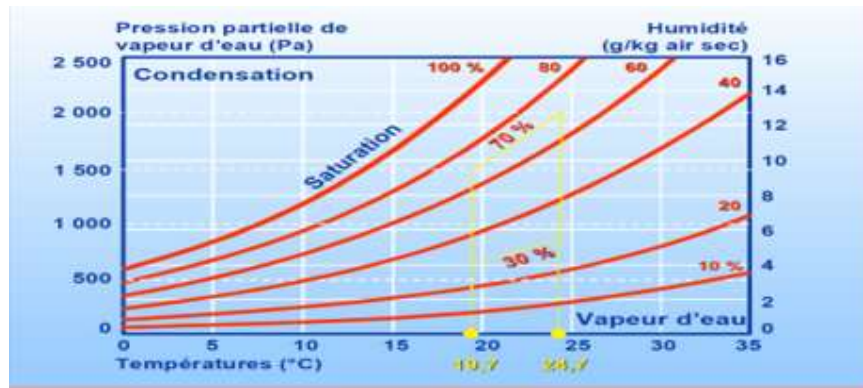


Figure I. 23: Diagramme de l'air humide. . [33]

-Vitesse de l'air : affecte les échanges thermiques par convection et peut modifier la sensation thermique ressentie. [33]

-Corrélation vent/Déperdition : Le graphique en insert montre que les déperditions thermiques augmentent de manière exponentielle avec la Vitesse du vent. Un bâtiment exposé "au vent" subit des pertes bien plus élevées qu'un bâtiment "à l'abri" pour une même vitesse d'air.

-Influence de la hauteur : Plus un bâtiment est haut, plus la vitesse du vent est importante. Par exemple, en centre-ville, la vitesse passe de **96 km/h** à 100m de hauteur à **160 km/h** à 400m. Cela signifie que les étages supérieurs des tours sont thermiquement plus Vulnérables.

-Effet de la rugosité environnements : en **plaine ou sur un lac** (faible rugosité), le vent est très rapide dès les bas niveaux.

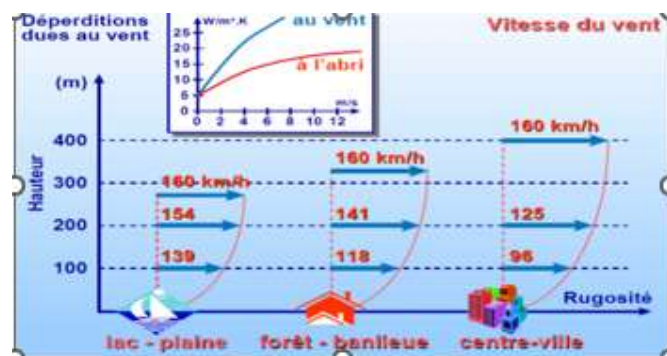


Figure I. 24: Impact de la rugosité du terrain et de la hauteur sur la vitesse du vent et les déperditions thermiques. . [33]

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de mettre en lumière que la **performance énergétique des bâtiments** n'est pas seulement un défi technique, mais une nécessité économique et environnementale majeure.

L'analyse des données montre que la consommation finale d'énergie, qui représente **76,1 %** du total national, a crû de **5,1 %** en un an. Cette dynamique souligne l'urgence d'agir sur le secteur du bâtiment pour stabiliser la demande globale. Cette analyse a permis de souligner le rôle déterminant de l'enveloppe du bâtiment dans la maîtrise de la consommation énergétique. Parmi les paramètres influents, le choix des matériaux de construction et des systèmes d'isolation apparaît comme un élément clé dans l'amélioration de l'efficacité énergétique et du confort thermique.

En effet, les propriétés thermiques des matériaux conditionnent directement les flux de chaleur et le comportement dynamique du bâtiment face aux variations climatiques. Ainsi, après avoir établi le cadre conceptuel et scientifique dans le chapitre précédent, il convient désormais d'examiner en détail les différents matériaux d'isolation thermique, leurs caractéristiques, leurs performances ainsi que leurs impacts sur la consommation énergétique. Le chapitre suivant sera donc consacré à l'étude comparative des matériaux isolants, qu'ils soient traditionnels ou innovants, afin d'identifier les solutions les plus adaptées aux différentes conditions climatiques.

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Introduction

Face à l'urgence climatique et à l'augmentation constante des coûts de l'énergie, la conception de l'enveloppe du bâtiment est devenue le levier principal de l'efficacité énergétique. Pour répondre aux exigences de confort tout en réduisant l'empreinte carbone, il ne suffit plus de construire, mais de **"concevoir thermiquement"** chaque paroi.

Ce chapitre présente un état de l'art des solutions d'isolation thermique. L'objectif est d'analyser l'évolution des techniques, des isolants traditionnels aux matériaux biosourcés. Nous porterons une attention particulière aux propriétés thermo physiques des parois, en étudiant comment l'émergence de matériaux innovants comme les **bétons légers (Argex)** et les **Matériaux à Changement de Phase (MCP)** permet d'optimiser l'inertie thermique. L'enjeu est de démontrer comment ces technologies agissent sur le confort des occupants tout en réduisant durablement la consommation énergétique globale.

II. 1. Techniques d'isolation :

II. 1. 1. Murs :

Lorsqu'il s'agit de sélectionner l'isolation des murs d'un édifice, deux questions majeures doivent généralement être prises en compte d'une part, il est essentiel de garantir la continuité de l'isolation pour obtenir une performance optimale et ainsi prévenir l'apparition de ponts thermiques additionnels. Par ailleurs, il y a l'inertie thermique, c'est-à-dire la capacité d'un matériau à résister aux variations de température. Il ne faut pas sous-estimer et il faut savoir l'exploiter pour maximiser la capacité du bâtiment à stocker et libérer de la chaleur. [35]

II. 1. 1. 1. Isolation des murs par l'intérieurs :

Maintenir une continuité d'isolation, en particulier lorsqu'il s'agit de l'isolation des murs de l'intérieur, est particulièrement ardu pour les murs porteurs intérieurs à cause du manque de continuité d'isolation. Cela s'applique également aux sols, fondations, plafonds et balcons.

Concernant l'espace au sol, l'isolation intérieure diminue l'espace disponible à l'intérieur, car les murs se sont épaissis de l'intérieur pour offrir une plus grande surface au sol. [35]



Figure II. 1 : Isolation d'un mur par l'intérieure. [36]

• Avantages d'ITI :

- * Peut bénéficier de subventions financières en cours ;
- * Coût réduit grâce à sa technique largement répandue ;
- * Un bon bricoleur peut poser l'isolation intérieure ;
- * Réchauffement rapide du bâtiment.

• Inconvénients d'ITI :

- * Complexité de l'application lors de la rénovation et réduction de l'espace habitable ;
- * Question de perméabilité à l'eau ;
- * Inertie thermique limitée en été comme en hiver, pouvant provoquer un inconfort (fluctuations significatives de température) et une consommation excessive d'énergie ;
- * Problème lié aux ponts thermiques nécessite d'installer des rupteurs de ponts thermiques.

II. 1. 1. 2. Isolation des murs par l'extérieurs :

Dans le cas d'une isolation extérieure, il est plus aisé de garantir la continuité de l'isolation grâce à une bonne continuité de l'isolation, contrairement à l'isolation intérieure. La fenêtre, étant une source de pont thermique, présente une zone particulièrement vulnérable qui requiert une intervention appropriée. De plus, en ce qui concerne le balcon, l'existence de ce phénomène est inévitable.



Figure II. 2 : Isolation d'un mur par l'extérieure. [37]

*Avantages d'ITE :

- *Admissible aux subventions financières en cours ;
- *Simple à installer lors de la rénovation, n'empiète pas sur l'espace de vie ;
- *Réduit les problèmes liés aux ponts thermiques ;
- * Excellente résistance à l'eau, donc peu ou pas de risques de moisissures dans les murs;
- * Inertie thermique avantageuse en hiver comme en été (meilleur confort et économies d'énergie) ;
- *Rend l'isolation du toit (et de l'immeuble) accessible à tous.

*Inconvénients d'ITE :

- * Méthode moins répandue, donc coût plus élevé.

II. 1. 1. 3. Comparaison entre l'isolation intérieure et extérieure :

La meilleure approche pour une nouvelle construction consiste à isoler les murs depuis l'extérieur, ce qui garantit une continuité dans l'isolation. En revanche, lors d'une rénovation, opter pour l'isolation intérieure s'avère plus avantageux sur le plan financier.

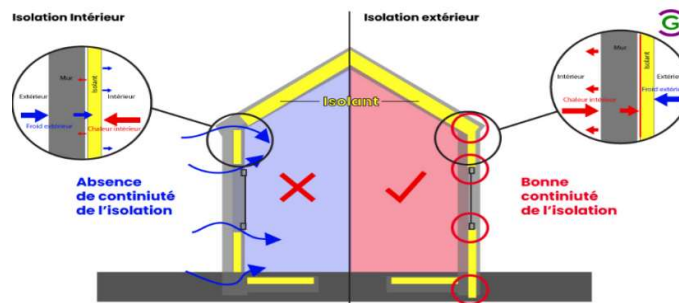


Figure II. 3 : Comparaison entre l'isolation intérieure et l'isolation extérieure. [38]

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Tableau II. 1 : Comparaison entre l'isolation intérieure et extérieure.

Critères	Isolation intérieurs	Isolation extérieurs
Performances en hiver	Présence de ponts thermiques difficiles à éviter	Réduction importante des ponts thermiques
Performances en été	Confort thermique limité	Très bonne performance grâce à l'inertie thermique des murs
Protection des murs	Les murs restent exposés au froid, ce qui augmente les risques de condensation	Les murs sont maintenus du côté chaud, assurant une meilleure protection
Impact sur les occupants	Travaux gênants pour les habitants et diminution de la surface habitable	Possibilité de continuer à occuper le logement durant les travaux, mais légère réduction de la luminosité
Impact architectural	Aspect extérieur conservé, généralement sans autorisation spécifique	Modification de la façade nécessitant souvent une autorisation d'urbanisme

II. 1. 2. Plancher :

L'isolation du plancher d'un bâtiment est comparable à celle des murs. L'isolation peut être effectuée depuis le haut, ce qui est comparable à une isolation des murs par l'extérieur, ou depuis le bas, ce qui s'apparente à une isolation intérieure.

II. 1. 2. 1. Isolation par le haut :

L'isolant est installé au sol et recouvert d'un matériau de finition destiné à faciliter le passage.

L'isolation par le haut nécessite l'application d'une nouvelle finition en lieu et place de la finition existante.

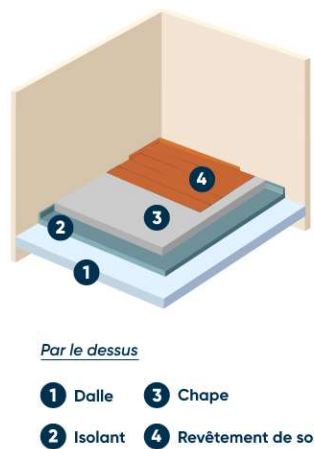
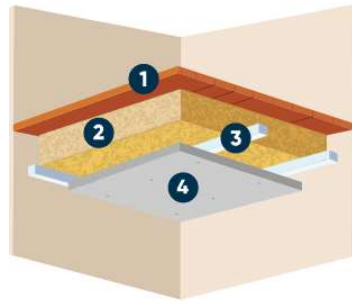


Figure II. 4 : Isolation du plancher par le haut. [39]

II. 1. 2. 2. Isolation par le bas :

L'isolant est attaché à la partie inférieure du plancher et peut être revêtu d'une finition.

Cependant, ce genre d'isolation n'est pas possible si le plancher est directement installé sur le sol.



Par le dessous

- | | |
|------------|------------|
| 1 Plancher | 3 Ossature |
| 2 Isolant | 4 Parement |

Figure II. 5 : Isolation du plancher par le bas.

II. 1. 2. 3. Comparaison entre l'isolation par le haut et par le bas :

Peu importe la technique employée, les ponts thermiques se produisent inévitablement entre les supports de plancher et le mur de fondation, ainsi qu'entre les appuis muraux du niveau supérieur et le plancher. Il est souvent complexe de mettre en œuvre l'extension du parcours de moindre résistance thermique ou surtout l'ajout d'un matériau isolant entre le mur et le sol lors d'une rénovation. Le recours à l'isolation par le dessous du plancher favorise l'exploitation de l'inertie thermique, ce qui facilite le stockage de la chaleur et contribue à éviter les excès de température. L'isolement par le haut réduit la capacité d'inertie à celle de la couche qui se trouve au-dessus de l'isolant.

II. 1. 3. Toiture :

L'isolation du toit contribue à minimiser une large part des pertes de chaleur.

II. 1. 3. 1. Isolation de la toiture par l'intérieure :

On privilégie souvent l'isolation intérieure, car elle est plus facile à mettre en œuvre et également plus abordable financièrement. Elle implique l'application d'un isolant sous forme de feuille semi-rigide ou en rouleau.

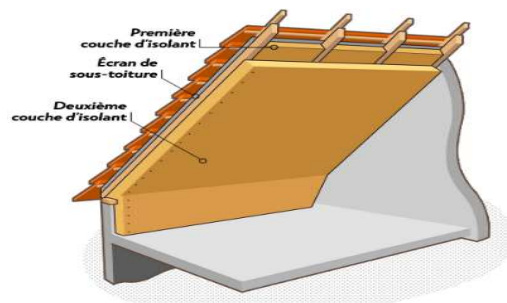


Figure II. 6 : Isolation de toiture par l'intérieure. [40]

II. 1. 3. 2. Isolation de la toiture par l'extérieure :

Il est plus complexe et ardu de mettre en œuvre l'isolation extérieure. Il faut retirer le toit pour la pose de l'isolant sous forme de panneaux ou de rouleaux.



Figure II. 7 : Isolation de toiture par l'extérieure.

II. 2. Techniques innovantes :

II. 2. 1. Isolants biosourcés :

Il s'agit d'isolants végétaux (comme la laine de bois, le chanvre, le lin, le coton, le liège ou la paille), animaux (tels que la laine de mouton et les plumes d'oie) ou provenant du recyclage (comme l'ouate de cellulose produite à partir de brochures et les textiles recyclés fabriqués à partir de vieux tissus). Ces isolants offrent de bonnes performances thermiques et sont généralement assez denses, ce qui est idéal pour les combles en termes de confort estival. Ils favorisent aussi l'évacuation naturelle de la vapeur d'eau (particulièrement les isolants Végétaux) et ont l'atout d'une empreinte écologique très positive. Cependant, le coût est généralement plus important, à l'exception des produits provenant du recyclage. Dans cette perspective, la ouate de cellulose offre probablement le meilleur équilibre entre performance, coût, confort estival et respect de l'environnement. [35]

a) Laine de lin :

Ce matériau présente une Conductivité thermique λ Variant de 0,035 à 0,041 W/(m. K).

[35]



Figure II. 8 : Un rouleau de laine de lin

Tableau II. 2 : Critères de performances de la laine de lin.

Avantages	Inconvénients	Environnements	Prix
Isolation phonique	Coût élevé	Fabriqué à partir du lin naturel	4600 DA/m ² (pour R = 2. 7 m ² K/W)
Matériau non-nocif	/	Energie grise 48Kwh/m ³	1698 DA/m ² (pour R= 1 m ² K/W.)
Résistant au vieillissement	/	Recyclabilité oui	/

-

b) Laine de chanvre :

Ce matériau présente une Conductivité thermique λ Variant de 0,039 à 0,060 W/(m. K).

Le chanvre est un matériau isolant multifonctionnel biologique qui allie une importante perméabilité à la vapeur d'eau et une gestion de l'humidité. [35]



Figure II. 9 : Laine de chanvre [35]

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Tableau II. 3 Critères de performances de la laine de chanvre. [35]

Avantages	Inconvénients	Environnements	Prix
Excellente isolation phonique	Quelques fabricants associent le chanvre au polyuréthane, il Vaut mieux s'abstenir de ces articles (favoriser ceux qui sont liés à l'amidon, un matériau naturel)	Production tige de chanvre (secteur agricole)	5590 DA pour : $R = 5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
Inflammabilité naturelle nulle	Bien que naturellement non inflammable et parfois traité avec du sel de bore, il est préférable d'éviter ces produits	Energie grise 48 kwh/m^3	1745 DA pour : $R = 1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
Résistance naturelle aux rongeurs (bien qu'elle soit à l'origine une plante)	Les panneaux en chanvre ne sont pas forcément simples à poser puisqu'ils peuvent être assez compliqués à découper.	Recyclabilité oui (Végétal non traité)	/

c) Liège expansé :

Le liège est un matériau biosourcé performant qui présente une conductivité thermique variant de 0,037 à 0,041 W/(m. K). Écologique, naturellement imperméable et doté d'une forte inertie thermique (favorable au confort d'été), il s'adapte à de multiples applications d'isolation thermique et acoustique. Néanmoins, son coût économique important et son comportement au feu exigent une attention particulière lors de sa mise en œuvre. Sur le plan biologique, il s'agit du seul isolant biosourcé totalement imputrescible. Cette propriété unique permet son application sans risque de dégradation structurelle dans des milieux hautement humides (sous-sols, dalles sur terre-plein, caves, vides sanitaires). Le liège expansé trouve ainsi une large utilisation dans l'isolation des parois verticales, des combles, des planchers bas et des toitures-terrasses. [35].



Figure II. 10 : Panneaux de liège expansé. [35]

Tableau II. 4 : Critères de performances de liège expansé. [35]

Avantages	Inconvénients	Environnements	Prix
Fréquemment employé dans les théâtres, c'est l'un des matériaux d'insonorisation les plus efficaces	Un chêne produit peu, environ une récolte de liège tous les 10 ans.	Production de l'écorce des chênes-lièges	17200 DA/m ² Pour : R = 5 m ² K/W
Résistant naturellement à la putréfaction	/	Énergie grise 450 kWh/m ³	3130 DA/m ² Pour : R= 1 m ² K/W.
Il a une longue espérance de vie.	/	Recyclabilité Oui.	/

d) Laine de bois :

Ce matériau possède une Conductivité thermique λ de 0,036 à 0,046 W/(m. K).

la laine de bois ou fibre de bois est un isolant biosourcé issu du défibrage de résidus de bois résineux ou de coupes forestières. Bien que sa capacité d'isolation hivernale soit légèrement inférieure à celle des isolants conventionnels (nécessitant une épaisseur supérieure), elle se distingue par sa densité élevée et sa forte capacité thermique.

Grâce à ces propriétés hygroscopiques et à un déphasage thermique important, elle régule efficacement l'humidité et participe activement au confort d'été. Elle s'avère donc particulièrement adaptée aux constructions à faible inertie thermique, telles que les habitations à ossature bois. [35]



Figure II. 11 Laine de bois. [35]

Tableau II. 5 : Critères de performances de la laine de bois. [35]

Avantages	Inconvénients	Environnements	Prix
Durabilité élevée	Réactifs à l'humidité	La production déchets de l'industrie du bois	4300 à 12900 DA/m ² Pour : R = 6 m ² K/W
Confort durant la période estivale.	Ils sont généralement combinés avec 25 % de polyuréthane pour unifier les fibres	Énergie grise 161 kWh/m ³	645 DA/ m ² Pour : R = 1 m ² K/W.
/	Nécessitent une protection contre les rongeurs	Recyclabilité Oui.	/
/	Doivent être rendus ininflammables.	/	/

e) Laine de mouton : Ce matériau est caractérisé par une Conductivité thermique λ de 0,032 à 0,041W/(m. K). [35]



Figure II. 12 Laine de mouton. [35]

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Tableau II. 6 : Critères de performances de la laine de mouton.

Avantages	Inconvénients	Environnements	Prix
Capacité de production locale	L'installation doit être réalisée en portant un masque et des gants	Production 100% laine de mouton	2580 DA/m ² Pour : R = 2,78 m ² K/W
Résistance élevée à l'humidité	Mise en place plus compliquée pour les murs verticaux (particulièrement pour les combles)	Énergie grise 51 kWh/m ³	926 DA/m ² Pour : R = 1 m ² k/W
Durabilité appréciable	Opter pour la laine de mouton sans incorporation de polyester	Recyclabilité Oui	/
/	Moins de confort est ressenti durant l'été en raison d'une faible inertie	/	/
/	Nécessite un traitement contre les rongeurs	/	/

II. 2. 2. Matériaux composites :

Les matériaux composites constituent une solution innovante pour l'isolation thermique et la transition énergétique du secteur du bâtiment. Par définition, un composite résulte de l'association d'au moins deux composants distincts une matrice et un renfort dont les propriétés synergiques surpassent celles de ses constituants pris isolément.

Outre leur légèreté structurelle (pouvant offrir une réduction de masse allant jusqu'à 30 % par rapport à un acier de résistance équivalente), ces matériaux se distinguent par une robustesse et une durabilité accrue. Leur capacité à être formulés sur mesure permet de répondre à des critères précis de conductivité thermique, de résistance au feu et de performance environnementale. Ils représentent ainsi une alternative performante pour optimiser l'efficacité énergétique des édifices tout en réduisant leur empreinte carbone. [41]

II. 2. 1. Exemples des matériaux composites pour l'isolation thermique innovante :

a) Panneaux isolants sous vide (PIV) à base de composites :

Les Panneaux Isolants Sous vide (PIV) constituent une technologie d'isolation thermique de haute performance, qui présente une résistance thermique remarquable dans un espace limité. Ils s'avèrent particulièrement utiles dans les contextes où il faut réduire l'épaisseur de l'isolation, comme par exemple lors de rénovations d'anciens bâtiments ou pour des constructions neuves à faible consommation d'énergie. L'emploi de matières composites dans la production de PIV contribue à renforcer leur longévité (prolongeant leur durée d'utilisation de 20% en moyenne) et à diminuer leurs frais, facilitant ainsi l'adoption généralisée de cette technologie avant-gardiste. Ces panneaux présentent des pistes intéressantes pour les réhabilitations énergétiques et les nouvelles constructions, aidant à réaliser les buts de performance énergétique des bâtiments (RT2020 et RE2020). [41]

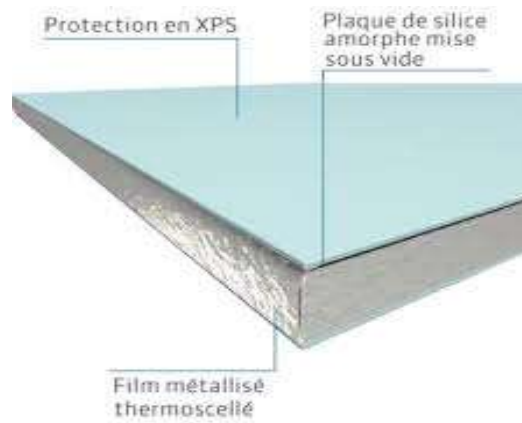


Figure II. 13 : Panneaux isolant sous vide.

*Avantages des PIV :

-Isolation d'une performance extrêmement élevée. Un PIV peut avoir une Conductivité thermique allant jusqu'à $0,004 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ce qui est bien inférieur à celle des isolants conventionnels tels que la laine de Verre (environ $0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) ou le polystyrène expansé (environ $0,032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) Performance d'isolation donnée pour une épaisseur minimale. Un PIV d'à peine 2 cm d'épaisseur peut fournir une isolation comparable à 10 cm de laine minérale, ce qui permet d'économiser énormément d'espace

-Une diminution notable de la consommation d'énergie et des frais de chauffage et de climatisation est possible, pouvant aller jusqu'à 40% comparé à une isolation standard. [41]

*Inconvénients des PIV :

-Sensibilité aux perforations de l'enveloppe. La performance d'isolation est grandement affectée par même la plus petite perte de vide, rendant ainsi le PIV inefficace

-En comparaison avec les isolants traditionnels, leur coût est relativement plus élevé, ce qui représente un investissement initial plus conséquent. Le coût par mètre carré peut être deux à trois fois plus élevé

-Bien que des avancées soient faites pour simplifier leur mise en place, notamment grâce à l'utilisation de PIV pré-découpés et de dispositifs d'attache spécifiques, des complications persistent lors de la découpe et de l'adaptation sur le site. [41]

b) Béton isolant composite avec fibres naturelles ou recyclées :

Le béton isolant composite constitue une solution innovante permettant d'intégrer la fonction structurelle et l'isolation thermique au sein d'un même matériau. L'incorporation de fibres naturelles (chanvre, lin, cellulose) ou recyclées (broyats de pneus, plastiques) dans la matrice cimentaire réduit la conductivité thermique du béton de 20 à 50 %.

En plus d'alléger les structures et de simplifier les phases de chantier, cette approche valorise des co-produits ou des déchets, réduisant ainsi l'empreinte carbone globale du bâtiment. Ce composite s'impose comme une alternative durable aux matériaux conventionnels, particulièrement adaptée à la réalisation de murs porteurs isolants ou en association avec des structures en bois.



Figure II. 14 : Béton en chanvre. . [42]



Figure II. 15 : Béton d'anas de lin. . [43]

***Avantages du béton isolant composite :**

L'utilisation de bétons composites biosourcés, tel que le béton de chanvre, offre des avantages environnementaux et techniques majeurs pour le bâtiment. Sur le plan thermique et acoustique, sa faible conductivité thermique ($\lambda \approx 0,07 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ contre 1,5 à 2 W/(m · K) pour un béton traditionnel) et sa porosité permettent de limiter les transferts de chaleur tout en assurant un affaiblissement acoustique pouvant atteindre 50 dB. De plus, ses excellentes propriétés hygrométriques lui permettent d'absorber jusqu'à dix fois son poids en eau, régulant ainsi passivement l'humidité intérieure sans risque de prolifération fongique. Enfin, ce matériau biosourcé agit comme un puits de carbone en stockant environ 30 kg de CO₂ par mètre cube, réduisant significativement l'empreinte carbone globale des ouvrages. [41]

***Inconvénients du béton isolant composite :**

-Efficacité d'isolation thermique inférieure comparée aux PIV ou aux isolants de synthèse. Il ne peut donc pas être utilisé en toute autonomie dans les régions à climat très rigoureux, nécessitant un renforcement de l'isolation.

