

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 أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubaker Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



**MEMOIRE**

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

**En : Génie mécanique**

**Spécialité : Énergies renouvelables en mécanique**

**Par : MOUHADJER Mohamed Ismail  
FRADJ Mohamed**

**Sujet**

***Évaluation des Performances Énergétiques des Bâtiments***

Soutenu publiquement, le 18/ 06 / 2025 , devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> ALIANE Abdenour	MCB	Université de Tlemcen	Président
M <sup>me</sup> MOSTEFAOUI Amina	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice
M <sup>me</sup> BENAHMED Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante
M <sup>r</sup> ALIANE Khaled	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 /2025

# **Remerciements**

*Louange à **Dieu Tout-Puissant**, source de force, de patience et de sagesse, qui nous a permis de franchir chaque étape de ce travail avec confiance et persévérance.*

*Sans Sa guidance, ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*Nous tenons à exprimer nos **remerciements les plus sincères** à **Madame BENAHMED Lamia**, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, et sa rigueur tout au long de ce travail. Son accompagnement a été d'un grand soutien, à la fois sur le plan scientifique et humain.*

*Nos vifs remerciements vont également à **Monsieur ALIANE Khaled**, Professeur à l'Université de Tlemcen, notre Co-encadreur, pour son suivi, ses orientations pertinentes et son appui constant.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer ce mémoire :*

***Monsieur ALIANE Abdenour**, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, Président du jury ;*

***Madame MOSTEFAOUI Amina**, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, Examinatrice.*

*Nos remerciements s'adressent également à **l'ensemble des enseignants** du département génie mécanique pour la qualité de leur enseignement, leur engagement et leur soutien continu tout au long de notre formation universitaire.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude au **groupement GTP – projet BRN**, qui nous a accueillis dans le cadre de notre stage pratique. Merci à toute l'équipe pour leur collaboration, leur encadrement sur le terrain et les précieuses connaissances techniques qu'ils nous ont transmises.*

*Nous remercions aussi tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire : collègues de promotion, camarades de projet, personnel administratif et technique.*

*Enfin, une pensée toute particulière à **nos familles** et **nos proches**, pour leur amour, leur patience et leur soutien inconditionnel. Leur présence à nos côtés, dans les moments de doute comme dans ceux de réussite, a été essentielle.*

*Ce mémoire est le fruit d'un travail partagé, mais aussi d'un parcours soutenu par de nombreuses personnes à qui nous devons beaucoup. À vous tous, **merci du fond du cœur**.*

## *Dédicace*

*À mes parents,*

*Les piliers de ma vie. Merci pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux, et votre foi en moi, même quand moi-même j'en doutais. Ce travail vous appartient autant qu'à moi.*

*À ma famille,*

*Pour votre présence, vos mots d'encouragement, et votre patience pendant les moments de fatigue et d'oubli.*

*À mes amis de cœur,*

*Qui m'ont soutenu dans les hauts comme dans les bas, toujours là pour écouter, motiver, ou simplement faire sourire quand il le fallait.*

*À toutes celles et ceux qui m'ont inspiré, guidé ou aidé, de près ou de loin, merci. Ce mémoire est le fruit d'un parcours que je n'ai jamais parcouru seul.*

**MOHAMED ISMAIL**

# Dédicace

## *À mes chers parents*

*À vous qui avez été mon premier souffle, mon premier repère, mon refuge dans les tempêtes et ma lumière dans l'obscurité.*

*Chaque pas que j'ai fait, chaque réussite que j'ai connue, porte l'empreinte de vos sacrifices, de vos prières murmurées en silence, de vos rêves que vous avez mis de côté pour que je puisse réaliser les miens. Je vous dois bien plus que ce mémoire. Je vous dois tout.*

*Du fond du cœur, merci.*

## *À mes enseignants*

*Pour votre accompagnement, votre patience et la richesse de votre savoir. Merci pour votre encadrement tout au long de mon parcours universitaire.*

## *À ma famille*

*Pour votre présence constante, vos encouragements et votre foi en moi. Votre soutien m'a portée et motivée jusqu'au bout de ce chemin.*

**MOHAMMED**

## Abstract

This thesis focuses on improving the energy performance of a residential building through practical solutions in thermal insulation and equipment modernization. After presenting the theoretical concepts related to energy consumption, building materials, and insulation techniques, a thermal study of the building in its initial state was carried out. It revealed significant heat losses and high energy consumption for both heating and cooling.

A renovation scenario was then simulated, including external wall insulation using silica aerogel, roof insulation with expanded polystyrene, replacement of single-glazed windows with double glazing, and installation of more efficient equipment (condensing boiler, inverter air conditioners, LED lighting). As a result, total heat loss was reduced by more than 40%, and annual heating and cooling needs dropped by nearly 48%.

The analysis showed a significant decrease in energy consumption and utility bills, with an interesting return on investment. These results demonstrate that a well-designed energy renovation can significantly improve thermal comfort, reduce operating costs, and contribute to sustainable building practices.

### Key Word :

Energy performance, thermal insulation, Renovation, Heat losses, silica aerogel, double Glazing, high-Efficiency Equipment, thermal Comfort, Energy Consumption, Sustainable construction.

## الملخص

يتناول هذا البحث موضوع تحسين الأداء الطاقوي لمبنى سكني من خلال تطبيق حلول فعالة تشمل العزل الحراري وتحديث التجهيزات التقنية. بعد عرض المفاهيم النظرية المتعلقة باستهلاك الطاقة، وخصائص مواد البناء، وتقنيات العزل، تم إجراء دراسة حرارية لحالة المبنى في وضعه الأصلي، والتي أظهرت وجود خسائر حرارية كبيرة واستهلاك مرتفع للطاقة سواء للتدفئة أو التبريد.

تم بعد ذلك اقتراح سيناريو لأعمال التهيئة يشمل عزل الجدران الخارجية باستخدام هلام السيليكا (aérogel) ، وعزل السطح بواسطة البوليستيرين الموسع (PSE) ، وتعويض النوافذ القديمة بأخرى مزدوجة الزجاج، إلى جانب استبدال الأجهزة ببدائل أكثر كفاءة مثل مرجل تكاثفي (chaudière à condensation) ، ومكيفات الهواء بتقنية الانفرتر، والإضاءة الاقتصادية (LED).

أظهرت النتائج انخفاضًا في الخسائر الحرارية بنسبة تجاوزت 40%، وتراجعًا في احتياجات التدفئة والتبريد السنوية بحوالي 48%. كما سجل انخفاض ملموس في استهلاك الطاقة وفواتيرها، مما يعكس جدوى الاستثمار الطاقوي على المدى المتوسط.

تؤكد هذه النتائج أن التهيئة الطاقوية المدروسة تساهم بفعالية في تحسين الراحة الحرارية، وتقليل التكاليف، وتعزيز البناء المستدام.

### الكلمات المفتاحية:

الأداء الطاقوي، العزل الحراري، التّجديد، الفواقد الحرارية، إيروجيل السيليكا، الزجاج المزدوج، المعدات الفعالة، الراحة الحرارية، استهلاك الطاقة، البناء المستدام.

## Résumé

Ce mémoire traite de l'optimisation de la performance énergétique d'un bâtiment résidentiel à travers des solutions concrètes d'isolation thermique et de modernisation des équipements. Après une présentation des concepts théoriques liés à la consommation énergétique, aux matériaux et aux techniques d'isolation, une étude thermique du bâtiment dans son état initial a été réalisée. Elle a mis en évidence des déperditions importantes et une consommation énergétique élevée, tant pour le chauffage que pour la climatisation.

Des travaux de rénovation ont ensuite été simulés, comprenant l'isolation des murs par l'extérieur à l'aide d'aérogel de silice, l'isolation de la toiture par polystyrène expansé, le remplacement des fenêtres par du double vitrage, ainsi que la mise en place d'équipements plus performants (chaudière à condensation, climatiseurs inverter, éclairage LED). Les déperditions thermiques totales ont été réduites de plus de 40 %, et les besoins annuels en chauffage et climatisation ont diminué de près de 48 %.

L'analyse a montré une baisse significative des consommations énergétiques et des factures, avec un retour sur investissement intéressant. Ces résultats démontrent qu'une rénovation énergétique bien pensée peut améliorer considérablement le confort thermique, réduire les coûts de fonctionnement et contribuer à la construction durable.

### **Mots clés :**

Performance énergétique, isolation thermique, rénovation, déperditions, aérogel de silice, double vitrage, équipements performants, confort thermique, consommation énergétique, construction durable.

# Sommaire

Introduction générale .....	1
Chapitre I : Fondements théoriques de la performance énergétique des bâtiments .....	3
I.1 Définition et importance de la performance énergétique.....	4
I.1.1 Consommation énergétique.....	4
I.1.2 Déperdition thermique .....	6
I.1.3 Efficacité énergétique .....	7
I.1.4 Importance de l'Optimisation Thermique.....	8
I.1.5 Enjeux économiques, environnementaux et sociaux .....	9
I.2 Facteurs clés influençant la performance énergétique .....	9
I.2.1 Enveloppe du bâtiment.....	9
I.2.2 Technologies et innovations .....	16
I.2.3 Ponts Thermiques .....	23
I.3 Cadre réglementaire et normatif .....	30
I.3.1 Normes Énergétiques et Codes de Construction .....	30
I.3.2 Règlementations Locales .....	31
I.3.3 Certifications et labels.....	32
Chapitre II : Isolation Thermique et matériaux de construction.....	34
Introduction .....	35
II.1 Isolation Thermique et matériaux de construction :.....	35
II.1.1 Techniques d'isolation.....	35
II.2 Performances des isolants.....	45
II.2.1 Propriétés thermiques des différents isolants .....	45
II.3 Comparaison entre isolants traditionnels et modernes.....	51
II.4 Propriétés thermiques des matériaux .....	51
II.5 Matériaux couramment utilisés :.....	61
II.6 Nouveaux matériaux .....	63
II.6.1 Bétons légers .....	63
II.6.2 Matériaux à changement de phase (PCM).....	64

II.7 Impact sur la Performance Énergétique .....	64
II.7.1 Solutions et techniques .....	64
II.7.2 Impacts .....	66
II.7.3 Défis .....	66
Conclusion .....	67
Chapitre III : Etude de cas .....	68
Introduction .....	69
III.1 Présentation de la wilaya .....	69
III.2 Paramètre du bâtiment (cas de base) : .....	70
III.2.1 Présentation du site du cas d'étude .....	70
III.2.2 Données architecturales de la maison .....	71
III.2.3 Données géographiques de la maison .....	71
III.2.4 Données températures de Tlemcen .....	71
III.2.5 Caractéristique des fenêtres .....	72
III.2.6 Caractéristique des portes .....	72
III.2.7 Dimensions des éléments résistants .....	72
III.3 Calcul des déperditions .....	72
III.3.1 Données de calcul .....	72
III.3.2 Calcul des déperditions à travers les parois en contact avec l'extérieur .....	75
III.3.3 Calcul des déperditions par renouvellement d'air .....	76
III.4 Besoins en Chauffage et en climatisation .....	77
III.4.1 Notions du degré jours pour le chauffage et/ou refroidissement : .....	77
III.4.2 Intégration des besoins en eau chaude sanitaire (ECS) .....	78
III.5 Bilan de puissance .....	79
III.5.1 Méthodologie de calcul .....	79
III.5.2 Pour la saison d'été .....	80
III.5.3 Pour la saison d'hiver .....	81
III.5.4 La consommation mensuelle d'électricité et du gaz .....	82
III.5.5 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz .....	84
III.6 Estimation de la facture .....	85
III.6.1 L'estimation de la facture pour l'été .....	86
III.6.2 L'estimation de la facture pour l'hiver .....	87

Conclusion.....	88
Chapitre IV : Optimisation Énergétique et interprétations des résultats.....	89
Introduction .....	90
IV.1 Présentation des modifications apportées .....	90
IV.1.1 Isolation thermique des parois .....	90
IV.1.2 Choix d'équipement.....	92
IV.1.3 Fenêtre à double vitrage .....	94
IV.1.4 Tableau comparatif des performances des parois isolées .....	94
IV.2 Recalcul des déperditions après isolation .....	95
IV.2.1 Calcul des déperditions surfaciques après isolation .....	95
IV.2.2 Déperditions par renouvellement d'air (inchangé).....	96
IV.2.3 Déperdition totale après travaux .....	96
IV.3 Recalcul des besoins en chauffage et en climatisation.....	96
IV.3.1 Rappel de la formule de calcul des besoins énergétiques.....	97
IV.3.2 Calcul du nouveau coefficient G après isolation.....	97
IV.3.3 Recalcul des besoins annuels en chauffage et climatisation .....	97
IV.4 Bilan de puissance après les modifications .....	98
IV.4.1 Pour la saison d'été .....	98
IV.4.2 Pour la saison d'hiver .....	99
IV.4.3 La consommation mensuelle d'électricité et du gaz .....	100
IV.4.4 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz .....	102
IV.5 Estimation de la facture .....	103
IV.5.1 L'estimation de la facture pour l'été.....	103
IV.5.2 L'estimation de la facture pour l'hiver .....	105
IV.6 Interprétation des résultats .....	106
Conclusion.....	107
Conclusion générale.....	108
Références bibliographiques .....	109
ANNEXES .....	113
Les appareillages existants.....	114
Les appareillages proposés .....	125

## Liste des figures

Figure I.1 Etiquette de performance énergétique .....	6
Figure I.2 Les principaux composants de l'enveloppe du bâtiment .....	10
Figure I.3 Différents types de matériaux du mur .....	12
Figure I.4 Techniques d'isolation .....	12
Figure I.5 Types de toitures.....	13
Figure I.6 Matériaux de couverture.....	14
Figure I.7 Types de vitrages .....	14
Figure I.8 Matériaux de cadres.....	15
Figure I.9 Matériaux biosourcés.....	16
Figure I.10 Toitures végétalisées.....	22
Figure I.11 Types de ponts thermiques .....	24
Figure I.12 Problèmes d'humidité et de condensation.....	26
Figure I.13 Caméra thermique .....	28
Figure I.14 Caméra d'imagerie thermique Cibor Eindhoven 1041 .....	29
Figure II.1 Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI).....	37
Figure II.2 Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE).....	37
Figure II.3 Isolation Répartie .....	38
Figure II.4 Laine de mouton.....	40
Figure II.5 Chanvre .....	40
Figure II.6 Ouate cellulose .....	41
Figure II.7 Liège.....	41
Figure II.8 Pailles .....	42
Figure II.9 Mycélium .....	42
Figure II.10 Aérogel.....	43
Figure II.11 Panneaux Isolants sous Vide (PIV).....	43
Figure II.12 Matériaux à Changement de Phase (PCM) .....	44
Figure II.13 Isolation par projection.....	44

Figure II.14 Peinture thermique .....	45
Figure II.15 Méthode flux métrique .....	46
Figure II.16 Méthode Plaque Chaude Gardée .....	47
Figure II.17 Méthode Fil chaude .....	48
Figure II.18 Bétons légers .....	63
Figure III.1 Situation Nationale de la wilaya de Tlemcen .....	69
Figure III.2 Plan général du bâtiment cas de base.....	70
Figure III.3 La répartition de la consommation mensuelle d'électricité par type d'équipements en été .....	82
Figure III.4 La répartition de la consommation mensuelle d'électricité par type d'équipements en hiver .....	83
Figure III.5 La consommation trimestrielle d'électricité pour les saisons d'été et d'hiver.....	84
Figure IV.1 La répartition de la consommation mensuelle d'électricité par type d'équipements avant et après les modifications .....	101
Figure IV.2 La consommation trimestrielle d'électricité pour les saisons d'été et d'hiver. ..	102
Figure IV.3 La consommation trimestrielle du gaz pour les saisons d'été et d'hiver.....	103

### **Liste des tableaux**

Tableau I.1 Les classes énergie et leurs seuils (en KWh EP/m <sup>2</sup> /an) .....	5
Tableau II.1 La différence entre (ITI)et (ITE) .....	38
Tableau II.2 Comparaison entre isolants traditionnels et modernes .....	51
Tableau II.3 Matériaux couramment utilisés : brique, béton, bois.....	61
Tableau III.1 Caractéristiques architecturales .....	71
Tableau III.2 Caractéristiques géométriques.....	71
Tableau III.3 Données températures de Tlemcen.....	71
Tableau III.4 Caractéristiques de fenêtre de base.....	72
Tableau III.5 Caractéristiques des portes .....	72

Tableau III.6 Composants et caractéristiques du plancher terrasse .....	73
Tableau III.7 Composants et caractéristiques du plancher bas sur terre-plein.....	73
Tableau III.8 Composants et caractéristiques du mur en double cloisons .....	74
Tableau III.9 Composants et caractéristiques des poutres longitudinales.....	74
Tableau III.10 Composants et caractéristiques thermiques du poteau .....	75
Tableau III.11 Déperditions surfaciques vers l'extérieur .....	76
Tableau III.12 Calcul du nombre de degrés jours mensuel (Dj) .....	77
Tableau III.13 Calcul les besoins en Chauffage et en climatisation annuel C (KWh).....	78
Tableau III.14 Calcul les besoins en Chauffage et en climatisation mensuelle C (KWh) .....	78
Tableau III.15 La consommation d'électricité.....	80
Tableau III.16 La consommation du gaz.....	80
Tableau III.17 La consommation d'électricité.....	81
Tableau III.18 La consommation du gaz.....	81
Tableau III.19 La consommation mensuelle d'électricité des équipements en été.....	82
Tableau III.20 La consommation mensuelle d'électricité des équipements en hiver .....	83
Tableau III.21 La consommation mensuelle du gaz des équipements en été.....	83
Tableau III.22 La consommation mensuelle du gaz des équipements en hiver.....	83
Tableau III.23 La consommation trimestrielle d'électricité en été et en hiver.....	84
Tableau III.24 La consommation trimestrielle du gaz en été et en hiver .....	84
Tableau III.25 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en été.....	86
Tableau III.26 Le cout d'électricité pour l'été .....	86
Tableau III.27 Le cout de gaz pour l'été .....	86
Tableau III.28 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en hiver .....	87
Tableau III.29 Le cout d'électricité pour l'hiver .....	87
Tableau III.30 Le cout de gaz pour l'hiver.....	87
Tableau IV.1 Coefficient de conductance K avant et après l'isolation de murs .....	91
Tableau IV.2 Coefficients de conductance K avant et après l'isolation de plancher (terrasse).....	92
Tableau IV.3 Coefficients de conductance K des fenêtres.....	94
Tableau IV.4 Comparaisons des performances des parois isolées.....	94
Tableau IV.5 Nouvelle déperditions surfaciques vers l'extérieur .....	95
Tableau IV.6 Comparaison avec l'état initial.....	96
Tableau IV.7 Les besoins en Chauffage et en climatisation annuel C (KWh) après l'isolation .....	97

Tableau IV.8 Les besoins en Chauffage et en climatisation mensuelle C (KWh) avant et après l'isolation .....	97
Tableau IV.9 La consommation d'électricité après les modifications pour la saison d'été .....	98
Tableau IV.10 La consommation du gaz après les modifications.....	98
Tableau IV.11 La consommation de l'électricité après les modifications pour la saison d'hiver .....	99
Tableau IV.12 La consommation du gaz après les modifications pour la saison d'hiver.....	100
Tableau IV.13 La consommation mensuelle d'électricité des équipements en été après les modifications.....	100
Tableau IV.14 La consommation mensuelle du gaz des équipements en été après les modifications.....	101
Tableau IV.15 La consommation mensuelle du gaz des équipements en hiver après les modifications.....	101
Tableau IV.16 La consommation trimestrielle d'électricité en été et en hiver .....	102
Tableau IV.17 La consommation trimestrielle du gaz en été et en hiver .....	103
Tableau IV.18 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en hiver après les modifications.....	103
Tableau IV.19 Le cout d'électricité pour l'été après les modifications .....	104
Tableau IV.20 Le cout de gaz pour l'été après les modifications .....	104
Tableau IV.21 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en hiver après les modifications.....	105
Tableau IV.22 Le cout d'électricité pour l'hiver après les modifications.....	105
Tableau IV.23 Le cout de gaz pour l'hiver après les modifications.....	105

## Tableau de Nomenclature

Ce tableau regroupe les principaux symboles, variables et abréviations utilisées dans ce mémoire, accompagnés de leur définition et de leurs unités.