-Il existe un risque de détérioration des fibres naturelles si elles ne sont pas suffisamment protégées contre l'humidité. Il est primordial d'assurer une bonne aération et de se prémunir contre les infiltrations d'eau.

-Les performances Varient en fonction de la qualité des fibres, de la quantité des composants et du procédé de production. Il est indispensable d'effectuer un contrôle qualité strict. [41]

c) Mousses polymères :

Les mousses polymères, comme le polyuréthane (PUR) et (EPS), sont souvent privilégiées comme matériaux isolants en raison de leur coût abordable, de leur légèreté et de leur simplicité d'application. Toutefois, elles ont des contraintes liées à la résistance mécanique (fragilité), l'inflammabilité et la Conductivité thermique. L'intégration de nanomatériaux (nanotubes de carbone, graphène, silice nanométrique) pourrait considérablement améliorer leurs performances et élargir leur champ d'application, en donnant naissance à des mousses plus robustes, plus isolantes et plus sûres. Ces mousses altérées offrent un potentiel considérable dans le domaine de l'isolation, spécialement pour les usages où la légèreté et l'efficacité sont essentielles. [41]



Figure II 16 : Isolation polyuréthane. . [44]

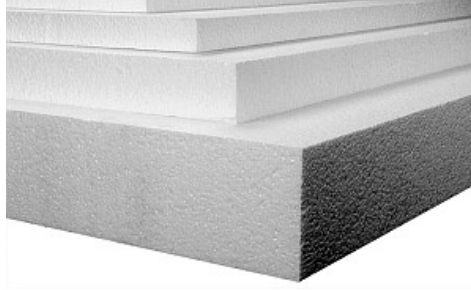


Figure II. 17 Polystyrène expansé. . [45]

***Avantages des mousses polymères renforcés :**

-Amélioration notable de la résistance physique et de la longévité, autorisant son emploi dans des applications plus rigoureuses (comme les panneaux d'isolation pour façades). Il est possible d'augmenter la résistance à la compression de 30 à 50%.

-Il est possible d'améliorer l'isolation thermique en diminuant la Conductivité thermique du polymère (réduction pouvant atteindre 15%) ou en mettant en place des barrières pour contrer la convection.

-Renforcement de la protection contre le feu, diminuant le danger de propagation des flammes et améliorant la sécurité des édifices. Des classifications de résistance au feu B ou C peuvent être obtenues par les mousses renforcées. [41]

***Inconvénients des mousses polymères renforcés :**

-Le coût prohibitif des nanomatériaux restreint leur déploiement à une échelle étendue. Le coût des nanotubes de carbone et du graphène peut constituer une portion significative du coût global du matériau, ce qui rend ces mousses plus onéreuses que les mousses conventionnelles.

-Des défis liés à la répartition uniforme des nanomatériaux dans la matrice polymère requièrent l'emploi de méthodes de fabrication avancées (par exemple, l'usage de surfactants ou de solvants particuliers). Une mauvaise répartition peut conduire à une baisse des performances.

-Des risques de toxicité potentiels associés à la manipulation des nanomatériaux requièrent l'adoption de mesures de sécurité rigoureuses lors de leur production et mise en place. Il faut mener des recherches supplémentaires pour apprécier les effets à long terme sur la santé et l'environnement. [41]

II. 3. Performances des isolants :

II. 3. 1. Propriétés thermiques d'un isolant :

a) Capacité thermique massique

Il s'agit de la faculté du matériau à accumuler de la chaleur en fonction de son poids. Elle définit le volume de chaleur nécessaire pour augmenter la température de 1 kg de matière de 1°C. Elle est formulée en J/[kg. K]. [46]

b) Masse volumique :

La densité ou masse volumique d'un matériau est quantifiée en kg/m³. C'est la quantité de matière par unité de volume. En règle générale, les matériaux offrant de l'inertie ont une densité élevée. [46]

c) Inertie thermique d'un isolant :

On décrit souvent l'inertie thermique d'un objet comme sa faculté à accumuler de la chaleur pour la libérer par la suite de manière graduelle. Plus un matériau est dense et massif, plus sa capacité thermique est élevée. Ainsi, une maison construite en parpaing possède une forte inertie thermique, tandis qu'une maison à structure en bois n'en présente pratiquement aucune. [46]

Chaque surface atténuera et décalera le flux thermique provoqué par les influences externes (comme la température et l'exposition au soleil). Plus la masse surfacique de la paroi est grande (inertie thermique élevée), plus l'amortissement et le déphasage sont prononcés.

Si une structure a une faible inertie, les changements de la température extérieure se refléteront rapidement à l'intérieur. Conséquence cela pourrait entraîner une hausse de la température intérieure durant les journées d'été. Durant l'hiver, la température à l'intérieur pourrait chuter pendant la nuit.

Inversement, si l'inertie thermique est conséquente, elle peut s'avérer bénéfique durant l'été la température intérieure maintiendra un niveau plus frais que celui de l'extérieur, alors que celle-ci atteindra un niveau supérieur à celui de l'extérieur pendant la nuit. Des revêtements muraux ou de sol (comme la moquette, le plafond acoustique, l'isolation intérieure...) peuvent éliminer l'effet d'inertie. [46]

d)Capacité hygrothermique :

Outre l'inertie thermique, certains matériaux peuvent offrir un avantage supplémentaire dans la gestion de la température et de l'humidité des espaces intérieurs, grâce à leur propriété hygrothermique. Encore peu définie, ce concept est particulièrement pertinent dans le contexte des matériaux bio sourcés qui se comportent comme de véritable matériaux à changement de phase.

Dans l'attente des résultats d'études en cours sur ce sujet, les fiches de ce guide fournissent pour chaque matériau une estimation de son niveau de capacité hygrothermique. [46]

e) Déphasage thermique :

Le décalage thermique correspond au délai nécessaire pour qu'un front de chaleur passe à travers une certaine épaisseur de matériau. Ce concept dynamique est également largement tributaire de la densité et de la capacité thermique par unité de masse du matériau. L'intégration du déphasage thermique est particulièrement bénéfique en été pour signaler la pénétration de la chaleur captée par les murs extérieurs pendant la journée, surtout lorsqu'il fait plus frais au cœur de la nuit. [46]

f) Conductivité thermique :

La capacité d'un matériau à conduire la chaleur est décrite par la propriété physique appelée Conductivité thermique. Elle est représentée par la lettre grecque λ (lambda). Le mode de transfert de chaleur associé à cette grandeur est la conduction thermique. Plus un matériau a une haute Conductivité thermique, plus sa capacité à transmettre la chaleur est grande. [46]

Dans le Système international d'unités, la Conductivité thermique est mesurée en watts par mètre et Kelvin (W/m. K).

La Conductivité thermique est principalement influencée par

- *La nature du matériau

- *La température du matériau

Lorsqu'il y a une élévation de la température, un isolant voit sa capacité d'isolation diminuer et en revanche, un conducteur subit une diminution de sa faculté de conduction.

Cependant, d'autres facteurs peuvent également avoir un impact sur ce paramètre ; on peut notamment mentionner

- *L'humidité du matériau (qui augmente la Valeur de la conductivité)

- *La pression a aussi son importance. [46]

Tableau II. 7 : Propriétés thermiques de quelques isolants. [46]

Matériaux	Densité kg/m ³	Conductivité thermique W/m ² . °C	Capacité thermique Wh/m ³ . °C	Epaisseur hiver en cm	Epaisseur été en cm ¹
Laine de bois	160	0,050	90	23	20
Laine de bois	55	0,040	31	18	31
Laine de bois	40	0,040	23	18	36
Ouate de cellulose (insufflée)	60	0,038	31	17	30
Ouate de cellulose (panneaux)	85	0,040	44	18	26
Paille de lavande broyée	110	0,055	50	25	29
Chênevotte	90	0,055	48	25	29
Liège expansé (vrac)	60	0,045	31	20	33
Perlite	80	0,050	22	23	41
Vermiculite	100	0,075	96	34	24
Polyuréthane rigide	30	0,030	12	14	43
Coton	20	0,040	6	18	71
Laine de mouton	10	0,040	5	18	78
Laines de verre	15	0,040	5	18	78
Laines de roche	40	0,045	34	20	32
Polystyrène	7	0,035	3	16	94
Fibres polyester	15	0,045	2	20	130
Structure					
Brique alvéolaire	750	0,125	210	56	21
Bois lourd (chêne, mélèze)	600	0,210	315	95	22
Bois léger (résineux, feuillus)	300	0,120	158	54	24
Béton cellulaire	400	0,147	96	66	34
Paille	80	0,070	31	32	41

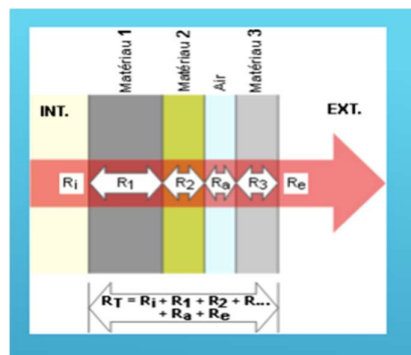


Figure II. 18 : Schéma des résistances thermique d'une paroi multicouche.

II. 3. 2. Comparaison entre isolants modernes et traditionnels :

Le confort et la consommation d'énergie d'un logement dépendent fortement de l'isolation thermique. Un bon isolant aide à réduire les déperditions de chaleur durant l'hiver et à préserver une température confortablement l'été.

Il est crucial de réfléchir soigneusement aux isolants à utiliser dans notre habitation (surtout si c'est une maison ancienne) afin de garantir un confort durable. [47]

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

Les divers paramètres à considérer pour évaluer les isolants thermiques

- La Conductivité thermique
- La résistance thermique
- Le déphasage thermique
- L'isolation phonique
- L'impact environnemental
- Le coût global. [47]

II. 3. 2. 1. Isolants moderne :

Tableau II. 8 : Comparatif technique des propriétés thermiques et acoustiques des isolants modernes [48]

Isolants Modernes	Conductivité thermique	Temps de déphasage (20 cm)	Isolation phonique
Laine de verre	0. 041w/m. k	6 heures	Bon
Laine de roche	0. 030-0. 045 w/m. k	6 heures	Très bon
Polystyrène expansé (PSE)	0. 032-0. 038 w/m. k	5 heures	Moyen
Polyuréthane (PU)	0. 022-0. 028 w/m. k	7 heures	Moyen

II. 3. 2. 2. Isolants traditionnels (biosourcés/naturels) :

Tableau II. 9 : Comparatif technique des propriétés thermiques et acoustiques des isolants traditionnels. [48]

Isolants traditionnel	Conductivité thermique	Temps de déphasage	Isolation phonique
Ouate de cellulose	0. 037-0. 042 w/m. k	10 à 12 heures	Excellent
Laine de bois	0. 038-0. 049 w/m. k	15 heures	Excellent
Liège expansé	0. 037-0. 044 w/m. k	19 heures	Très bon

II. 4. Propriétés Thermiques des Matériaux :

II. 4. 1. Matériaux couramment utilisés :

II. 4. 1. 1. Brique :

La brique est l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus utilisés dans le secteur du bâtiment. Elle est généralement fabriquée à partir d'argile cuite à haute

température, ce qui lui confère une bonne résistance mécanique et une durabilité importante face aux conditions environnementales. [49]



Figure II. 19 : Pile de briques modernes, faites d'argile et de sable. . [50]

***Capacité thermique et inertie thermique de la brique :**

La capacité thermique d'un matériau évalue sa faculté à retenir la chaleur. La brique, qui a une densité importante (environ 1800 kg/m^3 pour une brique pleine), dispose d'une grande capacité thermique. Cela implique qu'elle capte la chaleur durant le jour pour la diffuser durant la nuit, équilibrant de cette façon les températures à l'intérieur. Cette inertie thermique est essentielle pour réduire les fluctuations de température et assurer une stabilité de confort thermique. Par rapport au béton (2400 kg/m^3) qui possède une inertie thermique plus élevée, la brique fournit un meilleur équilibre entre inertie et coût ainsi qu'une meilleure capacité de respiration. En ce qui concerne le bois, du fait de sa densité nettement plus faible ($400\text{-}800 \text{ kg/m}^3$), son inertie thermique est bien moindre. Un mur de briques de 20 cm d'épaisseur est capable d'emmagasiner approximativement 1000 kJ/m^2 par degré Celsius, favorisant ainsi un contrôle thermique efficace et une diminution de l'usage énergétique.

***Isolation thermique choisir la brique adaptée au climat :**

La capacité d'isolation thermique d'une brique dépend de sa composition et de sa structure. Les briques creuses, grâce à leurs alvéoles, procurent une isolation supérieure par rapport aux briques pleines. La Conductivité thermique (λ) représente la faculté d'un matériau à transmettre la chaleur. Une brique creuse typique présente une Conductivité thermique d'environ $0,6 \text{ W/m. K}$, alors que les briques mono mur isolantes peuvent descendre en dessous de $0,2 \text{ W/m. K}$. Un autre élément crucial est la porosité plus une brique possède de pores, meilleure est son pouvoir isolant. La sélection de la brique doit prendre en considération le climat local et les normes thermiques actuellement applicables. Dans les zones froides, il est recommandé de choisir une brique avec une inertie thermique élevée et une faible Conductivité thermique. Dans une zone chaude, une brique ayant une meilleure perméabilité à l'air, réduisant les risques de surchauffe, sera plus adaptée. . [50]

a) Brique pleine :

Inertie thermique élevée, isolation thermique faible ($\lambda \approx 0.8 \text{ W/m. K}$).



Figure II. 20 : Brique pleine. [51]

b) Brique creuse standard :

Inertie thermique moyenne, isolation thermique moyenne ($\lambda \approx 0.6 \text{ W/m. K}$).



Figure II. 21 Brique creuse 16 tours 200x200x300mm. . [52]

c) Brique mono mur isolante :

Inertie thermique moyenne, isolation thermique élevée ($\lambda < 0.2 \text{ W/m. K}$).



Figure II. 22 : Brique mono mur avec isolation intégrés. . [53]

d) Brique terre cuite : Inertie thermique élevée, isolation thermique Variable selon la composition ($\lambda \approx 0.7\text{-}0.9 \text{ W/m. K}$). [25]



Figure II. 23 : Brique en terre cuite. . [54]

II. 4. 1. 2. Béton :

Le béton de structure est un matériau composite formé par le mélange de granulats (sables et graviers), d'un liant (ciment Portland) et d'eau. C'est le matériau le plus utilisé au monde pour sa résistance à la compression et sa capacité à prendre toutes les formes grâce au coffrage. [55]



Figure II 24 : Mise en œuvre d'un béton léger isolant pour une toiture-terrasse isolation et forme de pente. . [56]

a) Comportement thermique Conductivité et Inertie :

Contrairement aux matériaux isolants, le béton courant possède une Conductivité thermique élevée ($\lambda \approx 1,7$ à $2,5$ W/m. K). Cela s'explique par sa forte densité et sa compacité moléculaire qui facilitent le passage de la chaleur. [57]

Cependant, sa masse volumique élevée ($\rho \approx 2300 - 2500$ kg/m³) lui confère une inertie thermique exceptionnelle. Il est capable d'emmagasiner de grandes quantités de calories et de les restituer avec un déphasage important, ce qui est un atout majeur pour le confort d'été. [57]

b) Classification des bétons conventionnels :

On distingue principalement deux types selon la densité des granulats naturels utilisés

- **Le béton à granulats ordinaires (BGO) :** Utilisé pour les dalles, poteaux et poutres.

[57]



Figure II. 25 : Texture macroscopique d'un béton à granulats ordinaires (BGO) montrant la compacité de la matrice cimentaire. . [58]

•Le béton lourd :

Utilisé pour des besoins spécifiques de stabilité ou de protection (Barytine, Magnétite). [59]



Figure II. 26 : Béton lourd comme barrière structurelle et thermique. . [60]

-Tableau II. 10 : Présente l'évolution de la Conductivité thermique des blocs de béton à granulats ordinaires en fonction de leur masse volumique. [61]

La chaleur massique c Vaut 1 000 J/(kg. K)		
Masse volumique ρ (kg. m ³)	λ_{Ui} W/(m. K)	λ_{Ue} W/(m. K)
$\rho \leq 1600$	1. 07	1. 39
$1600 < \rho \leq 1700$	1. 13	1. 47
$1700 < \rho \leq 1800$	1. 23	1. 59
$1800 < \rho \leq 1900$	1. 33	1. 72
$1900 < \rho \leq 2000$	1. 45	1. 88
$2000 < \rho \leq 2100$	1. 58	2. 05
$2100 < \rho \leq 2200$	1. 73	2. 24
$2200 < \rho \leq 2300$	1. 90	2. 46
$2300 < \rho \leq 2400$	2. 09	2. 71

Tableau II. 11 : Présente l'évolution de la Conductivité thermique du béton lourd (armé et non armé) en fonction de la masse volumique. [61]

La chaleur massique Vaut 1 000 J/(kg. K)			
Béton lourd normal	λ_{Ui} W/(m. K)	λ_{Ue} W/(m. K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
Armé	1. 70	2. 20	2 400
Non armé	1. 30	1. 70	2 400

-D'après les données présentées, on observe que la Conductivité thermique du béton augmente avec la masse volumique.

-les bétons à granulats ordinaires présentent déjà des Valeurs élevées de Conductivité thermique, ce qui traduit une faible performance en isolation thermique.

-Le béton lourd normal caractérisé par une masse volumique encore plus élevée, présente des Valeurs de Conductivité thermique plus importantes, en particulier dans le cas du béton armé. Cela confirme que l'augmentation de la densité du matériau favorise les transferts de chaleur et malgré leur forte inertie thermique, ces types de béton ne peuvent pas être considérés comme des matériaux isolants efficaces et nécessitent l'ajout d'une isolation thermique complémentaire dans les bâtiments à haute performance énergétique.

II. 4. 1. 3. Bois :

Le bois est un matériau de construction naturel et bio source, largement plébiscité pour ses excellentes propriétés thermomécaniques. Il présente une Conductivité thermique modérée. Il présente une Conductivité thermique modérée ($\lambda \approx 0,13$ à $0,20$ W/m•K), ce qui le rend plus isolant que des matériaux tels que le béton ou la brique. [62]



Figure II. 27 : Illustration de la structure interne du bois. . [63]

a) Comportement thermique et anisotropie :

L'isolation thermique du bois repose sur sa structure cellulaire alvéolaire. Les cavités (fibres) emprisonnent de l'air sec, limitant ainsi les transferts de chaleur par conduction. [29]

Toutefois, ses performances sont fortement influencées par

-L'humidité L'eau : étant plus conductrice que l'air, l'augmentation du taux d'humidité du bois dégrade son λ .

-La densité : Un bois dense (ex chêne) sera plus conducteur qu'un bois tendre (ex résineux).

-L'orientation des fibres : La chaleur circule environ deux fois plus vite dans le sens des fibres (longitudinal) que perpendiculairement à celles-ci (transversal). [62]

Tableau II. 12 : Bois et dérivés de bois. [61]

Matériau	Masse volumique ρ (kg. m ³)	$\lambda_{U,i}$ W/(m. K)	$\lambda_{U,e}$ W/(m. K)	c [J/kg. K]
Bois de charpente	≤ 600	0. 13	0. 15	1880
	> 600	0. 18	0. 20	1880
Panneau de contreplaqué	< 400	0. 09	0. 11	1880
	$400 \leq \rho < 600$	0. 13	0. 15	
	$600 \leq \rho < 850$	0. 17	0. 20	
	≥ 850	0. 24	0. 28	
Panneau de particules ou d'aggloméré	< 450	0. 10	(1)	1880
	$450 \leq \rho < 750$	0. 14	(1)	
	≥ 750	0. 18	(1)	
Panneau de fibres liées au ciment	1200	0. 23	(1)	1470
Panneau d'OSB (oriented strand board)	650	0. 13	(1)	1880
Panneau de fibres de bois (y compris MDF)	< 375	0. 07	(1)	1880
	$375 \leq \rho < 500$	0. 10	(1)	
	$500 \leq \rho < 700$	0. 14	(1)	
	≥ 700	0. 18	(1)	

-Les données démontrent la polyvalence des matériaux à base de bois. On observe une transition nette les produits de forte densité ($> 600 \text{ kg/m}^3$) assurent une fonction structurelle avec une inertie intéressante, tandis que les produits de faible densité (panneaux de fibres) se rapprochent des performances des isolants thermiques. La chaleur massique élevée ($c \approx 1880 \text{ J/kg. K}$) est le facteur clé permettant d'atteindre des durées de déphasage thermique importantes (jusqu'à 12h), optimisant ainsi le confort d'été.

b) Types d'isolants à base de bois :

-fibre de bois :

La fibre de bois est un isolant thermique largement utilisé dans le domaine du bâtiment. disponible en vrac ou sous forme de panneaux, elle présente des propriétés isolantes appréciées. Bien que sa Conductivité thermique soit modérée par rapport à certains isolants, elle se distingue par un excellent déphasage thermique, pouvant atteindre 11 à 12 heures, contre 3 à 4 heures pour les laines minérales. Cette caractéristique permet de retarder le transfert de chaleur, assurant ainsi un meilleur confort thermique en été. [64]



Figure II. 28 : Pose de panneaux de fibres de bois semi-rigides sur une charpente bois.

- **Laine de bois flexible** : **principalement** utilisée pour l'isolation entre montants ou chevrons.

- **Panneaux rigides** : destinés à l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) ou au sarking en toiture.

- **Fibre en Vrac idéale** : pour l'insufflation dans des parois fermées ou le soufflage en combles perdus. [64]

II. 4. 2. Nouveaux matériaux :

II. 4. 2. 1. Bétons légers :

Le béton léger (ou allégé) se distingue du béton conventionnel par une masse volumique nettement inférieure. Cette légèreté structurelle permet de réduire les charges permanentes

sur les fondations. Au-delà de son aspect mécanique, sa structure poreuse lui confère des propriétés d'isolation thermique et acoustique supérieures à celles des bétons denses. [66]

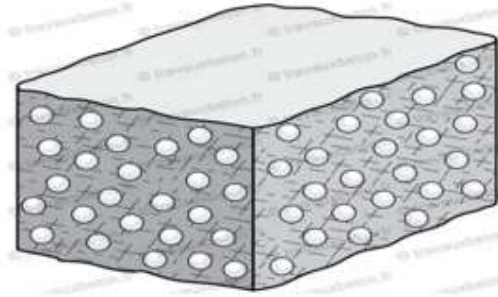


Figure II. 29 : Texture macroscopique d'un béton léger à base de billes de polystyrène expansé (PSE). . [67]

II. 4. 2. 1. 1. Différentes familles de bétons légers :

a) Béton de granulats légers (BGL) :

C'est un béton où les granulats denses sont remplacés par des composants poreux (argile expansée, schiste, perlite).

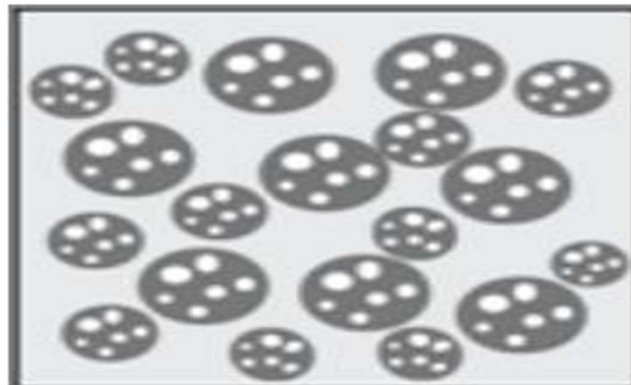


Figure II. 30 : Béton de granulat léger. . [67]

b) Le béton d'argile expansée (Billes d'Argex) :

Ce type de béton est le plus fabriqué au monde au sein de la famille des bétons de granulats légers. Son processus de fabrication et ses caractéristiques physiques en font un matériau de choix pour l'isolation structurelle.

-Processus de fabrication : L'argile est traitée thermiquement dans des fours rotatifs à des températures comprises entre 1150 °C et 1200 °C. Sous l'effet de la chaleur, le dégagement de gaz à l'intérieur de la matière provoque une expansion, créant une structure interne alvéolaire. . [67]

-Morphologie Au refroidissement, on obtient des billes de forme arrondie, d'un diamètre variant de 3 à 25 mm. Elles possèdent une surface externe vitrifiée et dure, ce qui leur confère une bonne résistance mécanique malgré leur légèreté. [67]

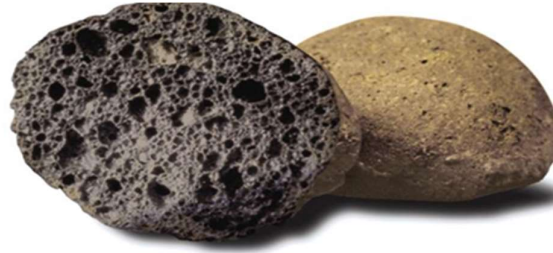


Figure II. 31 : Structure d'une bille d'argile expansée après traitement thermique.

c) Étude comparative des performances thermiques des blocs en béton de granulats légers :

-L'utilisation de granulats poreux permet d'ajuster les performances du béton en fonction des besoins structurels et thermiques.