### Symboles et Variables

Symbole/ Variable	Définition	Unité
Ds	Déperdition surfacique	W/°C
DR	Déperdition par renouvellement d'air	W/°C
DT	Déperdition thermique totale	W/°C
K	Coefficient de transmission thermique	W/(m <sup>2</sup> .°C)
A	Surface	m <sup>2</sup>
τ	Taux de renouvellement d'air	1/h
Vi	Volume de maison	m <sup>3</sup>
DJ	Degrés-jours unifiés	°C·jour
T	Température	°C
λ	Conductivité thermique	W/(m·K)
R	Résistance thermique	m <sup>2</sup> .°C/W
U	Coefficient de transmission thermique global	W/(m <sup>2</sup> .K)
K	Coefficient de transmission thermique	W/(m <sup>2</sup> .K)
Cp	Capacité thermique massique de l'air	J/(kg·K)
ρ	Masse volumique de l'air	kg/m <sup>3</sup>
H	Hauteur	m
G	Coefficient de déperdition thermique volumique	W/(m <sup>3</sup> .K)

Symbole/ Variable	Définition	Unité
E	Énergie	kWh
t	Temps	h / an
$\Delta T$	Différence de température	°C
q	Débit d'air	m <sup>3</sup> /h
Text	Température extérieure	°C
Tint	Température intérieure	°C
Rtot	Résistance thermique totale	m <sup>2</sup> .K/W
e	Épaisseur	m
Rsi	Résistance superficielle interne	m <sup>2</sup> .K/W
Rse	Résistance superficielle externe	m <sup>2</sup> .K/W
Pu	Puissance d'utilisation d'un appareil	W
DJC	Degrés-jours de chauffage	°C·jour
DJF	Degrés-jours de froid	°C·jour
q	Représente le flux thermique	W/m <sup>2</sup>
dT/dx	Gradient de température	K/m
$\alpha$	Coefficient de dilatation linéaire	°C <sup>-1</sup>
$\beta$	Représente le coefficient de dilatation volumique	°C <sup>-1</sup>
L0	Correspond à la longueur initiale	m
$\Delta L$	Représente la variation de longueur	m

## Abréviation

<b>Abréviation</b>	<b>Signification complète</b>
EN	Norme Européenne
NF	Norme Française
DPE	Diagnostic de Performance Énergétique
ECS	Eau Chaude Sanitaire
TVA	Taxe sur la Valeur Ajoutée
ITE	Isolation Thermique par l'Extérieur
ITI	Isolation Thermique par l'intérieur
ITR	Isolation Thermique par répartie
PSE	Polystyrène Expansé
LED	Diode Électroluminescente
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée
RT	Réglementation Thermique
BBC	Bâtiment Basse Consommation
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
COP	Coefficient de Performance
PCM	Matériaux à Changement de Phase
VIP	Panneaux isolants sous vide
ADEME	Agence de la transition écologique
DPEB	Directive sur la performance énergétique des bâtiments
NMPE	Normes minimales de performance énergétique
IECC	Code international de conservation de l'énergie
SGE	Système de gestion de l'énergie

Abréviation	Signification complète
W	Watt
m	Mètre
°C	Degré Celsius
K	Kelvin
h	Heure
an	Année
kg	Kilogramme
J	Joule
m <sup>2</sup>	Mètre carré
m <sup>3</sup>	Mètre cube
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de Carbone
DA	Dinar Algérien
KWh	Kilowattheure

### **Introduction générale**

L'efficacité énergétique des bâtiments est aujourd'hui au cœur des enjeux environnementaux, économiques et sociaux. Dans un contexte de hausse des coûts de l'énergie et de lutte contre le changement climatique, la réduction des consommations énergétiques du secteur du bâtiment devient une priorité. Pour cela, il est essentiel de maîtriser les principes de la performance thermique, de connaître les matériaux adaptés, et de mettre en œuvre des solutions concrètes d'amélioration.

Ce mémoire s'inscrit dans cette démarche, en étudiant la performance énergétique d'un bâtiment résidentiel et en proposant des solutions techniques permettant d'en optimiser le comportement thermique.

Le travail est organisé en **quatre chapitres** complémentaires et progressifs :

- Le **chapitre 1** présente les **fondements théoriques** de la performance énergétique des bâtiments. Il introduit les notions clés telles que les déperditions thermiques, la consommation énergétique, ainsi que les facteurs qui influencent ces performances. Il expose également le cadre normatif applicable dans le domaine de la construction.
- Le **chapitre 2** est consacré à l'**étude des techniques d'isolation thermique** et des **matériaux de construction**. Il analyse les performances des isolants traditionnels et innovants, ainsi que les propriétés thermiques des matériaux les plus couramment utilisés dans le bâtiment.
- Le **chapitre 3** propose une **étude thermique du bâtiment à l'état initial**. Il comprend l'analyse des déperditions thermiques, le calcul des besoins en chauffage et climatisation, ainsi qu'une estimation de la consommation énergétique et des coûts associés.
- Le **chapitre 4** présente les **solutions d'amélioration énergétique** proposées pour le bâtiment. Il détaille les choix d'isolants, les équipements remplacés, les nouvelles performances thermiques, et compare les consommations avant/après travaux. Ce chapitre se conclut par une analyse des résultats, des gains réalisés et des bénéfices attendus à court et long terme.

## *Introduction générale*

À travers cette démarche complète, ce mémoire vise à démontrer qu'une rénovation énergétique bien pensée permet non seulement de réduire les consommations et les factures, mais aussi d'améliorer le confort intérieur et de contribuer aux objectifs de développement durable dans le secteur du bâtiment.

---

*Chapitre I :*

*Fondements théoriques de la  
performance énergétique  
des bâtiments*

---

## **I.1 Définition et importance de la performance énergétique**

### **I.1.1 Consommation énergétique**

#### **I.1.1.1 Définition**

La consommation énergétique est la quantité totale d'énergie employée par un système, qu'il s'agisse d'un ménage, d'un équipement (comme les climatiseurs ou les chaudières), voire d'un bâtiment entier. Elle est généralement exprimée en unités telles que le kilo watt-heure (kWh) pour les appareils individuels et en kWh/m<sup>2</sup>/an pour les logements.

#### **I.1.1.2 Facteurs Influençant la Consommation Énergétique**

Plusieurs facteurs influencent cette consommation :

**Rendement des Equipements** : Le rendement des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation affecte directement leur consommation.

**Isolation Thermique** : Une bonne isolation réduit considérablement les pertes de chaleur et donc la consommation énergétique nécessaire au chauffage.

**Comportements Utilisateurs** : Les habitudes des occupants concernant l'utilisation de l'éclairage, du chauffage et autres équipements ont un impact significatif.

#### **I.1.1.3 Mesure et Classification**

La mesure et la classification de la consommation énergétique reposent sur plusieurs méthodes et systèmes, notamment le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) en France, qui est la référence pour évaluer la performance énergétique des bâtiments.

##### **➤ Mesure de la consommation énergétique**

Plusieurs méthodes permettent de mesurer la consommation énergétique d'un bâtiment ou d'une installation :

- **Utilisation de compteurs d'énergie** : Ces compteurs mesurent directement la quantité d'énergie consommée sur un site, avec des compteurs à intervalles pouvant analyser les données à des fréquences d'une heure ou moins, ce qui permet un suivi précis avant et après la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique.
- **Analyse des factures d'énergie** : Cette méthode consiste à analyser les factures sur une période donnée (souvent 3 ans) pour déterminer la consommation réelle, particulièrement utile pour les logements anciens ou avec chauffage collectif.

- **Logiciels d'analyse et calculs conventionnels** : Par exemple, la méthode 3 CL (Calcul de la Consommation Conventiionnelle des Logements) développée par l'ADEME, qui calcule la consommation énergétique en prenant en compte les déperditions thermiques, les apports internes et solaires, et les besoins énergétiques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Cette méthode intègre également des hypothèses sur l'occupation moyenne du logement et la température intérieure.
- **Classification de la consommation énergétique** :

La classification énergétique des logements en France est réalisée via le DPE, qui attribue une étiquette énergie allant de A à G, selon la consommation d'énergie primaire (kWh EP/m<sup>2</sup>/an) et les émissions de gaz à effet de serre associées. Cette classification permet d'anticiper les coûts énergétiques et d'évaluer la performance environnementale d'un bien immobilier.

*Tableau I.1 Les classes énergie et leurs seuils (en kWh EP/m<sup>2</sup>/an)*

<b>Classe</b>	<b>Consommation d'énergie primaire</b>	<b>Description</b>
UN	≤ 70	Logements très performants, souvent neufs, très bien isolés, parfois à énergie positive (BEPOS)
B	71 à 110	Bâtiments basse consommation (BBC), avec isolation renforcée et systèmes performants
C	111 à 180	Logements récents, performants, souvent avec chauffage central au gaz ou fioul
D	181 à 250	Logements des années 1980-1990, souvent rénovés partiellement
E	251 à 330	Logements anciens, performances moyennes à mauvaises, souvent chauffés à l'électricité
F	331 à 420	Logements anciens nécessitant un bouquet de travaux pour améliorer l'efficacité
G	> 421	Passoires thermiques, très énergivores, souvent interdites à la location si >450 kWh EP/m <sup>2</sup> /an

Cette classification est accompagnée de l'étiquette climatique qui renseigne sur les émissions de CO<sub>2</sub>, également classées de A à G.

➤ **Utilité de la classification énergétique**

- Elle informe les propriétaires, acheteurs et locataires sur la consommation énergétique et les coûts associés.
- Elle guide les travaux de rénovation énergétique en identifiant les priorités (isolation, système de chauffage, etc.).
- Elle influence la valeur immobilière : un logement classé A ou B se vend ou se loue plus cher qu'un logement classé F ou G, avec des différences pouvant atteindre 17 % à 20 % selon les régions.

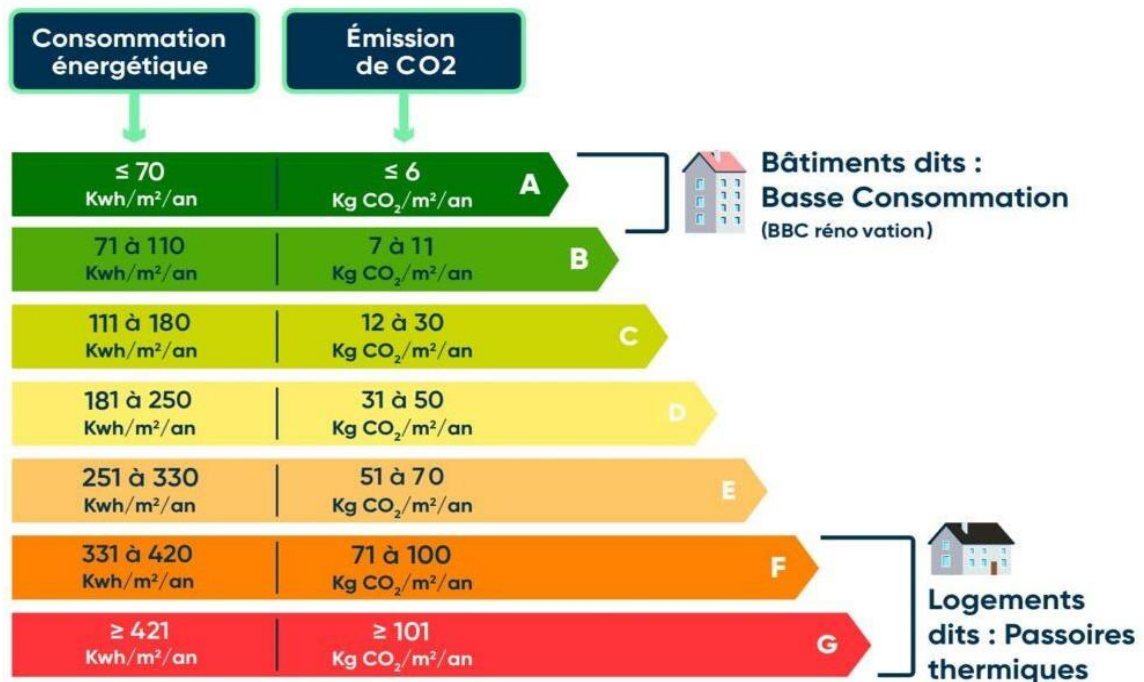


Figure I.1 Etiquette de performance énergétique [1]

## I.1.2 Déperdition thermique

### I.1.2.1 Définition

La déperdition thermique désigne la perte de chaleur (ou de fraîcheur) d'un bâtiment en raison d'une isolation insuffisante ou inadéquate. Ce phénomène se produit lorsque la température intérieure est supérieure à celle extérieure, entraînant une fuite silencieuse de l'énergie vers l'extérieur.

### I.1.2.2 Causes

Les principales causes des déperditions thermiques incluent :

- **Isolation Insuffisante** : Les murs, toits et sols mal isolés sont responsables d'une grande partie des pertes thermiques.

- **Ponts Thermiques** : Ces zones où l'isolation est interrompue (par exemple aux jonctions entre murs et toiture) favorisent les fuites de chaleur.
- **Ventilation Inadéquate** : Un renouvellement d'air insuffisant peut également contribuer aux pertes énergétiques.

### **I.1.2.3 Impacts sur la Performance Énergétique**

Les déperditions thermiques ont plusieurs impacts significatifs sur la performance énergétique

**-Consommation Énergétique Accrue** : Une mauvaise isolation force à augmenter le chauffage pour maintenir une température confortable, ce qui entraîne une consommation accrue d'énergie et donc des factures plus élevées.

**-Confort Réduit** : Les logements soumis à ces pertes sont souvent inconfortables en raison des courants d'air froids ou chauds selon les saisons, ainsi que du taux d'humidité accru qui peut affecter la santé respiratoire.

**-Impact Environnemental** : L'utilisation excessive de combustibles fossiles pour compenser ces pertes augmente les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au réchauffement climatique global.

### **I.1.3 Efficacité énergétique**

#### **I.1.3.1 Définition de l'efficacité énergétique**

L'efficacité énergétique est définie comme le rapport entre l'énergie utile produite par un système et l'énergie totale consommée pour son fonctionnement. Elle vise à optimiser la conversion de l'énergie en service rendu tout en minimisant les pertes. Par exemple, un système d'éclairage LED est plus efficace qu'une ampoule classique car il produit la même intensité lumineuse avec moins d'énergie.

#### **I.1.3.2 Définition de la Performance Énergétique**

La performance énergétique, quant à elle, concerne globalement la capacité d'un bâtiment ou d'un système à utiliser efficacement l'énergie pour maintenir un niveau donné de confort tout en minimisant les coûts et impacts environnementaux. Elle englobe non seulement les systèmes individuels mais aussi leur intégration dans le fonctionnement global du bâtiment.

#### **I.1.3.3 Différences Clés**

- **Portée** : L'efficacité se concentre sur des systèmes spécifiques (chauffage, climatisation), tandis que la performance englobe le bâtiment entier.

- **Objectifs** : L'efficacité vise principalement à réduire les pertes lors du processus de conversion, alors que la performance intègre plusieurs objectifs comme confort des occupants et impact environnemental.

- **Mesure** : L'efficacité est souvent mesurée par des indicateurs tels que le COP (Coefficient of Performance), tandis que la performance utilise des labels qui prennent en compte divers facteurs incluant isolation thermique et ventilation mécanique contrôlée (VMC).

#### **I.1.4 Importance de l'Optimisation Thermique**

##### **I.1.4.1 Réduction des Coûts Énergétiques**

L'optimisation thermique permet de minimiser les pertes de chaleur et d'améliorer l'efficacité des systèmes de chauffage et refroidissement, ce qui se traduit par une consommation d'énergie réduite. Cela entraîne des économies significatives sur les factures énergétiques pour les occupants et les gestionnaires de bâtiments.

##### **I.1.4.2 Contribution à la Transition Énergétique**

En réduisant la consommation d'énergie, l'optimisation thermique favorise le recours aux sources renouvelables, diminuant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles. Cela contribue activement à la transition énergétique vers un modèle plus durable.

##### **I.1.4.3 Lutte Contre le Changement Climatique**

La diminution des émissions de gaz à effet de serre résultant d'une meilleure efficacité énergétique est essentielle dans le combat contre le changement climatique. En optimisant l'enveloppe du bâtiment (isolation, fenêtres) et en utilisant des systèmes plus performants, on peut considérablement réduire ces émissions.

##### **I.1.4.4 Solutions Clés**

- **Amélioration Isolante** : Utiliser des matériaux isolants performants pour toitures et murs extérieurs.

- **Systèmes Économes** : Adopter des systèmes de chauffage/refroidissement plus efficaces.

- **Gestion Intelligente** : Mettre en place un suivi continu pour ajuster automatiquement la consommation selon les besoins réels.

Ces actions non seulement allègent le budget mais aussi participent activement au développement durable en protégeant l'environnement.

### **I.1.5 Enjeux économiques, environnementaux et sociaux**

#### **I.1.5.1 Enjeux Économiques**

- **Économies d'Énergie** : L'amélioration de la performance énergétique permet de réduire considérablement les coûts énergétiques pour les occupants et les gestionnaires. Cela se traduit par une diminution des factures d'électricité et de gaz.
- **Création d'Emplois** : Les travaux de rénovation énergétique génèrent des emplois dans le secteur du bâtiment, contribuant ainsi à la croissance économique locale.

#### **I.1.5.2 Enjeux Environnementaux**

- **Réduction des Émissions de CO<sub>2</sub>** : La construction durable vise à minimiser l'empreinte carbone en utilisant des matériaux respectueux de l'environnement et en favorisant les énergies renouvelables. Cela contribue à réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre.
- **Conservation des Ressources Naturelles** : L'utilisation efficace des ressources naturelles (eau, sols) est cruciale pour préserver notre patrimoine écologique.

#### **I.1.5.3 Enjeux Sociaux**

- **Amélioration du Confort des Usagers** : Un habitat sain améliore le bien-être physique et mental grâce à une meilleure qualité d'air intérieur, isolation acoustique, etc. Cela favorise un environnement plus sain pour vivre ou travailler.
- **Accès au Logement Digne** : La construction durable favorise un accès plus large à un logement décent tout en réduisant la précarité énergétique pour les foyers modestes.

Ces aspects convergent vers une approche globale qui allie durabilité environnementale avec confort social et rentabilité économique.

## **I.2 Facteurs clés influençant la performance énergétique**

### **I.2.1 Enveloppe du bâtiment**

#### **I.2.1.1 Définition**

L'enveloppe du bâtiment est la barrière physique qui sépare l'environnement intérieur d'un bâtiment de l'environnement extérieur. Elle est essentielle pour protéger les occupants et le contenu du bâtiment contre les intempéries, tout en régulant les conditions climatiques internes.

### I.2.1.2 Composants de l'enveloppe du bâtiment

Les principaux composants de l'enveloppe comprennent :

- **Murs extérieurs** : Ils assurent la structure et l'isolation du bâtiment.
- **Toiture** : Protège contre les prélèvements et régule la température.
- **Fenêtres et portes** : Contrôlez la lumière naturelle et la ventilation.
- **Planchers** : Surtout ceux en contact avec le sol ou l'extérieur.
- **Fondations** : Assurent la stabilité et la protection contre l'humidité.

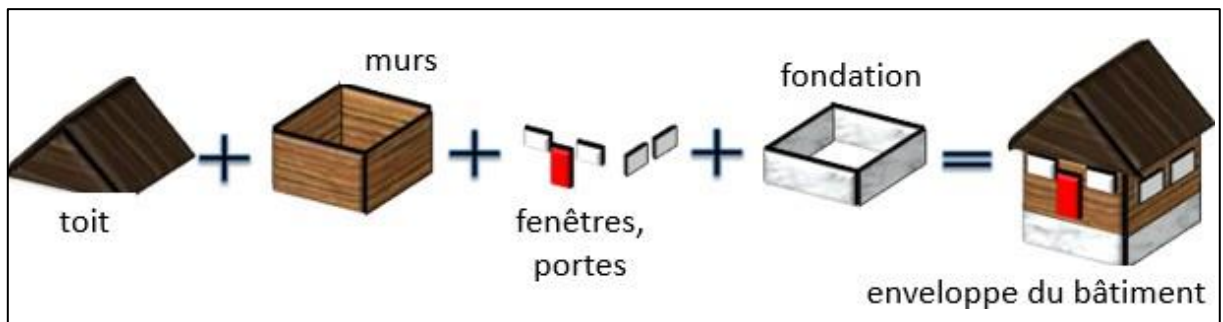


Figure I.2 Les principaux composants de l'enveloppe du bâtiment [2]

### I.2.1.3 Rôle principal de l'enveloppe du bâtiment

- **Protection contre les éléments** : L'enveloppe protège l'intérieur du bâtiment contre les intempéries telles que la pluie, la neige, le vent et le soleil, assurant ainsi un environnement intérieur stable et sécurisé.
- **Régulation thermique** : Elle aide à maintenir une température agréable à l'intérieur en contrôlant les flux de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur, notamment les besoins en chauffage et climatisation.
- **Gestion de l'humidité** : L'enveloppe empêche les infiltrations d'eau et régule les niveaux d'humidité pour éviter les dommages causés par la condensation et maintenir un air sain.
- **Contrôle de l'air** : Elle assure l'étanchéité à l'air, notamment les fuites d'air et les pertes d'énergie associées.
- **Structure de soutien** : L'enveloppe contribue à la stabilité structurelle du bâtiment en supportant et en transférant les charges imposées par l'environnement et le bâtiment lui-même.
- **Esthétique et fonctionnalité** : Elle répond également à des exigences esthétiques tout en abritant les conduites et réseaux nécessaires au fonctionnement du bâtiment.

#### **I.2.1.4 Importance de l'enveloppe du bâtiment**

##### **✓ Enjeux énergétiques et environnementaux**

**-Réduction des émissions de gaz à effet de serre** : Une enveloppe bien conçue et isolée peut considérablement diminuer la consommation énergétique d'un bâtiment, ce qui contribue à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et à atteindre les objectifs de décarbonation.

**-Efficacité énergétique** : Les enveloppes performantes sont essentielles pour atteindre les normes d'efficacité énergétique actuelles, réduisant ainsi les coûts énergétiques et l'empreinte carbone des bâtiments.

##### **✓ Impact sur le confort et la santé des occupants**

**-Qualité de l'air intérieur** : L'enveloppe contrôle la qualité de l'air intérieur en régulant l'humidité et en prévenant les infiltrations d'air extérieur pollué.

**-Confort thermique** : Elle assure un confort thermique optimal en régulant la température intérieure, ce qui est essentiel pour la santé et le bien-être des occupants.

#### **I.2.1.5 Analyse des composantes de l'enveloppe**

##### **a). Murs**

##### **➤ Différents types de matériaux**

Les murs peuvent être construits avec divers matériaux, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients :

- **Béton** : Résistant et durable, mais peut nécessiter une isolation supplémentaire pour améliorer les performances thermiques.
- **Bois** : Utilisé dans les constructions traditionnelles, il offre une bonne isolation naturelle mais peut être sensible à l'humidité.
- **Brique** : Matériau classique, souvent utilisé pour sa durabilité et son esthétique, mais nécessite une isolation pour réduire les pertes de chaleur



Figure I.3 Différents types de matériaux du mur

➤ **Techniques d'isolation**

Les techniques d'isolation des murs incluent :

- **Isolation intérieure** : Placée à l'intérieur du mur, elle peut être plus facile à installer lors de rénovations mais peut réduire l'espace intérieur.
- **Isolation extérieure** : Appliquée à l'extérieur du mur, elle protège contre les intempéries et améliore l'efficacité énergétique.
- **Isolation répartie** : Intégrée dans le mur lui-même, elle offre une bonne répartition de la chaleur et de la fraîcheur



**Extérieur**



**Intérieure**



**Répartie**

Figure I.4 Techniques d'isolation

➤ **Performances thermiques et acoustiques**

Les murs bien isolés réduisent les pertes de chaleur en hiver et maintiennent la fraîcheur en été, améliorant ainsi le confort intérieur. En outre, une bonne isolation acoustique des murs est essentielle pour réduire les bruits extérieurs et intérieurs.

**b). Toiture**

➤ **Types de toitures**

Les toitures peuvent être classées en plusieurs types :

- **Toitures plates** : Souvent utilisées pour les toits-terrasses, elles nécessitent une étanchéité particulière et peuvent être végétalisées pour améliorer l'efficacité énergétique.
- **Toitures inclinées** : Plus courantes, elles permettent une meilleure évacuation des eaux pluviales et peuvent être recouvertes de divers matériaux



**Plate**



**Inclinée**

*Figure I.5 Types de toitures*

➤ **Matériaux de couverture**

Les matériaux de couverture incluent :

- **Tuiles** : Traditionnelles et durables, elles offrent une bonne protection contre les intempéries.
- **Ardoise** : Résistante et esthétique, mais peut être lourde et coûteuse.
- **Métal** : Léger et résistant, souvent utilisé pour les toits modernes.



*Tuiles*



*Ardoise*



*Métal*

*Figure I.6 Matériaux de couverture*

➤ **Isolation et étanchéité**

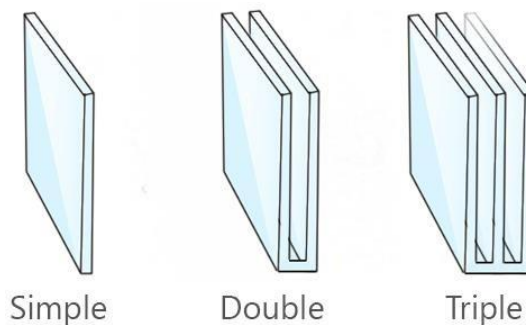
L'isolation des toitures est cruciale pour réduire les pertes de chaleur. Les systèmes multicouches, incluant un pare-vapeur, un isolant thermique, une couche d'étanchéité et une protection mécanique, assurent une protection optimale contre les éléments. Les membranes bitumineuses et les produits d'étanchéité liquide sont couramment utilisés pour garantir l'étanchéité.

c). Fenêtres et portes

➤ **Types de vitrages**

Les vitrages peuvent être :

- **Simple vitrage** : Moins efficace en termes d'isolation thermique.
- **Double vitrage** : Offre une meilleure isolation thermique et acoustique.
- **Triple vitrage** : Maximise l'efficacité énergétique et réduit les bruits extérieurs.

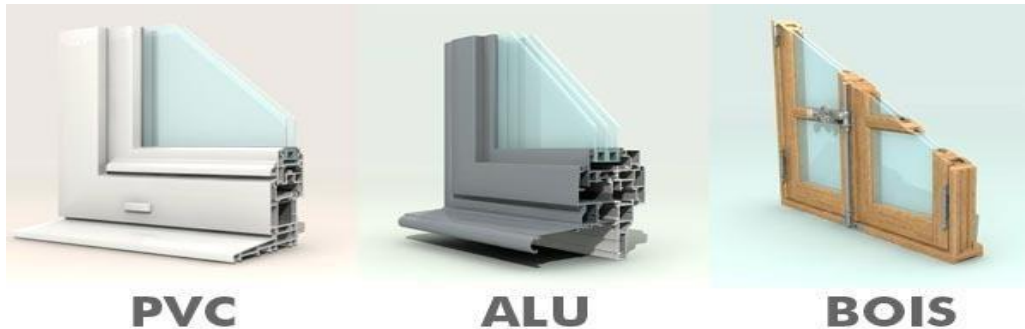


*Figure I.7 Types de vitrages [3]*

➤ **Matériaux de cadres**

Les cadres peuvent être faits de :

- **PVC** : Léger et économique, souvent utilisé pour les fenêtres modernes.
- **Bois** : Traditionnel et esthétique, mais nécessite un entretien régulier.
- **Aluminium** : Résistant et léger, souvent utilisé pour les constructions industrielles.



*Figure I.8 Matériaux de cadres [4]*

➤ **Performances en termes d'isolation et d'apport solaire**

Les fenêtres bien isolées réduisent les pertes de chaleur et permettent un apport solaire optimal, ce qui peut contribuer à réduire les coûts énergétiques. Les vitrages spéciaux, comme les vitres à faible émissivité, améliorent encore ces performances.

**d). Fondations et planchers**

➤ **Importance de l'isolation des fondations**

L'isolation des fondations est essentielle pour éviter les pertes de chaleur par le sol. Elle contribue à maintenir une température stable à l'intérieur du bâtiment et réduit les risques de condensation, ce qui peut prévenir les moisissures et les dommages structurels.

➤ **Impact des ponts thermiques**

Les ponts thermiques sont des zones où l'isolation est moins efficace, souvent aux jonctions entre les murs et les planchers ou les toits. Ils peuvent causer des pertes de chaleur significatives et doivent être traités avec des matériaux spécifiques pour minimiser ces pertes et améliorer l'efficacité énergétique globale du bâtiment.

## **I.2.2 Technologies et innovations**

### **I.2.2.1 Matériaux innovants**

#### **a). Matériaux biosourcés**

Les matériaux biosourcés sont issus de la biomasse, d'origine végétale ou animale. Ils sont utilisés pour réduire l'empreinte environnementale des bâtiments et incluent :

- **Bois** : Utilisé pour les structures, l'isolation, et les finitions, le bois est renouvelable et offre de bonnes performances thermiques et acoustiques.
- **Chanvre** : Utilisé pour l'isolation et la construction de murs en béton de chanvre, il régule l'humidité et offre de bonnes performances thermiques.
- **Paille** : Économique et facile à installer, la paille est utilisée pour l'isolation thermique intérieure et extérieure.
- **Ouate de cellulose** : Issue de journaux recyclés, elle est utilisée pour l'isolation des combles et des murs.
- **Textiles recyclés** : Utilisés pour l'isolation des murs et des combles.



*Bois*



*Chanvre*



*Paille*



*Textiles recyclés*



*Ouate de cellulose*

*Figure I.9 Matériaux biosourcés*

### **Avantages des matériaux biosourcés**

- **Confort et performance** : Ils offrent un bon confort thermique et acoustique, ainsi qu'une régulation de l'hygrométrie.
- **Environnement et climat** : Ils contribuent à réduire l'empreinte carbone en stockant le carbone atmosphérique pendant leur cycle de vie.
- **Diversité des applications** : Adaptés à la construction neuve et à la rénovation, ils couvrent un large éventail d'applications, du gros œuvre à la finition.

### **b). Matériaux à changement de phase (MCP)**

Ces matériaux stockent et libèrent de la chaleur en changeant d'état physique sans modifier leur température, ce qui aide à réguler la température intérieure des bâtiments et à réduire les besoins en chauffage et climatisation.

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux capables de changer d'état physique, généralement entre l'état solide et liquide, dans une plage de température restreinte, typiquement entre 10°C et 80°C. Ce changement d'état permet de stocker et de restituer de la chaleur latente, ce qui est particulièrement utile pour réguler la température intérieure des bâtiments.

#### ➤ **Fonctionnement**

1. **Stockage de chaleur latente** : Lorsque la température ambiante augmente, le MCP fond, stockant la chaleur sous forme de chaleur latente. Cela permet de ralentir l'augmentation de la température intérieure du bâtiment.
2. **Restitution de chaleur** : Lorsque la température ambiante diminue, le MCP se solidifie, restituant la chaleur stockée. Cela aide à maintenir une température stable à l'intérieur du bâtiment.

#### ➤ **Types de MCP**

Les MCP peuvent être classés en plusieurs familles, notamment :

- **Composés organiques** : Comme l'acide formique ou l'acide dodécanoïque, qui ont des températures de fusion spécifiques.
- **Composés inorganiques** : Comme l'acétate trihydraté de sodium ou l'hydroxyde de sodium, qui sont également utilisés pour leur capacité à stocker de la chaleur latente.

➤ **Applications**

1. **Climatisation passive** : Les MCP sont utilisés pour réduire les besoins en climatisation active en régulant la température intérieure des bâtiments.
2. **Stockage d'énergie thermique** : Ils peuvent être intégrés dans des systèmes de stockage d'eau chaude solaire pour optimiser l'utilisation de l'énergie renouvelable.
3. **Amélioration de l'inertie thermique** : Intégrés dans les murs ou les toits, les MCP augmentent l'inertie thermique des bâtiments, notamment ainsi les fluctuations de température journalières. [5]

➤ **Exemples de produits**

**c). Matériaux intelligents et connectés**

Les matériaux intelligents et connectés sont conçus pour répondre à des stimuli externes tels que la température, la lumière ou les champs électriques. Ils intègrent souvent des technologies électroniques pour optimiser leur fonctionnement et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

➤ **Caractéristiques des matériaux intelligents**

- **Réactivité aux stimuli** : Ces matériaux peuvent changer de propriétés physiques en réponse à des changements environnementaux, comme la température ou la lumière.
- **Adaptabilité** : Ils peuvent s'adapter à leur environnement, par exemple en modifiant leur transparence ou leur couleur pour contrôler la chaleur et là.
- **Intégration de capteurs** : Les matériaux intelligents peuvent être associés à des capteurs pour collecter des données et ajuster leur comportement en conséquence.

➤ **Exemples de matériaux intelligents**

- **Verre intelligent** : Peut changer de transparence en réponse aux stimuli électriques ou thermiques, permettant de contrôler la lumière et la chaleur dans les bâtiments.
- **Alliages à mémoire de forme** : Ces matériaux peuvent reprendre leur forme initiale après avoir été déformés, ce qui est utile pour des applications où la flexibilité est requise.
- **Polymères électroactifs** : Ils peuvent changer de forme ou de propriétés en réponse à des stimuli électriques, ce qui est intéressant pour des applications mécaniques ou sensorielles.

#### **d). Matériaux connectés**

Les matériaux connectés font partie intégrante des bâtiments intelligents, où ils sont intégrés à des systèmes de capteurs et d'analyse de données pour optimiser le confort et l'efficacité énergétique. Ces systèmes utilisent l'Internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle pour automatiser et personnaliser les conditions de vie dans les bâtiments.

##### ➤ **Avantages**

- **Efficacité énergétique** : Les matériaux intelligents et connectés contribuent à réduire la consommation d'énergie en adaptant les conditions internes aux besoins réels.
- **Confort amélioré** : Ils permettent de maintenir un environnement intérieur optimal en ajustant les paramètres climatiques et lumineux.
- **Maintenance prédictive** : Les systèmes connectés facilitent la détection précoce des problèmes techniques, notamment ainsi que les coûts de maintenance.

#### **I.2.2.2 Solutions techniques avancées**

##### **a). Systèmes d'isolation sous vide (VIP)**

Les systèmes d'isolation sous vide, également appelés panneaux isolants sous vide (VIP), sont des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

##### **Composition et fonctionnement**

1. **Noyau microporeux** : Les VIP sont constitués d'un noyau microporeux, généralement à base de silice fumée ou de silice amorphe, qui est introduit dans une enveloppe multicouche étanche au gaz.
2. **Vidéo partielle** : L'ensemble est ensuite mis sous vide, ce qui réduit considérablement les transferts de chaleur par convection et conduction, offrant ainsi une isolation thermique exceptionnelle.
3. **Enveloppe étanche** : L'enveloppe métallisée ou multicouche protège le noyau et maintient le vide, assurant la durabilité des performances thermiques.

## Propriétés et avantages

- **Haute performance d'isolation** : Les VIP ont une conductivité thermique très faible, généralement entre 0,006 et 0,009 W/mK, ce qui est 3 à 5 fois supérieur aux isolants traditionnels.
- **Épaisseur minimale** : Ils permettent d'obtenir une efficacité maximale avec une épaisseur minimale, ce qui est particulièrement utile dans les espaces restreints.
- **Durabilité** : Les VIP conservent leurs propriétés sur une longue période, souvent supérieure à 50 ans, sous réserve d'une installation correcte.

## Utilisations

- **Construction neuve et rénovation** : Les VIP sont utilisés dans la construction neuve et la rénovation pour répondre aux normes énergétiques strictes, notamment dans les zones urbaines où l'espace est limité.
- **Applications spécifiques** : Ils sont également employés dans des applications cryogéniques et des réfrigérateurs pour leur capacité à maintenir des températures extrêmes.

## Précautions d'installation

- **Protection de l'enveloppe** : Il est crucial de protéger l'enveloppe des VIP lors du stockage et de la pose pour maintenir leur efficacité.
- **Évitement des ponts thermiques** : Les jonctions entre panneaux doivent être calfeutrées pour éviter les ponts thermiques et maintenir la performance globale.

## b). Fenêtres à contrôle solaire dynamique

Les fenêtres à contrôle solaire dynamique, également connues sous le nom de vitrages électrochromes, sont conçues pour réguler la quantité de lumière et de chaleur solaire qui pénètre dans un bâtiment. Elles offrent une solution innovante pour améliorer le confort intérieur tout en limitant les besoins en climatisation et éclairage artificiel.

## Fonctionnement

**Technologie électro chrome** : Ces fenêtres utilisent une couche mince conductrice qui change de teinte en réponse à un courant électrique faible. Cela permet d'ajuster la transmission lumineuse et calorifique en fonction des conditions extérieures.

**Contrôle dynamique** : Le vitrage peut passer d'une transparence élevée (jusqu'à 62%) à une transparence réduite (jusqu'à 2%), permettant ainsi de contrôler la quantité de lumière et de chaleur qui entre dans le bâtiment.

## **Avantages**

- **Économies d'énergie** : En particulier les gains de chaleur solaire en été et en laissant pénétrer la solaire en hiver, ces fenêtres chaleur contribuent à diminuer les besoins en climatisation et chauffage.
- **Confort intérieur** : Elles offrent un confort visuel optimal en minimisant l'éblouissement tout en préservant la luminosité naturelle.
- **Esthétique et flexible** : Les fenêtres à contrôle solaire dynamique peuvent être intégrées dans des vitrages isolants doubles ou triples, offrant ainsi une solution esthétique et fonctionnelle pour divers types de bâtiments.

## **Types de vitrages à contrôle solaire**

- **Vitrage à contrôle solaire basse émissivité** : Réduit les déperditions thermiques en hiver tout en filtrant les rayons solaires.
- **Vitrage à contrôle solaire sélectif** : Équilibre transmission lumineuse et facteur solaire pour un confort optimal.
- **Vitrage électro chrome** : Changer de teinte en fonction d'un courant électrique pour un contrôle dynamique.

## **Applications**

Ces fenêtres sont idéales pour les bâtiments résidentiels et tertiaires, où elles peuvent remplacer les protections solaires traditionnelles comme les magasins ou volets, tout en offrant une meilleure régulation thermique et un confort accru.

### **c). Toitures végétalisées et rafraîchissantes**

Les toitures végétalisées et rafraîchissantes sont des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments.

#### **➤ Toitures végétalisées Avantages**

**Régulation thermique** : Les toitures végétalisées améliorent les variations de température en fournissant une isolation supplémentaire, ce qui diminue les besoins en chauffage en hiver et en climatisation en été.

**Gestion des eaux pluviales** : Elles peuvent retenir jusqu'à 80% des eaux de pluie, notamment ainsi le ruissellement et les risques d'inondation.

**Biodiversité et environnement** : Ces toits agissent comme habitats pour diverses espèces végétales et animales, contribuant à la protection de la biodiversité urbaine.

**Durabilité** : Elles prolongent la durée de vie des membranes d'étanchéité en les protégeant des rayons UV et des intempéries.

### **Fonctionnement**

Les toitures végétalisées sont recouvertes de végétation et de sol, ce qui crée une couche isolante supplémentaire. La végétation absorbe le rayonnement solaire et évapore l'eau par transpiration, ainsi que la température ambiante.



*Figure I.10 Toitures végétalisées [6]*

#### ➤ **Toitures rafraîchissantes Avantages**

**-Réduction des îlots de chaleur** : Les toitures rafraîchissantes, souvent recouvertes de matériaux réfléchissants, réduisent la température de surface en réfléchissant le rayonnement solaire.

**-Économies d'énergie** : En diminuant la chaleur absorbée par le bâtiment, elles réduisent les besoins en climatisation.

**-Durabilité** : Ces toits peuvent être conçus pour être plus résistants aux intempéries et prolonger la durée de vie des matériaux de toiture.

## **Fonctionnement**

Les toitures rafraîchissantes utilisent des matériaux à haute réflectivité pour réfléchir le rayonnement solaire, notamment la température de surface et les gains de chaleur dans le bâtiment.

## **Avantages**

Lorsqu'elles sont combinées, les toitures végétalisées et rafraîchissantes offrent une solution globale pour améliorer la durabilité, réduire les coûts énergétiques et protéger l'environnement. Elles contribuent à créer des villes plus durables et à atténuer les effets des îlots de chaleur urbains.

### **I.2.3 Ponts Thermiques**

#### **I.2.3.1 Définition des ponts thermiques**

Un **pont thermique** est une zone dans l'enveloppe d'un bâtiment où la résistance thermique est moins bonne que celle du reste de la structure. Cela se produit généralement à la jonction de deux matériaux différents ou lorsqu'un élément structurel traverse une paroi isolante, créant une rupture dans la barrière isolante. Les ponts thermiques entraînent la fuite de (ou de fraîcheur) vers l'extérieur, entraînant des pertes de chaleur énergétiques et des problèmes de confort thermique.

#### **I.2.3.2 Différenciation des types de ponts thermiques**

- **Ponts thermiques linéaires** : Ces ponts se forment à la jonction de deux parois, comme entre un mur et un plancher ou entre deux murs. Ils sont les plus courants et incluent des sous-catégories comme les ponts de jonction, de pénétration et de rupture de continuité.
- **Ponts thermiques ponctuels** : Ils apparaissent à la jonction de trois parois, souvent dans les pièces où se rencontrent un plancher et deux murs.
- **Ponts thermiques structurés** : Ces ponts sont liés à la technique de mise en œuvre de l'isolation et peuvent survenir lors de l'assemblage de plusieurs éléments par collage ou vissage.