Tableau II. 13 : Blocs de béton d'argile expansée. [61]

La chaleur massique c Vaut 1 000 J/(kg. K)		
Masse volumique ρ (kg. m ³)	λ_{Ui} W/(m. K)	λ_{Ue} W/(m. K)
$\rho \leq 400$	0. 14	(1)
$400 < \rho \leq 500$	0. 18	(1)
$500 < \rho \leq 600$	0. 21	0. 28
$600 < \rho \leq 700$	0. 25	0. 33
$700 < \rho \leq 800$	0. 30	0. 39
$800 < \rho \leq 900$	0. 33	0. 44
$900 < \rho \leq 1000$	0. 38	0. 50
$1000 < \rho \leq 1100$	0. 43	0. 57
$1100 < \rho \leq 1200$	0. 49	0. 65
$1200 < \rho \leq 1300$	0. 55	0. 73
$1300 < \rho \leq 1400$	0. 61	0. 80
$1400 < \rho \leq 1500$	0. 67	0. 88
$1500 < \rho \leq 1600$	0. 75	0. 99
$1600 < \rho \leq 1700$	0. 83	1. 10

Tableau II. 14 : Blocs de béton avec d'autres granulats légers.

La chaleur massique c Vaut 1 000 J/(kg. K)		
Masse volumique ρ (kg. m ³)	λ_{Ui} W/(m. K)	λ_{Ue} W/(m. K)
$\rho \leq 500$	0. 30	(1)
$500 < \rho \leq 600$	0. 33	0. 43
$600 < \rho \leq 700$	0. 37	0. 47
$700 < \rho \leq 800$	0. 41	0. 52
$800 < \rho \leq 900$	0. 46	0. 58
$900 < \rho \leq 1000$	0. 51	0. 65
$1000 < \rho \leq 1100$	0. 57	0. 73
$1100 < \rho \leq 1200$	0. 64	0. 82
$1200 < \rho \leq 1300$	0. 72	0. 91
$1300 < \rho \leq 1400$	0. 82	1. 04
$1400 < \rho \leq 1500$	0. 92	1. 17
$1500 < \rho \leq 1600$	1. 03	1. 31
$1600 < \rho \leq 1800$	1. 34	1. 70

L'analyse de ces deux Tableau permet de tirer plusieurs conclusions fondamentales pour la conception thermique des bâtiments :

-Corrélation Densité / Conductivité : Pour les deux familles, on observe une croissance linéaire de la Conductivité thermique (λ) en fonction de la masse volumique (ρ). Plus le matériau est dense (donc plus résistant mécaniquement), moins il est isolant.

-Supériorité de l'Argile Expansée : À masse volumique égale, le béton d'argile expansée (Tableau 2. 13) présente des performances thermiques nettement supérieures. Par exemple, pour une densité d'environ 1100 kg/m³

-L'argile expansée affiche $\lambda_{Ui} = 0,43$ W/m. K.

-Les autres granulats affichent $\lambda_{Ui} = 0,57$ W/m. K.

-Interprétation : Cela s'explique par la structure interne très poreuse et alvéolaire propre aux billes d'argile expansée.

-Influence de l'humidité : (λ_{Ui} IVs λ_{Ue}) : On remarque que la Conductivité en conditions extérieures (λ_{Ue}) est systématiquement plus élevée que celle en conditions intérieures (λ_{Ui}). Cela confirme que l'humidité augmente la transmission de chaleur. Pour les densités les plus faibles, l'exposition directe est même proscrite (noté (1)), car l'absorption d'eau annulerait tout le bénéfice thermique.

-Inertie Thermique : Bien que ces bétons soient légers, leur chaleur massique reste constante (1000 J/kg. K). Ils offrent ainsi un compromis intéressant entre isolation et déphasage thermique, contrairement aux isolants "purs" qui manquent souvent de masse.

II. 4. 2. 2. Matériaux à changement de phase (PCM) :

a) Principe de fonctionnement et chaleur latente :

-Le rôle des MCP (ou PCM en anglais) repose sur l'exploitation de la chaleur latente. Contrairement aux matériaux classiques (béton, brique) qui stockent la chaleur de manière "sensible" (leur température augmente), les MCP absorbent une énergie considérable à température constante lors de leur transition de phase. L'énergie thermique emmagasinée ou restituée lors de ce processus est régie par la relation fondamentale

$$Q = m * L \quad (\text{II. 1})$$

Où :

- Q : est l'énergie stockée ou libérée,
- m : est la masse du PCM,
- L : est la chaleur latente de fusion ou de solidification. [68]

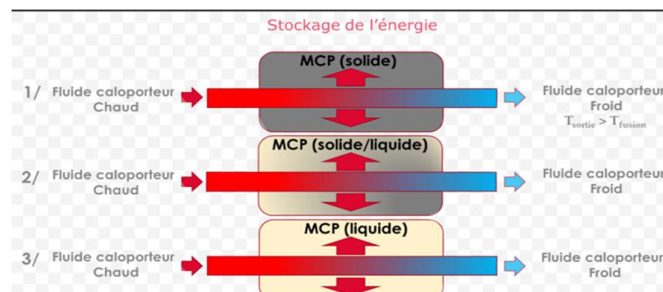


Figure II. 32 : Schématisation des phases de stockage thermique par un MCP.

Le schéma illustre le transfert thermique entre un fluide caloporteur et le matériau à changement de phase selon trois étapes distinctes

• **Phase de chauffage sensible (Solide) :** Le fluide chaud transmet sa chaleur au MCP. La température du matériau augmente progressivement jusqu'à atteindre son point de fusion, tout en restant à l'état solide.

- **Phase de stockage latent (Transition) :** C'est l'étape de changement d'état. le MCP absorbe une quantité massive d'énergie à température constante. Cette énergie (chaleur latente) est utilisée pour rompre les liaisons moléculaires et passer de l'état solide à l'état liquide.

- **Phase de chauffage sensible (liquide) :** Une fois la fusion totale achevée, le matériau est entièrement liquide. S'il continue d'absorber de l'énergie, sa température recommence à augmenter de façon sensible.

b) Classification chimique des MCP :

Classification chimique des MCP On distingue trois grandes familles de matériaux selon leur nature et leurs propriétés thermo physiques

- **Les MCP organiques :** Composés de paraffines ou d'acides gras. Ils sont stable chimiquement et non corrosifs, mais inflammables.

- **Les MCP inorganiques :** Sels hydratés. Ils possèdent une densité énergétique plus élevée et sont incombustibles, mais peuvent présenter des problèmes de surfusion.

- **Les MCP eutectiques :** Mélanges de composants offrant un point de fusion précis. [68]

II. 5. Impact sur la Performance Énergétique :

II. 5. 1. Rôle de l'inertie thermique :

L'inertie thermique est un levier majeur de la performance énergétique, agissant sur trois axes fondamentaux

- Régulation des amplitudes thermiques :** Elle atténue les variations de température quotidiennes et saisonnières. En stockant l'énergie, les parois massives limitent les pics de chaleur en journée et les chutes de température la nuit, favorisant une ambiance intérieure stable et confortable. [69]

- Valorisation des apports passifs :** Elle permet de stocker les apports solaires gratuits (pénétrant par les vitrages) durant la journée. Cette énergie est ensuite restituée par rayonnement durant la nuit, ce qui réduit la sollicitation des systèmes de chauffage actifs. [69]

- Optimisation de la consommation énergétique :** En lissant les besoins, l'inertie réduit directement la demande de chauffage en hiver et de climatisation en été. Cela permet non seulement de diminuer les coûts énergétiques (factures), mais aussi de dimensionner des équipements de génie climatique plus petits et moins énergivores. [69]

- **Déphasage Thermique (ϕ)** : C'est le temps écoulé entre le pic de température extérieure et le pic de température intérieure. Un bon matériau innovant doit offrir un déphasage d'environ **10 à 12 heures** pour restituer la chaleur diurne durant la nuit, au moment où les besoins de chauffage sont les plus élevés ou pour évacuer la chaleur par Ventilation nocturne.

Toutefois, les bétons légers présentent une inertie plus faible que le béton dense. C'est ici que l'ajout de **MCP** (Matériaux à Changement de Phase) prend tout son sens en apportant une capacité de stockage thermique élevée malgré la légèreté de la structure.

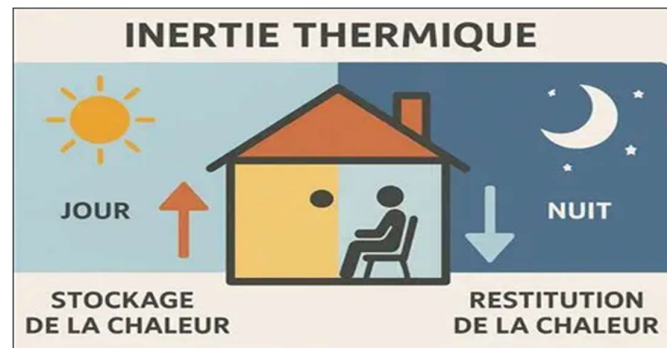


Figure II. 33 : Cycle de stockage et de restitution de la chaleur par inertie thermique.

II. 5. 2. Effets des matériaux sur le confort thermique et la consommation énergétique :

L'interaction entre l'isolation thermique (béton léger) et l'inertie (MCP) influence directement les deux piliers de la performance d'un bâtiment le bien-être des occupants et la facture énergétique.

a) Amélioration du confort thermique

Le confort thermique ne dépend pas uniquement de la température de l'air, mais de la température opérative, qui est la moyenne entre la température de l'air et celle des parois. [70]

-**Suppression de l'effet de "paroi froide"** : En hiver, une forte résistance thermique (R) maintient la face intérieure du mur à une température proche de celle de l'air. Cela évite l'inconfort lié au rayonnement froid des murs. [70]

-**Régulation passive par les MCP** : En été, les matériaux à changement de phase absorbent l'excès de chaleur calorifique. En stabilisant la température intérieure dans la zone de confort (entre 21°C et 26°C), ils limitent les chocs thermiques et les surchauffes cutanées. [70]

b) Réduction de la consommation énergétique :

L'optimisation des matériaux permet de réduire la dépendance aux systèmes de génie climatique actifs (chauffage et climatisation).

-Économies de chauffage : L'association d'une faible Conductivité λ et d'une bonne inertie permet de conserver les apports solaires passifs (énergie gratuite du soleil) plus longtemps à l'intérieur. Cela retarde le déclenchement de la chaudière et réduit la consommation de combustible. [71]

-Efficacité en période estivale : Le lissage des pics de température grâce au déphasage thermique permet souvent de supprimer le recours à la climatisation mécanique. Le bâtiment utilise la fraîcheur nocturne stockée dans les parois pour climatiser naturellement la journée suivante. [71]

-Réduction de l'empreinte carbone : Une moindre consommation d'énergie primaire se traduit directement par une baisse des émissions de CO₂, inscrivant le bâtiment dans les objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050. [71]

Conclusion :

Ce chapitre a permis de dresser un état des lieux des solutions d'isolation, allant des méthodes classiques (ITI et ITE) aux matériaux biosourcés et technologiques. L'analyse montre que la performance d'une paroi ne repose plus uniquement sur sa résistance thermique (R), mais sur sa capacité à réguler dynamiquement les flux de chaleur grâce à l'inertie et au déphasage.

L'intégration de solutions innovantes, telles que les bétons légers (Argex) et les Matériaux à Changement de Phase (MCP), représente une avancée majeure. Ces technologies transforment l'enveloppe du bâtiment en un système de régulation passive, capable de stabiliser le confort intérieur tout en réduisant drastiquement la dépendance aux systèmes de chauffage et de climatisation.

En optimisant ces propriétés thermo physiques, il devient possible de concilier confort thermique et exigences environnementales, inscrivant ainsi le bâtiment dans une démarche de durabilité pour répondre aux objectifs de neutralité carbone à l'horizon 20

Chapitre III :

Méthodologie et

description du cas d'étude

Introduction :

Ce chapitre se dédie à l'analyse technoeconomique d'une maison individuelle de 130 m² située à Remchi (Tlemcen), servant à évaluer l'influence du gain thermique sur sa consommation d'énergie. L'analyse repose sur trois cas de figure distincts un cas de départ sans isolation, un cas où l'on isole du côté intérieur et un cas où l'on isole du côté extérieur. Dans chaque cas, nous avons calculé le coefficient de déperdition globale pour caractériser la qualité d'enveloppe, puis nous avons évalué avec précision les besoins en chauffage et en climatisation. Enfin, une étude comparative des factures de gaz et d'électricité pour les saisons hivernale et estivale met en évidence les économies financières réalisées, offrant ainsi une Vision globale de l'efficacité de chaque solution d'isolation dans le contexte climatique de la région.

III. 1. Présentation de la wilaya de Tlemcen :

La wilaya de Tlemcen, située à l'extrémité nord-ouest de l'Algérie, occupe une position géographique stratégique caractérisée par une importante diversité écosystémique et topographique. Son territoire englobe des massifs montagneux (notamment les monts de Tlemcen et des Trara), des plaines fertiles et des franges steppiques. Du point de vue climatique, la wilaya est soumise à un régime méditerranéen à tendance semi-aride, dont les variables thermo-hygrométriques varient significativement en fonction de l'altitude et de la proximité maritime. Cette hétérogénéité climatique engendre des conditions environnementales contrastées, influençant directement les charges thermiques des bâtiments et les besoins en climatisation ou en chauffage dans la région

III. 1. 1. Présentation de la commune de Remchi :

Remchi, chef-lieu de daïra, se situe dans la portion septentrionale (nord) de la wilaya de Tlemcen, au centre de l'immense plaine de la Zenata. Située à environ 25 km du chef-lieu de la wilaya, la commune constitue un carrefour stratégique majeur entre les hauts plateaux et le littoral (notamment Ghazaouet et Rachgoun).

Sur le plan socio-économique, Remchi se distingue par la richesse de ses terres et ses périmètres irrigués, s'imposant comme le cœur agricole de la région. De plus, sa topographie essentiellement plate favorise une extension urbaine et industrielle significative, positionnant la municipalité comme un pôle économique régional en pleine croissance.

Du point de vue climatique, la région est soumise à un climat semi-aride. Les étés se caractérisent par des températures élevées et un ciel clair, accentuant l'évapotranspiration, tandis que les hivers sont frais, humides et venteux. Les températures oscillent généralement entre 3 °C et 34 °C au cours de l'année. Elles descendent rarement en dessous du seuil de 0 °C, mais peuvent exceptionnellement franchir les 38 °C lors des épisodes de sirocco.

III. 2. Présentation de l'Entité Étudiée :

Cette recherche s'articule autour d'une analyse thermique détaillée dédiée à l'amélioration de la performance énergétique à l'échelle de l'habitat individuel. Le but central de l'étude est d'évaluer le comportement thermo physique de la structure à travers une approche comparative, mettant en évidence les gains énergétiques générés par l'application de solutions d'isolation par rapport à l'état initial du bâtiment

-Il convient de souligner que l'efficacité d'un système d'isolation (qu'elle soit intérieure, extérieure ou biosourcée) est intrinsèquement dépendante des spécificités du milieu environnant. En effet, sous différentes conditions climatiques, les besoins énergétiques d'un bâtiment varient de manière significative : un climat semi-aride, caractérisé par de forts écarts thermiques journaliers, ne sollicite pas l'enveloppe de la même manière qu'un climat littoral humide ou saharien.

L'intégration de cette variabilité climatique dans notre démarche permet d'anticiper comment les performances thermiques et les temps de retour sur investissement des isolants oscillent d'une zone à l'autre. Ainsi, cette analyse comparative vise à définir les critères de choix optimaux d'un système d'isolation, démontrant qu'une solution hautement performante dans un contexte thermique donné peut s'avérer sous-optimale sous d'autres latitudes climatiques.

III. 2. 1. Fiche technique du bâtiment :

*La hauteur de la maison est de 3. 06 m.

*La surface de la maison est de 130 m².

*Le volume de la maison est de 379,8 m³.

III. 2. 2. Contexte géographique et climatique :

On constate que le projet se trouve à Remchi, dans la wilaya de Tlemcen. on pense que choisir ce lieu est essentiel pour l'analyse, parce que le lieu impose des restrictions climatiques particulières

La zone climatique est classée selon le DTR (Document Technique Réglementaire) algérien.

Hiver : un bon système de chauffage est essentiel pour affronter les Vagues de froid.

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Été : Passer longtemps au soleil demande la protection thermique. Le confort de l'été reste présent sans trop dépendre de la climatisation.

-Description de bâtiment :

Le bâtiment occupe une surface au sol de 130 mètres carrés. Il dispose d'un volume total chauffé de 379,8 mètres cubes.

Le plan architectural de cette structure a été entièrement conçu et modélisé par nos soins sur le logiciel **AutoCAD**

Cette disposition particulière donne un rapport de compacité spécifique. Ce rapport a un impact direct sur les déperditions thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Le bâtiment est conçu pour accueillir sept personnes. Cela signifie que les apports de chaleur internes sont définis en fonction du nombre d'habitants, ainsi que les besoins en Renouvellement d'air neuf

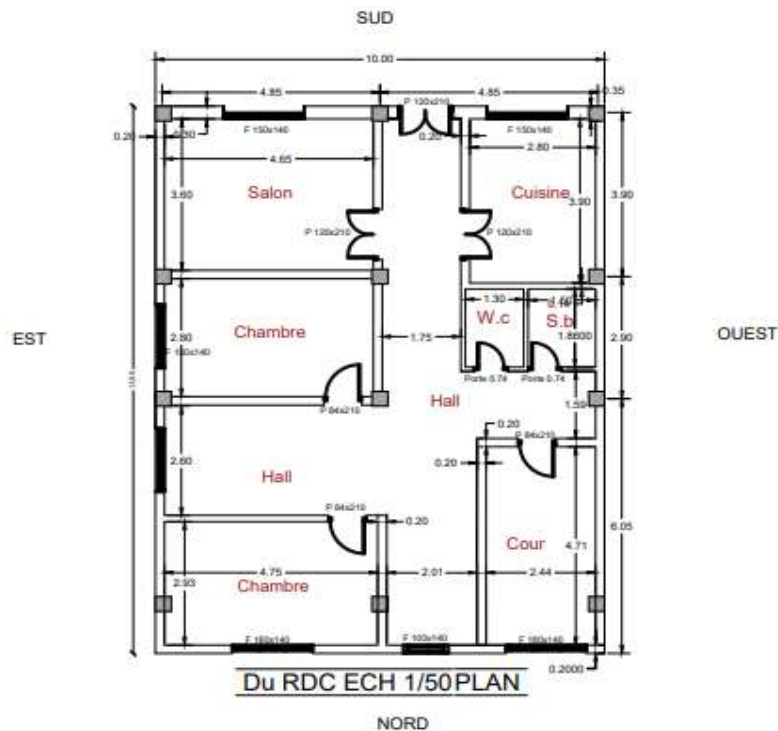


Figure III. 1 : Plan du bâtiment étudié AutoCAD

La conception architecturale favorise une approche bioclimatique en plaçant les espaces selon l'ensoleillement

Zone de vie (Sud) : Les espaces de jour sont implantés sur la façade Sud afin de bénéficier d'un bon apport en éclairage naturel. Ils comprennent un salon et une cuisine, tous deux équipés de fenêtres assurant l'éclairage et la ventilation naturelle.

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Zone de repos (Est et Nord) : La partie nuit est constituée de deux chambres. La première, située à l'Est, présente des dimensions tandis que la seconde, orientée au Nord, mesure. Les ouvertures prévues garantissent un confort visuel et une ventilation adéquate.

Espaces de service (Ouest) : Les locaux sanitaires sont regroupés dans la partie Ouest du logement et comprennent un W. C. de ainsi qu'une salle de bain. Cette disposition permet d'optimiser l'organisation fonctionnelle et les réseaux techniques.

Espace extérieur intégré : Une cour intérieure est aménagée au sein du logement. Elle favorise l'éclairage naturel, la ventilation des espaces adjacents et améliore le confort des occupants.

III. 2. 3. Enveloppe du bâtiment et les différentes variantes d'étude :

L'examen compare deux états différents de l'enveloppe

Version de base (sans isolation) : On utilise des matériaux de construction standards et on ne coupe pas les ponts thermiques. Cette étape constitue la référence pour mesurer les pertes naturelles.

Version Améliorée (Post-isolation) : On ajoute des matériaux isolants très performants sur les murs opaques et on améliore les fenêtres.

III. 2. 4. Objectifs de l'étude :

- *Calculer les besoins en calories du bâtiment pour les deux scénarios.
- * évaluer comment l'isolation diminue les pertes de chaleur.
- * Vérifier le respect du projet. Le projet doit satisfaire les critères de confort hygrothermie ainsi que d'efficacité énergétique.
- *Évaluation de la consommation énergétique avant et après l'isolation.

III. 2. 5. Données de température de la commune de Remchi :

Tableau III. 1 : Température moyenne de la commune de Remchi.

Mois	Température moyenne °C
Janvier	11
Février	12
Mars	14
Avril	16
Mai	22
Juin	26
Juillet	30
Aout	30

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Septembre	26
Octobre	19
Novembre	16
Décembre	13

III. 2. 6. Caractéristiques des portes :

Tableau III. . 2 : Caractéristiques des portes.

Caractéristiques	Nombre	Le cadre	Dimension
Les portes des chambres	3	En bois massif	2. 1m/0. 84m
La porte de salon	1	En bois massif	2,1m/1,2m
La porte de la cour	1	En bois massif	2. 1m/1. 2m
La porte de S. D. B	1	En PVC	2. 1m/0. 74m
La porte de WC	1	En PVC	2. 1m/0. 74m
Les portes extérieures	1	En bois massif	2. 1m/1. 2m

III. 2. 7. Caractéristiques des fenêtres :

Tableau III. . 3 : Caractéristiques des fenêtres.

Caractéristiques	Vitre	Nombre	Dimension
Fenêtres en PVC (chambres)	Double Vitrage	6	1. 5m/1. 4m
Fenêtre en pvc (Hall)	Double vitrage	1	1m/1. 4m
Fenêtre en Pvc (w. c)	Double vitrage	2	0. 6m/0. 6m

III. 2. 8. Caractéristiques géométriques des éléments porteurs :

Après la phase de prédimensionnement structurel, nous avons fixé les sections des principaux éléments porteurs de l'ossature comme suit

-Éléments verticaux : Les poteaux ont une section carrée de **40 × 40 cm**. Les poteaux assurent la descente de charge vers les fondations.

-Ossature horizontale (Poutres)

*Les poutres longitudinales principales ont une section de **30 × 45 cm**.

*Poutres transversales (secondaires) la section mesure **25 × 40 cm**.

III. 3. Calculs des déperditions :

III. 3. 1. Avant isolation :

Avant l'application de l'isolation thermique, le bâtiment présentait des pertes de chaleur importantes à travers l'enveloppe extérieure, ce qui influençait directement le confort thermique intérieur et augmentait la consommation énergétique. Les parois existantes étaient composées de matériaux classiques offrant une faible résistance thermique. Cette étape permet donc d'évaluer les performances thermiques initiales du bâtiment avant l'intégration des solutions d'isolation.

III. 3. 1. 1. Planchers :

a-Toiture :

Type corps creux en béton ou dalle pleine, qui constitue la partie supérieure horizontale de l'enveloppe.

Configuration : Le plancher reçoit l'air chaud à l'intérieur, sous la surface, et il est directement exposé à l'air extérieur sur le dessus, aux intempéries et au rayonnement solaire.

Objectif : Calculer le coefficient de transmission thermique (k) de la paroi brute afin de mesurer les pertes de chaleur par le haut, souvent les plus importantes.

Tableau III. 4 : Composants et caractéristiques de toiture (sans isolation).

Composants	Épaisseur [cm]	Conductivité λ [W/m. °C]	Résistance R [m². °C/W]
Béton précontraint (dalle)	20	1. 80	0. 111
Chape (mortier mince)	5	1. 00	0. 05
Revêtement de sol (carrelage mince)	1	1. 00	0. 01
Résistances de surface intérieure	/	/	0. 13
Résistances de surface extérieur	/	/	0. 04

$$1/k = R(\text{total})$$

(III. 1)

$$R(\text{total}) = 0. 111 + 0. 05 + 0. 01 + 0. 13 + 0. 04$$

$$R(\text{total}) = 0. 341 [\text{m}^2. \text{°C/W}]$$

$$1/k = 0.341$$

$$K = 2.933 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

b-Plancher bas :

Type : Le plancher comprend une dalle en béton précontraint, une chape fluide à base d'anhydrite, et un revêtement final en carrelage ou en grès cérame. Le plancher délimite la partie inférieure de l'enveloppe habitable.

Configuration : La paroi touche l'air intérieur sur la surface supérieure. En dessous, la face inférieure de la paroi touche le sol ou un espace non chauffé, ce qui provoque un transfert de chaleur par conduction et convection vers le bas.

Objectif : Calculer le coefficient de transmission thermique (k) de la paroi brute.

Tableau III. 5 : Composants et caractéristiques du plancher bas (sans isolation).

Composants	Épaisseur [cm]	Conductivité λ [W/m. °C]	Résistance R [m ² . °C/W]
Béton précontraint (dalle)	20	1.80	0.111
Chape fluide (anhydrite)	5	1.20	0.042
Revêtement (Carrelage/Grès)	1	1.30	0.008
Résistances de surface intérieure	/	/	0.13
Re_vide	/	/	0.17

$$R \text{ (total)} = 0.111 + 0.042 + 0.008 + 0.13 + 0.17$$

$$R \text{ (total)} = 0.461 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

$$1/k = 0.461$$

$$K = 2.169 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

III. 3. 1. 2. Murs de façade :

Type : La paroi verticale se compose d'un mur en briques de 25 cm d'épaisseur. Le mur en briques porte un revêtement intérieur en plaque de plâtre. Le revêtement intérieur en plaque de plâtre constitue l'enveloppe latérale du bâtiment.

Configuration : La paroi sépare l'intérieur chauffé de l'extérieur. La paroi subit les variations de température au fil des saisons, le vent, et les échanges de chaleur par convection et par rayonnement sur sa face extérieure.