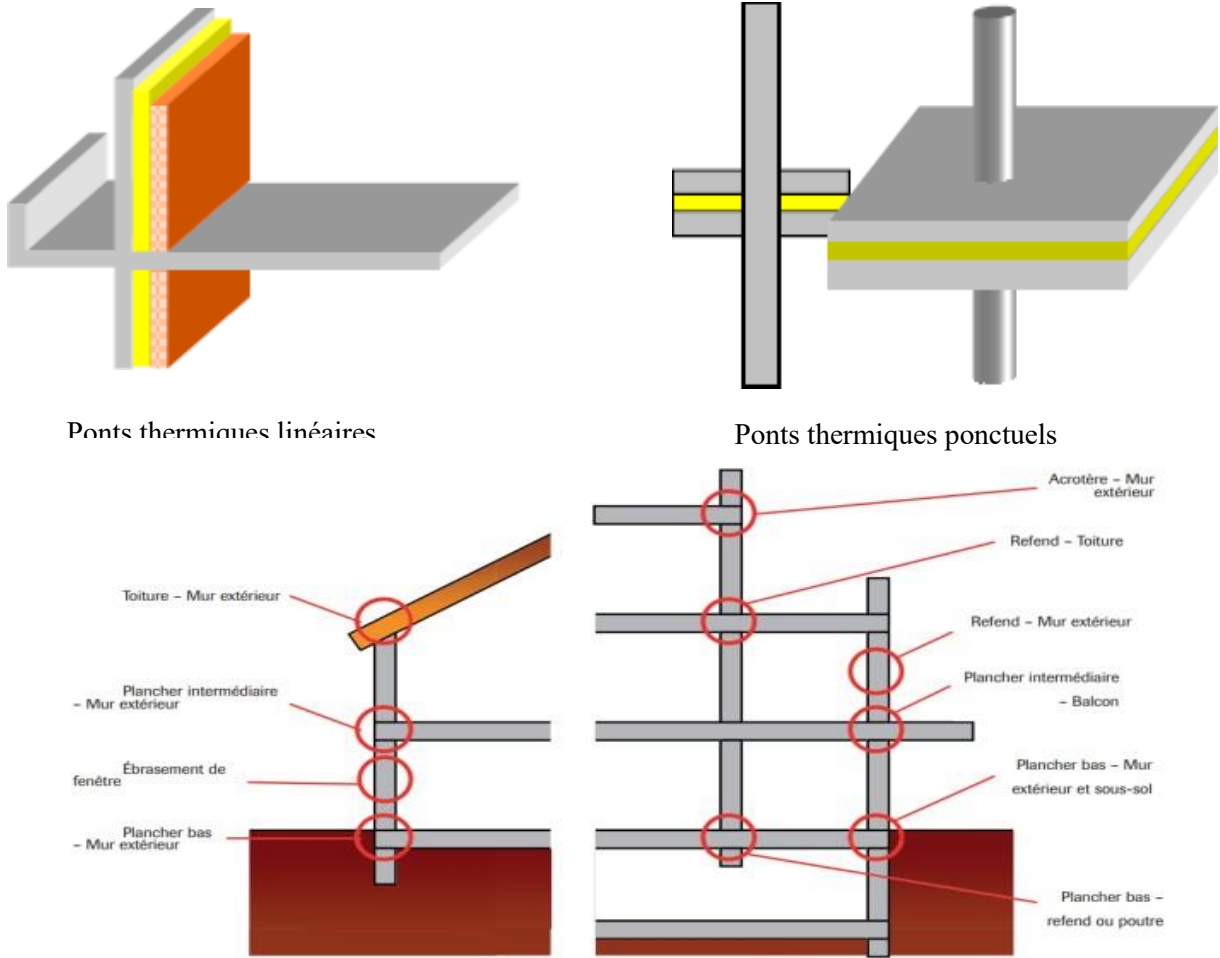


Figure I.11 types de ponts thermiques

### I.2.3.3 Importance des ponts thermiques

- **Impact sur la performance énergétique** : Les ponts thermiques sont responsables de 5 à 10 % des déperditions de chaleur dans un bâtiment, ce qui peut augmenter les dépenses énergétiques.
- **Conséquences sur le confort thermique et la santé** : Ils créent des zones froides localisées, entraînant un inconfort pour les occupants et probable des problèmes de santé liés à l'humidité
- **Rôle dans l'apparition de problèmes d'humidité et de moisissures** : Les ponts thermiques entraînent la condensation et la formation de moisissures, aggravant les conditions d'humidité dans le bâtiment.
- **Impacts sur les dépenses énergétiques** : En outre les pertes de chaleur, les ponts thermiques contribuent à une surconsommation d'énergie, ce qui peut entraîner une augmentation des coûts énergétiques.

#### **I.2.3.4 Causes et Conséquences des ponts thermiques**

##### **A. Causes des ponts thermiques**

Les ponts thermiques sont causés par divers facteurs structurels et liés aux matériaux utilisés dans la construction d'un bâtiment.

##### **-Causes structurelles**

- **Jonctions entre les murs, les planchers et les toitures** : Ces jonctions sont des zones critiques où la continuité de l'isolement peut être rompue, créant des ponts thermiques linéaires.
- **Encadrements de fenêtres et de portes** : Les seuils et les montants des fenêtres et portes sont souvent des points faibles dans l'isolement, favorisant la formation de ponts thermiques.
- **Balcons et autres éléments en porte-à-faux** : Ces éléments peuvent perturber l'isolement continu, créant des ponts thermiques, notamment linéaires.

##### **-Causes liées aux matériaux**

- **Utilisation de matériaux conducteurs de chaleur** : Lorsque des matériaux à haute conductivité thermique sont utilisés dans des zones critiques, cela peut créer des ponts thermiques.
- **Incompatibilité des matériaux en termes de dilatation thermique** : Des différences dans la dilatation thermique entre matériaux peuvent entraîner des fissures et des ponts thermiques.
- **Hétérogénéités dans les canapés d'isolement** : Une mauvaise installation ou des variations dans l'épaisseur de l'isolation peuvent créer des ponts thermiques structurels.

##### **B. Conséquences des ponts thermiques**

Les ponts thermiques ont plusieurs conséquences importantes sur les bâtiments, allant des déperditions thermiques aux problèmes d'humidité et d'inconfort thermique.

##### **-Déperditions thermiques**

- **Augmentation de la consommation d'énergie pour le chauffage** : Les ponts thermiques entraînent des pertes de chaleur, nécessitant une quantité supplémentaire de chauffage pour maintenir une température confortable à l'intérieur du bâtiment. Cela peut augmenter la consommation énergétique jusqu'à 30% dans les cas extrêmes, bien que des surconsommations de 5 à 15% soient plus courantes.

- **Impact sur les coûts de fonctionnement des bâtiments** : L'augmentation de la consommation d'énergie se traduit par des factures énergétiques plus élevées, ce qui affecte les coûts de fonctionnement des bâtiments.

#### **-Problèmes d'humidité et de condensation**

- **Formation de condensation sur les surfaces froides** : Les ponts thermiques présentent la condensation sur les surfaces froides, ce qui peut entraîner des problèmes d'humidité.
- **Développement de moisissures et de champignons** : La condensation crée un environnement propice au développement de moisissures et de champignons, ce qui peut dégrader l'apparence et la santé des occupants.
- **Dégradation des matériaux de construction** : L'humidité persistante peut dégrader les matériaux de construction, notamment la durée de vie du bâtiment.



*Figure I.12 Problèmes d'humidité et de condensation*

#### **-Inconfort thermique**

- **Sensation de froid près des zones de ponts thermiques** : Les zones froides créées par les ponts thermiques provoquent des sensations de froid, même lorsque le bâtiment est chauffé.
- **Inégalités de température dans les pièces** : Les ponts thermiques peuvent entraîner des variations de température dans les pièces, ce qui affectent le confort thermique global.

#### **I.2.3.5 Solutions et techniques de correction des ponts thermiques**

La correction des ponts thermiques est cruciale pour améliorer la performance énergétique des bâtiments et réduire les déperditions thermiques. Voici quelques solutions et techniques efficaces :

### **-Isolation thermique continue**

- **Techniques d'isolation par l'extérieur (ITE)** : L'ITE consiste à appliquer une couche isolante continue sur l'extérieur des murs, ce qui permet de réduire efficacement les ponts thermiques, notamment ceux situés aux jonctions entre les planchers intermédiaires et les murs extérieurs.
- **Utilisation de matériaux isolants performants** : Les matériaux isolants à faible conductivité thermique, comme les panneaux de polystyrène expansé ou les laines minérales, sont distinctifs pour minimiser les déperditions thermiques.

### **-Traitement des jonctions**

- **Utilisation de rupteurs de ponts thermiques** : Les rupteurs de ponts thermiques, tels que ceux utilisés pour les balcons en porte-à-faux, permettent d'isoler les éléments structuraux tout en maintenant leur capacité portante.
- **Conception de détails constructifs optimisés** : Une conception soignée des détails constructifs, comme les retours d'isolant, est essentielle pour éviter les ponts thermiques linéaires et ponctuels.

### **-Choix des matériaux**

- **Utilisation de matériaux à faible conductivité thermique** : Les matériaux à faible conductivité thermique, comme le bois ou certains plastiques, peuvent être utilisés pour réduire les ponts thermiques ponctuels.
- **Solutions d'isolation intégrées** : Intégrer l'isolation dans la structure du bâtiment dès la conception permet de minimiser les ponts thermiques et d'améliorer la performance globale.

### **-Rénovation énergétique**

- **Solutions pour la rénovation des bâtiments existants** : Lors de la rénovation, l'ITE et l'utilisation de ruptures de ponts thermiques sont des solutions efficaces pour traiter les ponts thermiques existants.

**Importance de traiter les ponts thermiques lors des rénovations** : Le traitement des ponts thermiques est crucial lors des rénovations pour atteindre les objectifs de consommation énergétique et améliorer le confort thermique. Les subventions pour la rénovation énergétique peuvent aider à financer ces travaux.

### **I.2.3.6 Méthodes de détection et d'évaluation des ponts thermiques**

La détection et l'évaluation des ponts thermiques nécessitent des méthodes précises pour identifier et quantifier ces zones de déperdition thermique. Voici les principales méthodes utilisées :

#### **Thermographie infrarouge**

- **Utilisation de caméras thermiques** : Les caméras thermiques, également appelées caméras infrarouges, permettent de visualiser les ponts thermiques en mesurant les différences de température à travers les éléments structuraux d'un bâtiment, tels que les murs, les toits et les planchers.
- **Interprétation des images thermiques** : Les images thermiques obtenues montrent les zones où la température est anormalement basse ou élevée, indiquant la présence de ponts thermiques. L'interprétation de ces images nécessite une expertise pour identifier correctement les zones problématiques.



*Figure I.13 caméra thermique [7]*



*Figure I.14 caméra d'imagerie thermique Cibor Eindhoven 1041 [8]*

### Calculs et simulations numériques

- **Utilisation de logiciels de simulation thermique** : Ces logiciels permettent de simuler les flux de chaleur à travers un bâtiment, aidant à identifier les zones où les ponts thermiques sont susceptibles de se former.
- **Calcul des coefficients de transmission thermique linéaire et ponctuelle** : Ces coefficients, notés  $\Psi$ , sont utilisés pour quantifier les pertes thermiques linéaires et ponctuelles. Les règles Th-Bat proposent des méthodes pour déterminer ces valeurs.

### Mesures in situ

- **Utilisation de sondes thermiques** : Les sondes thermiques permettent de mesurer directement les températures de surface et les flux de chaleur dans les zones suspectées de ponts thermiques.
- **Mesure des températures de surface et des flux de chaleur** : Ces mesures sont cruciales pour évaluer l'impact réel des ponts thermiques sur la performance énergétique du bâtiment. Elles peuvent être effectuées à l'aide de thermomètres infrarouges ou de capteurs de flux thermique.

## **I.3 Cadre réglementaire et normatif**

### **I.3.1 Normes Énergétiques et Codes de Construction**

Les normes énergétiques et les codes de construction sont essentiels pour garantir l'efficacité énergétique des bâtiments. Voici quelques exemples clés :

#### **I.3.1.1 Normes Internationales**

**ISO 16343 :2013** : Cette norme fournit des méthodes pour exprimer la performance énergétique dans le certificat de performance énergétique d'un bâtiment, y compris des indicateurs numériques et des classes par rapport à des valeurs de référence. Elle définit des indicateurs généraux pour la performance énergétique de l'ensemble du bâtiment, des méthodes pour exprimer les besoins énergétiques des bâtiments neufs ou rénovés, des procédures pour définir des valeurs de référence et des méthodes pour concevoir des procédures de certification énergétique des bâtiments. [9]

**ISO 50001** : Une norme internationale qui aide les organisations de tous les secteurs à améliorer leur efficacité énergétique en établissant un système de gestion de l'énergie (SGE). Elle fournit un cadre pour l'amélioration de l'utilisation durable de l'énergie, aidant les entreprises de construction à identifier et évaluer les opportunités d'utilisation et d'efficacité énergétiques. [10]

**Norme ASHRAE 90.1**: Il s'agit d'un code énergétique modèle pour les bâtiments commerciaux et les immeubles multifamiliaux de quatre étages ou plus.

#### **I.3.1.2 Normes Européennes**

**Directive sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB)** : L'UE dispose d'un cadre législatif pour améliorer la performance énergétique des bâtiments, notamment la directive révisée sur la performance énergétique des bâtiments (UE/2024/1275) et la directive révisée sur l'efficacité énergétique (UE/2023/1791). La directive révisée sur la performance énergétique des bâtiments (UE/2024/1275) est entrée en vigueur le 28 mai 2024. Elle vise à accroître le taux de rénovation des bâtiments dans l'UE, en particulier les moins performants. [4]

**Normes minimales de performance énergétique (NMPE)** : Une partie de la nouvelle réglementation de l'UE exige que tous les bâtiments résidentiels de l'UE atteignent au moins une cote d'efficacité énergétique E d'ici janvier 2030, et une cote D ou supérieure d'ici janvier 2033. D'ici 2040, tous les bâtiments doivent atteindre une cote d'efficacité énergétique A ou B, conformément à l'objectif de bâtiments à zéro émission d'ici 2050. [11]

**NF EN 15232** : S'applique aux systèmes de gestion technique des bâtiments et aux fonctions d'automatisation et de contrôle. Spécifie une liste de fonctions d'automatisation, de contrôle et de gestion technique des bâtiments qui ont un impact sur la performance énergétique des bâtiments. [10]

### **I.3.1.3 Codes Nationaux**

**Code international de conservation de l'énergie (IECC)** : Établit des normes minimales d'efficacité énergétique pour les bâtiments commerciaux et les immeubles résidentiels de faible hauteur. Elle est mise à jour tous les trois ans.

**Codes I** : Plus de 1500 normes internationales sont élaborées par des organisations internationales de normalisation avec le soutien de l'International Code Council. [11]

### **I.3.2 Règlements Locales**

#### **I.3.2.1 Règlements en France**

La « Réglementation Thermique » (RT) en France fixe une limite maximale à la consommation énergétique des nouveaux bâtiments pour le chauffage, la ventilation, la climatisation, l'éclairage et la production d'eau chaude sanitaire. Elle vise à améliorer le confort des occupants en réduisant la consommation énergétique des nouvelles constructions. Au cours des 40 dernières années, il y a eu six réglementations thermiques : RT1974, RT1988, RT2000, RT2005, RT2012 et RE2020. Depuis 2022, le terme « Réglementation Thermique » (RT) a été remplacé par « Réglementation Environnementale » (RE), qui intègre l'impact carbone.

**RT1974** : Suite à la crise pétrolière de 1973, la première réglementation thermique a été instaurée en 1974, fixant des normes d'isolation thermique des murs et de réglage automatique des systèmes de chauffage dans les bâtiments neufs. Elle visait à réduire la consommation énergétique de 25 % par rapport aux bâtiments construits entre 1950 et 1973. [12]

**RT1988** : Cette deuxième réglementation thermique s'applique aux bâtiments neufs résidentiels et non résidentiels. Son objectif est de réduire la consommation d'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des logements neufs. L'introduction du « coefficient C » vise à trouver l'optimum économique. [12]

**RT2000** : Applicable à compter du 29 novembre 2000 aux bâtiments d'habitation neufs, cette réglementation visait une réduction de 20 % de la consommation maximale par rapport à la RT1988, en visant un niveau ne dépassant pas 130 kWh/m<sup>2</sup>/an. Elle s'appliquait également aux bâtiments tertiaires avec une réduction de 40 % de la consommation maximale. [12]

**RT2005** : Cette réglementation, la quatrième, impose une amélioration de 15% des performances thermiques par rapport à la RT2000, visant à ne pas dépasser 90 kWh/m<sup>2</sup>/an. Elle s'applique aux bâtiments neufs et aux nouvelles parties de bâtiments. La RT 2005 compare le bâtiment étudié à un bâtiment de référence géométriquement similaire mais aux caractéristiques techniques prédéfinies. [12]

**RT2012** : La réglementation thermique a été affinée et structurée autour de trois principaux facteurs : l'indice BBIO, le CEP et le TIC. De ces trois indices découlent trois exigences minimales. Elle vise à réduire d'un facteur 3 la consommation énergétique des bâtiments par rapport à la RT1974. Pour les bâtiments dont le permis de construire a été déposé après le 1er janvier 2013, c'est la RT2012 qui est entrée en vigueur. [13]

**RE2020** : Remplaçant la RT2012 en 2022, la RE2020 est obligatoire pour tous les nouveaux bâtiments d'habitation dont la demande de permis de construire est déposée après le 1er janvier 2022. Elle intègre l'empreinte carbone du bâtiment en incluant une analyse du cycle de vie des matériaux et équipements utilisés. La RE2020 vise des bâtiments plus respectueux de l'environnement et plus performants, capables de produire leur propre énergie renouvelable. Elle intègre également la mesure des déperditions sur les systèmes de ventilation et l'empreinte carbone des matériaux.

### **I.3.3 Certifications et labels**

#### **✓ Label Bâtiment Passif**

**Description** : Ce label est la déclinaison française du label européen "Passivhaus" et a été établi en 1997. Il est destiné aux constructions neuves.

#### **Critères :**

- Besoin de chauffage inférieur à 15 kWh d'énergie utile par m<sup>2</sup> par an.
- Perméabilité à l'air de l'enveloppe Inférieure à 0,6 par heure sous une pression de 50 Pascals.

- Consommation totale en énergie primaire (tous usages) Inférieure à 120 kWh par m<sup>2</sup> par an.
- Fréquence de surchauffe Inférieure à 10% des heures de l'année au-dessus de 25°C.

✓ **Étiquette EnerPHit**

**Description :** Adapté aux rénovations, ce label est plus flexible que le label Bâtiment Passif.

**Critères :**

- Besoin de chauffage plafonné à 25 kWh d'énergie utile par m<sup>2</sup> par an.
- Les autres critères de confort restent similaires à ceux du label Bâtiment Passif, mais avec des exigences adaptées aux bâtiments existants.

✓ **Étiquettes Passivhaus**

Niveaux de performance :

**Bâtiment Passif Classique :** Répondre aux critères standards mentionnés ci-dessus.

**Bâtiment Passif Plus :** Doit générer au moins 60 kWh/(m<sup>2</sup>a) d'énergie renouvelable par rapport à son entreprise au sol.

**Bâtiment Passif Premium :** Doit générer au moins 120 kWh/(m<sup>2</sup>a) d'énergie renouvelable.

✓ **Label ESB (Bâtiment Sobre en Énergie)**

**Description :** Ce label s'adresse aux bâtiments qui n'atteignent pas la norme classique du Bâtiment Passif pour diverses raisons, mais qui visent tout de même une réduction significative de leur consommation énergétique.

---

*Chapitre II :*

*Isolation Thermique et matériaux  
de construction*

---

### **Introduction**

Dans le cadre de la transition énergétique, l'isolation thermique des bâtiments est essentielle pour réduire les pertes de chaleur, améliorer le confort et diminuer l'empreinte carbone. Ce chapitre présente les principales techniques d'isolation, les types de matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés thermiques et performances. Il aborde également les défis de la rénovation et les innovations en matière de matériaux durables.

### **II.1 Isolation Thermique et matériaux de construction :**

L'isolation thermique est un ensemble de techniques utilisées pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. Elle permet de minimiser la consommation d'énergie nécessaire pour maintenir une température requise dans un espace clos. Un système d'isolation thermique est l'association d'au moins un matériau isolant. La performance de ce système dépend de l'ensemble de ses composants.

Un matériau isolant thermique empêche la chaleur ou le froid de s'échapper d'un espace clos. Les isolants thermiques sont caractérisés par leur résistance thermique (valeur R en  $m^2\text{C}/W$ ) et leur inertie thermique. La résistance thermique est le rapport entre l'épaisseur du matériau en mètres et son coefficient lambda de Conductivité thermique (en  $W/m^{\circ}C$ ). Un produit est considéré comme isolant si son coefficient R est au moins égal à  $4 m^2\text{C}/W$ , ce qui équivaut à 12 cm d'isolation avec des produits standards comme le polystyrène ou la laine minérale [14].

#### **II.1.1 Techniques d'isolation**

L'isolation thermique regroupe un ensemble de méthodes permettant de limiter les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment. Elle joue un rôle essentiel dans l'amélioration du confort thermique, la réduction des consommations énergétiques et la préservation de l'environnement en diminuant les émissions de gaz à effet de serre.

Pour assurer une isolation efficace, plusieurs solutions peuvent être mises en place en fonction des caractéristiques du bâtiment et des contraintes techniques. Ces techniques visent à créer une barrière thermique en limitant les pertes de chaleur en hiver et en réduisant la surchauffe en été. Elles peuvent être appliquées à différentes parties du bâti, en tenant compte des spécificités architecturales et des performances recherchées.

## *Chapitre II : Isolation Thermique et matériaux de construction*

Le choix des matériaux est également un élément clé dans l'efficacité de l'isolation. Il existe une large gamme d'isolants, allant des matériaux traditionnels aux solutions écologiques, qui offrent divers niveaux de résistance thermique et d'impact environnemental. Une bonne mise en œuvre est essentielle pour éviter les ponts thermiques et garantir une performance optimale sur le long terme.

Au-delà du confort thermique, une isolation de qualité contribue également à l'amélioration de l'isolation acoustique, réduisant ainsi les nuisances sonores extérieures. Elle permet également de valoriser un bien immobilier en augmentant sa performance énergétique, ce qui devient un critère déterminant dans le cadre de la transition énergétique et des réglementations en vigueur.

Ainsi, une approche adaptée et bien étudiée permet d'optimiser l'efficacité énergétique d'un bâtiment tout en assurant un cadre de vie confortable et respectueux de l'environnement.[15]

### **II.1.1.1 Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI) :**

L'une des techniques couramment utilisées pour améliorer la performance énergétique des bâtiments. Elle consiste à poser un isolant thermique à l'intérieur des murs, permettant de limiter les **pertes de chaleur** en hiver et de maintenir une température agréable en été. Pour évaluer l'efficacité de l'ITI, plusieurs **lois physiques** sont utilisées. La **loi de Fourier** permet de calculer la quantité de chaleur traversant un matériau selon sa **conductivité thermique ( $\lambda$ )**, ce qui aide à choisir un isolant performant. Ensuite, la **résistance thermique ( $R$ )** d'un matériau est déterminée par la formule

$$R = e/\lambda \quad (II.1)$$

où  $e$  est l'épaisseur du matériau. Plus  $R$  est élevé, meilleure est l'isolation.