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Objectif le coefficient de transmission thermique (K) de la paroi non isolée pour mesurer les pertes de chaleur latérales. Cette étape montre pourquoi il faut ajouter un isolant thermique afin de diminuer la consommation d'énergie et d'améliorer le confort à l'intérieur.

Tableau III. . 6 : Composants et caractéristiques des murs de façade (sans isolation).

Composant	Épaisseur (cm)	λ (W/m·°C)	Résistance thermique (m ² °C/W)
Mur brique	25	1,2	0,21
Plaque de plâtre	1,3	0,25	0,05
Total paroi	—	—	≈ 0.26

$$R(\text{total}) = 0.21 + 0.05$$

$$R(\text{total}) = 0.26 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

$$1/k = 0.26$$

$$K = 3.846 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

III. 3. 1. 2. Poutres longitudinales :

Le Tableau suivant récapitule les caractéristiques thermos physiques des poutres longitudinales, nécessaires à la détermination de leur coefficient de transmission thermique K.

Tableau III. 7 : Composants et caractéristiques des poutres longitudinales.

Composants	Épaisseur (cm)	Conductivité (W/m°C)	Résistance (m ² °C/W)
Enduit ciment	1.5	1.15	0.013
Béton armé	30	1.75	0.171
Résistance d'échange superficielle	/	/	0.17

$$R(\text{total}) = 0.013 + 0.171 + 0.17$$

$$R(\text{total}) = 0.354 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

$$1/k = 0.354$$

$$K = 2.825 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

III. 3. 1. 3. Poutres transversales :

Pour une épaisseur de béton de 25 cm et le même type de revêtement, nous avons - Pour les poutres orientées vers l'extérieur, le calcul donne un coefficient de Conductivité **K égal à 3.077 [W/m² · °C]**.

III. 3. 1. 4. Poteaux :

Pour 12 poteaux de dimension 40cm/40cm

On a les caractéristiques suivantes pour la composition des poteaux en béton armé.

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Tableau III. 8 : Composants et caractéristiques des poteaux.

Composants	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique λ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m². °C/W]
Enduit ciment (éxt)	1. 5	1. 15	0. 013
Poteau en béton armé	40	1. 75	0. 229
Résistance superficielle	/	/	0. 22

$$R \text{ (total)} = 0. 013 + 0. 229 + 0. 22$$

$$R \text{ (total)} = 0. 462 \text{ [m}^2. \text{ °C/W]}$$

$$1/k = 0. 462$$

$$K = 2. 165 \text{ [W/m}^2. \text{ °C]}.$$

-Calcul des déperditions à travers les parois en contact avec l'extérieur avant isolation

La formule ci-dessous fournit les pertes de surface par transmission (D_s) à travers un mur pour diverses températures

$$D_s = K \times A \quad [\text{W/°C}] \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

- K [m². °C/W] : coefficient de transmission surfacique (conductance)
- A [m²] : surface intérieure de la paroi.

Tableau III. 9 : Déperdition surfaciques vers l'extérieur(avant isolation)

Parois	Surface A [m²]	K [m². °C/W]	D_s [W/°C]
Toiture	130	2. 933	381. 29
Plancher bas	130	2. 169	281. 97
Murs extérieur	93. 18	3. 846	358. 37
Fenêtres	14. 72	1. 6	23. 55
Portes (extérieur)	2. 52	1. 5	3. 78
Poteaux	14. 69	2. 165	31. 8
Poutres longitudinales	11. 7	2. 825	33. 05
Poutres transversales	8	3. 077	24. 62

$$\sum D_s = 1138.43 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

-Calcul des déperditions par Renouvellement d'air avant isolation

La formule ci-après fournit les déperditions dues au Renouvellement de l'air

$$DR = 0.34 \times \tau \times V_i \quad [\text{W/}^\circ\text{C}] \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

0.34 : $[\text{W} \cdot \text{h}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}]$ chaleur volumique de l'air ;

τ : $[\text{1/h}]$ Taux de Renouvellement d'air ;

V_i : $[\text{m}^3]$ volume du local.

$$\text{Volume de la maison} = \text{Hauteur} \times \text{Largeur} \times \text{Longueur} \quad (\text{III. 4})$$

$$V = 3.06 \times 10 \times 13$$

$$V = 379.8 \text{ m}^3$$

On a

$$0 < V_i < 100 \quad \tau = 1$$

$$100 < V_i < 500 \quad \tau = 0.75$$

$$500 < V_i < 1000 \quad \tau = 0.5$$

$$DR = 0.34 \times 0.75 \times 379.8$$

$$DR = 96.85 \text{ [W/}^\circ\text{C]}$$

La somme totale des déperditions du bâtiment (sans isolation) est de

$$DT = DR + DS \quad (\text{III. 5})$$

$$DT = 1235.28 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Le coefficient de déperdition volumique G (avant isolation).

$$G = DT/V_i \quad (\text{III. 6})$$

$$G = (1235.28) / (379.6)$$

$$G = 3.25 \text{ [W/ m}^3 \cdot ^\circ\text{C]}$$

III. 3. 2. Après isolation intérieure :

Dans la présente étude, la technique d'isolation thermique par l'intérieure (ITI) a été adoptée comme solution efficace visant à améliorer les performances thermiques d'un bâtiment en plaçant des matériaux isolants sur les faces internes murs, des planchers ou des plafonds. cette méthode permet de réduire les pertes de chaleur en hiver et de limiter les apports de chaleur en été, tout en améliorant le confort thermique et acoustique des occupants. Elle représente une solution efficace et économique pour diminuer la consommation énergétique des bâtiments.

III. 3. 2. 1. Planchers :

a- Toiture :

Tableau III. 10 : Composants et caractéristiques du Toiture (après isolation).

Composants	Épaisseur [cm]	Conductivité λ [W/m. °C]	Résistance R [m². °C/W]
Béton précontraint (dalle)	20	1. 80	0. 111
Chape (mortier mince)	5	1. 00	0. 05
Isolant (Polystyrène expansé)	8	0. 035	2. 286
Revêtement de sol (carrelage mince)	1	1. 00	0. 01
Résistances de surface intérieure	/	/	0. 13
Résistances de surface extérieur	/	/	0. 04

$$R(\text{total}) = 0. 111 + 0. 05 + 2. 286 + 0. 01 + 0. 13 + 0. 04$$

$$R(\text{total}) = 2. 627 \text{ [m}^2. \text{ °C/W]}$$

$$1/k = \sum R$$

$$\text{Donc : } 1/k = 2. 627$$

$$K = 0. 381 \text{ [W/m}^2. \text{ °C]}$$

b- plancher bas :

***Type :** dalle corps creux 200 mm, vide sanitaire non chauffé sous la dalle.

***Objectif :** isolation thermique du plancher bas pour limiter pertes vers le vide sanitaire.

***Résistances superficielle :** intérieur $R_i = 0,13 \text{ m}^2. \text{ °C/W}$; côté vide sanitaire (air confiné/peu ventilé) $Re_{\text{vide}} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Valeur usuelle pour face interne non ventilée).

Tableau III. 11 : Composants et caractéristiques du plancher bas (après isolation).

Composants	Épaisseur [cm]	Conductivité λ [W/m. °C]	Résistance R [m². °C/W]
Béton précontraint (dalle)	20	1. 80	0. 111
Chape fluide (anhydrite)	5	1. 20	0. 042
Isolant (Laine de Roche (panneau rigide).	10	0. 039	2. 564
Revêtement (Carrelage/Grès)	1	1. 30	0. 008
Résistances de surface intérieure	/	/	0. 13
Re_vide	/	/	0. 17

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

$$R(\text{total}) = 0.111 + 0.042 + 2.564 + 0.008 + 0.13 + 0.17$$

$$R(\text{total}) = 3.025 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

$$1/k = R(\text{total})$$

$$1/k = 3.025$$

$$K = 0.331 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

III. 3. 2. 1. Murs de façade :

La maçonnerie proposée pour les murs de façade utilise un système de doublage isolant par l'intérieur.

Tableau III. 12 : Composants et Caractéristiques de la paroi extérieure en ITI

Composant	Épaisseur (cm)	λ (W/m·°C)	Résistance thermique (m ² ·°C/W)
Mur brique	25	1,2	0,21
Laine de verre	14	0,035	4,00
Lame d'air	2	/	0,11*
Plaque de plâtre	1,3	0,25	0,05

Remarque :

La résistance thermique de la lame d'air de 2 cm est calculée selon la norme comme une lame d'air immobile. Une Ventilation, même légère, réduirait considérablement sa contribution à l'isolation totale de la paroi.

- Pour une paroi en contact avec l'extérieur

La résistance d'échange superficielle est de 0.17 [m². °C/W].

$$1/k = 4.37 + 0.17$$

$$1/k = 4.54$$

$$K = 0.22 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°C]}$$

III. 3. 2. 2. Poutres longitudinales :

Tableau III. 13 Composants et caractéristiques des poutres longitudinales (après isolation).

Composants	Epaisseur (cm)	Conductivité (W/m·°C)	Résistance (m ² ·°C/W)
Enduit ciment	1.5	1.15	0.013
Béton armé	30	1.75	0.171
Laine de verre	5	0.035	1.429
Plaque de platre (BA13)	1.3	0.35	0.037
Résistance d'échange superficielle	/	/	0.17

$$R(\text{total}) = 1.82 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W].}$$

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

$$1/k = 1.82$$

$$K = 0.549 [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$$

III. 3. 2. 3. Poutres transversales :

Pour une épaisseur de béton de 25 cm et le même type de revêtement, nous avons - Pour les poutres orientées vers l'extérieur, le calcul donne un coefficient de Conductivité **K égal à 1.791 [W/m². °C]**.

III. 3. 2. 4. Poteaux :

Pour 12 poteaux de dimension 40cm/40cm

Tableau III. 14 : Composants et caractéristiques des poteaux (après isolation).

Composants	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique λ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m². °C/W]
Enduit ciment (éxt)	1.5	1.15	0.013
Poteau en béton armé	40	1.75	0.229
Laine de verre	5	0.035	1.429
Plaque de plâtre (BA13)	1.3	0.35	0.037
Résistance superficielle	/	/	0.22

$$R(\text{total}) = 0.013 + 0.229 + 1.429 + 0.037 + 0.22$$

$$R(\text{total}) = 1.928 [\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}]$$

$$1/k = 1.928$$

$$K = 0.517 [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}]$$

-Calcul des déperditions à travers les parois en contact avec l'extérieur après isolation extérieure

Tableau III. 15 : Déperditions surfaciques vers l'extérieur (après isolation intérieure).

Parois	Surface A [m²]	K [m². °C/W]	Ds [W/°C]
Toiture	130	0.381	49.53
Plancher bas	130	0.331	43.03
Murs extérieur	93.18	0.22	20.50
Fenêtres	14.72	1.6	23.55
Portes (extérieur)	2.52	1.5	3.78
Poteaux	14.69	0.517	7.60
Poutres longitudinales	11.7	0.549	6.42
Poutres transversales	8	1.791	14.33

$$Ds = \sum K \times A = 168.74 [W/^{\circ}C].$$

Les déperditions par Renouvellement d'air :

$$DR = 0.34 \times \tau \times V_i [W/^{\circ}C]$$

$$V = 3.06 \times 10 \times 13$$

$$V = 379.8 \text{ m}^3$$

On a déjà

$$DR = 96.85 \text{ w/k}$$

La somme totale des déperditions du bâtiment est de

$$DT = DR + DS$$

$$DT = 265.59 \text{ W}/^{\circ}C$$

$$G = \frac{Dt}{Vi}$$

$$G = \frac{263.35}{376.9}$$

$$G = 0.69 [w/m^3/^{\circ}C]$$

III. 3. 3. Après isolation extérieure :

Dans la présente étude, la technique d'isolation thermique par l'extérieur (ITE) a été retenue comme dispositif stratégique susceptible d'améliorer le fonctionnement d'enveloppe du bâtiment. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser des **matériaux modernes** à hautes performances dans le but de garantir une rupture totale des ponts thermiques.

III. 3. 3. 1. Plancher :

a- Toiture :

Tableau III. 16 : Composants et caractéristiques du Toiture (après isolation extérieure).

Composants	Épaisseur [cm]	Conductivité λ [W/m. °C]	Résistance R [m². °C/W]
Béton précontraint (dalle)	20	1.80	0.111
Chape (mortier mince)	5	1.00	0.05
Isolant (mousse de polyuréthane)	8	0.023	3.478
Revêtement de sol (carrelage mince)	1	1.00	0.01
Résistances de surface intérieure	/	/	0.13
Résistances de surface extérieur	/	/	0.04

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

$$R \text{ (total)} = 0.111 + 0.05 + 3.478 + 0.01 + 0.13 + 0.04$$

$$K = 0.262 \text{ [w/m}^2\text{°C]}$$

Tableau III. 17 : Composants et caractéristiques du plancher bas (après isolation extérieure).

Composants	Épaisseur [cm]	Conductivité λ [W/m. °C]	Résistance R [m ² . °C/W]
Béton précontraint (dalle)	20	1.80	0.111
Chape fluide (anhydrite)	5	1.20	0.042
Isolant (panneau polyuréthane).	10	0.022	4.545
Revêtement (Carrelage/Grès)	1	1.30	0.008
Résistances de surface intérieure	/	/	0.13
Re_vide	/	/	0.17

$$R \text{ (total)} = 0.111 + 0.042 + 4.545 + 0.008 + 0.13 + 0.17$$

$$K = 0.199 \text{ [w/m}^2\text{°C]}$$

III. 3. 3. 2. Murs extérieurs :

Tableau III. 18 : Composants et caractéristiques des murs extérieurs (après isolation extérieure).

Composants	Épaisseur (cm)	λ (W/m. °C)	R (m ² . °C/W)
Enduit mince technique	1	0.700	0.014
Aérogel de Silice	6	0.015	4.00
Mur Brique (Plan RDC)	25	0.450	0.555
Enduit plâtre	1	0.350	0.028
Résistance d'échange superficielle	/	/	0.17

$$R \text{ (total)} = 0.014 + 4 + 0.555 + 0.028 + 0.13 + 0.04 + 0.17$$

$$K = 0.209 \text{ [w/m}^2\text{°C]}$$

III. 3. 3. 3. Poutres :

a- Poutres longitudinales :

Tableau III. 19 : Composants et caractéristiques des poutres longitudinales (après isolation extérieure).

Composants	Epaisseur (cm)	Conductivité (W/m•°C)	Résistance (m²•°C/W)
Enduit ciment	1. 5	1. 15	0. 013
Béton armé	30	1. 75	0. 171
Mousse de polyuréthane (PUR)	5	0. 023	2. 174
Plaque de plâtre (BA13)	1. 3	0. 35	0. 037
Résistance d'échange superficielle	/	/	0. 17

$$R \text{ (total)}=0. 013+0. 171+2. 174+0. 037+0. 17$$

$$R \text{ (total)}=1/k$$

$$K=0. 389[\text{w/m}^2\text{°C}]$$

b- Poutres transversales :

Pour une épaisseur de béton de 25 cm et le même type de revêtement, nous avons - Pour les poutres orientées vers l'extérieur, le calcul donne un coefficient de Conductivité **K égal à 0. 394 [W/m². °C]**.

III. 3. 3. 4. Poteaux :

Tableau III. 20 : Composants et caractéristiques du plancher bas (après isolation extérieure).

Composants	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique λ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m². °C/W]
Enduit ciment (éxt)	1. 5	1. 15	0. 013
Poteau en béton armé	40	1. 75	0. 229
Mousse de polyuréthane (PUR)	5	0. 023	2. 174
Plaque de platre (BA13)	1. 3	0. 35	0. 037
Résistance superficielle	/	/	0. 22

$$R \text{ (total)}= 0. 013+0. 229+2. 174+0. 037+0. 22$$

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

$$R \text{ (total)} = 1/k$$

$$K = 0.374 \text{ [w/m}^2\text{°C]}$$

Calcul des déperditions à travers les parois en contact avec l'extérieur après isolation extérieure

Tableau III. 21 : Déperditions surfaciques vers l'extérieur (après isolation extérieure).

Parois	Surface A [m ²]	K [m ² . °C/W]	D _s [W/°C]
Toiture	130	0.262	34.06
Plancher bas	130	0.199	25.87
Murs extérieur	93.18	0.209	19.47
Fenêtres	14.72	1.6	23.55
Portes (extérieur)	2.52	1.5	3.78
Poteaux	14.69	0.374	5.49
Poutres longitudinales	11.7	0.389	4.55
Poutres transversales	8	0.394	3.15

$$D_s = \sum K \times A = 119.92 \text{ [W/°C]}.$$

Les déperditions par Renouvellement d'air :

$$DR = 0.34 \times \tau \times IV_i \quad [W/°C]$$

$$V = 3.06 \times 10 \times 13$$

$$V = 379.8 \text{ m}^3$$

On a déjà

$$DR = 96.85 \text{ w/k}$$

La somme totale des déperditions du bâtiment est de

$$DT = DR + DS$$

$$DT = 119.92 + 96.85$$

$$DT = 216.77 \text{ [w/°C]}$$

$$G = \frac{Dt}{v_i}$$

$$G = \frac{216.77}{376.9}$$

$$G = 0.57 \text{ [w/m}^3\text{°C]}.$$

III. 4. Besoins en chauffage et en climatisation :

Dans le cadre de la thermique appliquée au bâtiment, les besoins énergétiques sont définis par la quantité de chaleur à évacuer et/ou la quantité de chaleur à apporter pour maintenir dans un local donné une température de confort souhaitée.

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Les besoins de chauffage sont la quantité d'énergie thermique à apporter dans un local pour compenser les déperditions de chaleur (par les parois et le Renouvellement d'air) pour obtenir la température de consigne (généralement entre 19°C et 21°C). Ces systèmes sont nécessaires lorsque les pertes de chaleur, provoquées par le Renouvellement d'air et par les parois, sont supérieures aux apports gratuits (soleil, présence humaine et appareils électroménagers).

Les besoins en climatisation correspondent à la chaleur qu'il faut extraire d'un bâtiment pour être dans une zone confortable en termes de température intérieure (température de consigne de refroidissement) pendant les périodes chaudes.

III. 4. 1. Degré –jour de chauffage et de climatisation :

a-Degré-jour de chauffage (DJC) :

Ils servent à quantifier le besoin en chauffage. On les calcule lorsque la température extérieure moyenne journalière se révèle inférieure à une température de référence

Principe. Plus le nombre de DJC est important, plus la température est froide et plus la demande en chauffage sera élevée.

$$\text{DJC} = \text{nombre de jours chauffés} \times (\text{T intérieure moyenne} - \text{T extérieure moyenne}) \quad (\text{III. 7})$$

b-Degré-jour de climatisation (DJF ou DJR) :

Pour déterminer les besoins en climatisation d'un bâtiment, il est indispensable de bien cerner les effets des paramètres climatiques extérieurs sur le confort thermique en interne. Pour caractériser cette sollicitation thermique au cours de la période estivale, on adopte l'indicateur Degrés-Jours de Climatisation (DJC).

Un indicateur qui permet de quantifier la quantité de chaleur externe que devra subir un système de climatisation si on veut maintenir le bâtiment au frais ; il s'établit à partir de la différence de température entre l'environnement extérieur et la température de confort en interne. Mathématiquement, cette approche peut se formaliser par la loi suivante

$$\text{DJR} = \text{nombre de jours climatisés} \times (\text{T extérieure moyenne} - \text{T intérieure moyenne}) \quad (\text{III. 8})$$

Tableau III. 22 : Calcul du nombre de degrés jours mensuel (Dj).

Mois	Température de confort	Température (moyenne) °C	Dj pour le chauffage	Dj pour la climatisation
Janvier	20	11	279	
Février	20	12	224	
Mars	20	14	186	

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Avril	20	16	120	
Mai	20	22		62
Juin	24	26		60
Juillet	24	30		186
Août	24	30		180
Septembre	24	26		62
Octobre	20	19	30	
Novembre	20	16	120	
Décembre	20	13	210	
		Total	1169	550

III. 4. 2. Calculs des besoins en chauffage et en climatisation :

Le confort thermique dépend bien sûr de la qualité de l'enveloppe, mais aussi du comportement des usagers. Les usagers sont-ils d'accord pour ne pas chauffer en hiver des pièces où le thermomètre passe sous les 20 °C, pas de climatiser en été des. Pièces qui devancent les 25 °C ?

Notre étude a pour but d'assurer le confort de toute l'espace habitable grâce à la performance des isolants choisis.

On peut donc évaluer les besoins selon la formule suivante :

$$C = 24 \times G \times V_i \times D_j \quad \text{(III. 8)}$$

Tableau III. 23 : Calcul besoins en chauffage et en climatisation annuel (avant Isolation) C(Kwh)

Besoins	Mois	Dj	C (KWh)
Chauffage	Octobre à avril	1169	34630. 92
Climatisation	Mai à septembre	550	16293. 42

Tableau III. 24 : Besoins en chauffage et en climatisation mensuelle (avant Isolation) C (KWh)

Besoins	C (KWh)
Chauffage	4947. 27
Climatisation	3258. 68

Tableau III. 25 : Besoins en chauffage et en climatisation annuel (après isolation intérieure)

Besoins	Mois	Dj	C (KWh)
Chauffage	Octobre à avril	1169	7352.4
Climatisation	Mai à septembre	550	3459.2

Tableau III. 26 Besoins en chauffage et en climatisation mensuelle (après isolation intérieure)

Besoins	C (KWh)
Chauffage	1050.3
Climatisation	691.8

Tableau III. 27 : Besoins en chauffage et en climatisation annuelle (après isolation extérieure)

	Mois	Dj	C(KWh)
Chauffage	Octobre à avril	1169	6073. 73
Climatisation	Mai à septembre	550	2857. 61

Tableau III. 28 : besoins en chauffage et en climatisation mensuelle (après isolation extérieure)

Besoins	C (KWh)
Chauffage	867. 67
Climatisation	571. 52

***Conversion de Kwh en Kcal/h :**

$$1 \text{ Kwh} = 860 \text{ kcal/h}$$

***Intégration des besoins en eau chaude sanitaire (ECS) :**

Afin de garantir un confort thermique idéal dans une construction, la capacité de la chaudière doit répondre non seulement aux exigences de chauffage, mais aussi à celles associées à la production d'eau chaude domestique (ECS).

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Estimation de l'énergie requise pour la production d'eau chaude sanitaire.

La formule suivante exprime l'énergie nécessaire pour chauffer une masse spécifique d'eau

$$E=m \times c \times \Delta T \quad (\text{III. 9})$$

Avec

- E : énergie en Wh,
- m : masse d'eau à chauffer (en kg), 1 litre=1 kg, m=200 kg/jour
- c : chaleur spécifique de l'eau $\approx 1,16 \text{ Wh/kg}^\circ\text{C}$,
- $\Delta T = T_h - T_c = 55 - 15 = 40^\circ\text{C}$,

L'énergie journalière :

$$E_J = 200 \times 1,16 \times 40 = 9\,280 \text{ Wh/jour} = 9,28 \text{ kWh}$$

Énergie mensuelle :

$$E = 9,28 \times 30 = 278,4 \text{ kWh} = 239424 \text{ kcal}$$

III. 5. Bilan de puissance :

III. 5. 1. Pour la saison d'été :

Tableau III. 29 : Consommation d'électricité pour la saison d'été avant isolation

Appareils	Nombres d'appareils	Puissance d'appareils (w)	Durée de travail	Nombres de jours d'utilisation par mois	Énergie consommée (Kwh)
Climatiseur	2	1000	8	30	480
Réfrigérateur	1	260	8h	30	62. 4
Congélateur	1	300	8h	30	72
Lave-vaisselle	1	1200	1h	30	36
Lave-linge	1	2200	1h	15	33
Micro-ondes	1	800	0. 5h	30	12
Four électrique	1	3000	0. 5	20	30
Téléviseur LED	2	100	5h	30	30
Eclairage LED	9	15	6h	30	24. 3
Modem internet	1	10	24h	30	7. 2

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Prises 16A	8	65	3h	30	46. 8
Prises 16A	4	100	2h	30	24
Fer à repasser	1	1000	0. 3h	10	3
Pompe à eau	1	600	1h	30	18
				Totale	878. 7

Tableau III. 30 : Consommation d'électricité pour la saison d'été (après isolation intérieure).

Appareils	Nombres d'appareils	Puissance d'appareils (w)	Durée de travail	Nombres de jours d'utilisation par mois	Énergie consommée (Kwh)
Climatiseur	2	1000	5h	30	300
Réfrigérateur	1	260	8h	30	62. 4
Congélateur	1	300	8h	30	72
Lave-vaisselle	1	1200	1h	30	36
Lave-linge	1	2200	1h	15	33
Micro-ondes	1	800	0. 5h	30	12
Four électrique	1	3000	0. 5	20	30
Téléviseur LED	2	100	5h	30	30
Eclairage LED	9	15	6h	30	24. 3
Modem internet	1	10	24h	30	7. 2
Prises 16A	8	65	3h	30	46. 8
Prises 16A	4	100	2h	30	24
Fer à repasser	1	1000	0. 3h	10	3
Pompe à eau	1	600	1h	30	18
				Totale	698. 7

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Tableau III. 31 : Consommation d'électricité pour la saison d'été (après isolation extérieure).

Appareils	Nombres d'appareils	Puissance d'appareils (w)	Durée de travail	Nombres de jours d'utilisation par mois	Énergie consommée (Kwh)
Climatiseur	2	1000	4	30	240
Réfrigérateur	1	260	8h	30	62. 4
Congélateur	1	300	8h	30	72
Lave-vaisselle	1	1200	1h	30	36
Lave-linge	1	2200	1h	15	33
Micro-ondes	1	800	0. 5h	30	12
Four électrique	1	3000	0. 5	20	30
Téléviseur LED	2	100	5h	30	30
Eclairage LED	9	15	6h	30	24. 3
Modem internet	1	10	24h	30	7. 2
Prises 16A	8	65	3h	30	46. 8
Prises 16A	4	100	2h	30	24
Fer à repasser	1	1000	0. 3h	10	3
Pompe à eau	1	600	1h	30	18
Totale					638. 7

Tableau III. . 32 : Consommation du gaz pour la saison d'été.