Enfin, le coefficient de transmission thermique ( $U$ ), donné par :

$$U = 1/\Sigma R \quad (II.2)$$

Permet d'estimer les pertes de chaleur d'une paroi : plus  $U$  est faible, plus l'isolation est efficace. L'ITI est souvent réalisée en fixant des panneaux isolants (polystyrène, laine de verre, polyuréthane) par collage ou vissage sur une ossature. Un pare-vapeur est ajouté pour éviter les problèmes de condensation. Bien que cette solution soit moins coûteuse que l'isolation extérieure, elle réduit légèrement l'espace habitable et nécessite une bonne gestion des ponts thermiques. Conforme aux normes thermiques (RT 2012, RE 2020), l'ITI améliore le confort et réduit la consommation énergétique du logement.

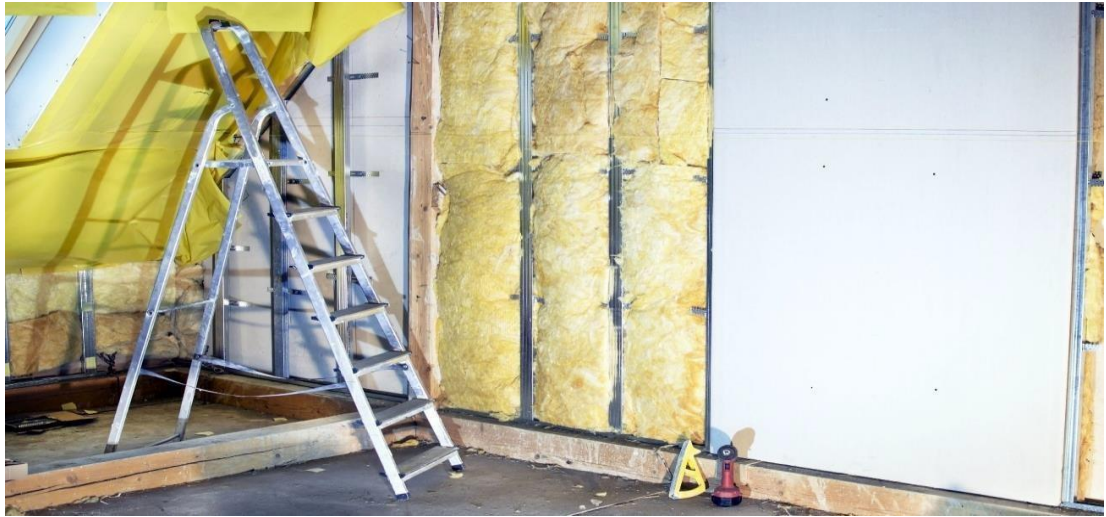


Figure II.1 Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI)

### II.1.1.2 Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE)

L'isolation Thermique par l'Extérieur consiste à poser des matériaux d'isolation sur la face externe du bâtiment. Cette approche génère une protection thermique continue, minimisant les ponts thermiques et améliorant la performance énergétique globale. Avant de procéder à l'isolation d'un mur extérieur, il est essentiel de vérifier qu'il est en bon état et qu'il n'y a pas de signes de remontées capillaires ou d'infiltrations d'humidité venant de l'extérieur. Si les matériaux subissent des dommages causés par l'humidité, leur capacité isolante sera réduite. Avant toute intervention d'isolation, il est crucial de préparer les zones humides. Il existe diverses méthodes pour isoler les parois verticales. En Algérie, la méthode de construction la plus courante est celle du mur double (double cloison), où l'isolant est placé dans l'espace d'air piégé entre le mur extérieur et le mur intérieur. Cette méthode est particulièrement captivante si on prend en compte ses performances thermiques tant du point de vue de la conductivité que de l'inertie.



Figure II.2 Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE)

### II.1.1.3 Isolation Thermique Répartie (ITR)

Est une technique qui repose sur l'utilisation de matériaux de construction aux propriétés isolantes. Contrairement aux méthodes classiques, elle ne nécessite pas l'ajout d'un isolant supplémentaire, car les murs eux-mêmes assurent l'isolation thermique du bâtiment. Ce procédé repose sur les principes de conduction, de résistance thermique et de transmission de chaleur, qui déterminent l'efficacité de l'isolation. Plus un matériau limite la circulation de la chaleur, plus il améliore les performances énergétiques de l'ensemble de la structure. L'ITR permet également de limiter les ponts thermiques en assurant une continuité de l'isolation dans toute l'épaisseur des parois. Grâce à sa capacité à stocker et restituer la chaleur progressivement, elle améliore le confort thermique en réduisant les variations de température à l'intérieur des bâtiments. Sa mise en œuvre est relativement simple, mais elle peut impliquer des contraintes liées à l'épaisseur des murs et à la compatibilité avec certains systèmes constructifs. Cette solution est particulièrement adaptée aux constructions neuves respectant les normes énergétiques en vigueur et cherchant à concilier performance thermique, durabilité et simplicité d'exécution.



*Figure II.3 Isolation Répartie*

#### **II.1.1.4 Isolation intérieure et extérieure : avantages et inconvénients**

*Tableau II.1 La différence entre (ITI)et (ITE)*

Type d'Isolation	Avantages	Inconvénients
<b>Isolation Intérieure (ITI)</b>	- Coût généralement moins Elevé	- Réduction de la surface habitable
	- Mise en œuvre rapide	- Risque de ponts thermiques si mal réalisée.
	- Permet de rénover l'intérieur en même temps	- Moins performante que L'ITE en termes d'efficacité énergétique
	- N'affecte pas l'aspect extérieur du bâtiment	/
<b>Isolation Extérieure (ITE)</b>	- Performance thermique supérieure, éliminant les ponts thermiques].	- Coût initial plus élevé et travaux plus longs
	- Améliore l'inertie thermique du bâtiment, réduisant les besoins en Energie	- Nécessite souvent une autorisation administrative
	- Protège les murs des intempéries et améliore l'esthétique extérieure	- Modifie l'aspect extérieur du bâtiment, ce qui peut ne pas convenir à tous
	- Pas de perte d'espace intérieur	

### II.1.1.5 Techniques innovantes : isolants biosourcés, matériaux composites

Les **isolants biosourcés** et les **matériaux composites** sont des solutions innovantes et écologiques pour l'isolation thermique des bâtiments. Les isolants biosourcés sont issus de matières premières renouvelables comme le bois, le chanvre, la laine de mouton ou encore le liège. Leur principale qualité réside dans leur faible impact environnemental, leur capacité à stocker le carbone et leur excellente gestion de l'humidité, contribuant ainsi au confort thermique et à la durabilité des constructions. De leur côté, les **matériaux composites** sont conçus en associant plusieurs composants pour améliorer leurs performances mécaniques et thermiques. Ces matériaux hybrides combinent souvent une matrice organique ou minérale avec des fibres naturelles ou synthétiques, leur conférant une résistance accrue aux contraintes physiques et aux variations climatiques. Grâce à leur structure optimisée, ces isolants présentent une bonne performance en termes de conductivité thermique, réduisant ainsi les pertes énergétiques du bâtiment. En plus de leurs avantages thermiques, ils offrent également une meilleure isolation acoustique et une résistance accrue au feu. Bien qu'ils soient parfois plus coûteux que les isolants conventionnels, leur utilisation s'inscrit dans une démarche de construction durable et respectueuse des normes environnementales actuelles.

Leur développement et leur intégration dans le secteur du bâtiment sont encouragés par les réglementations thermiques visant à réduire l’empreinte carbone des constructions neuves et en rénovation.

➤ **Types d'isolants biosourcés :**

**Laine de mouton :** Naturellement ignifuge et résistante aux parasites, elle offre une bonne régulation de l’humidité. [16]



*Figure II.4 Laine de mouton*

**Chanvre :** Utilisé sous forme de panneaux ou de vrac, le chanvre est un excellent isolant thermique et acoustique. [17]



*Figure II.5 Chanvre*

**Ouate de cellulose :** Fabriquée à partir de papier recyclé, elle est efficace et respectueuse de l'environnement. La certification ACERMI est la plus reconnue pour les isolants biosourcés comme la ouate de cellulose.



*Figure II.6 Ouate cellulose*

**Liège :** L'écorce du chêne-liège est utilisée pour l'isolation des murs et des toitures



*Figure II.7 Liège*

**Paille :** est un isolant thermique naturel et écologique utilisé dans la construction durable. Issue des tiges sèches de céréales (blé, seigle, avoine...), elle est conditionnée en bottes ou en vrac pour l'isolation des murs, toitures et planchers.



*Figure II.8 Pailles*

**Mycélium :** Fabriqués à base de la moisissure des champignons, ils sont légers, résistants, isolants et entièrement biodégradables



*Figure II.9 Mycélium*

### ➤ **Matériaux Composites**

Bien que les résultats de recherche ne mettent pas en évidence des informations sur les matériaux composites, les techniques d'isolation avancées suivantes sont à noter [18] :

**Aérogel :** Matériau ultraléger composé à 99 % d'air, offrant une capacité isolante exceptionnelle et idéal pour les rénovations où l'espace est limité [18]. Il offre une très faible conductivité thermique, permettant d'atteindre un niveau d'isolation thermique de haute qualité [19].



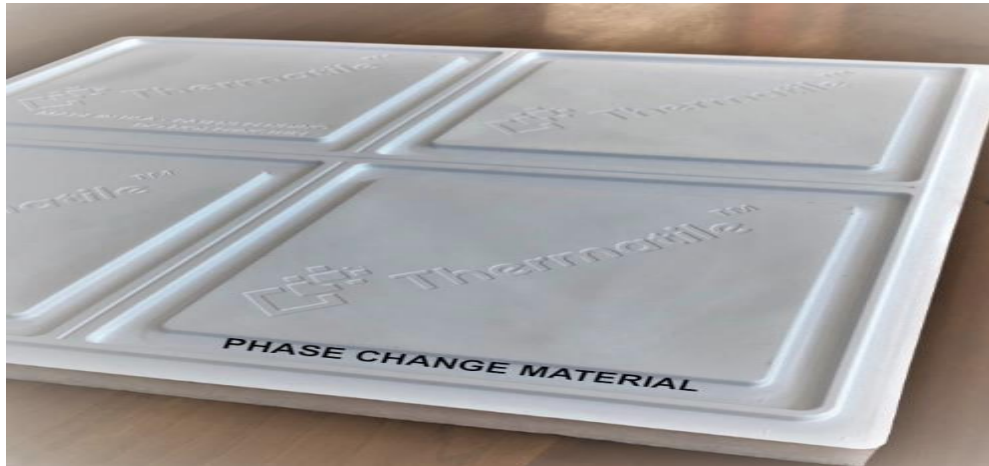
*Figure II.10 Aéro-gel*

**Panneaux Isolants sous Vide (PIV) :** Ces panneaux offrent une isolation thermique performante avec une épaisseur minimale, ce qui les rend idéaux pour les projets de rénovation où l'espace est limité [1]. Ils sont composés d'un cœur microporeux enfermé dans une enveloppe hermétique, limitant considérablement la conduction thermique [20].



*Figure II.11 Panneaux Isolants sous Vide (PIV)*

**Matériaux à Changement de Phase (PCM) :** Ces isolants emmagasinent la chaleur et la restituent progressivement, régularisant ainsi la température intérieure [21]. Ils absorbent et libèrent de la chaleur, contribuant à stabiliser la température intérieure des habitations



*Figure II.12 Matériaux à Changement de Phase (PCM)*

**Isolation par projection :** La mousse de polyuréthane projetée et le liège pulvérisé sont deux matériaux d'isolation appliqués par projection, assurant une couverture homogène des surfaces. Grâce à leur application continue, ils éliminent efficacement les ponts thermiques et s'adaptent aux formes irrégulières. Leur utilisation convient aussi bien aux murs qu'aux sols et plafonds, offrant une isolation durable. Le liège pulvérisé est apprécié pour son origine naturelle, tandis que la mousse polyuréthane est réputé pour ses performances thermiques élevées. Ces solutions modernes permettent d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Elles sont de plus en plus utilisées dans la construction et la rénovation.



*Figure II.13 Isolation par projection*

**Peinture thermique** : Composée de céramiques spéciales qui réfléchissent et dispersent la chaleur, cette peinture augmente considérablement la capacité isolante des surfaces traitées



*Figure II.14 Peinture thermique*

## **II.2 Performances des isolants**

### **II.2.1 Propriétés thermiques des différents isolants**

L'efficacité d'un isolant thermique dépend de sa faculté à restreindre les échanges énergétiques entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment. Il a pour mission principale de préserver la chaleur durant l'hiver en évitant sa dispersion et, à l'inverse, de limiter la pénétration de la chaleur en été afin d'assurer un climat intérieur confortable. Cette efficacité est évaluée grâce à plusieurs coefficients analysés en laboratoire, qui mesurent la résistance thermique, la conductivité thermique et la transmission thermique du matériau. La résistance thermique traduit la capacité d'un isolant à freiner le passage de la chaleur, tandis que la conductivité thermique exprime la rapidité avec laquelle celle-ci traverse le matériau. Un bon isolant doit également garantir une excellente étanchéité à l'air pour empêcher les infiltrations pouvant compromettre l'efficacité thermique. De plus, il est primordial qu'il contrôle les transferts d'humidité et de vapeur d'eau afin d'éviter la

condensation interne, responsable de moisissures et d'une diminution des performances isolantes. Ainsi, le choix d'un matériau isolant doit non seulement reposer sur ses propriétés thermiques, mais aussi sur sa capacité à les préserver durablement, malgré les variations de température et d'humidité. Un isolant de qualité contribue à limiter les dépenses énergétiques liées au chauffage et à la climatisation, réduisant ainsi l'impact environnemental des constructions.

### **II.2.1.1 Conductivité thermique :**

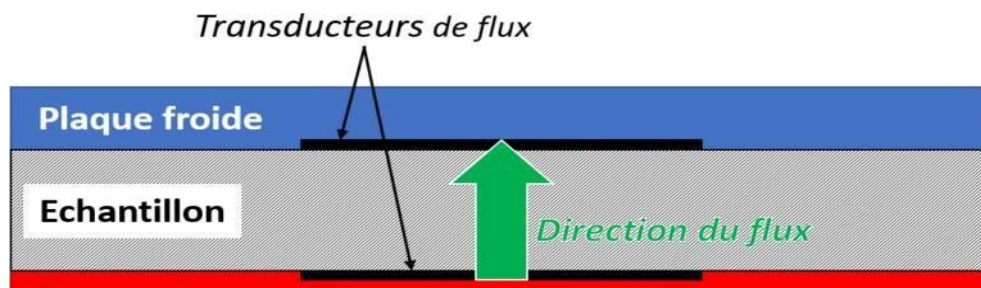
La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est un indicateur clé permettant d'évaluer l'efficacité d'un matériau isolant. Elle traduit la capacité d'un matériau à laisser passer la chaleur et s'exprime en **watts par mètre-kelvin (W/m·K)**. Plus cette valeur est basse, plus le matériau offre une bonne isolation en limitant le transfert thermique. [22]

#### **✓ Méthodes de Mesure en Laboratoire**

Pour déterminer la conductivité thermique d'un matériau, des tests sont réalisés en laboratoire à l'aide de techniques normalisées. Parmi les méthodes les plus utilisées, on retrouve :

##### **Méthode du flux thermique :**

- Un échantillon est placé entre deux plaques dont la température est précisément contrôlée.
- Un capteur enregistre le flux de chaleur traversant le matériau.
- La conductivité thermique est ensuite calculée en tenant compte de l'épaisseur du matériau et de la différence de température appliquée.



*Figure II.15 Méthode flux métrique*

**Méthode du régime stationnaire (plaque chaude gardée) :**

- Une plaque chauffante est positionnée au centre d'un échantillon entouré d'un isolant.
- Un flux thermique constant est appliqué, et la température est relevée de part et d'autre du matériau.
- Ces données permettent d'estimer la conductivité thermique.

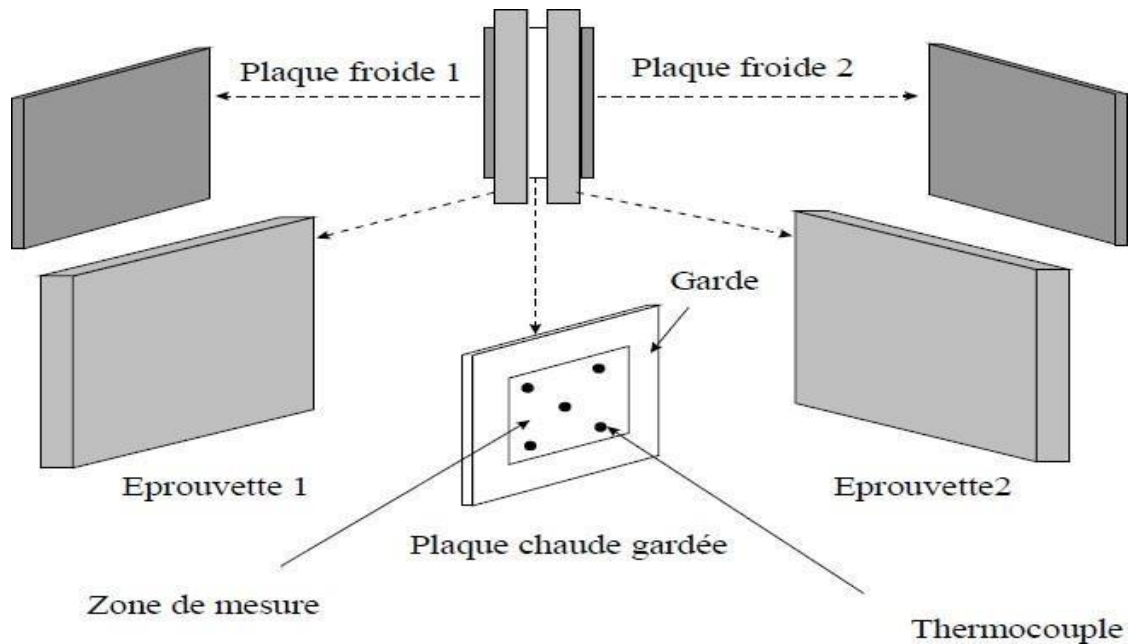


Figure II.16 Méthode Plaque Chaude Gardée

**Méthode du régime transitoire (fil chaud ou plan chaud transitoire)**

- Un fil ou une sonde chauffante est inséré dans l'échantillon.
- L'évolution de la température en fonction du temps est enregistrée pour en déduire la valeur de  $\lambda$ .

Ces expériences sont menées sous des conditions rigoureusement contrôlées en matière de température et d'humidité afin de garantir des résultats précis et comparables entre différents matériaux.

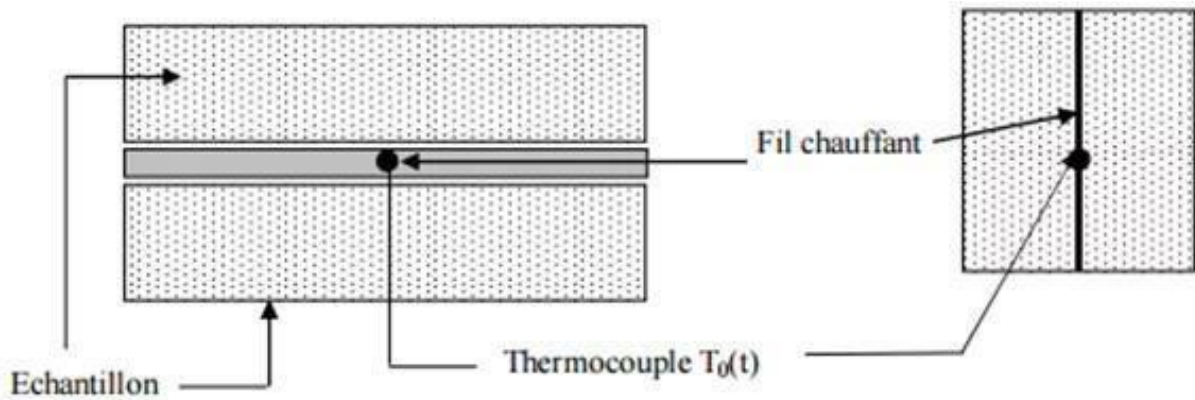


Figure II.17 Méthode Fil chaude

### ✓ Estimation Théorique de la Conductivité Thermique

Il est également possible d'évaluer la conductivité thermique à partir des propriétés physiques du matériau en s'appuyant sur la **loi de Fourier de la conduction thermique** :

$$q = -\lambda * (dT / dx) \quad (II.3)$$

Avec :

- $q$  représente le flux thermique (W/m<sup>2</sup>),
- $\lambda$  correspond à la conductivité thermique (W/m·K),
- $dT/dx$  est le gradient de température (K/m).

Lorsque les caractéristiques du matériau sont bien définies (composition chimique, porosité, taux d'humidité), il est possible de prévoir  $\lambda$  en utilisant des modèles mathématiques qui prennent en compte les phénomènes de conduction, de convection interne et de rayonnement thermique.

Toutefois, les valeurs obtenues par calcul théorique peuvent différer de celles mesurées en laboratoire, car certains facteurs comme l'humidité, la microstructure du matériau ou encore sa compression influencent la conductivité thermique réelle. C'est pourquoi les essais en laboratoire restent indispensables pour obtenir des données précises et adaptées aux conditions d'utilisation des isolants.

### II.2.1.2 Résistance thermique

#### ✓ Qu'est-ce que la Résistance Thermique ?

La **résistance thermique (R)** est un indicateur essentiel permettant d'évaluer la capacité d'un matériau à ralentir le passage de la chaleur. Plus cette résistance est grande, plus le matériau joue efficacement son rôle d'isolant. Elle est exprimée en **mètre carré-kelvin par watt (m<sup>2</sup>·K/W)** et dépend directement des propriétés du matériau.