Équipement	Nombre	Puissance unitaire en kcal/h	Durée d'utilisation par jours en (h)	Nombre de jours d'utilisation par mois	Totale kcal/h
Chaudière à gaz	1	2660. 26	3	30	239423. 4
Total en thermie					239. 423

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Tableau III. 33 : Consommation mensuelle d'électricité des équipements en été.

	Avant isolation	Après isolation intérieure	Après isolation extérieure
Climatisation	864	360	288
Éclairage	24,3	24,3	24,3
Prise de courant	70,8	70,8	70,8
Autres	28,2	28,2	28,2

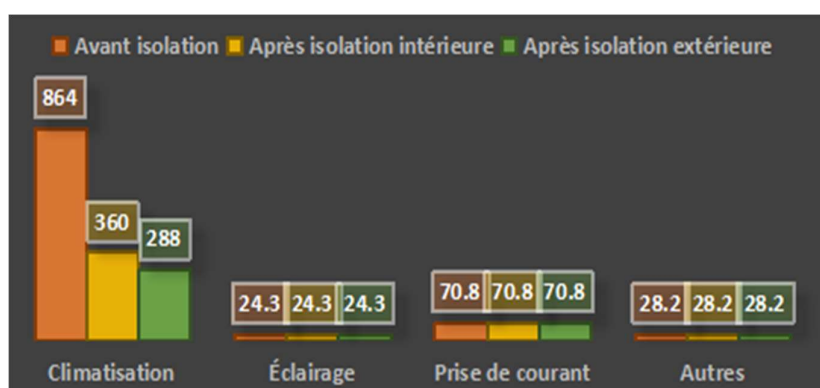


Figure III. 2 : Répartition de la consommation d'électricité des équipements en été selon le type d'isolation.

III. 5. 2. Pour la saison d'hiver :

Tableau III. 34 : Consommation d'électricité pour la saison d'hiver.

Appareils	Nombres d'appareils	Puissance d'appareils (w)	Durée de travail	Nombres de jours d'utilisation par mois	Énergie consommée (Kwh)
Réfrigérateur	1	260	8h	30	62. 4
Congélateur	1	300	8h	30	72
Lave-vaisselle	1	1200	1h	30	36
Lave-linge	1	2200	1h	15	33
Micro-ondes	1	800	0. 5h	30	12
Four électrique	1	3000	0. 5	20	30
Téléviseur ED	2	100	5h	30	30
Eclairage LED	9	15	6h	30	24. 3
Modem internet	1	10	24h	30	7. 2

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Prises 16A	8	65	3h	30	46.8
Prises 16A	4	100	2h	30	24
Fer à repasser	1	1000	0.3h	10	3
Pompe à eau	1	600	1h	30	18
Totale					398.7

Tableau III. 35 : Consommation mensuelle d'électricité des équipements en hiver

Équipements	Consommation
Electroménager	275,4
Eclairage	24,3
Prise de courant	70,8
Autres	28,2

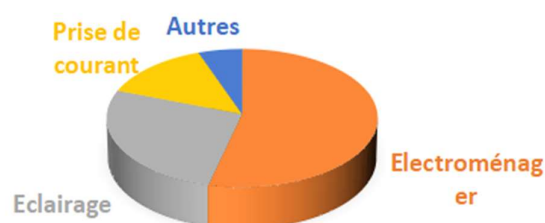


Figure III. 3 : Répartition de la consommation électrique mensuelle par type d'équipement en hiver.

Tableau III. 36 : Consommation du gaz pour la saison d'hiver (avant et après isolation)

	Équipement	Nombre	Puissance unitaire en kcal/h	Durée d'utilisation par jours en (h)	Nombre de jours d'utilisation par mois	Totale kcal/h
Avant isolation	Chaudière à gaz	1	18725.31	8	30	4494074.4
					Total en thermie	4494.07
	Équipement	Nombre	Puissance unitaire en Kcal/h	Durée d'utilisation par jours en (h)	Nombre de jours d'utilisation par mois	Totale Kcal/h

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

Après isolation Intérieure	Chaudière à gaz	1	4761. 17	8	30	1142680. 8
					Totale en thermie	1142. 68
	Équipement	Nombre	Puissance unitaire en Kcal/h	Durée d'utilisation par jours en (h)	Nombre de jours d'utilisation par mois	totale en Kcal/h
Après isolation extérieure	Chaudière à gaz	1	4106. 75	8	30	985620
					Totale en thermie	985. 62

III. 6. Consommation trimestrielle d'électricité et du gaz :

Tableau III. 37 : Consommation trimestrielle d'électricité pour l'été avant et après isolation

Consommation trimestrielle d'électricité pour l'été (Kwh)	
Avant isolation	2196,75
Après isolation intérieure	1746,75
Après isolation extérieure	1596,75

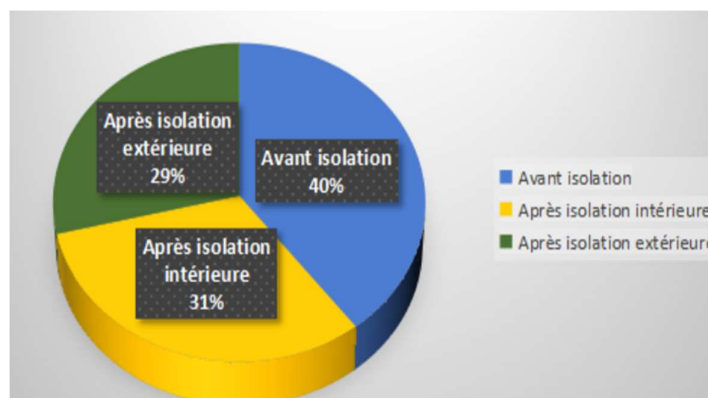


Figure III. 4 : Analyse comparative des besoins électrique estivaux avant et après rénovation thermique.

Tableau III. 38 Consommation trimestrielle d'électricité pour l'hiver

Consommation trimestrielle d'électricité pour l'hiver (KWh)	1280,25
---	---------

Tableau III. 39 : Consommation trimestrielle du gaz en hiver avant et après isolation

	Avant isolation	Après isolation intérieure	Après isolation extérieure
La consommation Trimestrielle du gaz en (été) thermie	718. 27	718. 27	718. 27
La consommation Trimestrielle du gaz en (hiver) thermie	13482. 21	3428. 04	2956. 86

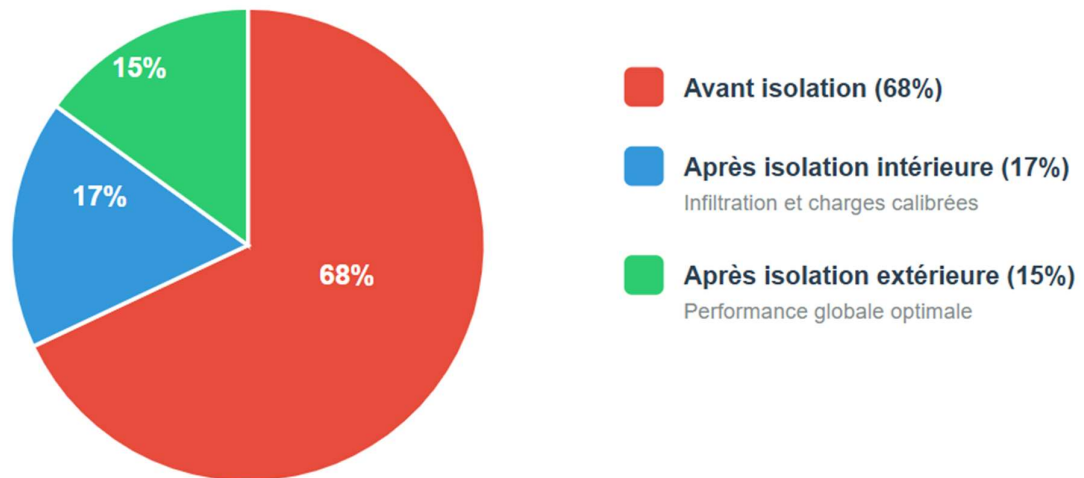


Figure III. 5 : Impact des solutions d'isolation sur la consommation de gaz en période hivernale.

III. 7. Estimation de la facture :

La facture d'électricité et de gaz est établie sur la base du bilan énergétique précédemment calculé.

$$\text{Le cout} = \text{la consommation (KWh)} \times \text{le cout par tranche} \quad (\text{III. 10})$$

Le coût par tranche d'électricité il se divise en quatre tranches, Sonelgaz a indiqué que la première tranche concerne la consommation inférieure à 125 kW au prix de 1. 7787 DA/kWh, la deuxième entre 125 KW et 250 kW au prix de 4,1789 DA/kWh, la troisième entre 250 et 1000 kW au prix de 4,812 DA/kWh et la dernière tranche concerne la consommation supérieure à 1000 kW au prix de 5,4796 DA/kWh. [72]

Le coût par tranche du gaz Sonelgaz recourt, dans sa tarification, à quatre tranches, à travers lesquelles, elle prend compte de la nécessité de préserver le pouvoir d'achat du consommateur. La tranche 1 appelée tranche sociale, est estimée à 0,1682 DA/Th (cas d'une consommation inférieure à 1125Th. Tandis que le tarif de la tranche 2 est estimé à 0,3245 DA/th

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

en cas d'une consommation entre 1125. 1 et 1135 Th. Pour la troisième tranche entre 1375. 1 et 5000 Th le prix est de 0. 4025 DA/Th et la dernière tranche concerne la consommation supérieure à 7500 Th au prix de 0,4599 DA/Th. [72]

Tva (taxe sur la Valeur ajoutée) Le taux de la Tva est pour la première et la deuxième tranche 9 %. Le taux de 19 % de Tva applicable sur les tranches 3 et 4 pour les clients résidentiels et les tranches 2 et 3 pour les clients non-résidentiels. [72]

III. 7. 1. Pour l'été :

Tableau III. 40 : Coût d'électricité pour la saison d'été (avant isolation) :

Tranche	Consommation (kW)	Prix unitaire (DA/kWh)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	125	1. 7787	222. 3375	67. 023
2	125	4. 1789	522. 3625	
3	750	4. 812	3609	1931. 67
4	1196. 75	5. 4796	6557. 71	
		Total (DA)	10911. 41	1998. 69
			12910. 1	

Tableau III. 41 : Coût d'électricité pour la saison d'été (après isolation intérieure).

Tranche	Consommation (kW)	Prix unitaire (DA/kWh)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	125	1. 7787	222. 3375	67. 023
2	125	4. 1789	522. 3625	
3	750	4. 812	3609	1463. 16
4	746. 75	5. 4796	4091. 89	
		Total (DA)	8445. 59	1530. 18
			9975. 77	

Tableau III. 42 : Coût d'électricité pour la saison d'été (après isolation extérieure).

Tranche	Consommation (kW)	Prix unitaire (DA/kWh)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	125	1. 7787	222. 3375	67. 023

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

2	125	4. 1789	522. 3625	
3	750	4. 812	3609	1307
4	596. 75	5. 4796	3269. 95	
		Total (DA)	7623. 65	1374. 023
			8997. 67	

III. 7. 2. Pour l'hiver :

Tableau III. 43 : Coût du gaz pour la saison d'hiver

Tranche	Consommation (Th)	Prix unitaire (DA/Th)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	718,27	0,1682	120.813	10.873
2	0	0,3245	0	
3	0	0.4025	0	0
4	0	0,4599	0	
		Total (DA)	120.813	10.873
			131.686	

Tableau III. 44 : Coût d'électricité pour la saison d'hiver

Tranche	Consommation (kW)	Prix unitaire (DA/kWh)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	125	1. 7787	222. 3375	67. 023
2	125	4. 1789	522. 3625	
3	746. 75	4. 812	3593. 361	682. 73
4	0	5. 4796	0	
		Total (DA)	4338. 06	749. 75
			5087. 81	

Tableau III. 45 : Coût du gaz pour la saison d'hiver avant isolation.

Avant isolation				
Tranche	Consommation (Th)	Prix unitaire (DA/Th)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	1125	0,1682	189. 225	57. 187

Chapitre III : Méthodologie et description du cas d'étude

2	1375	0,3245	446. 1875	
3	5000	0. 4025	2012. 5	905. 106
4	5982. 21	0,4599	2751. 218	
		Total (DA)	5396. 13	962. 293
			6358. 423	

Tableau III. 46 : Coût du gaz pour la saison d'hiver après isolation intérieure.

Après isolation intérieure				
Tranche	Consommation (Th)	Prix unitaire (DA/Th)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	1125	0,1682	189. 225	57. 187
2	1375	0,3245	446. 1875	
3	928. 04	0. 4025	373. 53	70. 97
4	0	0,4599	0	
		Total (DA)	1008. 94	128. 157
			1137. 09	

Tableau III. 47 Coût du gaz pour la saison d'hiver après isolation extérieure

Après isolation extérieure				
Tranche	Consommation (Th)	Prix unitaire (DA/Th)	Prix total (DA)	Tva (DA)
1	1125	0,1682	189. 225	57. 187
2	1375	0,3245	446. 1875	
3	456. 86	0. 4025	183. 886	34. 94
4	0	0,4599	0	
		Total (DA)	819. 29	92. 127
			911. 41	

III. 8. Evaluation de l'efficacité énergétique (étude comparative avant et après isolation) :

Tableau III. . 48 : Bilan comparatif avant et après isolation thermique

	Avant isolation	Après isolation intérieure	Après isolation extérieure
Le coefficient global de déperditions thermique (G) ($\text{W/m}^3\text{°C}$)	3,25	0,69	0,57
Besoins en chauffage annuel (Kwh)	34630,92	7352,4	6073,73
Besoins en climatisation annuel (Kwh)	16293,42	3459,2	2857,61
Besoins en chauffage mensuelle (Kwh)	4947,27	1050,3	867,67
Besoins en climatisation mensuelle	3258,68	691,8	571,52
Consommation du gaz en thermie (hiver)	4494,07	1142,68	985,62
Consommation d'électricité trimestrielle en été (Kwh)	2196,75	1746,75	1596,75
Consommation trimestrielle du gaz en thermie (hiver)	13482,21	3428,04	2956,86
Coût d'électricité en été (DA)	12910,1	9975,77	8997,67
Coût du gaz (hiver) (DA)	6358,42	1137,09	911,41

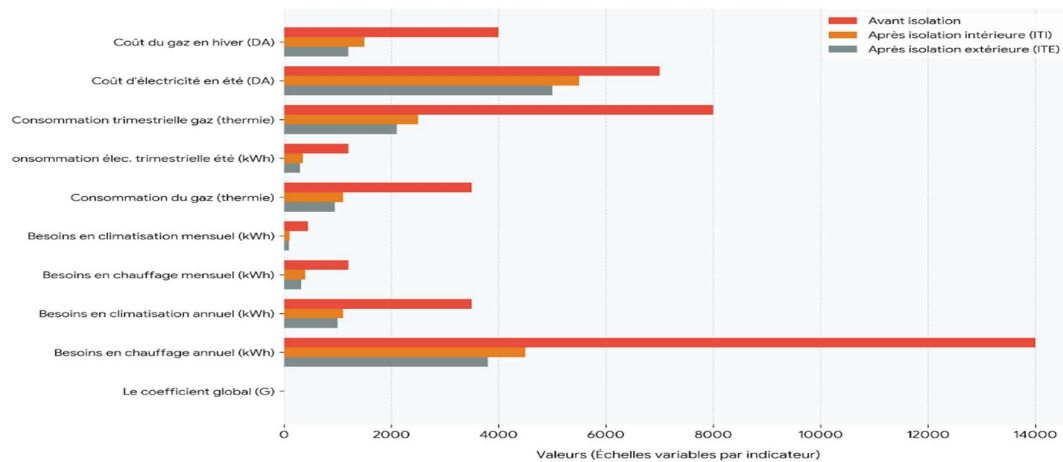


Figure III. 6 : Evolution des paramètres thermiques et financiers avant et après isolation.

Conclusion

Les résultats de ce chapitre montrent clairement à quel point le choix de l'isolant et sa bonne installation sont cruciaux, surtout compte tenu du climat de Tlemcen. En effet, passer d'un bâtiment non isolé à une structure bien protégée améliore considérablement ses performances thermiques. L'isolation par l'intérieur (ITI) est une première étape efficace pour faire baisser la consommation d'énergie, même si elle a ses limites, notamment face aux ponts thermiques de la structure. L'isolation par l'extérieur (ITE), elle, se révèle plus complète, car elle permet non seulement d'éliminer ces ponts thermiques, mais aussi de diminuer très fortement les pertes de chaleur.

Les calculs comparatifs montrent que l'emploi d'un matériau moderne à faible Conductivité thermique permet d'optimiser les performances du bâtiment sans en augmenter excessivement l'épaisseur. D'un point de vue financier, l'analyse des coûts de consommation d'énergie (gaz et électricité) montre qu'un investissement initial dans l'isolation, qu'elle soit intérieure ou extérieure, est rapidement rentabilisé par les économies réalisées à long terme. Cette étude technicoéconomique confirme que la Variante ITE est la plus performante, tandis que l'ITI est présentée comme une alternative viable, ouvrant ainsi la Voie à la simulation thermique dynamique pour affiner l'analyse du confort thermique intérieur.

Chapitre IV :

Modélisation numérique et simulation numérique

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de quantifier l'impact des choix constructifs sur l'efficacité énergétique du bâtiment étudié. À travers une approche de simulation thermique dynamique (STD) réalisée sous l'environnement Open Studio/Energy Plus, nous analysons le comportement des parois multicouches face aux sollicitations climatiques.

Ce chapitre présente la modélisation détaillée d'enveloppe du bâtiment, la configuration des zones thermiques, ainsi que les paramètres de simulation adoptés. Une analyse comparative est ensuite menée entre trois configurations un bâtiment de référence non isolé, une Variante avec isolation thermique par l'intérieur (ITI), et une autre avec isolation thermique par l'extérieur (ITE).

Cette comparaison permet d'évaluer l'influence de chaque solution d'isolation sur les performances énergétiques globales, notamment en termes de réduction des flux thermiques, de consommation énergétique et d'amélioration du confort thermique intérieur. Les résultats obtenus permettront ainsi de valider les hypothèses formulées concernant l'efficacité des différentes stratégies d'isolation.

IV. 1. Outils et logiciels utilisés :

Pour mener à bien cette étude, nous avons opté pour une suite logicielle interopérable, reconnue mondialement dans le domaine de la performance énergétique des bâtiments.

-Open Studio (Interface de modélisation)

Open Studio est une plate-forme logicielle open-source développée par le National Renewable Energy Laboratory. Elle constitue une interface graphique avancée facilitant la gestion et la structuration des données du bâtiment.

-Rôle dans le projet :

Nous l'utilisons pour définir enveloppe thermique, assigner les matériaux (brique, isolants, vitrages), créer les plannings d'occupation (Schedules) pour **7 occupants**, et configurer les charges internes.

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

-Avantage :

Il permet une visualisation 3D en temps réel et une gestion simplifiée des bibliothèques de constructions.

-EnergyPlus (Moteur de calcul) :

EnergyPlus est le moteur de simulation utilisé en arrière-plan par Open Studio.

Fonctionnement :

Il résout les équations de bilan thermique à des pas de temps très courts, en prenant en compte simultanément

- La conduction thermique
- Le rayonnement solaire
- Les apports internes

• Précision :

Il permet de simuler l'inertie thermique des parois, ce qui est essentiel pour comparer les matériaux isolants (par exemple laine de Verre et ouate de cellulose).

- SketchUp & Plugin Open Studio (Conception géométrique)

La géométrie tridimensionnelle du bâtiment a été réalisée sous SketchUp. Grâce au plugin Open Studio, chaque volume est converti en une zone thermique.

• Application dans le projet :

Cela nous a permis de modéliser avec précision un bâtiment de **130 m² de surface habitable**, en intégrant les ouvertures (fenêtres et porte) selon leur orientation réelle.

-Données climatiques et hypothèses de simulation

La simulation thermique dynamique (STD) nécessite la définition de plusieurs paramètres physiques et opérationnels. Afin de garantir la précision des calculs sous OpenStudio/EnergyPlus, les hypothèses suivantes ont été adoptées

- Occupation **7 occupants**
- Charges internes et scénarios d'usage réalistes
- Conditions climatiques locales

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

La précision de la simulation dépend fortement des données météorologiques. Ainsi, nous avons utilisé le fichier climatique correspondant à la région de Remchi (station de Tlemcen – code DZ_605350), représentatif du climat local.

IV. 2. Description des scénarios étudiés :

Dans le cadre de cette étude, trois scénarios ont été définis afin d'évaluer l'impact de l'isolation thermique sur les performances énergétiques du bâtiment. Ces scénarios se distinguent par la composition des parois opaques (murs extérieurs), tandis que les autres paramètres (géométrie, occupation, conditions climatiques) restent identiques.

-Cas 1 Bâtiment de référence (sans isolation) :

Ce scénario représente l'état initial du bâtiment sans aucune isolation thermique. Les murs extérieurs sont constitués uniquement de matériaux traditionnels (brique + enduit), sans ajout de couche isolante.

Ce cas sert de référence pour évaluer les améliorations apportées par les solutions d'isolation. Il se caractérise généralement par

- Des pertes thermiques élevées en hiver
- Des gains de chaleur importants en été
- Une consommation énergétique plus élevée

IV. 3 Procédure de simulation sous OpenStudio :

IV. 3. 1 Configuration du fichier météorologique :

Le fichier météorologique utilisé correspond à la station de Zenata-Hadj (Tlemcen), avec une latitude de 35. 017 et une longitude de 35. 017. Ce fichier, intégré dans EnergyPlus, permet de représenter fidèlement les conditions climatiques locales (température, rayonnement solaire, humidité, etc.) utilisées pour la simulation thermique dynamique du bâtiment.

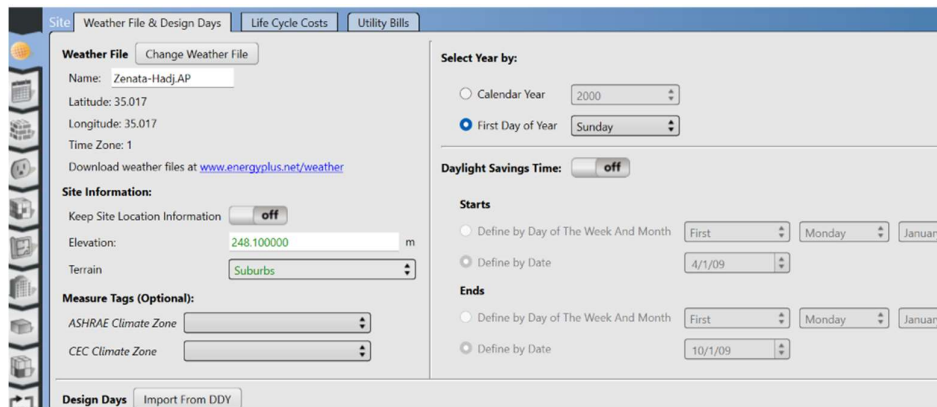


Figure IV. 1 : Configuration du fichier météorologique sous OpenStudio

-Le choix de la station de Zenata se justifie par sa proximité géographique avec la région de Remchi, garantissant ainsi la représentativité des données climatiques.

IV. 3. 2 Géométrie du bâtiment :

Le modèle géométrique du bâtiment a été réalisé à l'aide de l'interface Floorplan d'OpenStudio. Le plan comprend plusieurs espaces fonctionnels (cuisine, chambres, salle, hall, sanitaires et cour), chacun étant défini comme une zone thermique indépendante. Cette répartition permet une simulation précise des échanges thermiques et du comportement énergétique de chaque espace.

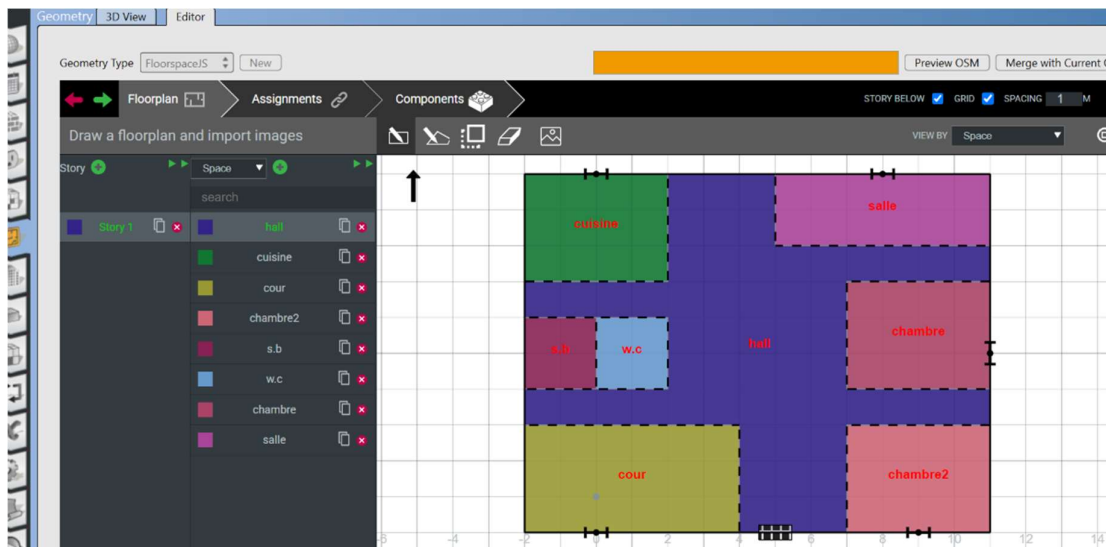


Figure IV. 2 : Plan du bâtiment et répartition des zones sous OpenStudio

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

IV. 3. 3. Visualisation tridimensionnelle du modèle :

La vue tridimensionnelle permet de Vérifier la cohérence du modèle géométrique, notamment la hauteur des murs, l'orientation des surfaces et la fermeture correcte des volumes. Cette étape est essentielle pour garantir la fiabilité des résultats de simulation sous EnergyPlus.