#### ✓ Détermination théorique de la résistance thermique

Dans le cas d'un matériau homogène, la résistance thermique se calcule selon la formule suivante :

$$R = e / \lambda \quad (II.4)$$

Avec :

- **R** est la résistance thermique (m<sup>2</sup>·K/W),
- **e** désigne l'épaisseur du matériau (m),
- **λ** correspond à la conductivité thermique (W/m·K).

Cette équation met en évidence que plus l'épaisseur du matériau est importante et plus sa conductivité thermique est faible, meilleure sera son efficacité isolante.

Si un mur ou une paroi est composé de plusieurs couches de matériaux différents, la résistance thermique globale **R<sub>tot</sub>** est obtenue en additionnant les résistances thermiques de chaque couche :

$$R_{tot} = \frac{\sum e_i}{\lambda_i} \quad (II.5)$$

Avec **e<sub>i</sub>** et **λ<sub>i</sub>** sont respectivement l'épaisseur et la conductivité thermique de chaque matériau constituant la paroi.

#### ✓ Méthodes de mesure en laboratoire

Pour évaluer la résistance thermique d'un matériau, plusieurs méthodes expérimentales sont utilisées en laboratoire, parmi lesquelles :

**Méthode de la plaque chaude gardée :**

- L'échantillon est placé entre une source de chaleur et une surface froide.
- Un flux de chaleur est imposé à travers le matériau.
- La résistance thermique est calculée en mesurant l'écart de température entre les deux surfaces et en appliquant la loi de Fourier.

**Méthode du flux thermique :**

- Une sonde thermique est placée sur l'échantillon pour mesurer le flux de chaleur traversant le matériau.
- À partir de la relation :

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (II.6)$$

Où  $\Delta T$  représente la différence de température entre les faces du matériau (K) et  $q$  le flux thermique traversant celui-ci ( $W/m^2$ ), on déduit la résistance thermique du matériau testé.

✓ **Lien entre résistance thermique et transmission de la chaleur**

La résistance thermique est également liée au **coefficient de transmission thermique (U)**, un paramètre clé pour quantifier l'isolation thermique d'une paroi :

$$U = \frac{1}{Rt_0} \quad (II.7)$$

Où  $U$  s'exprime en  $W/m^2 \cdot K$  et indique la quantité de chaleur traversant un matériau. Une valeur

$U$  faible signifie que la paroi possède une bonne isolation thermique.[23]

### II.3 Comparaison entre isolants traditionnels et modernes.

Tableau II.2 Comparaison entre isolants traditionnels et modernes

Caractéristique	Isolants Traditionnels (Laine de verre, Laine de roche)	Isolants Modernes (Aérogel, Polyuréthane)
<b>Matériaux</b>	Laine de verre, Laine de roche, Perlite expansée	Aérogel, Polyuréthane, Polystyrène extrudé
<b>Conductivité thermique (<math>\lambda</math>) (W/m.K)</b>	Laine de verre : 0.032, Laine de roche : 0.035	Aérogel : 0.013, Polyuréthane : 0.022-0.028
<b>Épaisseur pour R=4 (cm)</b>	Laine de verre : 12, Laine de roche : 14	Aérogel : 2, Polyuréthane : 8
<b>Résistance au feu</b>	Bonne à excellente	Aérogel : Excellente (incombustible), Polyuréthane : Moyenne
<b>Prix moyen (€/m<sup>2</sup>)</b>	Laine de verre : 5-10, Laine de roche : 10-15	Aérogel : 40-60, Polyuréthane : 15-25
<b>Avantages</b>	Bon rapport performance/prix, bonne tenue au feu	Performances thermiques élevées, gain de place (aérogel), résistance à l'humidité
<b>Inconvénients</b>	Bilan environnemental moins favorable, faible déphasage	Prix plus élevé (aérogel), dégagement de gaz toxiques en cas d'incendie (polyuréthane)

### II.4 Propriétés thermiques des matériaux

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent leur comportement lorsqu'ils sont soumis à une variation de température. La connaissance de ces propriétés permet de modéliser les transferts thermiques dans des systèmes complexes et de prédire leurs comportements thermiques. Ainsi, la mesure des propriétés thermiques des matériaux représente un enjeu important pour la quasi-totalité de l'activité industrielle.

**Joseph Fourier** [24] a développé une théorie analytique pour décrire la conduction de la chaleur dans les matériaux. **La loi de Fourier** traduit, par exemple, que le flux de chaleur transféré, au travers d'une surface, est proportionnel au gradient de température ( $T_2 > T_1$ ) sur l'épaisseur ( $e$ ) considérée, à la surface et au temps, et que le transfert de chaleur s'effectue de la zone chaude vers la zone froide

$$\phi = -\lambda \text{grad} T \quad (\text{II.8})$$

Avec :

**T** : est la température locale

**λ** : est la conductivité thermique du matériau Les principales propriétés thermiques sont [25]:

- **Diffusivité thermique** est une caractéristique essentielle des matériaux qui exprime leur aptitude à transmettre les variations de température au fil du temps [26]. Elle se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\alpha = \lambda / \rho C_p \quad (\text{II.9})$$

- $\alpha$  représente la diffusivité thermique ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),
- $\lambda$  correspond à la conductivité thermique ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ),
- $\rho$  désigne la masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),
- $C_p$  est la capacité thermique massique ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ).

La diffusivité thermique mesure la rapidité avec laquelle un matériau réagit aux fluctuations de température. Un matériau ayant une grande diffusivité thermique s'adapte rapidement aux changements thermiques, tandis qu'un matériau à faible diffusivité met plus de temps à atteindre un équilibre thermique.

### Exemples et valeurs caractéristiques

- Les métaux possèdent généralement une diffusivité thermique élevée, en raison de leur forte conductivité thermique et de leur capacité thermique massique modérée. Par exemple, pour l'aluminium, cette valeur est d'environ  $(9.7 \times 10^{-5})\text{m}^2/\text{s}$ .
- Les matériaux isolants tels que la laine de verre ou le polystyrène ont une diffusivité faible, ce qui leur permet de limiter la propagation de la chaleur.
- Les matériaux de construction comme le béton ou le bois présentent une diffusivité thermique intermédiaire.

**Utilisation et impact :**

- En génie thermique, cette propriété est essentielle pour analyser la réaction des matériaux aux cycles thermiques.
  - Dans le domaine industriel, elle joue un rôle clé dans la conception des équipements tels que les échangeurs thermiques et les structures réfractaires.
  - En génie civil, elle influence le comportement thermique des bâtiments et le confort thermique des occupants.
- **L'effusivité thermique** : caractérise la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement. Elle influence la perception de chaleur ou de froid lorsqu'on touche un matériau et est définie par l'expression suivante :

$$e = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (II. 10)$$

Avec :

- $e$  représente l'effusivité thermique ( $J/m^2 \cdot K$ ),
  - $\lambda$  correspond à la conductivité thermique ( $W/m \cdot K$ ),
  - $\rho$  est la masse volumique du matériau ( $kg/m^3$ ),
- $C_p$  désigne la capacité thermique massique ( $J/kg \cdot K$ )

**Compréhension physique :**

L'effusivité thermique reflète la manière dont un matériau absorbe ou restitue la chaleur lorsqu'il est en contact avec une autre surface. Un matériau ayant une effusivité élevée absorbe rapidement la chaleur, donnant une impression de froid au toucher, comme c'est le cas des métaux.

À l'inverse, un matériau à faible effusivité transmet peu de chaleur et semble plus chaud, à l'image du bois ou des textiles.

**Comparaison des matériaux par leur effusivité thermique :**

- Les métaux possèdent une effusivité importante, ce qui explique pourquoi ils semblent froids au contact.
- Les isolants thermiques, tels que le liège ou la laine de verre, présentent une faible effusivité, limitant ainsi les échanges de chaleur.
- Les matériaux de construction, comme le béton et les briques, ont une effusivité intermédiaire, influençant ainsi l'inertie thermique des bâtiments.

**Applications et utilité :**

- En génie thermique, cette propriété permet d'étudier l'interaction des matériaux avec leur environnement.
- Dans le domaine du bâtiment, elle joue un rôle essentiel dans le choix des matériaux de revêtement pour assurer un confort thermique optimal.
- En industrie, elle est exploitée pour la conception de capteurs thermiques et de matériaux réfractaires.

La capacité thermique : La capacité thermique d'un matériau correspond à la quantité d'énergie qu'il peut emmagasiner ou restituer lorsqu'il subit une variation de température. Cette propriété est essentielle pour analyser le comportement thermique des matériaux et leur implication dans les échanges de chaleur.

Elle est déterminée par l'équation suivante

$$C = m * Cp \text{ (II.11)}$$

où :

- C : représente la capacité thermique en joules par kelvin (J/K),
- m : désigne la masse du matériau en kilogrammes (kg),

Cp : correspond à la capacité thermique massique en joules par kilogramme et par kelvin (J/kg·K), qui exprime la quantité de chaleur requise pour augmenter la température d'un kilogramme de matériau d'un degré Celsius.

## **Domaine d'application**

- Génie thermique : Amélioration des systèmes de stockage de chaleur et gestion efficace de l'énergie thermique.
- Secteur du bâtiment : Optimisation du confort thermique des habitations en limitant les fluctuations de température.
- Industrie : Sélection de matériaux adaptés aux équipements nécessitant un contrôle précis de la dissipation thermique, tels que les échangeurs de chaleur.

### ➤ **La dilatation thermique**

#### **Définition :**

La dilatation thermique est un phénomène physique qui se traduit par une modification des dimensions d'un matériau lorsqu'il est soumis à un changement de température. L'élévation de la température accroît l'agitation des particules constituant le matériau, ce qui entraîne une expansion. À l'inverse, une baisse de température provoque une contraction

#### **Types de dilatation thermique**

La dilatation thermique se manifeste sous trois formes distinctes :

1. **Dilatation linéaire** : Ce type de dilatation concerne l'allongement d'un matériau sous l'effet de la chaleur.

Elle est décrite par la relation :

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (II. 12)$$

Avec :

- $\Delta L$  représente la variation de longueur (m),
- $L_0$  correspond à la longueur initiale (m),
- $\alpha$  est le coefficient de dilatation linéaire ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
- $\Delta T$  désigne la variation de température ( $^{\circ}\text{C}$ ).

2. **Dilatation superficielle** : Elle se traduit par une augmentation de la surface d'un matériau lorsqu'il est exposé à un changement de température.
3. **Dilatation volumique** : Cette forme concerne l'expansion dans les trois dimensions d'un matériau solide, liquide ou gazeux sous l'effet de la chaleur. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta v = V_0 * \beta * \Delta T \quad (II. 13)$$

Avec :

$\beta$  : beta représente le coefficient de dilatation volumique. ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

➤ **L'émissivité :**

L'émissivité thermique désigne l'aptitude d'un matériau à diffuser un rayonnement infrarouge en fonction de sa température. Elle correspond au rapport entre l'énergie thermique qu'un matériau émet et celle émise par un corps noir parfait, qui constitue un émetteur de référence avec une émissivité de 1. Cette propriété, symbolisée par  $\epsilon$  est comprise entre 0 et 1. Plus sa valeur est élevée, plus le matériau est efficace pour restituer la chaleur sous forme de rayonnement thermique.

**L'émissivité d'un matériau est influencée par plusieurs paramètres :**

- La nature du matériau : Les surfaces lisses et métalliques réfléchissent davantage la chaleur et possèdent une émissivité faible, tandis que les matériaux rugueux ou non métalliques ont une émissivité plus importante.
- La température : Plus la température d'un matériau augmente, plus il émet de rayonnement thermique.

La longueur d'onde d'émission : Certains matériaux possèdent une émissivité variable selon la longueur d'onde du rayonnement, notamment dans le domaine infrarouge.

Toutes les propriétés thermiques des matériaux sont dépendantes de la nature du corps et de sa température [27].

➤ **Inertie thermique :**

L'inertie thermique correspond à la capacité d'un matériau à capter la chaleur, à conserver puis à la libérer progressivement. Elle dépend de plusieurs caractéristiques physiques, notamment la densité, la capacité thermique et la conductivité des matériaux. Plus un matériau est lourd et capable de retenir de l'énergie, plus son inertie thermique est importante. Cette propriété joue un rôle clé dans la stabilisation des températures en atténuant les écarts entre les phases de réchauffement et de refroidissement. Elle est largement exploitée dans des domaines comme l'ingénierie thermique et la conception de dispositifs de gestion énergétique.

Dans un bâtiment, l'inertie thermique participe à l'amélioration du confort intérieur en réduisant les variations de température. Pendant l'été, les surfaces massives, comme les murs et les sols, absorbent la chaleur accumulée au cours de la journée et la restituent lentement durant la nuit, limitant ainsi la surchauffe. En hiver, elles conservent la chaleur produite par le chauffage et la diffusent progressivement, ce qui optimise la performance énergétique du bâtiment. Une inertie thermique bien maîtrisée, associée à une isolation efficace et à une orientation adéquate, permet de réduire les besoins en chauffage et en climatisation, tout en garantissant un meilleur confort aux occupants.

**Types de l'inertie :**

• **Inertie thermique forte :**

L'inertie thermique forte correspond à la faculté d'un matériau ou d'une structure à accumuler, conserver et libérer la chaleur de manière progressive, grâce à une masse volumique élevée et une grande capacité thermique. Cette caractéristique aide à atténuer les fluctuations de la température intérieure en emmagasinant la chaleur pendant les phases chaudes, puis en la restituant doucement lorsque la température extérieure diminue, ce qui contribue à maintenir un environnement intérieur plus stable.

• **Inertie thermique faible :**

L'inertie thermique faible se caractérise par la faible aptitude d'un matériau ou d'un bâtiment à emmagasiner la chaleur et à la diffuser lentement. Ce phénomène est courant

dans les constructions utilisant des matériaux légers et peu massifs, comme le bois ou les cloisons en plaques de plâtre. Ces éléments retiennent peu d'énergie thermique et la transmettent rapidement, ce qui rend les températures intérieures plus instables. En conséquence, ce type de bâtiment est sujet à des changements rapides de température, réduisant le confort des occupants et accentuant le recours aux systèmes de régulation thermique comme le chauffage ou la climatisation.

- **Inertie thermique intérieure :**

L'inertie intérieure correspond à l'aptitude des composants situés à l'intérieur de la zone isolée thermiquement du bâtiment comme les murs de refend, les planchers ou les cloisons massives à capter, emmagasiner puis restituer la chaleur. Elle joue un rôle crucial dans la régulation de la température intérieure, indépendamment des caractéristiques de l'enveloppe extérieure.

Cette inertie agit directement sur le confort thermique des occupants, car elle réagit aux sources de chaleur présentes à l'intérieur du bâtiment, telles que le rayonnement solaire, la chaleur corporelle ou les équipements électroménagers.

- **Inertie thermique extérieure :**

L'inertie thermique extérieure désigne la faculté des parties du bâtiment placées à l'extérieur, comme les murs, les façades ou la toiture, à absorber la chaleur issue des conditions climatiques extérieures telles que le soleil, la température ambiante ou le vent et à la libérer lentement dans le temps. Cette inertie concerne donc les éléments qui sont directement exposés aux fluctuations de la température extérieure, avant la couche isolante.

- **Inertie répartie :**

L'inertie répartie correspond à la faculté d'un bâtiment à emmagasiner et diffuser la chaleur non pas de manière localisée, mais uniformément à travers tous ses matériaux et structures. Cela signifie que la masse thermique est distribuée de façon continue dans les murs, planchers, cloisons et autres composants, ce qui permet une absorption et une libération de la chaleur de façon plus équilibrée et prolongée dans le temps.

- **Inertie thermique activée :**

L'inertie activée correspond à la capacité d'un élément de construction ou d'un matériau à emmagasiner et libérer de la chaleur grâce à l'intégration d'un système actif de transfert thermique, comme des circuits de fluides (eau chaude ou froide) qui circulent à l'intérieur de la masse thermique des murs, planchers ou plafonds.

À la différence de l'inertie passive, qui repose uniquement sur les caractéristiques intrinsèques des matériaux, l'inertie activée fait appel à un équipement technique (comme les planchers chauffants/refroidissants, murs ou dalles équipés de tubes) pour gérer de manière précise et dynamique le stockage et la restitution de la chaleur dans le bâtiment.

### **Rôles de l'inertie :**

- Limiter les variations de température intérieure face aux changements extérieurs.
- Améliorer le confort thermique en maintenant une température plus stable.
- Réduire les besoins en chauffage et en climatisation, donc économiser de l'énergie.
- Décaler et atténuer les pics de chaleur pour éviter les surchauffes en été.
- Favoriser le rafraîchissement nocturne en permettant aux murs de stocker la fraîcheur de la nuit.
- Favoriser l'utilisation de la ventilation nocturne pour refroidir efficacement les matériaux.
- Réduire les besoins d'isolation active (climatisation, chauffage intense).
- Améliorer la qualité de l'air intérieur en évitant les surchauffes favorisant l'évaporation de polluants
- Faciliter la conception bioclimatique, en exploitant au mieux les ressources naturelles (soleil, vent).
- Réduire les besoins d'isolation active (climatisation, chauffage intense).

### **Avantages de l'inertie thermique :**

1. **Stabilité de la température intérieure** : Grâce à l'inertie thermique, les fluctuations de température extérieure ont moins d'impact sur l'intérieur du bâtiment. Cela permet de maintenir une température plus stable tout au long de la journée
2. **Confort thermique** : En été, l'inertie thermique aide à éviter des températures intérieures trop élevées en stockant la chaleur pendant la journée et en la restituant durant les nuits plus fraîches. En hiver, elle permet de conserver la chaleur accumulée grâce aux apports solaires
3. **Économie d'énergie** : En réduisant les besoins en chauffage et en climatisation, l'inertie thermique contribue à diminuer les factures d'énergie. Elle permet également une gestion plus efficace des systèmes de chauffage, en évitant les pics de consommation

**Applications pratiques :**

- **Matériaux utilisés** : Les matériaux lourds comme le béton, la brique pleine ou la pierre sont souvent privilégiés pour leur capacité à stocker la chaleur. En revanche, les matériaux légers ont une inertie thermique faible et sont moins efficaces pour réguler les températures intérieures

- **Conception bioclimatique** : L'intégration de l'inertie thermique dans la conception des bâtiments est essentielle pour optimiser leur performance énergétique. Cela inclut des stratégies comme l'isolation par l'extérieur pour maximiser l'effet des matériaux lourds.

Matériau	Type	Conductivité thermique ( $\lambda$ )
----------	------	--------------------------------------

		(W/m·K)	II.5
<b>Béton</b>	<i>Tableau II.3 Matériaux couramment utilisés : brique, béton, bois, [28]</i> Ordinaire		2,1
	Allégé (+ granulats poreux)		0,47 à 1,2
	Allégé (+argile expansé)		0,3 à 0,73
	Cellulaire		0,14 à 0,23
	Léger (+ granulats non poreux)		0,81 à 1,2
	Léger (+ granulats poreux)		0,22 à 1,2
	Léger (+ pierre ponce)		0,15 à 0,46
	Léger (+ argile expansé)		0,18 à 0,46
<b>Bois</b>	Epicéa, pin, sapin		0,13
	Hêtre, chêne		0,2
	Panneau en contreplaqué ou aggloméré		0,15
	Panneau de particules disposées à plat		0,13
	Panneaux de fibres extrudés		0,17
	Panneaux fibres tendres		0,17
	Panneaux fibres bitumés		0,050
	Panneaux fibres durs		0,17
<b>Brique</b>	Maçonnerie Briques réfractaires pleines		0,96
	Maçonnerie Briques réfractaires perforées		0,81
	Maçonnerie Briques pleine, perforées à haute résistance		0,5 à 0,96
	Maçonnerie Briques perforées allégées		0,3 à 0,45
	Maçonnerie Briques silico-calcaires		0,5 à 1,3
	Maçonnerie Briques de laitier granulé		0,47 à 0,76
	Maçonnerie blocs de béton cellulaire		0,22 à 0,29
	Maçonnerie parpaings		0,29 à 0,9

**Matériaux couramment utilisés :**



## **II.6 Nouveaux matériaux**

### **II.6.1 Bétons légers**

Les bétons légers se distinguent par leur faible densité et leur excellente capacité d'isolation thermique. Ils sont souvent utilisés dans des applications où le poids est un facteur critique, tout en offrant de bonnes propriétés mécaniques. Voici quelques caractéristiques clés :



*Figure II.18 Bétons légers*

**Conductivité thermique** : Les bétons légers peuvent avoir une conductivité thermique allant de 0,1 à 0,7 W/m·K, ce qui est significativement inférieur à celui des bétons classiques (environ 1,75 W/m·K) [29].

- **Densité** : Leur masse volumique varie entre 300 et 2000 kg/m<sup>3</sup>, selon le type de béton léger utilisé [30].

- **Résistance mécanique** : Bien que moins résistants que les bétons traditionnels, leur résistance à la compression peut atteindre jusqu'à 40 MPa, selon la composition [31].

- **Propriétés acoustiques** : Grâce à leur structure alvéolaire, ils offrent également de bonnes performances en matière d'isolation phonique [32]

- **Applications** : Utilisés pour des éléments porteurs et isolants, en réhabilitation ou comme remplissage [33].