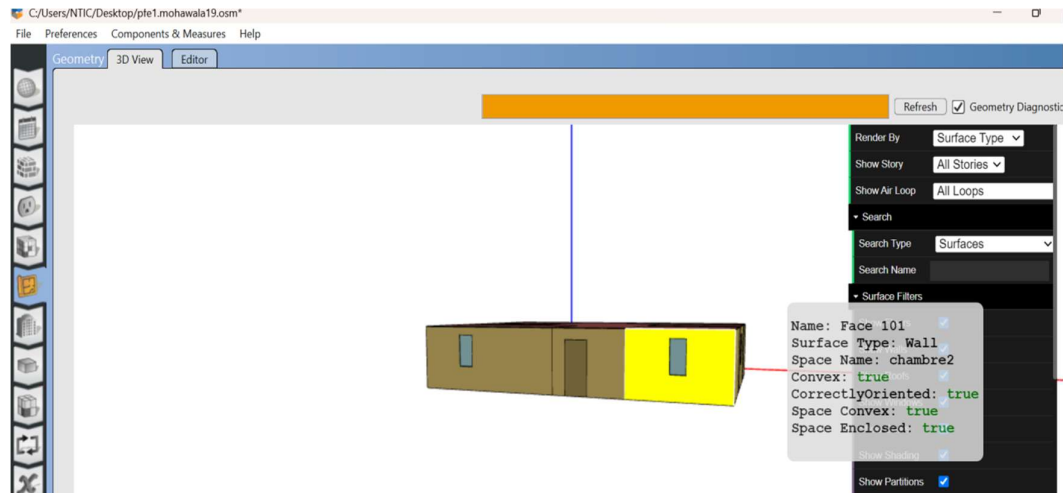


Figure IV. 3 : Vue 3D du bâtiment modélisé sous OpenStudio

IV. 4. Configuration des matériaux dans l'interface de simulation :

L'étape préalable à la simulation thermique dynamique consiste à renseigner précisément les propriétés thermo physiques des matériaux de l'enveloppe. Pour ce faire, nous avons utilisé l'interface de saisie des matériaux du logiciel (OpenStudio/EnergyPlus).

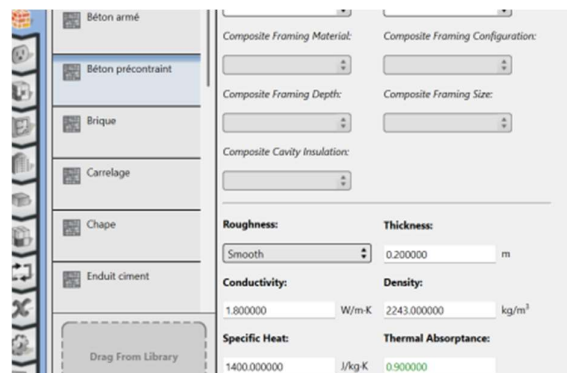


Figure IV. 4 : Interface de saisie des propriétés thermophysiques des matériaux (Exemple du béton précontraint)

-Pour chaque composant défini précédemment au **Chapitre 03**, les paramètres suivants ont été introduits afin de modéliser le comportement thermique réel du bâtiment

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

-**Rugosité (Roughness)** ; Ce paramètre influence les échanges superficiels par convection. Pour les matériaux de structure comme le béton, une rugosité de type "Smooth" (lisse) a été sélectionnée.

-**Épaisseur (Thickness)** ; Elle correspond aux dimensions réelles des parois définies dans le projet. Par exemple, la dalle en béton précontraint est fixée à 0,20 m.

-**Conductivité Thermique** Exprimée en $W/m \cdot K$, elle caractérise la capacité du matériau à conduire la chaleur. Pour le béton précontraint, une Valeur de $1,80 W/m \cdot K$ a été adoptée.

-**Masse volumique (Density) et Chaleur spécifique (Specific Heat)** Ces deux paramètres sont cruciaux pour le calcul de l'inertie thermique et du déphasage des parois, permettant au logiciel de simuler le stockage de l'énergie dans la masse du bâtiment.

Cette rigueur dans la saisie des données garantit que les résultats de la simulation (besoins de chauffage/refroidissement) seront représentatifs de la réalité physique du bâtiment étudié

IV. 4. 1 Zones thermiques :

Après avoir défini les caractéristiques des parois, l'étape suivante a consisté à diviser le bâtiment en **zones thermiques** distinctes afin de simuler précisément les besoins énergétiques.

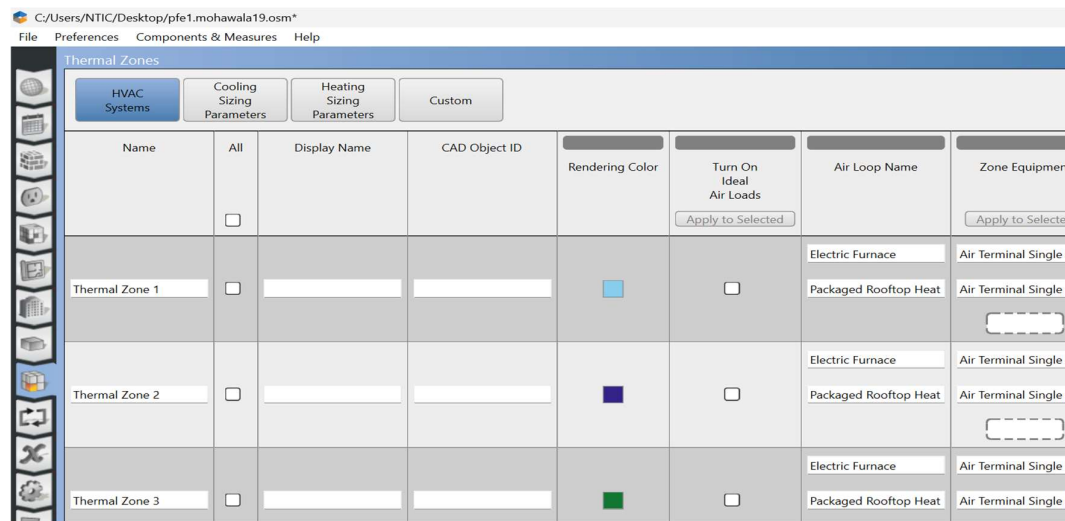


Figure IV. 5 : Configuration des zones thermiques et affectation des systèmes HVAC dans OpenStudio.

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

L'image présente la configuration de l'onglet « Thermal Zones » du logiciel openstudio pour notre projet. Nous avons défini 8 **zones thermiques** (dont les trois premières sont Visibles sur la capture Thermal Zone 1, 2 et 3). Cette segmentation est cruciale pour obtenir des résultats précis basés sur l'orientation et l'usage de chaque espace.

Les éléments clés configurés dans cette interface sont

-Zonage spatial : Chaque zone thermique possède son propre code couleur (Rendering Color) pour faciliter l'identification Visuelle sur le modèle 3D.

-Équipements HVAC : Pour chaque zone, des systèmes de chauffage ont été assignés, notamment des unités de type "Electric Furnace" et "packaged rooftop heat".

-Contrôle des charges (Ideal Air Loads) : La case « turn On ideal Air loads » n'est pas cochée. Cela signifie que nous utilisons des systèmes CVC (HVAC) dimensionnés et réels pour le calcul des consommations, plutôt qu'une charge théorique parfaite, ce qui rend la simulation plus proche de la réalité.

IV. 4. 2 Modélisation du système de traitement d'air :

Un système de traitement d'air de type Electric Furnace a été configuré sous OpenStudio pour assurer le confort thermique des huit zones d'étude. La boucle d'air (Air Loop) associée est représentée dans la figure suivante. Dans cette configuration, les composants liés à la ventilation ont été retirés afin de se concentrer exclusivement sur les charges de chauffage et de refroidissement

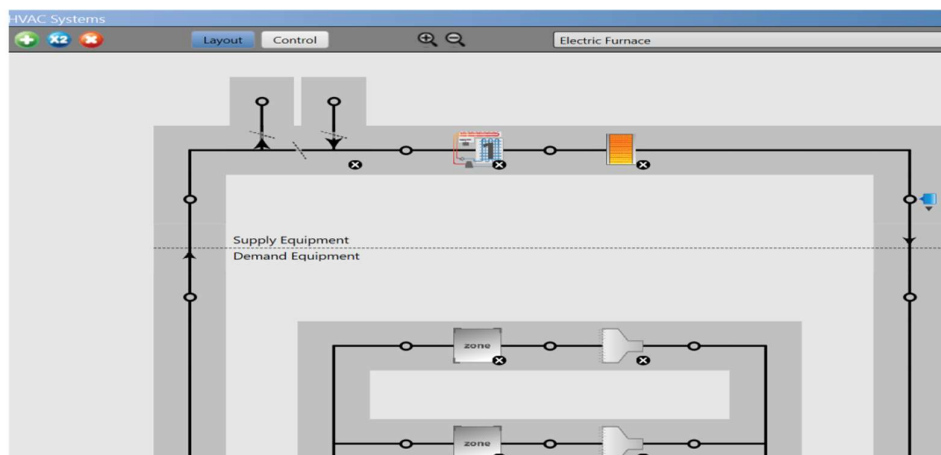


Figure IV. 6 : Schéma de la boucle de traitement d'air et des composants de distribution.

Le schéma représente le circuit aéraulique permettant de chauffer et de distribuer l'air dans le bâtiment de 130 m². On y distingue deux parties principales

-Côté Alimentation (Supply Equipment)

-Prise d'air et extraction En haut à gauche, on observe les registres de mélange pour la gestion de l'air neuf et de l'air recirculé.

-Batterie de chauffe (Electric Furnace) C'est l'élément central qui fournit l'énergie thermique nécessaire pour compenser les déperditions calculées.

-Côté Demande (Demand Equipment)

Le flux d'air est dirigé vers les différentes zones thermiques via des terminaux de diffusion.

IV. 4. 3. Programmation des scénarios de fonctionnement (Schedules) :

Afin de simuler le comportement énergétique du bâtiment de manière réaliste et conformément aux directives de l'étude, des calendriers de fonctionnement (Schedules) ont été paramétrés. Ces scénarios définissent les périodes d'activation des systèmes de chauffage et de climatisation sur l'année.

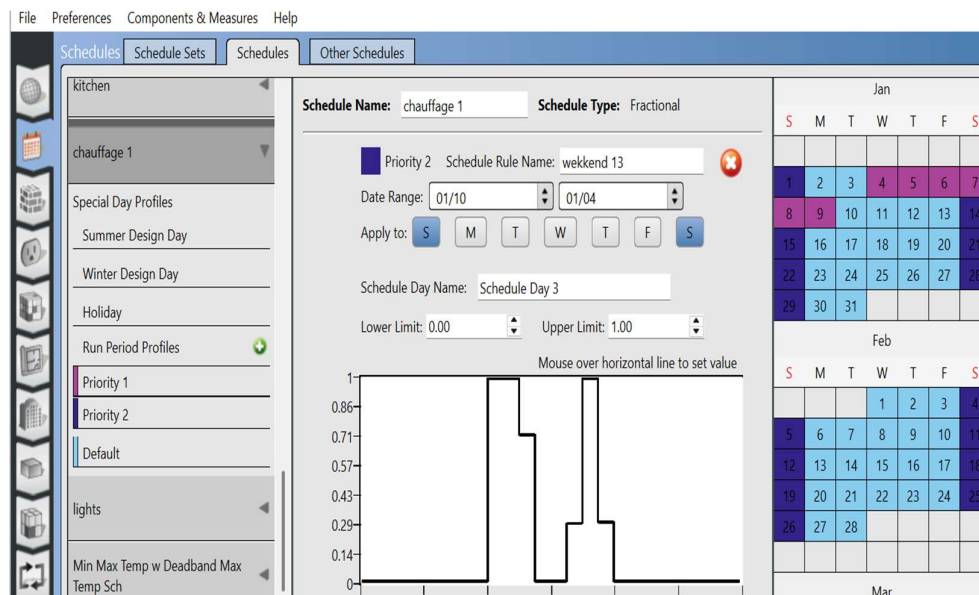


Figure IV. 7 : Définition des périodes de chauffage

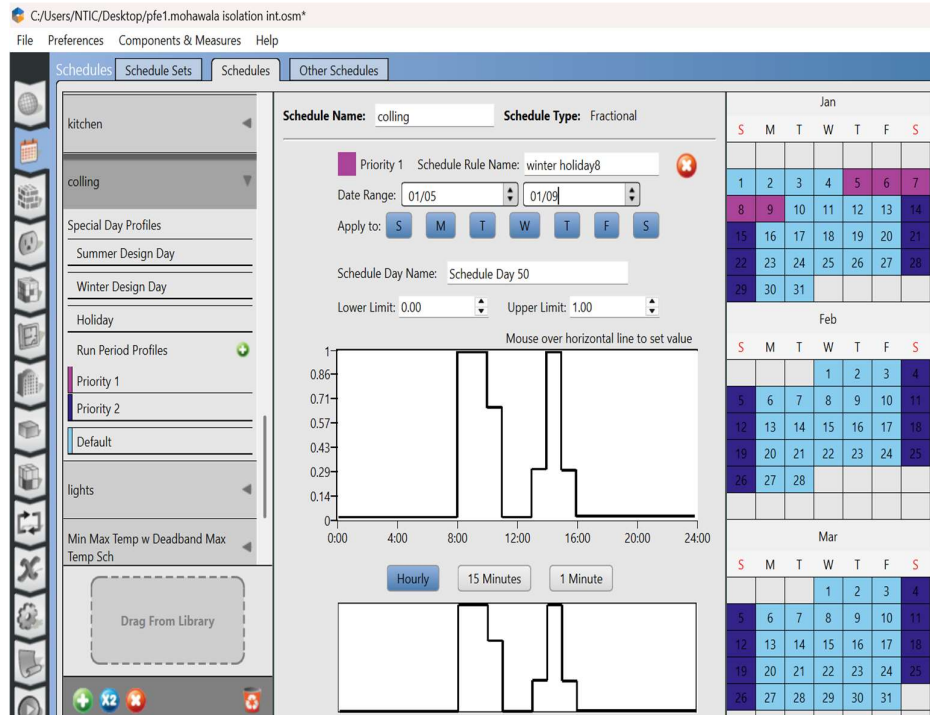


Figure IV. 8 : Définition des périodes de climatisation.

Le paramétrage a été effectué selon une répartition saisonnière précise pour correspondre aux conditions climatiques locales

-Période de Chauffage : Le système est programmé pour fonctionner du **1er octobre au 30 avril** (indiqué par la plage "01/10" à "01/05" dans le logiciel pour couvrir la période hivernale). Le profil journalier montre une activation principalement durant les heures d'occupation, avec des pics de puissance le matin (8h) et l'après-midi.

-Période de Climatisation : Le système de refroidissement (cooling) prend le relais durant la période estivale, allant du **1er mai au 30 septembre** (configuré de "01/05" à "01/10").

Comme illustré sur les graphiques de charge fractionnelle (Fractional Schedule), nous avons appliqué un profil type "Schedule Day" qui module l'intensité des systèmes heure par heure. Cette approche permet de ne pas simuler une consommation constante, mais plutôt une consommation qui s'adapte aux besoins réels selon les heures de la journée, garantissant ainsi la précision des résultats de consommation globale (chauffage et climatisation).

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

IV. 4. 4. Définition des charges internes (Electric Equipment) :

En plus des caractéristiques de l'enveloppe, la précision de la simulation repose sur la prise en compte des apports de chaleur internes. Comme décrit dans l'inventaire des équipements au **Chapitre III**, nous avons intégré les charges électriques correspondantes dans le logiciel.

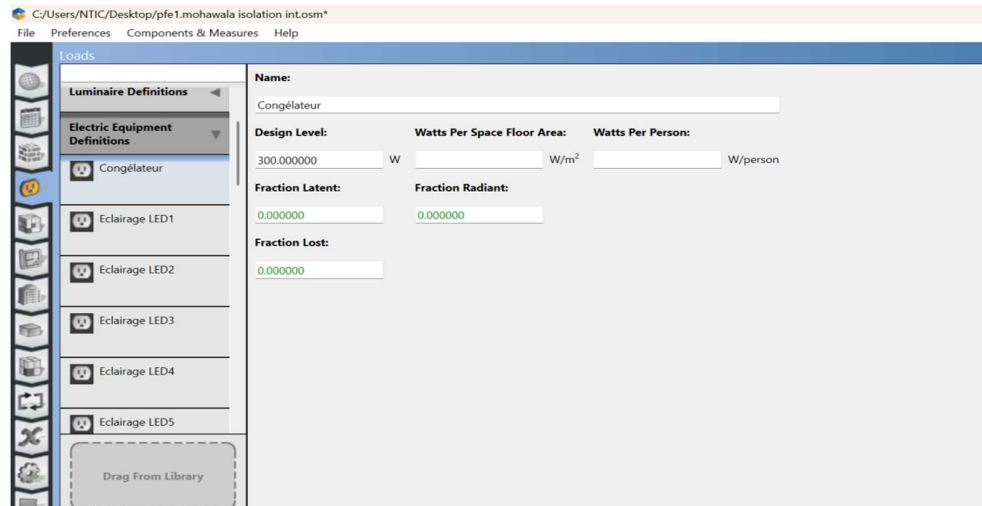


Figure IV. 9 : Configuration des charges électriques internes (Éclairage et Équipements).

L'image montre l'onglet « Loads » d'openstudio où chaque équipement a été défini avec sa puissance nominale. Cette étape permet au logiciel de calculer la chaleur dissipée par les appareils électriques à l'intérieur de la zone de 130 m².

IV. 5. Résultats du cas de référence (sans isolation) :

- Caractéristiques dimensionnelles du modèle

Le bâtiment a été modélisé sur OpenStudio en respectant les dimensions réelles afin de garantir la précision des calculs de déperditions thermiques.

Tableau IV. 1 : Synthèse des surfaces du bâtiment simulé

Désignation	Valeur
Total Building Area (Surface totale du bâtiment)	130m ²
Net Conditioned Building Area (Surface traitée thermiquement)	130m ²

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Tableau IV. 2 : Synthèse des coefficients K par type de paroi (Cas de référence) simulé

Paroi	Type de Construction	K-Factor avec Film (W/m²·K)	K-Factor sans Film (W/m²·K)	R-équivalent (m²·K/W)
Murs Extérieurs	MUR_EXTERIEUR	2,364	3,658	≈0,42
Toiture	TOITURE	3,242	5,844	≈0,31
Plancher Bas	INTERIOR FLOOR 3	1,174	1,449	≈0,85

-Interprétation et cohérence avec le Chapitre III

-K-Factor "No Film" (Sans film)

Il représente la performance thermique **intrinsèque** des matériaux seuls (brique de 25 cm + plaque de plâtre).

Calcul :

$$K_{no_film} = \frac{1}{\sum R_{matériaux}} \quad (IV. 1)$$

K = 3,658 W/m²·K. Si on fait l'inverse (1 / 3,658), on retrouve environ **0,27** m²·K/W. C'est quasiment votre R_totale de **0,26** calculé au Chapitre 03. La petite différence vient des arrondis du logiciel.

K-Factor "With Film" (avec film) :

Il représente la performance **réelle** de la paroi une fois installée dans son environnement.

Calcul

$$K_{with_film} = \frac{1}{R_{si} + \sum R_{matériaux} + R_{se}} \quad (IV. 2)$$

L'air intérieur et extérieur agit comme un petit isolant supplémentaire. C'est pour cela que la Valeur K baisse (elle passe de **3,658** à **2,364** W/m²·K). Plus le K est bas, mieux la paroi isole.

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Tableau IV. 3 : Propriétés thermo-physiques des fenêtres simulées

Paramètre	Valeur OpenStudio
Glass (Fenêtres) K-Factor (Coefficient de transmission)	1,608 W/m ² ·K
Area (surface)	14,72 m ²
Glass SHGC (Coefficient d'apport solaire)	0,312

- Paramétrage des scénarios de fonctionnement (Schedule) :

Pour que la simulation dynamique soit représentative de la réalité, nous avons défini des profils horaires pour l'occupation, l'utilisation des équipements et les consignes de température. Ces données sont identiques pour les 8 zones thermiques du projet.

a. Occupation et Activité humaine :

➤ Occupation (occ) :

Le profil de fonctionnement temporel des équipements intérieurs et de l'éclairage artificiel a été rigoureusement calibré de manière à refléter le comportement thermique et anthropique réel d'un ménage type

Contrairement aux profils standardisés par défaut d'OpenStudio, cette courbe dynamique met en évidence une fluctuation horaire corrélée directement au cycle de vie quotidien de la famille

Période nocturne (22h00 - 06h00) : Une charge résiduelle minimale stable (fraction de 0. 05) est observée, correspondant uniquement aux appareils à fonctionnement continu indispensables (réfrigérateur, congélateur et modem internet).

Pics d'activité (Matin et Midi) : Le profil enregistre des hausses modérées Variant entre 0. 15 et 0. 20, induites par les phases de préparation des repas, l'usage ponctuel de l'électroménager (micro-ondes, lave-vaisselle) et l'activation des équipements audiovisuels.

-Phase d'absence (08h00 - 12h00) : Le profil reflète fidèlement la baisse d'occupation (similairement au scénario occ), où la demande retombe à son seuil de Vieille passif.

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

-Période de pointe du soir (18h00 - 22h00) On assiste à une hausse majeure atteignant son maximum (fraction de **0.30 à 0.35**), expliquée par le retour simultané de tous les occupants, l'enclenchement de l'éclairage artificiel LED (calibré à **135 W** pour 6 heures d'utilisation) et la mise en marche des équipements à forte puissance comme le four électrique

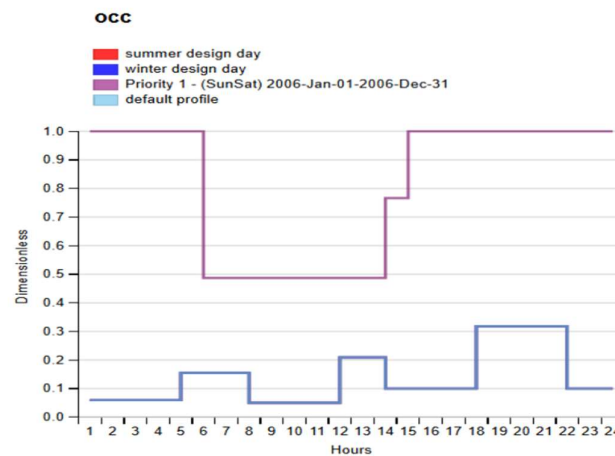


Figure IV. 10 : Taux d'occupation des locaux (occ).

➤ **Niveau d'activité (act)** Le niveau d'activité métabolique est maintenu constant à **23.89 W** par personne, ce qui génère des apports de chaleur internes permanents pris en compte par Open Studio.

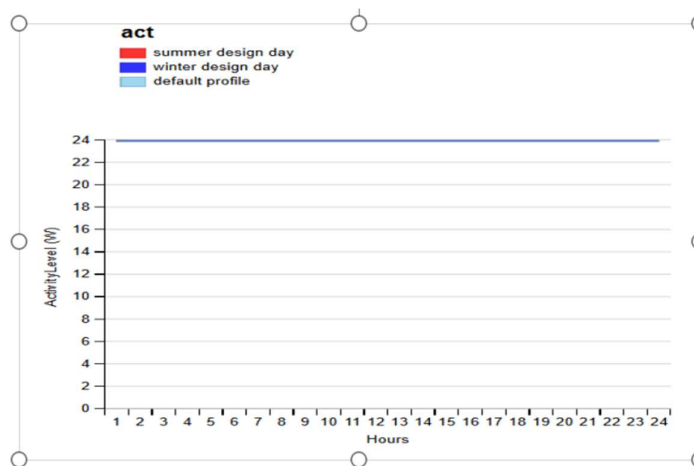


Figure IV. 11 : Profils horaires du niveau d'activité métabolique (act)

b. Équipements et Éclairage :

➤ **Éclairage (lights)** L'utilisation de l'éclairage suit un cycle logique avec une activation nulle en journée et un passage à pleine puissance (1.0) dès **18h**, augmentant la

consommation électrique nocturne.

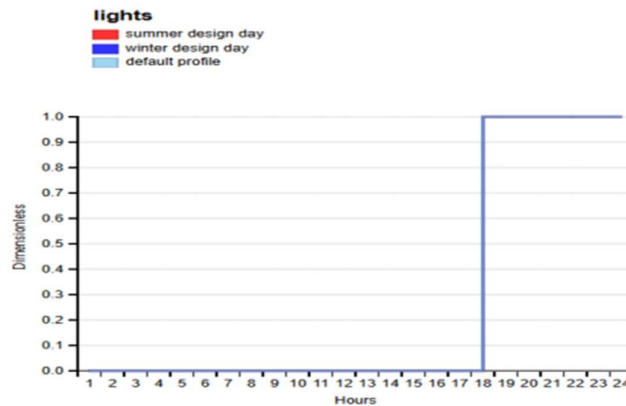


Figure IV. 12 : Profils horaires d'utilisation de l'éclairage (lights)

➤ **Équipements (epp)** Le scénario des équipements intérieurs montre un pic d'utilisation à partir de 16h, ce qui coïncide avec l'utilisation des appareils électroménagers calculés au Chapitre III.

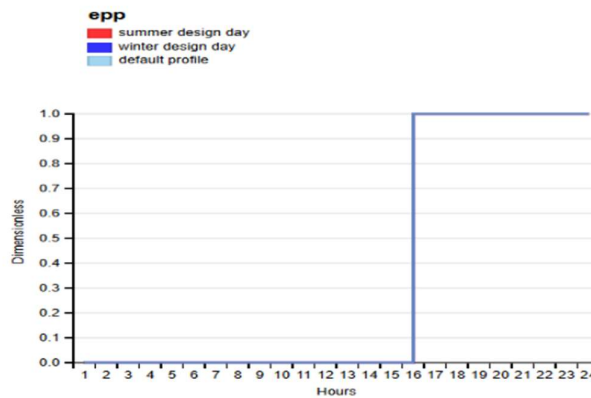


Figure IV. 13 : Profils horaires d'utilisation des équipements électriques (epp)

c. Consignes de Confort Thermique :

➤ Chauffage (heating) :

· **Période de confort actif (06h00 - 19h00)** La consigne est fixée à 70°F (soit 21,04°C). C'est durant cette plage horaire que le système s'active pour garantir le confort thermique des occupants au sein des 8 zones du bâtiment.

Période de réduit nocturne (19h00 - 06h00) Période d'arrêt nocturne (19h00 - 06h00)
Le système de chauffage est désactivé (OFF) afin de réduire la consommation énergétique durant les heures d'inoccupation.

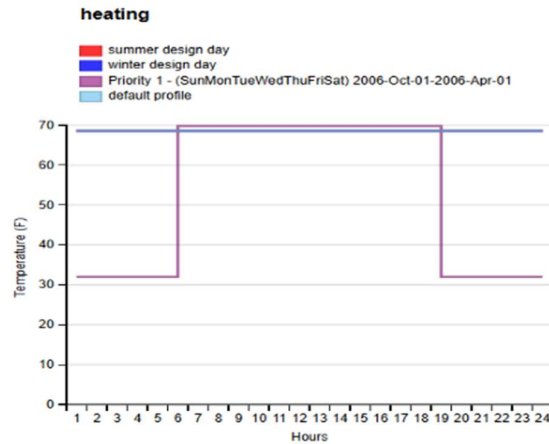


Figure IV. 14 : Température de consigne de chauffage (heating).

-Climatisation (cooling) : Pour la saison estivale, le scénario de climatisation

✓ **Matinée (01h00 - 11h00) :** Le système de climatisation est désactivé (OFF) de 01h00 à 11h00

✓ **Période de pointe (11h00 - 00h00) :** Dès 11h00, alors que le rayonnement solaire s'intensifie, la consigne est ajustée à **76°F (soit 24,5°C)**. Le climatiseur s'enclenche alors pour maintenir cette température cible.

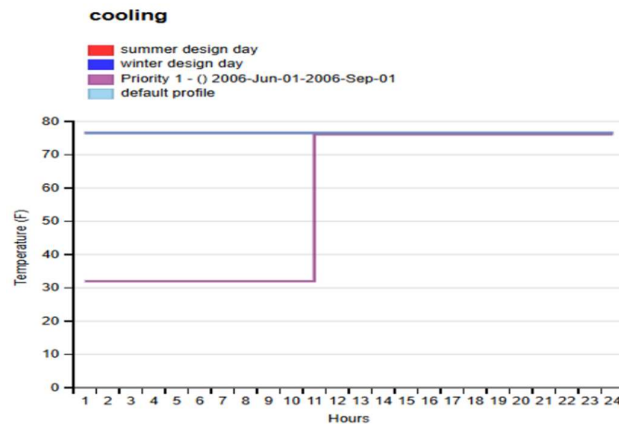


Figure IV. 15 : Température de consigne de refroidissement (cooling).

IV. 5. 1 Besoins en chauffage et en climatisation :

Tableau IV. 4 : Consommation énergétique annuelle (simulation)

	Valeur (kWh)
Heating (Chauffage)	5247. 28
Cooling (Refroidissement)	2720. 87
Interior Lighting(Éclairage)	295. 65
Équipements	2665. 6
Total	10929. 39

-Les besoins en climatisation simulés sont légèrement supérieurs aux résultats théoriques. Cette différence s'explique par le fait que la simulation dynamique prend en compte

- Les apports solaires
- L'inertie thermique
- La Variation horaire des conditions climatiques
- Les gains internes
- Contrairement au calcul théorique qui reste simplifié

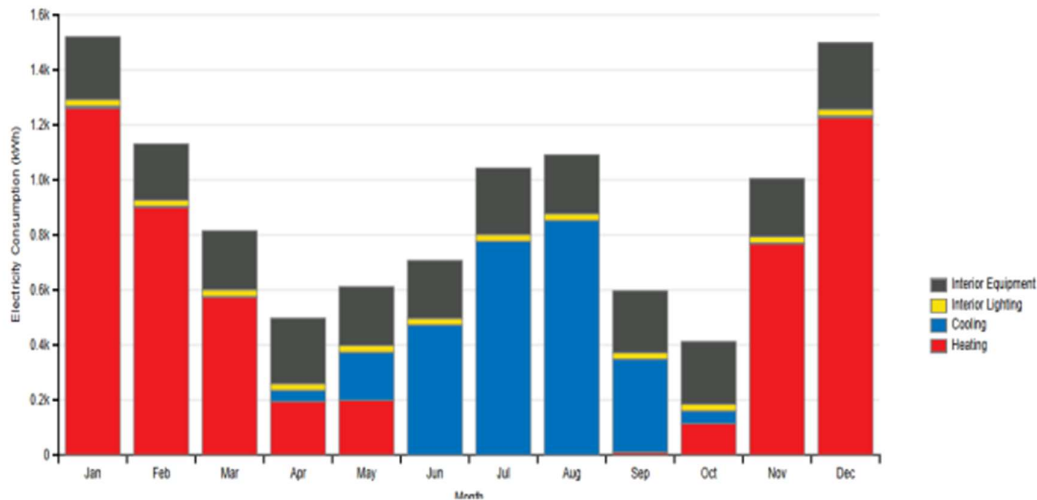


Figure IV. 16 : Consommation énergétique (kWh)

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

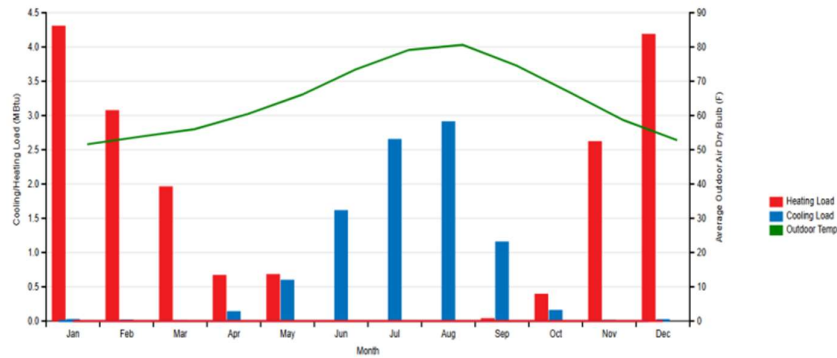


Figure IV. 17 : HVAC (chauffage et climatisation).

-On remarque que le chauffage est prédominant en hiver (janvier, février, décembre), alors que le refroidissement augmente fortement en été (juin, juillet, août), ce qui traduit l'influence directe des conditions climatiques.

Les besoins énergétiques du bâtiment Varient fortement selon les saisons, avec une dominance du chauffage en hiver et du refroidissement en été, ce qui met en évidence l'importance d'une bonne isolation thermique et de stratégies passives pour améliorer la performance énergétique.

- ✓ L'échelle est en **MBtu** (Million British Thermal Units), une unité de mesure de l'énergie thermique.

IV. 5. 2 Consommation des équipements électriques :

Paramétrage des charges internes (Internal Loads) Afin que la simulation numérique reflète le comportement réel des occupants, les puissances des équipements électriques calculées au **Chapitre 03 (Tableau III. 29)** ont été introduites dans OpenStudio. Ces charges internes sont essentielles car elles dégagent de la chaleur qui influence directement les besoins de climatisation en été.

Tableau IV. 5 : Validation de la puissance installée par zone (Cas de référence)

Equipment Name	Definition	Load (units)	Inheritance Level	Multiplier	Total Load (W)
(Space Name chambre)					
Electric Equipment 2	Lampel	75 (W)	space	1. 0	75

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Electric Equipment 6	Prises 16A	100 (W)	space	1. 0	100
Electric Equipment 3	Téléviseur LED	100 (W)	space	1. 0	100
(Space Name chambre2)					
Electric Equipment 25	Lampe1	75 (W)	space	1. 0	75
Electric Equipment 26	Téléviseur	100 (W)	space	1. 0	100
Electric Equipment 7	Prises 16A	100 (W)	space	1. 0	100
(Space Name cour)					
Electric Equipment 5	Pompe à eau	600 (W)	space	1. 0	600
Electric Equipment 15	Lampe	75 (W)	space	1. 0	75
Electric Equipment 11	Prises 16	100 (W)	space	1. 0	100
(Space Name cuisine)					
Electric Equipment 28	Congélateur	300 (W)	space	1. 0	300
Electric Equipment 35	Réfrigérateur	260 (W)	space	1. 0	260
Electric Equipment 29	Lave-vaisselle	1200 (W)	space	1. 0	1200
Electric Equipment 30	Micro-ondes	800 (W)	space	1. 0	800
Electric Equipment 12	Prises 16A	100 (W)	space	1. 0	100
Electric Equipment 16	Lampe	75 (W)	space	1. 0	75
(Space Name hall)					

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Electric Equipment 31	Modem	10 (W)	space	1. 0	10
Electric Equipment 32	Téléviseur LED	100 (W)	space	1. 0	100
Electric Equipment 21	Lampel	75 (W)	space	2. 0	150
Electric Equipment 13	Prises 16A	100 (W)	space	1. 0	100
(Space Name s. b)					
Electric Equipment 24	Lampel	75 (W)	space	1. 0	75
Electric Equipment 4	Lave-linge	2200 (W)	space	1. 0	2200
(Space Name salle)					
Electric Equipment 14	Prises 16A	65 (W)	space	8. 0	520
Electric Equipment 33	Lampel	75 (W)	space	1. 0	75
(Space Name w. c)					
Electric Equipment 27	Lampel	75 (W)	space	1. 0	75

-Conformité des puissances : On constate que les puissances nominales saisies dans le logiciel (ex **260 W** pour le réfrigérateur, **1200 W** pour le Lave-vaisselle) correspondent exactement aux données de l'inventaire du **Chapitre 03**.

-Calcul de l'énergie : Alors que le Chapitre 03 calcule une énergie mensuelle en **kWh** basée sur des durées d'utilisation fixes, OpenStudio utilise des profils horaires (**Schedules**) pour simuler la diversité d'utilisation au cours de la journée.

-Impact Thermique : Ces équipements ne sont pas seulement des consommateurs d'électricité ; ils agissent comme des sources de chaleur interne.

➤ **Analyse de la consommation électrique :**

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

**Tableau IV. 6 : Consommation d'électricité pour la saison d'été (avant isolation)
(Simulation)**

Mois	Climatisation (kWh)	Éclairage (kWh)	Équipements (kWh)	Consommation Totale (kWh)
Mai	215,54	25,11	210,22	373,72
Juin	353,85	24,3	206,83	584,98
Juillet	559,24	25,11	236,5	820,85
Août	606,29	25,11	210,22	841,62
Septembre	138,39	24,3	219,97	459,81
Total Période	1873,31	123,93	1083,74	3080,98

Cette Variation s'explique par le fait que :

- Le calcul manuel repose sur des hypothèses simplifiées (durée de fonctionnement constante, puissance nominale),
- Tandis que la simulation prend en compte des paramètres plus réalistes, notamment les profils d'utilisation, les variations climatiques et le fonctionnement intermittent des équipements.

Ainsi, les résultats obtenus par simulation sont considérés comme plus représentatifs de la consommation réelle du bâtiment.

**Tableau IV. 7 : Consommation d'électricité pour la saison d'hiver (avant isolation)
(Simulation)**

Mois	Chauffage (kWh)	Éclairage (kWh)	Équipements (kWh)	Consommation Totale (kWh)
Octobre	230,07	25,11	223,36	478,54
Novembre	306,96	24,3	206,83	538,09
Décembre	379,49	25,11	236,52	641,12
Janvier	378,13	25,11	223,36	626,6
Février	248,61	22,68	200,05	471,34
Mars	108,55	25,11	210,22	343,88
Avril	54,78	24,3	233,11	312,19
Total Période	1706,59	171,72	1533,45	3411,76

IV. 6. Simulation du bâtiment avec isolation thermique intérieure (ITI) :

Dans cette phase, nous introduisons des améliorations sur l'enveloppe du bâtiment en appliquant une isolation thermique par l'intérieur. L'objectif est d'évaluer le gain énergétique par rapport au cas de référence.

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

IV. 6. 1. Propriétés thermiques des matériaux isolants :

Pour optimiser la performance thermique, nous avons intégré de nouveaux matériaux dans l'onglet "**Constructions**" du logiciel OpenStudio. Le Tableau suivant récapitule les caractéristiques techniques des isolants choisis.

Tableau IV 8 : Caractéristiques des isolants intégrés dans le modèle

Composant	Matériau Isolant	Épaisseur (cm)	Conductivité λ (W/m. °C)
Murs Extérieurs	Laine de verre	14	0.035
Toiture	Polystyrène expansé	8	0.035
Plancher Bas	Laine de roche	10	0.039

Pour chaque couche de la paroi, des paramètres physiques précis sont renseignés afin de garantir la fiabilité de la simulation thermique dynamique (STD)

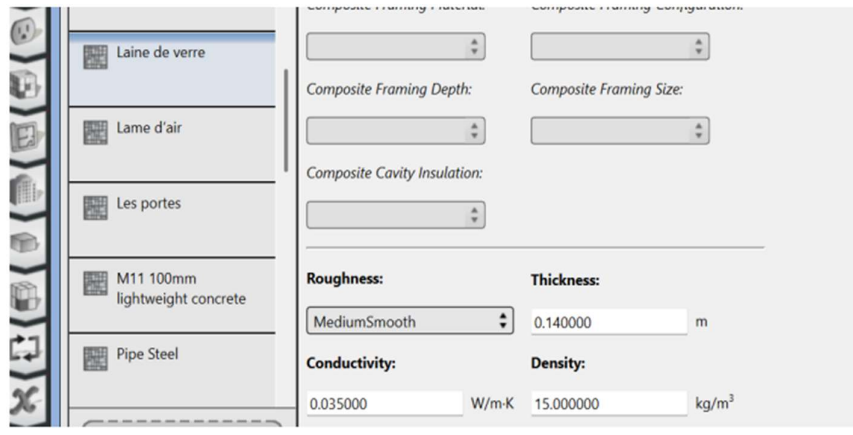


Figure IV. 18 : Modélisation des parois Intégration de l'isolation (Laine de verre) et des matériaux de structure.

IV. 6. 2. Analyse des nouveaux résultats de consommation :

Après avoir lancé la simulation avec les nouveaux paramètres, nous observons une transformation majeure dans le profil énergétique du bâtiment. Les résultats issus du rapport EnergyPlus (**End Uses**) sont présentés ci-dessous

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Tableau IV. 9 Comparaison entre les résultats théoriques et numériques.

Parois du bâtiment	K calculé (W/m ² . K) (Chapitre 3)	K logiciel (W/m ² . K) (Chapitre 4)	Écart (%)
Toiture	0.381	0.385	1,04 %
Mur Extérieur (ITI)	0.220	0.224	1,81 %
Plancher Bas	0.331	0.335	1,20 %

IV. 6. 3. Besoins en chauffage et en climatisation :

Tableau IV. 10 Consommation énergétique annuelle (simulation)

Usage Énergétique	Valeur [kWh]
Chauffage	3747.44
Refroidissement (Climatisation)	1919.67
Éclairage intérieur	295.65
Équipements intérieurs	2665.6
Total annuel	8579.96

L'isolation thermique intérieure (ITI) joue un rôle de régulateur thermique efficace pour ce bâtiment. Bien qu'elle coupe l'accès à l'inertie thermique des murs extérieurs (ce qui peut parfois emprisonner la chaleur interne), les résultats d'OpenStudio démontrent qu'à Remchi, l'ITI reste une solution hautement performante pour réduire la facture énergétique globale, en agissant de manière expressive sur le confort d'été et d'hiver.

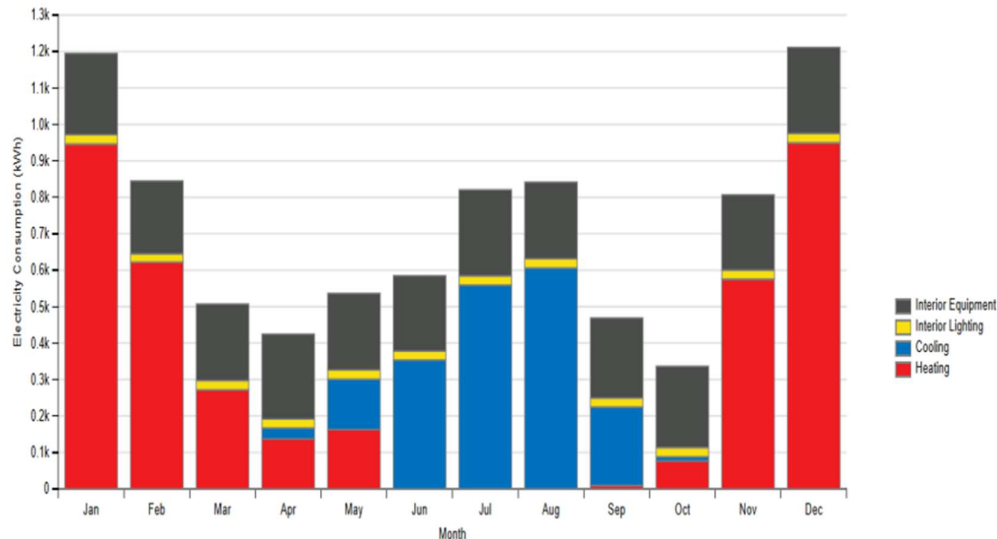


Figure IV. 19 Consommation énergétique (kWh) après isolation intérieure.

-Le graphique de la consommation électrique mensuelle révèle l'impact significatif de l'isolation thermique sur les besoins bioclimatiques du bâtiment. On observe une réduction

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

drastique des besoins de chauffage, qui ne représentent désormais qu'une fraction mineure de la consommation totale.

Cependant, l'usage de l'isolation par l'intérieur semble induire une légère augmentation des besoins en refroidissement durant la période estivale (juillet-août). Ce résultat s'explique par la réduction de l'inertie thermique intérieure, limitant la capacité de la structure à absorber les gains de chaleur en journée.

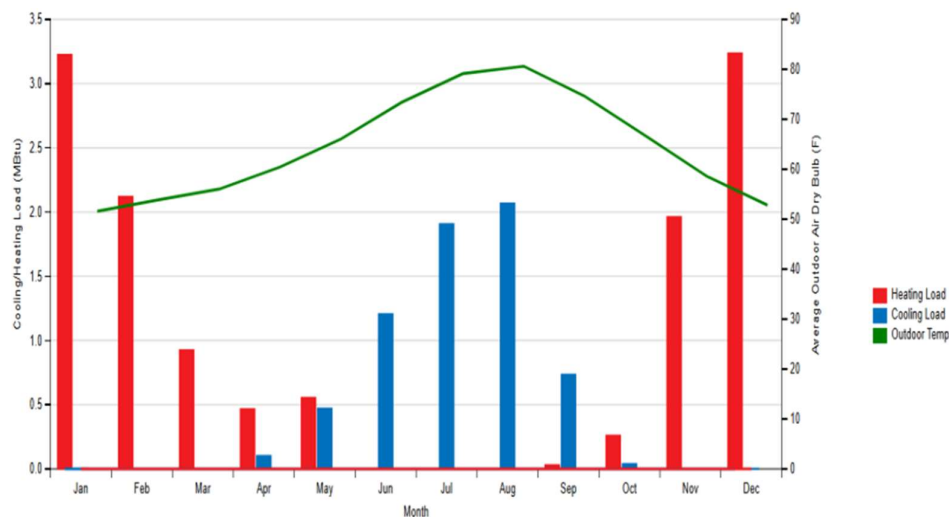


Figure IV. 20 : HVAC (chauffage, et climatisation).

L'analyse du profil de charge thermique mensuel met en évidence l'efficacité de l'isolation intérieure sur la performance énergétique du bâtiment. Les résultats montrent une corrélation directe entre la température de l'air extérieur et les besoins en chauffage (Heating Load).

On constate une nette prédominance des besoins de chauffage durant la saison hivernale, avec un pic maximal en janvier et décembre. À l'inverse, la période estivale (juin à septembre) marque une transition vers des besoins de refroidissement (Cooling Load). Ce phénomène s'explique par la réduction des déperditions thermiques par les parois l'isolation intérieure, tout en protégeant du froid hivernal, limite l'évacuation naturelle des apports internes et solaires en été, induisant ainsi un besoin de climatisation pour maintenir le confort thermique.

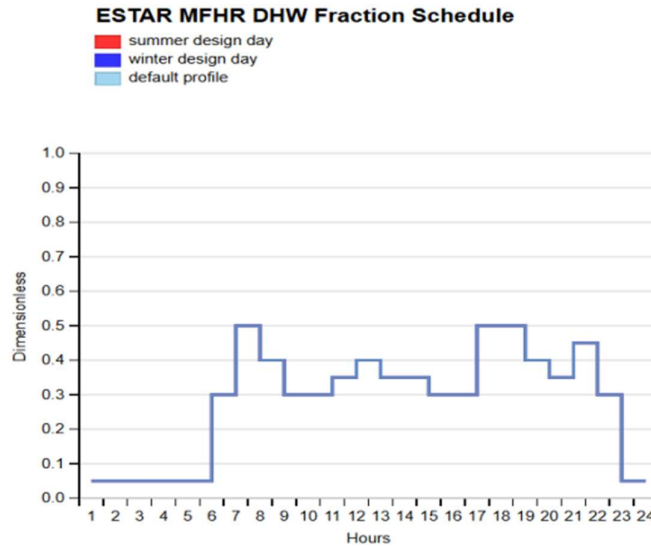


Figure IV. 21 : **Profil** de fraction de consommation horaire d'Eau Chaude Sanitaire (DHW).

➤ **DHW (Domestic Hot Water) :** Il s'agit de l'utilisation de l'eau chaude pour la cuisine et la salle de bain (S. B).

➤ **Fraction Schedule :** Ce n'est pas une puissance fixe, mais une fraction (un pourcentage) de l'utilisation maximale.

➤ **Profil horaire**

-La nuit (23h à 6h) : La consommation est très faible (proche de 0.05), car les occupants dorment.

-Le matin (7h - 8h) : Premier pic (0.5), ce qui correspond aux douches et au petit-déjeuner.

-Le soir (17h - 19h) : Deuxième pic (0.5), correspondant à la préparation du dîner et aux douches du soir.

IV. 7. Simulation du bâtiment avec isolation thermique extérieure (ITE) :

IV. 7. 1 Propriétés thermiques des matériaux isolants :

Les composants et la superposition des couches de matériaux pour le modèle en isolation extérieure ont été configurés dans l'interface de simulation OpenStudio selon l'ordre strict allant de l'extérieur (Outside) vers l'intérieur.

Tableau IV. 11 : Caractéristiques des isolants intégrés dans le modèle (Configuration ITE)

Composant	Matériau Isolant	Épaisseur (cm)	Conductivité λ (W/m. °C)
-----------	------------------	----------------	----------------------------------

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Murs Extérieurs	Aérogel de Silice	6	0. 015
Toiture	Mousse de polyuréthane (PUR)	8	0. 023
Plancher Bas	Panneau polyuréthane	10	0. 022

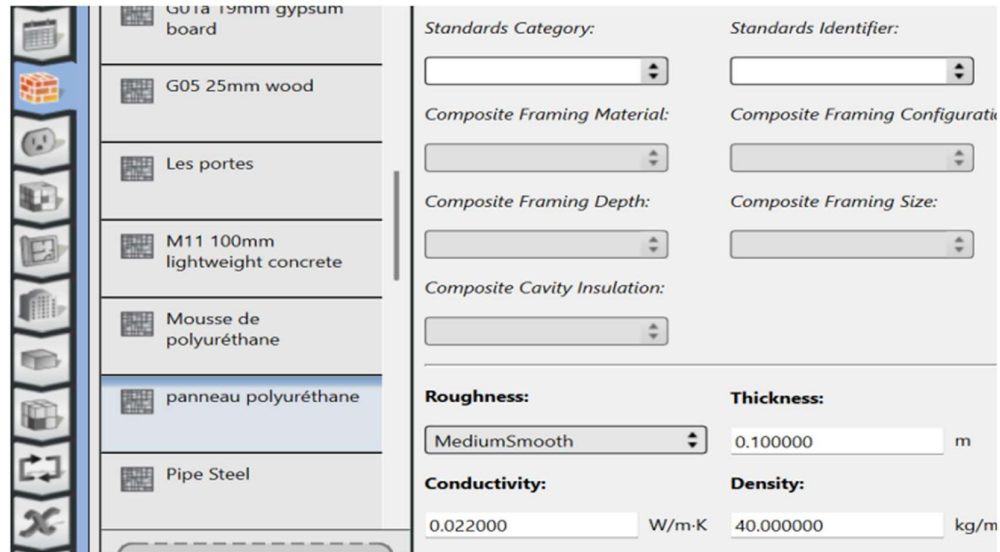


Figure IV. 22 : Configuration des propriétés thermo physiques du panneau de polyuréthane dans l'onglet Materials d'OpenStudio.