### **II.6.2 Matériaux à changement de phase (PCM)**

Les matériaux à changement de phase (PCM) sont conçus pour stocker et libérer de l'énergie thermique lors de changements de température. Ils sont particulièrement efficaces pour réguler la température dans les bâtiments. Voici quelques points essentiels :

- **Fonctionnement** : Les PCM absorbent la chaleur lorsqu'ils fondent et la libèrent lorsqu'ils se solidifient, permettant ainsi de maintenir une température ambiante stable.
- **Applications** : Utilisés dans des systèmes de construction passifs pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment dans les murs, plafonds et planchers [34].
- **Types** : Les PCM peuvent être basés sur des sels hydratés, des paraffines ou d'autres matériaux organiques et inorganiques, chacun ayant des caractéristiques spécifiques en termes de température de fusion et de capacité thermique.

Ces nouveaux matériaux offrent des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique et le confort des bâtiments tout en réduisant leur impact environnemental.

## **II.7 Impact sur la Performance Énergétique**

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est devenue un enjeu majeur, surtout en raison de l'augmentation des prix de l'énergie et des défis climatiques . La France s'est engagée, dans le cadre des directives européennes, à réduire de 40% la consommation énergétique des bâtiments d'ici 2030[35]. L'objectif est d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, en rénovant 750 000 logements par an [36].

### **II.7.1 Solutions et techniques**

- ❖ **Isolation thermique** : L'isolation est le premier levier d'une rénovation énergétique performante. Les techniques ont évolué pour concilier efficacité et compacité, avec des matériaux comme les aérogels et les isolants biosourcés [37].

- ❖ **Systèmes de chauffage performants** : La rénovation énergétique passe par l'installation de systèmes de chauffage nouvelle génération, comme les pompes à chaleur air-eau et les chaudières à très haute performance énergétique [37].
  
- ❖ **Matériaux isolants** : Le choix des matériaux isolants joue un rôle clé dans la maîtrise thermique des bâtiments. Des solutions modernes comme la laine de roche, le polyuréthane et l'aérogel offrent des capacités d'isolation remarquables [38].
  
- ❖ **Ventilation double flux avec récupération de chaleur** : Ce type de ventilation assure un renouvellement constant de l'air intérieur tout en récupérant l'énergie thermique de l'air extrait. Cela permet de limiter les déperditions énergétiques et d'optimiser le confort thermique, notamment dans les bâtiments bien isolés [39]
  
- ❖ **Valorisation de l'inertie thermique des matériaux** : L'emploi de matériaux possédant une forte capacité à emmagasiner la chaleur, comme le béton, la terre crue ou les briques pleines, contribue à réguler naturellement la température intérieure. Cette propriété permet de réduire les écarts thermiques jour/nuit et de limiter le recours aux systèmes de chauffage ou de refroidissement [39].
  
- ❖ **Réduction de la pénétrabilité à l'air et traitement des ponts thermiques** : Réduire la pénétrabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment permet de limiter les infiltrations indésirables et les pertes de chaleur. De plus, un travail soigné au niveau des jonctions entre les composants structurels (murs, planchers, toitures, etc.) permet de supprimer les ponts thermiques, zones propices aux déperditions énergétiques [39].

## **II.7.2 Impacts**

- ❖ **Réduction des coûts** : L'optimisation de la performance énergétique des bâtiments permet de réaliser des économies substantielles, pouvant atteindre jusqu'à 30% des coûts actuels [40].
- ❖ **Parc immobilier ancien** : La rénovation énergétique se heurte à un défi de taille lorsqu'il s'agit d'adapter le parc immobilier ancien, en conciliant préservation et performance énergétique [40]

## **II.7.3 Défis**

- ❖ **Coût initial élevé des travaux** : Bien que les rénovations énergétiques permettent de réaliser des économies sur le long terme, le montant initial des investissements (notamment pour l'isolation, le remplacement des systèmes de chauffage ou la ventilation) reste souvent important. Ce facteur représente un obstacle majeur pour de nombreux foyers, en particulier lorsque les aides financières sont insuffisantes ou difficiles à obtenir.[41]
- ❖ **Insuffisance de professionnels qualifiés** : La qualité des travaux est déterminante pour garantir l'efficacité énergétique après rénovation. Cependant, certaines zones souffrent encore d'un déficit de personnel formé et compétent, et il est nécessaire d'intensifier la formation continue afin d'accompagner l'évolution rapide des techniques et des matériaux dans le secteur du bâtiment.[41]
- ❖ **Contraintes de production des matériaux innovants** : La fabrication à grande échelle de matériaux isolants modernes, tels que les aérogels ou isolants issus de ressources naturelles, rencontre parfois des limites techniques. Ces procédés spécifiques peuvent restreindre leur disponibilité sur le marché, accroître leur coût, et freiner leur intégration dans les projets de rénovation. [41]

## **Conclusion**

L'isolation thermique est un levier essentiel pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Les différentes techniques et types d'isolants, qu'ils soient classiques ou innovants, doivent être choisis en fonction des contraintes du projet. L'étude des propriétés thermiques permet d'optimiser les performances. Une isolation bien adaptée contribue à répondre aux enjeux environnementaux tout en améliorant le confort intérieur.

---

*Chapitre III :*

*Etude de cas*

---

## Introduction

Le secteur du bâtiment suscite un intérêt croissant en matière de consommation énergétique, notamment face aux enjeux environnementaux et économiques liés à l'utilisation des ressources énergétiques. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur cette problématique en adoptant diverses approches méthodologiques, et en analysant plusieurs facteurs pouvant contribuer à la réduction de la demande énergétique, tels que le choix des matériaux, l'isolation thermique, l'étanchéité à l'air ou encore l'efficacité des équipements techniques.

Dans ce contexte, la présente étude vise à analyser les besoins énergétiques d'un bâtiment résidentiel représentatif du contexte algérien. Un modèle de base a été défini en prenant en compte les caractéristiques physiques et géographiques propres au bâti local.

La suite de ce travail présentera la méthodologie retenue, notamment l'approche des degrés-jours, reconnue pour sa simplicité et sa pertinence dans les cas où l'usage du bâtiment et la performance des systèmes de chauffage et de climatisation restent constants.

### III.1 Présentation de la wilaya

La wilaya de Tlemcen est située à l'extrême nord-ouest de l'Algérie, à la frontière avec le Maroc. Elle se distingue par son riche patrimoine historique, culturel et architectural, hérité de plusieurs civilisations, notamment arabo-musulmane et andalouse. Tlemcen bénéficie d'un climat méditerranéen, avec des hivers modérés et des étés chauds, et présente une diversité géographique allant des montagnes de la Trara aux plaines agricoles fertiles. Elle joue un rôle important sur les plans touristique, agricole et universitaire au niveau national.

La température moyenne annuelle dans la région de Tlemcen est d'environ 17,5 °C, avec une pluviométrie moyenne avoisinant les 520 mm par an, variant selon l'altitude entre les zones côtières, les plaines et les montagnes de l'intérieur.

À Tlemcen, les étés sont courts, très chaud, sec et dégagé dans l'ensemble et les hivers sont long, frisquet, venteux et partiellement nuageux. Au cours de l'année, la température varie généralement de 2 °C à 32 °C et est rarement inférieure à -2 °C ou supérieure à 36 °C. [42]



Figure III.1 Situation Nationale de la wilaya de Tlemcen [43]

### III.2 Paramètre du bâtiment (cas de base) :

#### III.2.1 Présentation du site du cas d'étude

La maison qui fait l'objet de cette étude possède une surface habitable de **105,88 m<sup>2</sup>** pour un volume de **315,84 m<sup>3</sup>**. Construite avec des matériaux locaux, elle est implantée dans la **wilaya de Tlemcen**, plus précisément dans la **commune de Chetouane**, au niveau d'un quartier résidentiel. Elle est habitée par **7 personnes**.

La maison contient trois chambres est positionnée vers le sud, la salle de séjour est vers le nord-est et la cuisine vers nord-ouest et du côté de enfin salle de bain et les toilettes, L'entrée du bâtiment est orientée vers l'est, et la cour (en cours de construction) orienté vers le ouest.

Ce logement est construit sur la base d'une architecture simple, sans considération pour l'efficacité énergétique, les murs extérieurs non isolés sont en double cloison de briques creuse d'une épaisseur de 10 cm et lame d'air avec un enduit en mortier sur les deux côtés, les murs intérieurs sont en brique creuse de 15 cm l'enduit est en mortier sur les deux côtés.

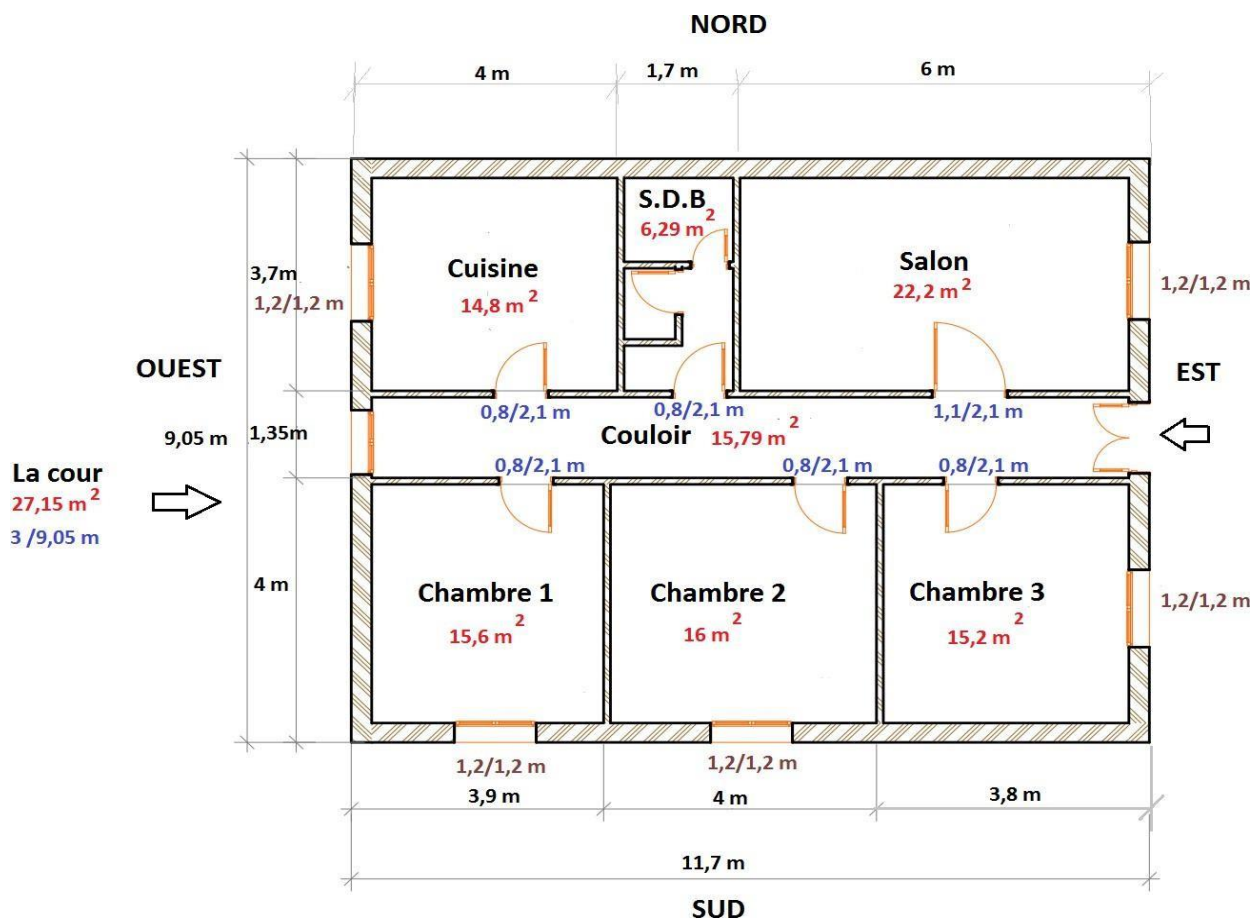


Figure III.2 Plan général du bâtiment cas de base

### III.2.2 Données architecturales de la maison

Les caractéristiques architecturales de la maison sont récapitulées dans le tableau suivant :

*Tableau III.1 Caractéristiques architecturales*

<b>Hauteur de la maison</b>	<b>2.9 m</b>
<b>Surface de la maison</b>	<b>105.88 m<sup>2</sup></b>
<b>Volume de la maison</b>	<b>315.84m<sup>3</sup></b>

### III.2.3 Données géographiques de la maison

Les caractéristiques géométriques de la maison sont récapitulées dans le tableau suivant :

*Tableau III.2 Caractéristiques géométriques*

<b>Latitude (<math>\phi</math>)</b>	<b>34,56</b>
<b>Longitude (L)</b>	<b>-1,19</b>
<b>Altitude</b>	<b>830m</b>

### III.2.4 Données températures de Tlemcen

*Tableau III.3 Données températures de Tlemcen [44]*

<b>Mois</b>	<b>T. moy [°C]</b>
<b>Janvier</b>	10
<b>Février</b>	12
<b>Mars</b>	13
<b>Avr.</b>	18
<b>Mai</b>	23
<b>Juin</b>	27
<b>Juil.</b>	31
<b>Aout</b>	31
<b>Sept.</b>	27
<b>Oct.</b>	19
<b>Nov.</b>	15
<b>Déc.</b>	12

### III.2.5 Caractéristique des fenêtres

Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques des fenêtres de la maison :

*Tableau III.4 Caractéristiques de fenêtre de base*

Caractéristiques	Vitre	Nombre	Dimension
Fenêtre de base	Simple	5	1.2m/1.2m

### III.2.6 Caractéristique des portes

Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques des portes de la maison :

*Tableau III.5 Caractéristiques des portes*

Caractéristiques	Nombre	Le cadre	Dimension
Les portes des chambres	5	En bois	2,1m/0,8m
La porte de salon	1	En bois	2,1m/1,1m
La porte de S.D.B	1	En bois	1,95m/0,5m
La porte de WC	1	En bois	1,88m/0,7m
Les portes extérieures	2	En métal	2,10m/1,17m

### III.2.7 Dimensions des éléments résistants

Les prédimensionnements pour ce bâtiment a donné les dimensions suivantes :

- Poteau .....40×40cm ;
- Poutre longitudinale ..... 30x45 cm ;
- Poutre transversale ..... 25x40cm ;

## III.3 Calcul des déperditions

### III.3.1 Données de calcul

#### III.3.1.1 Planchers

Notre bâtiment possède un seul type de plancher qui est « un plancher dalle pleine ».

#### Plancher terrasse

Les différentes couches constitutives du plancher terrasse ainsi que leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau III.6.

Tableau III.6 Composants et caractéristiques du plancher terrasse

Composants	Epaisseur [Cm]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m <sup>2</sup> . °C/W]
Forme de pente	10	1.15	0.087
Dalle pleine	15	1.75	0.085
Enduit au mortier	1,5	1.15	0.013
Enduit plâtre	2	0.35	0.057
Résistance d'échange Superficielle	/	/	0.22

En utilisant ses données, on va calculer le coefficient de conductance K.

La résistance thermique R= 0.46 [m<sup>2</sup>. °C/W]

$$\text{Donc } 1/K = 0.242 + 1/h_i + 1/h_e$$

$$1/K = 0.242 + 0.17 + 0.05$$

$$1/K = 0.462$$

$$K = 2.16 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

### Plancher bas sur terre-plein

La composition du plancher bas sur terre-plein sera comme il est indiqué dans le Tableau III.7.

Tableau III.7 Composants et caractéristiques du plancher bas sur terre-plein

Composants	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m <sup>2</sup> .°C/W]
Carrelages scellés	1	1	0.01
Chape en mortier	5	1.15	0.043
Dalle en béton	15	1.75	0.085
Sol naturel ou hérisson	20	1,2	0.166
Résistance d'échange Superficielle	/	/	0.34

La résistance thermique R= 0.304 [m<sup>2</sup>. °C/W]

Calcul du coefficient de conductance K

$$\text{On a : } 1/K = 0.304 + 1/h_i + 1/h_e$$

$$1/ K = 0.304 + 0.17 + 0.17$$

$$1/K = 0.644$$

$$K = 1.55 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

### III.3.1.2 Murs de façade

La maçonnerie utilisée dans ce projet est la brique creuse présente dans deux types de murs :

- Les murs extérieurs sont en double cloisons.
- Murs intérieurs de séparation entre les pièces d'un appartement sont en simple cloison.

#### Mur en double cloison

Tableau III.8 Composants et caractéristiques du mur en double cloisons

Composants	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m <sup>2</sup> .°C/W]
Enduit plâtre	1,5	0.35	0.042
Enduit ciment	1,5	1.15	0.013
Parois en briques creuses	10	0.5	0.2
Lame d'air	5	/	0.16
Parois en brique creuse	15	0.5	0.3
Enduit ciment	1,5	1.15	0.013

La résistance thermique  $R = 0.728$  [m<sup>2</sup>.°C/W]

- Pour une paroi en contact avec l'extérieur :

La résistance d'échange superficielle est de  $0.17$  [m<sup>2</sup>. °C/W]

Donc  $1/K = 0.728 + 1/h_i + 1/h_e$

$1/K = 0.728 + 0.11 + 0.06 = 0.898$

$K = 1.11$  [m<sup>2</sup>. °C/W]

### III.3.1.3 Retombées des poutres

#### Poutres longitudinales

Nous allons calculer le coefficient de conductance K pour poutres longitudinales des murs de façade donnant vers l'extérieur.

Tableau III.9 Composants et caractéristiques des poutres longitudinales

Composants	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m <sup>2</sup> .°C/W]
Enduit plâtre	1,5	0.35	0.042
Enduit ciment	1,5	1.15	0.013
Béton	30	1.75	0.17
Enduit ciment	1,5	1.15	0.013
Résistance d'échange superficiel	/	/	0.17

$$1/K = \sum R = 0.408$$

$$K = 2.45 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

### Poutres transversales

Pour une épaisseur de béton de 25 cm avec le même revêtement on a :

- Pour les poutres donnant vers l'extérieur, le calcula donner un coefficient de conductance K égal à 2.63 [m<sup>2</sup>. °C/W]

### III.3.1.4 Retombées des poteaux

Tableau III.10 Composants et caractéristiques thermiques du poteau

Composants	Epaisseur [cm]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/m. °C]	Résistance thermique R [m <sup>2</sup> .°C/W]
Enduit plâtre	1,5	0.35	0.042
Enduit ciment	1,5	1.15	0.013
Béton	40	1.75	0.22
Enduit ciment	1,5	1.15	0.013
Enduit plâtre	1,5	0.35	0.042
Résistance d'échange superficielle			0.22

$$1/K = \sum R = 0.55$$

$$K = 1.81 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

### III.3.2 Calcul des déperditions à travers les parois en contact avec l'extérieur

Les déperditions surfaciques par transmission ( $D_s$ ) à travers une paroi pour des températures différentes sont donnée par la formule suivante :

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

Avec :

- K [m<sup>2</sup>. °C/W] : coefficient de transmission surfacique (conductance)
- A [m<sup>2</sup>] : surface intérieure de la paroi.

Tableau III.11 Déperditions surfaciques vers l'extérieur

Parois	Surface A [m <sup>2</sup> ]	K [m <sup>2</sup> . °C/W]	D <sub>s</sub> [W/°C]
Plancher terrasse	105.88	2.16	228.7
Plancher bas sur terre-plein	105.88	1.55	164.11
Murs extérieur	71.9	1.11	79.09
Fenêtres	7.2	2.10	15.12
Portes	4.914	3.5	17.2
Poteaux	18.56	1.81	33.59
Poutres longitudinales	10.53	2.45	25.8
Poutres transversales	7.24	2.63	19.04

Remplacent ces résultats dans la formule précédente :

$$D_s = \sum K \times A = 582.85 \text{ [W/°C]}$$

### III.3.3 Calcul des déperditions par renouvellement d'air

Les déperditions par renouvellement d'air sont données par la formule suivante :

$$D_R = 0.34 \times \tau \times V_i \quad \text{[W/°C]}$$

Avec

0.34 : [W. h/m<sup>3</sup>. °C] chaleur volumique de l'air ;

$\tau$  : [1/h] Taux de renouvellement d'air ;

$V_i$  : [m<sup>3</sup>] Volume du local.

On a :

0 < $V_i$ < 100	$\tau = 1$
100 < $V_i$ < 500	$\tau = 0,75$
500 < $V_i$ < 1000	$\tau = 0,5$

Donc :

$$D_R = 0.34 \times 0.75 \times 315.84$$

$$D_R = 80.53 \text{ [W/°C]}$$

La somme totale des déperditions du bâtiment est de

$$\begin{aligned} DT &= D_s + D_R \\ DT &= 582.85 + 80.53 \\ DT &= 663.38 \text{ W/°C} \end{aligned}$$

### III.4 Besoins en Chauffage et en climatisation

#### III.4.1 Notions du degré jours pour le chauffage et/ou refroidissement :

L'estimation des besoins énergétiques repose sur la différence de température entre l'intérieur d'un bâtiment et l'extérieur, sachant que cette température extérieure varie selon la localisation.

Pour tenir compte de cette variation, la notion de degré-jour a été développée. Elle permet d'évaluer la quantité de chaleur utilisée pour chauffer un bâtiment sur une période donnée, tout en facilitant la comparaison entre bâtiments situés dans des régions climatiques différentes.

##### III.4.1.1 Degré-jour de chauffage :

Le degré-jour de chauffage correspond à une mesure obtenue en multipliant le nombre de jours durant lesquels le chauffage est nécessaire par l'écart entre la température moyenne intérieure souhaitée dans le local et la température moyenne extérieure sur cette même période.