IV. 7. 2. Analyse des nouveaux résultats de consommation

Les résultats issus du rapport Energy Plus (**End Uses**) sont présentés ci-dessous

Tableau IV. 12 : Valeurs des coefficients de transmission thermique globale (K-Factor) des parois de l'enveloppe (Variante ITE) calculées par OpenStudio

Type de Paroi Opaque	Coefficient K sans film (W/m ² ·K)	Coefficient K final avec film (W/m ² ·K)
Mur Extérieur (ITE)	0,234	0,226
Toiture	0,274	0,264
Plancher Bas (ITE)	0,212	0,205

IV. 7. 3. Besoins en chauffage et en climatisation :

Tableau IV. 13 : Usage énergétique annuel après isolation thermique extérieure (ITE)

Usage Énergétique	Valeur (kWh)	Annuelle
Chauffage (Heating)	2668. 74	
Climatisation (Cooling)	1188. 27	
Éclairage intérieur (Lights)	295. 65	
Équipements intérieurs	2665. 6	

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Total Annuel

6764. 19

-Ces Valeurs confirment l'excellent choix de l'ITE (Aérogel en mur et polyuréthane en dalles). En éliminant efficacement les ponts thermiques et en exploitant l'inertie de la brique lourde, l'enveloppe bloque les gains de chaleur estivaux et retient les apports thermiques en hiver, réduisant ainsi l'usage des systèmes de climatisation et de chauffage au strict minimum.

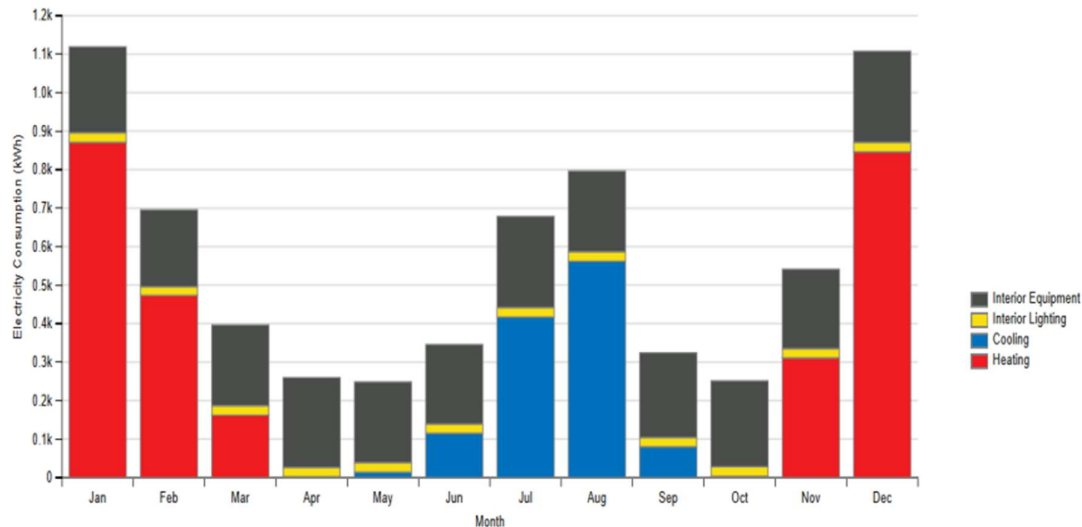


Figure IV. 23 : Consommation énergétique (kWh) après isolation extérieure (ITE)

➤ Comportement en période hivernale (octobre à avril) :

Durant la saison froide, la demande énergétique est marquée par l'apparition du poste de chauffage (Heating, en rouge), qui atteint ses pics maximaux en Janvier et en Décembre. Grâce à la performance thermo-physique de l'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) à base d'Aérogel, les besoins en chauffage restent très modérés. De plus, on observe une extinction totale de la climatisation (Cooling) durant cette période, ce qui confirme l'absence de conflits thermiques au sein des zones régulées.

➤ Comportement en période estivale (Mai à Octobre) :

Dès l'apparition des fortes chaleurs estivales, le chauffage s'annule complètement, ce qui valide la justesse des règles de priorité introduites dans le thermostat. C'est le poste de climatisation (Cooling, en bleu) qui prend le relais pour maintenir le confort, principalement en Juillet et en Août avec une demande maximale pour le mois d'Août.

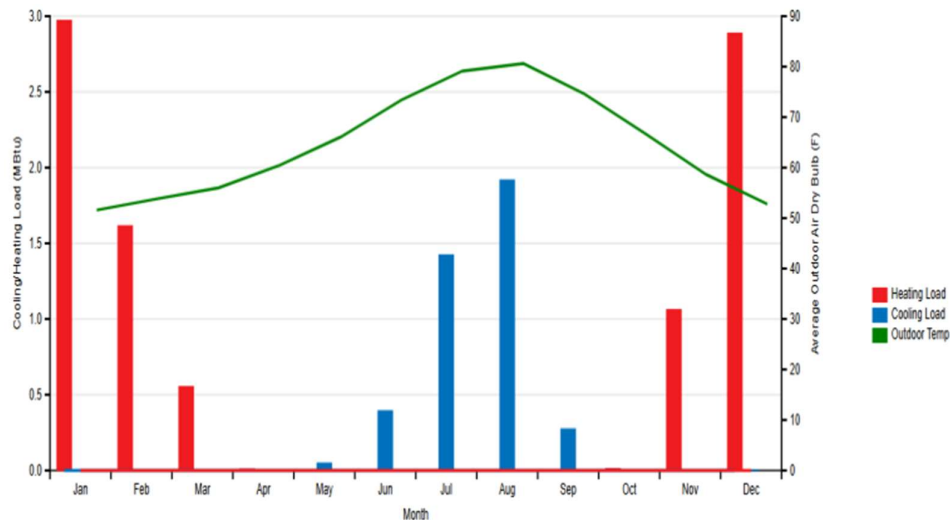


Figure IV. 24 : HVAC (chauffage, et climatisation).

La parfaite symétrie entre les courbes montre que le bâtiment n'est plus soumis passivement aux variations météo-climatiques, mais qu'il les amortit efficacement

➤ **En hiver** La demande de chauffage (Heating) suit rigoureusement la baisse des températures, mais reste contenue grâce au fort pouvoir isolant de l'Aérogel de silice qui confine la chaleur à l'intérieur.

➤ **En été** Malgré l'élévation importante de la température extérieure sèche (courbe Verte), les charges de climatisation (Cooling) restent plafonnées et maîtrisées. Cela confirme le rôle de bouclier thermique joué par l'isolation extérieure combinée à l'inertie de la brique.

IV. 8. Comparaison de la consommation énergétique selon le type d'isolation :

Dans cette section, une comparaison est réalisée entre trois cas le bâtiment sans isolation, avec isolation intérieure et avec isolation thermique extérieure (ITE). Les résultats sont issus de simulations numériques et permettent d'évaluer l'impact de chaque solution sur la performance énergétique globale.

Tableau IV. 14 : Comparaison des consommations énergétiques annuelles

Usage Énergétique	Avant isolation (kWh)	Après isolation intérieure - ITI (kWh)	Après-isolation extérieure - ITE (kWh)
Chauffage (Heating)	5247. 28	3747. 44	2668. 74
Climatisation (Cooling)	2720. 87	1919. 67	1188. 27

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

Éclairage intérieur (Lights)	295. 65	295. 65	295. 65
Équipements intérieurs	2665. 6	2665. 6	2665. 6
Total Annuel Global	10929. 39	8579. 96	6764. 19

Le Tableau montre une diminution importante de la consommation énergétique annuelle après l'application des solutions d'isolation thermique.

Avant isolation, la consommation totale annuelle atteint **10 929,39 kWh**, ce qui traduit des pertes thermiques importantes au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Après l'application de l'isolation intérieure (ITI), la consommation globale diminue à **8579,96 kWh**, soit une réduction d'environ **21,5 %**. Cette amélioration concerne principalement les besoins en chauffage et en climatisation.

L'isolation thermique extérieure (ITE) présente des performances plus élevées avec une consommation annuelle réduite à **6 764,19 kWh**, correspondant à une économie énergétique d'environ **38,1 %** par rapport à l'état initial.

Les consommations liées à l'éclairage et aux équipements intérieurs restent constantes, car elles dépendent essentiellement des usages des occupants. Ainsi, les résultats montrent que l'isolation thermique extérieure constitue la solution la plus efficace pour améliorer la performance énergétique globale du bâtiment et réduire les besoins énergétiques annuels.

Chapitre IV : Modélisation numérique et simulation thermique

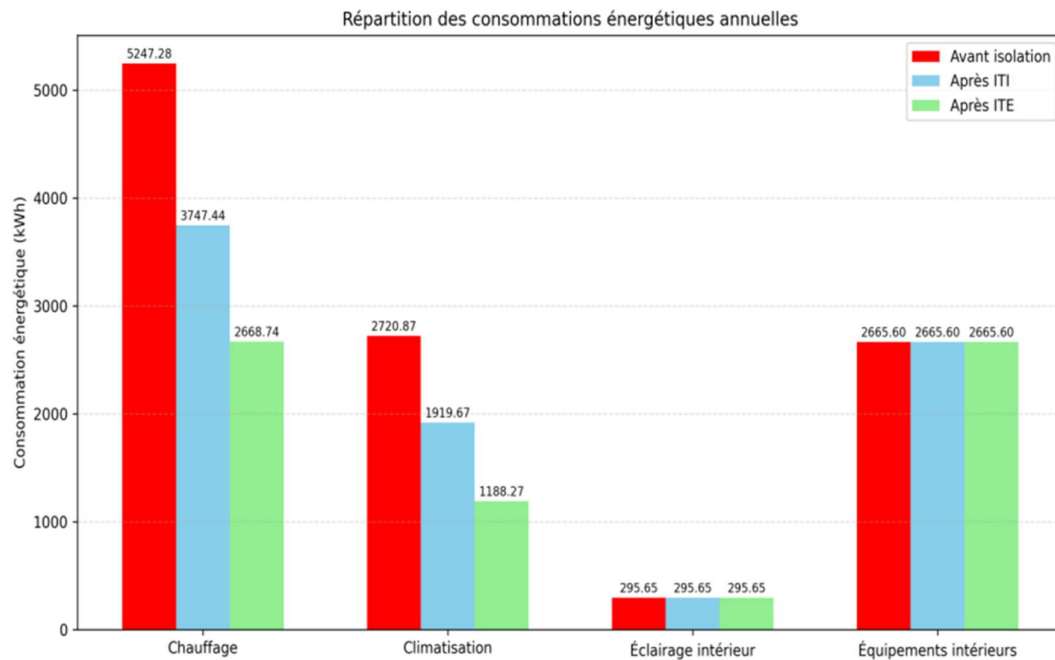


Figure IV. 25 : Évaluation sectorielle par poste d'usage

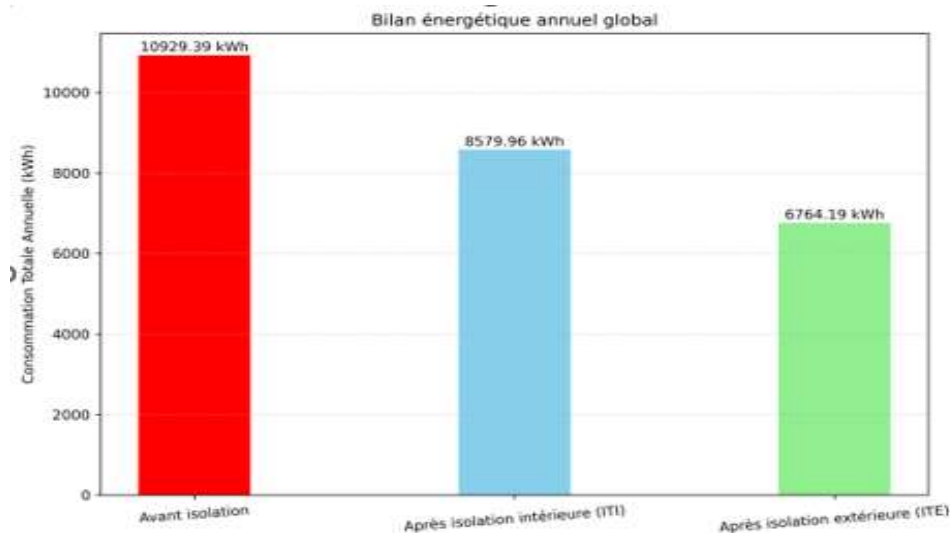


Figure IV. 26 : Bilan macroscopique global et efficacité systémique

Ces graphiques démontrent de manière irréfutablement que l'action sur l'enveloppe (approche passive) permet de réduire le besoin à sa plus simple expression.

Le bâtiment est désormais configuré de façon optimale pour être couplé au système

De production photovoltaïque (approche active) garantissant un excellent taux d'autoconsommation et ouvrant la Voie vers l'autonomie énergétique positive

Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude comparative de la performance énergétique du bâtiment avant et après isolation thermique a été réalisée à l'aide de la simulation numérique sous OpenStudio.

Les résultats obtenus montrent que l'application de l'isolation thermique permet une réduction significative des consommations énergétiques annuelles, notamment pour les besoins en chauffage et en climatisation. Avant isolation, le bâtiment présente une consommation énergétique élevée due aux importantes déperditions thermiques à travers l'enveloppe.

Après l'intégration de l'isolation intérieure (ITI), la consommation annuelle globale diminue de manière notable aux, traduisant une amélioration des performances thermiques du bâtiment. Cependant, l'isolation thermique extérieure (ITE) offre les meilleurs résultats avec une réduction énergétique plus importante et une meilleure stabilité thermique.

L'analyse des différents postes énergétiques montre que les besoins en chauffage et en refroidissement sont les plus influencés par l'isolation, tandis que les consommations liées à l'éclairage et aux équipements restent pratiquement constantes puisqu'elles dépendent essentiellement des usages des occupants.

Les graphiques comparatifs réalisés ont permis de Visualiser clairement l'impact positif des solutions d'isolation sur la consommation énergétique globale du bâtiment.

Ainsi, cette étude confirme que l'isolation thermique, particulièrement l'isolation par l'extérieur, constitue une solution efficace pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, réduire les pertes thermiques et limiter la consommation d'énergie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'analyse comparative des systèmes d'isolation thermique appliqués aux bâtiments sous différentes conditions climatiques. Face à l'augmentation continue de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment et aux enjeux environnementaux actuels, l'amélioration de la performance thermique d'enveloppe bâtie apparaît comme une solution essentielle pour réduire les besoins énergétiques et améliorer le confort des occupants.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a permis de présenter les concepts fondamentaux liés à la thermique du bâtiment, aux mécanismes de transfert de chaleur ainsi qu'aux facteurs influençant la performance énergétique. Une attention particulière a été portée au rôle de l'isolation thermique dans la limitation des déperditions énergétiques.

Par la suite, les principaux matériaux et techniques d'isolation ont été analysés en mettant en évidence leurs propriétés thermiques, leurs avantages et leurs limites. Cette étude a permis de mieux comprendre l'influence des caractéristiques des matériaux sur le comportement thermique des bâtiments.

La méthodologie adoptée a reposé sur la modélisation d'un bâtiment résidentiel et la simulation de différents scénarios d'isolation à l'aide d'outils numériques adaptés. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer l'impact de chaque solution sur les besoins en chauffage et en climatisation ainsi que sur la consommation énergétique globale.

L'analyse comparative réalisée a montré que l'intégration d'une isolation thermique performante contribue significativement à la réduction des pertes de chaleur en hiver, à la limitation des gains thermiques en été et à l'amélioration du confort thermique intérieur. Les simulations ont également confirmé que le choix du matériau isolant et de la technique d'isolation influence directement les performances énergétiques du bâtiment.

En conclusion, l'isolation thermique constitue un levier majeur pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et la réduction de leur impact environnemental. Les résultats obtenus soulignent l'importance de sélectionner des solutions d'isolation adaptées aux conditions climatiques et aux caractéristiques du bâtiment afin d'optimiser les économies d'énergie.

Comme perspectives, il serait intéressant d'étendre cette étude à d'autres zones climatiques, d'évaluer l'impact économique des différentes solutions d'isolation à travers une analyse coût-bénéfice et d'intégrer l'utilisation de matériaux innovants ou bio sourcés afin de renforcer davantage la durabilité énergétique des bâtiments.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] Kihal, G. , & Rouag, D. (2024). *Évaluation post-occupationnelle et optimisation de la performance énergétique du bâtiment (Thèse de doctorat)*. Université Constantine 3 Salah Boubnider, Faculté d'architecture et d'urbanisme.
- [2] Affinicia. (2023). *Qu'est-ce que la consommation énergétique et comment la calculer ?*. Énergie
- [3] Service de la donnée et des études statistiques (SDES). (2025). *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2025 International*. Ministère de la Transition écologique.
- [4] Ouarab, Y. M. , & Bellal, N. (2021). *Étude et réalisation d'un isolant à base de matériaux bio sourcés [Mémoire de Master]*. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algérie.
- [5] Ministère des Hydrocarbures et des Mines. (s. d.). *Rapports, bilans et données statistiques sectorielles*.
- [6] Rahmani, A. , & Achour, R. (2020). *Bilan thermique d'une maison individuelle en utilisant comme isolant un matériau à changement de phase (Mémoire de Master)*. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.
- [7] Agrabatt, M. L. , N'baba, M. L. , Bebe D'ingue, & Elhadrami, J. (2023). *Mini-Projet Déperdition Thermique*. Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Gabès, Université de Gabès, Tunisie.
- [8] Ben Abbes, H. (2026). *Exemple de calcul simple des déperditions thermiques d'un bâtiment*. Scribd
- [9] Guessas, B. , Zaghouane, S. , & Haouche, A. (2026). *L'isolation thermique des constructions [Cours et TD, 2ème année Licence]*. Département d'Architecture, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, Algérie.
- [10] Ait Ahmed, N. (2017). *L'efficacité énergétique dans le bâtiment (Thèse de doctorat)*. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.
- [11] ADEME. (2023). *Manuel de performance énergétique des bâtiments calcul des déperditions thermiques et amélioration de l'efficacité énergétique*.
- [12] Stoecklin, A. (2025). *Optimisation énergétique. Opéra Énergie*
- [13] Energy Solution. (s. d.). *Solutions d'optimisation énergétique et performance globale*.
- [14] Agence de la Transition Écologique (ADEME). (2024). *Indicateurs de performance énergétique des bâtiments. Guide méthodologique*.
- [15] Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2010). *directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments*.

[16] Taibi, H. , & Zinai. (2026). *Cours de Béton Armé [Destiné aux étudiants de S5 Licence Génie Civil et Travaux Publics]*. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf (USTO-MB).

[17] Exacompare. (2025). *Conductivité thermique (lambda) Ce qu'il faut savoir*.

[18] *Guide Technique de la Rénovation*. (s. d.). Classement des différents types de vitrages selon le coefficient de transmission thermique (U_w).

[19] République Algérienne Démocratique et Populaire. (s. d.). *Cours de Transfert Thermique*. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf (USTO-MB)

[20] Parlons Sciences. (s. d.). *Les mécanismes de transferts de chaleur [Fiche pédagogique]*.

Givoni, B. (1998). *Thermal Comfort in Buildings Principles and Practice*. Wiley & Sons.

[21] **Techno-Science**. (s. d.). *Principes de la thermodynamique : Transfert de chaleur dans une maison individuelle*.

[22] Donev, J., & l'Université de Calgary. (2024). *Mécanismes de la convection forcée*. L'Encyclopédie de l'Énergie. Energyeducation.ca.

[23] **Stufe Focolari (Entreprise)**. (s. d.). *Techniques de diffusion de la chaleur par convection naturelle dans l'habitat*.

[24] Kharbouch, B. (2018). *Transfert de chaleur, partie Convection*. Université Abdelmalek Essaâdi.

[25] meetMED (Mitigation Enabling Energy Transition in the Mediterranean region). (2024). *Introduction aux stratégies d'efficacité énergétique et de transition*

[26] Straube, J. (s. d.). *L'enveloppe du bâtiment haute performance en béton préfabriqué le contrôle de la pluie*. CPCI / Schok.

[27] Bouayed, L. A. (2023). *Thermique du bâtiment [Polycopié de cours]*. Université Djilali Liabes, Sidi Bel Abbès.

[28] La Prime Énergie. (2019). *Les travaux de rénovation fenêtres et double vitrage*.

[29] Observatoire de la Performance Énergétique du Bâtiment. (2024). *Performance énergétique indicateurs clés pour l'Évaluation des bâtiments*. Guide technique.

[30] AGF Couverture. (s. d.). *Toiture en tuiles Avantages, inconvénients et propriétés thermiques*.

[31] Maison & Travaux. (s. d.). *Comment les matériaux isolants influencent-ils l'efficacité énergétique de votre maison ?*

- [32] Connor, N. (2024). *Matériaux à changement de phase | Stockage thermique, efficacité énergétique*. Thermal Engineering.
- [33] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). (2022). *Humidité relative et performance énergétique des bâtiments. Guide technique*.
- [34] *Rénovation Écologique*. (2025). *Découvrez les matériaux bio sourcés qui façonnent l'avenir du bâtiment*.
- [35] *Tout sur l'Isolation*. (2026). *Isolation des murs par l'intérieur Pourquoi et comment isoler*.
- [36] *Espace Conseil Énergie*. (2022). *3 exemples de matériaux composites Isolation thermique innovante !*.
- [37] Nabil. (2025). *Tableau comparatif des isolants thermiques Conductivité, efficacité et prix*. Ithaque Rénovation.
- [38] Cmesmat. (2024). *Les différents types de matériaux de construction*.
- [39] *Techno-Science*. (2026). *Brique (matériau) Définition et explications*.
- [40] Guillaume-Camus, L. (2025). *Briques plaines vs briques creuses Quelle option choisir pour votre construction ?*. Guide Travaux.
- [41] *Calcul Béton*. (2024). *Béton isolant Utilisation, avantages, dosage, composition*.
- [42] *Génie Civil Pour Vous*. (2025). *Béton ordinaire De la définition à l'exécution*.
- [43] Jean. (2025). *Propriétés isolantes des matériaux en bois Guide complet et conseils. Rénoventop*.
- [44] *Isoler Homes*. (2025). *Le bois comme isolant thermique Vrai ou faux ?*.
- [45] *Tout sur le Béton*. (2020). *Le béton léger Avantages, utilisations, fabrication, prix*.
- [46] Antoine. (2021). *Les isolants bio sourcés et leurs atouts*. Hellio.
- [47] StudySmarter. (2019). *Inertie thermique Définition & calcul*.
- [48] Varys, D. (2023). *Comment le choix des matériaux peut impacter l'efficacité énergétique ?*. La Maison Saint-Gobain.
- [49] Ecomatic. (2024). *Le phénomène et l'effet de paroi froide*.
- [50] *Arbre Digital*. (2025). *Matériaux à changement de phase Comprendre, optimiser et exploiter les PCM pour un avenir plus efficace*.
- [51] Parexlanko. (2022). *Guide ITE 2022 Isolation Thermique par l'Extérieur. Document technique de mise en œuvre*.

- [52] Safiya. (2025). *Déphasage thermique Tout ce qu'il faut connaître en 2025*. Maison Safiya.
- [53] Maisons en Construction. (2026). *L'inertie thermique d'une maison, c'est quoi ?*.
- [54] Euradif. (s. d.). *Solutions techniques pour ouvertures et parois*.
- [55] Parexlanko. (2022). *Guide ITE 2022 Isolation Thermique par l'Extérieur*. Document technique de mise en œuvre.
- [56] EIE Bretagne. (2020). *Isolation thermique des parois opaques. Parcours Habitat Économe*.
- [57] Zeghichi, L. (2026). *Chapitre 1 Les bétons légers [Support de cours]*. Université de Biskra.
- [58] Ait Akka, A. (2017). *Élaboration d'un modèle de calcul de l'empreinte carbone et proposition de moyens d'amélioration des performances environnementales au niveau de l'unité de production des Phosphates de Youssoufia*.
- [59] Taibi, H. , & Zinai. (2026). *Cours de Béton Armé [Destiné aux étudiants de S5 Licence Génie Civil et Travaux Publics]*. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf (USTO-MB).
- [60] Zeghichi, L. (2026). *Chapitre 1 Les bétons légers [Support de cours]*. Université de Biskra
- [61] Énergie Plus. (2026). *Conductivité thermique des matériaux (lambda)*. Architecture et Climat, Université Catholique de Louvain.
- [62] Écohabitation. (s. d.). *Comment éviter la surchauffe solaire grâce à des éléments architecturaux extérieurs*.
- [63] Gedimat. (s. d.). *Guide maçonnerie Monter des murs de maison en brique mono mur*.
- [64] Guide Artisan. (s. d.). *Les solutions et avantages de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE)*.
- [65] Ihaddadene, S. , & Kerrouche, R. (2018). *Évaluation thermique et économique de l'impact des nouveaux isolants thermiques sur l'économie d'énergie dans des bâtiments (Mémoire de Master en Génie Civil, Option : Équipement de l'habitat)*. Dirigé par le Dr. Triki, Z.
- [66] AGF Couverture. (s. d.). *Toiture en tuiles Avantages, inconvénients et propriétés thermiques*.
- [67] ResearchGate / Scientific Diagram. (2007). *Évolution comparative de la température intérieure d'une pièce avec et sans isolation thermique*.
- [68] Association pour la Gestion Durable de l'Énergie (AGEDEN). (s. d.). *Le confort thermique et les modes d'échanges thermiques entre le corps humain et son environnement*.
- [69] ResearchGate / Scientific Diagram. (s. d.). *Profil de variation de la vitesse de l'air selon la hauteur et l'altitude*.

[70] Batiweb. (s. d.). Solutions de référence pour le doublage thermo-acoustique des murs.

[71] Du Bois Isolation. (s. d.). Caractéristiques thermiques de la laine de verre.

[72]. Mme L. BENAHMED, « Thermique du bâtiment et efficacité énergétique », support de cours, Département de Génie Mécanique, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algérie, 2025