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

##### III.4.1.2 Degré-jour de climatisation :

Le degré-jour de climatisation correspond à une mesure obtenue en multipliant le nombre de jours durant lesquels la climatisation est nécessaire par l'écart entre la température moyenne extérieure et la température moyenne intérieure souhaitée dans le local sur cette même période.

$$\text{DJF} = \text{nombre de jours climatisés} \times (\text{T extérieure moyenne} - \text{T intérieure moyenne})$$

Tableau III.12 Calcul du nombre de degrés jours mensuel (Dj)

Mois	Température de confort	Température moyenne ambiante	Dj pour le chauffage	Dj pour la climatisation
Janvier	20	10	310	
Février	20	12	224	
Mars	20	13	217	
Avril	20	18	60	
Mai	20	23		93
Juin	25	27		60
Juillet	25	31		186
Août	25	31		186
Septembre	25	27		60
Octobre	20	19	31	
Novembre	20	15	150	
Décembre	20	12	248	
		<b>Total</b>	<b>1240</b>	<b>585</b>

Dans ces conditions, la somme totale des déperditions du bâtiment est de

$$D_T = D_s + D_R$$

$$D_T = 582.85 + 80.53$$

$$D_T = 663.38 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$D_T = 663.38 \text{ W/}^\circ\text{C}$ , où le coefficient  $G$  de déperdition volumique vaut :

$$G = \frac{D_T}{V_i}$$

$$G = \frac{663.38}{315.84}$$

$$G = 2.1 \text{ W/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Bien qu'il soit plus difficile de tenir compte des exigences thermiques des occupants, ces derniers, accepteront-ils de ne pas utiliser certaines pièces en hiver pour le chauffage ou en été pour la climatisation ? Compte tenu de tout ça, on peut alors évaluer les besoins comme suit :

$$C = 24 \times G \times V_i \times D_j$$

Tableau III. 13 Calcul les besoins en Chauffage et en climatisation annuel  $C$  (KWh)

Besoins	Mois	Dj	C (KWh)
<b>Chauffage</b>	Octobre à avril	1240	19738.7
<b>Climatisation</b>	Mai à septembre	585	9312.23

Tableau III.14 Calcul les besoins en Chauffage et en climatisation mensuelle  $C$  (KWh)

Besoins	C (KWh)
<b>Chauffage</b>	2819.8
<b>Climatisation</b>	1862.4

### Conversion de kWh en kcal/h

◆ Formule de conversion :

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$$

Donc :

$$2819,81 \text{ kWh} = 2819,81 \times 860 = 2\,424\,023,6 \text{ kcal/mois}$$

### III.4.2 Intégration des besoins en eau chaude sanitaire (ECS)

Pour assurer un confort thermique optimal dans un bâtiment, la puissance de la chaudière doit couvrir non seulement les besoins en chauffage, mais également ceux liés à la production d'eau chaude sanitaire (ECS).

### Estimation de l'énergie nécessaire pour l'ECS

L'énergie requise pour chauffer une masse donnée d'eau est exprimée par la formule :

$$E = m \times c \times \Delta T$$

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  $\approx 1,16 \text{ Wh/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ,
- $\Delta T = T_{\text{chaude}} - T_{\text{froide}} = 55 - 15 = 40^\circ\text{C}$ ,

**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**

Le bilan de puissance est une opération qui consiste à effectuer un bilan du courant en évaluant la consommation de chaque appareil et équipement électrique à son niveau jusqu'à la source.

Notre travail consiste à définir les différents appareils utilisés ainsi leur puissance unitaire et leurs durées d'utilisations par jour et par mois. Pour ensuite calculer la consommation mensuelle d'électricité et du gaz de la maison.

#### **III.5.1 Méthodologie de calcul**

Le bilan de puissance est une étape indispensable dans une installation électrique. Il prend en compte la totalité des puissances des appareils installés et leur utilisation. Pour un résultat garantissant le bon fonctionnement de l'installation.

Pour le calcul de la consommation mensuelle du gaz et de l'électricité de la villa, nous allons appliquer la loi suivante :

**Consommation = nombre d'appareil  $\times$  Pu  $\times$  temps d'utilisation  $\times$  nombre de jours**

- **Pu** : Puissance d'utilisation d'un appareil.

III.5.2 Pour la saison d'été

Tableau III.15 La consommation d'électricité

Les appareils	Nombre d'appareil	Puissance d'appareil (W)	Temps de travail	Nombre de jours d'utilisation par mois	Energie Consommée (KWh)
Lampe	10	75W	6 heures	30	135
Lampe (LED)	5	18W	6 heures	30	16.2
Congélateur	1	300W	8 heures	30	72
Réfrigérateur	1	280W	8 heures	30	67.2
TV Plasma	2	150W	5 heures	30	45
Machine à laver	1	2300W	1 heure	15	34.5
Plaque électrique	1	3000W	3 heures	30	270
Four électrique	1	3400 W	0,5heur	20	34
Micro-onde	1	700W	0,25heur	30	5.25
Prise 16A	6	65W	3 heures	30	35.1
Prise 16A	4	100W	2 heures	30	24
Climatiseur	2	1200W	8 heures	30	576
<b>Totale</b>					<b>1314.25</b>

Tableau III.16 La consommation du gaz

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	1	3990.4	2	30	239424
<b>Total en thermie</b>					<b>239.424</b>

Remarque

Le plus proche modèle standard est un **climatiseur de 9 000 BTU/h** ( $\approx 2,6$  kW) par unité. Les climatiseurs n'utilisent pas toute leur puissance en continu, mais s'adaptent à la charge réelle, fonctionnant en moyenne à environ **75 %** de leur capacité.

La chaudière à installer doit donc avoir une **puissance minimale de 3990.4 kcal/h**, afin de répondre efficacement à la demande énergétique du bâtiment en eau chaude sanitaire.

III.5.3 Pour la saison d'hiver

Tableau III.17 La consommation d'électricité

Les appareils	Nombre d'appareil	Puissance d'appareil (W)	Temps de travail	Nombre de jours d'utilisation par mois	Energie Consommée (KWh)
Lampe	10	75W	6 heures	30	135
Lampe (LED)	5	18W	6 heures	30	16.2
Congélateur	1	300W	8 heures	30	72
Réfrigérateur	1	280W	8 heures	30	67.2
TV Plasma	2	150W	5 heures	30	45
Machine à laver	1	2300W	1 heure	15	34.5
Plaque électrique	1	3000W	3 heures	30	270
Four électrique	1	3400 W	0,5heur	20	34
Micro-onde	1	700W	0,25heur	30	5.25
Prise 16A	6	65W	3 heures	30	35.1
Prise 16A	4	100W	2 heures	30	24
				<b>Totale</b>	<b>738.25</b>

Tableau III.18 La consommation du gaz

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	1	11097.7	8	30	2663448
				<b>Total en thermie</b>	<b>2663.448</b>

Remarque

La chaudière à installer doit donc avoir une puissance minimale de **11097.7 kcal/h**, afin de répondre efficacement à la demande énergétique du bâtiment en chauffage et en eau chaude sanitaire.

### III.5.4 La consommation mensuelle d'électricité et du gaz

#### III.5.4.1 Électricité

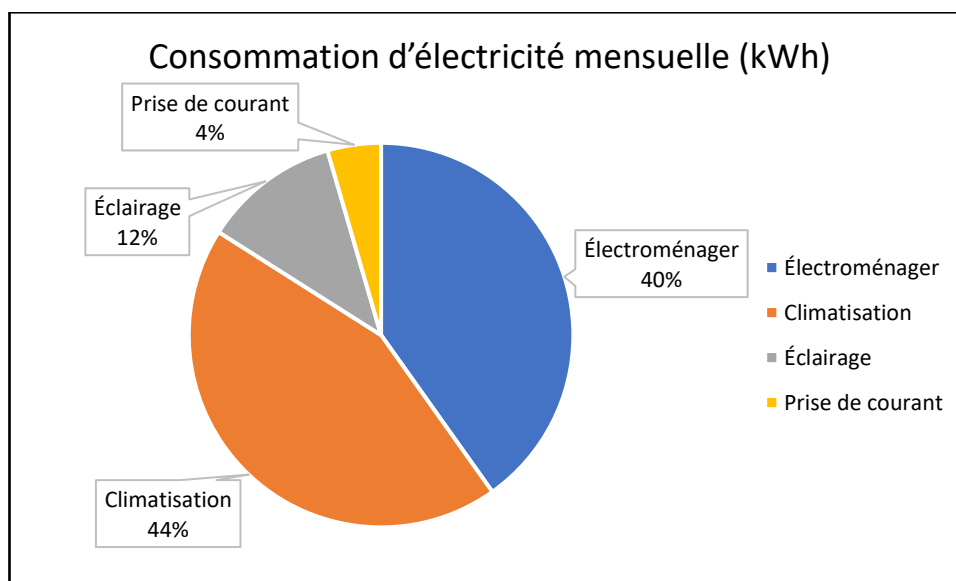
##### Pour l'été

Après avoir fait les calculs, on a trouvé une consommation mensuelle d'électricité égale à 1314.25 kWh.

*Tableau III.19 La consommation mensuelle d'électricité des équipements en été*

Appareillage	Consommation d'électricité mensuelle (kWh)
Électroménager	527,95
Climatisation	576
Éclairage	151,2
Prise de courant	59,1

Le diagramme circulaire représente le pourcentage de la consommation mensuelle de l'électricité par type d'équipements en été.



*Figure III.3 La répartition de la consommation mensuelle d'électricité par type d'équipements en été*

##### Pour l'hiver

Après avoir fait les calculs, on a trouvé une consommation mensuelle d'électricité égale à 738.25 KWh

Tableau III.20 La consommation mensuelle d'électricité des équipements en hiver

Appareillage	Consommation d'électricité mensuelle (kWh)
Électroménager	527,95
Éclairage	151,2
Prise de courant	59,1

Le diagramme circulaire représente le pourcentage de la consommation mensuelle de l'électricité par type d'équipements en hiver.

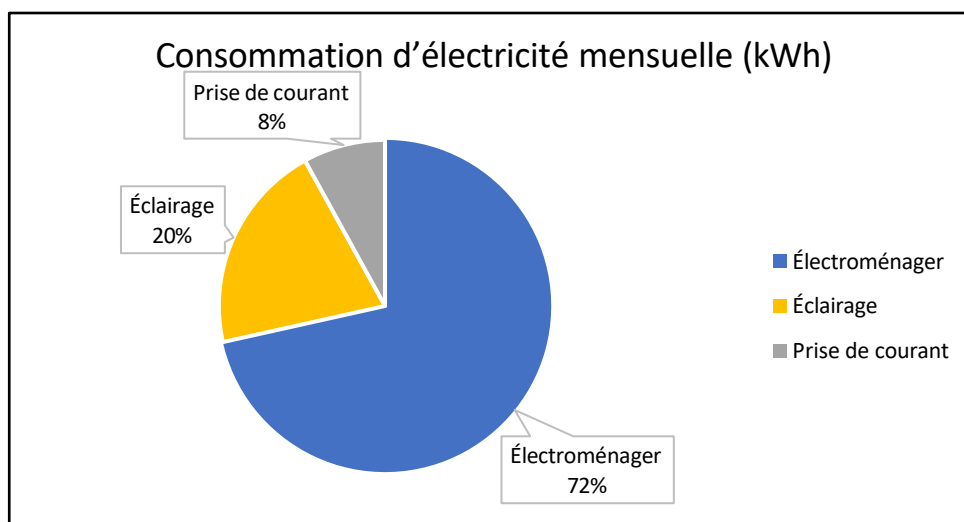


Figure III.4 La répartition de la consommation mensuelle d'électricité par type d'équipements en hiver

### III.5.4.2 Gaz

#### Pour l'été

Les calculs nous ont donné une consommation mensuelle du gaz égale à 239.424 thermie.

Tableau III.21 La consommation mensuelle du gaz des équipements en été

Appareillage	Consommation mensuelle du gaz (thermie)
Chaudière	239.424

#### Pour l'hiver

Les calculs nous ont donné une consommation mensuelle du gaz égale à 2663.448 thermie.

Tableau III.22 La consommation mensuelle du gaz des équipements en hiver

Appareillage	Consommation mensuelle du gaz (thermie)
Chaudière	2663.448

**III.5.5 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz**

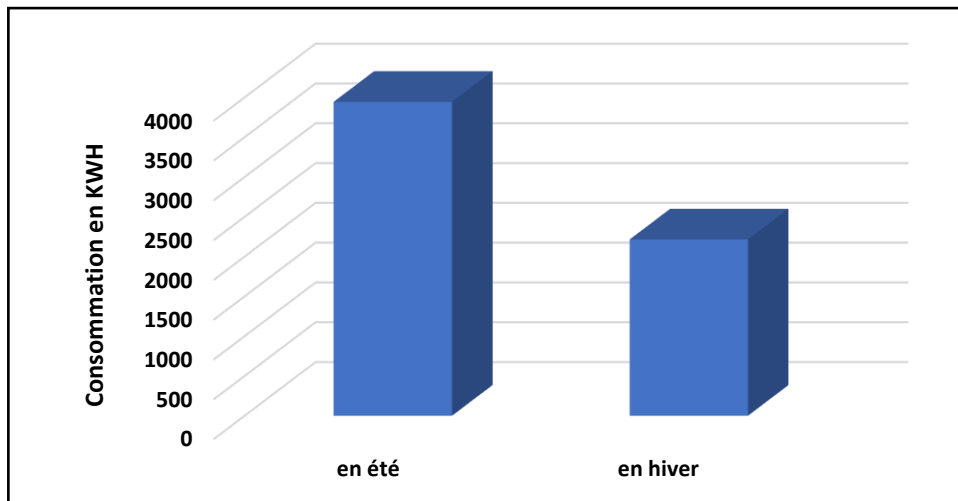
**III.5.5.1 Pour l'électricité**

Le total de la consommation trimestrielle d'électricité pour les saisons d'été et d'hiver nous a donné les valeurs mentionnées dans le tableau III.23.

*Tableau III.23 La consommation trimestrielle d'électricité en été et en hiver*

La consommation trimestrielle d'électricité en été (kWh)	La consommation trimestrielle d'électricité en hiver (kWh)
3942,75	2214,75

L'histogramme schématise la consommation trimestrielle de l'électricité en été et en hiver.



*Figure III.5 La consommation trimestrielle d'électricité pour les saisons d'été et d'hiver.*

**III.5.5.2 Pour le gaz**

Le total de la consommation trimestrielle du gaz pour les saisons d'été et d'hiver nous a donné les valeurs mentionnées dans le tableau III.24.

*Tableau III.24 La consommation trimestrielle du gaz en été et en hiver*

La consommation trimestrielle du gaz en été (Thermie)	La consommation trimestrielle du gaz en hiver (Thermie)
718,272	7990,344

L'histogramme schématise la consommation trimestrielle du gaz en été et en hiver.

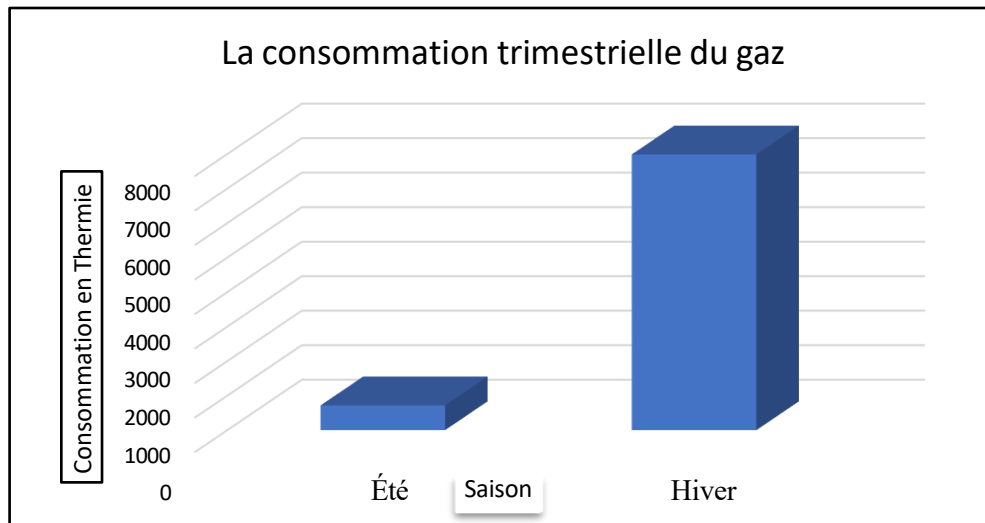


Figure III.6 La consommation trimestrielle du gaz pour les saisons d'été et d'hiver.

### III.6 Estimation de la facture

On détermine la facture d'électricité et du gaz à partir du bilan de puissance calculer précédemment

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

**Le cout par tranche d'électricité :** il se divise en quatre tranches, le ministre 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. [45]

**Le cout 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 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. [45]

**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. [45]

Nous allons utiliser le cours de **Mme L. BENAHMED** pour l'estimation de la facture trimestrielle d'électricité et du gaz.

III.6.1 L'estimation de la facture pour l'été

Tableau III.25 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en été

La consommation trimestrielle de l'électricité en kWh	La consommation trimestrielle du gaz en thermie
3942.75	718,272

III.6.1.1 Pour l'électricité

Tableau III.26 le cout d'électricité pour l'été

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	3749.477
4	2942.75	5.4796	16125.09	
<b>Total (DA)</b>			<b>20478.79</b>	<b>3816.493</b>
			<b>24295.283</b>	

III.6.1.2 Pour le gaz

Tableau III.27 le cout de gaz pour l'été

Tranche	Consommation (Th)	Prix unitaire (DA/Th)	Prix total (DA)	TVA (DA)
1	718,272	0,1682	120.813	10.873
2	0	0,3245	0	
3	0	0.4025	0	0
4	0	0,4599	0	
<b>Total (DA)</b>			<b>120.813</b>	<b>10.873</b>
			<b>131.686</b>	

### III.6.2 L'estimation de la facture pour l'hiver

Tableau III.28 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en hiver

La consommation trimestrielle de l'électricité en kWh	La consommation trimestrielle du gaz en thermie
2214,75	7990,344

#### III.6.2.1 Pour l'électricité

Tableau III.29 le cout d'électricité pour l'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	750	4.812	3609	1950.415
4	1214.75	5.4796	6656.3441	
<b>Total (DA)</b>			<b>11010.0441</b>	<b>2017.4383</b>
			<b>13027.4824</b>	

#### III.6.2.2 Pour le gaz

Tableau III.30 le cout de gaz pour l'hiver

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	5000	0.4025	2012.5	425.222
4	490.344	0,4599	225.5092	
<b>Total (DA)</b>			<b>2873.4217</b>	<b>482.409</b>
			<b>3355.8307</b>	

## **Conclusion**

L'étude thermique menée dans ce chapitre a permis de dresser un état des lieux détaillé du comportement énergétique du bâtiment dans sa configuration d'origine. Les calculs ont mis en évidence des déperditions thermiques importantes, notamment à travers les parois opaques (murs, toiture, plancher), les vitrages simples et l'absence d'isolation efficace.

La déperdition thermique totale (DT) du bâtiment atteint **663,38 W/°C**, ce qui reflète une faible performance de l'enveloppe thermique. Les besoins énergétiques annuels ont été évalués à **19738,7 kWh pour le chauffage et 9312,2 kWh pour la climatisation**, traduisant une **dépendance énergétique élevée** pour maintenir un confort thermique intérieur.

L'estimation de la consommation d'énergie (électricité et gaz) ainsi que des factures associées montre **un coût énergétique élevé** pour un usage domestique standard, aggravé par un **rendement moyen des équipements existants** (chaudière classique, climatiseurs ON/OFF, appareils peu efficaces).

Ces résultats confirment la nécessité de mettre en œuvre des **solutions d'amélioration énergétique ciblées**, qui seront présentées dans le chapitre suivant. L'objectif est de réduire les pertes, optimiser les consommations et améliorer le confort, tout en rendant le bâtiment plus performant sur le plan économique et environnemental.

---

*Chapitre IV :*

*Optimisation Énergétique  
et interprétations  
des résultats*

---

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### Introduction

Dans un contexte de transition énergétique et de réduction des consommations, l'amélioration de la performance thermique du bâtiment représente un levier essentiel. Le présent chapitre vise à évaluer l'impact d'une stratégie d'isolation thermique appliquée au bâtiment étudié dans le chapitre précédent.

Après avoir identifié et analysé les déperditions thermiques du bâtiment à l'état initial, une série de modifications est proposée dans ce chapitre, notamment l'ajout d'un isolant sur les murs de façade et le plancher. Cette intervention a pour objectif de réduire les pertes d'énergie, d'optimiser les besoins en chauffage et en climatisation, et, par conséquent, d'améliorer l'efficacité énergétique globale du bâtiment.

Par ailleurs, des ajustements au niveau des équipements thermiques sont envisagés afin d'accompagner ces améliorations de l'enveloppe. Une comparaison rigoureuse entre la situation avant et après les travaux sera menée à travers des indicateurs clés tels que les déperditions thermiques, les besoins énergétiques, la consommation d'énergie (électricité et gaz) et les coûts associés.

Cette approche permettra de quantifier les gains obtenus, de démontrer la pertinence de l'isolation thermique choisie, et de mettre en évidence les avantages économiques et environnementaux d'une rénovation énergétique ciblée.

### IV.1 Présentation des modifications apportées

#### IV.1.1 Isolation thermique des parois

##### IV.1.1.1 Isolation des murs par l'extérieur

Les murs de façade du bâtiment étudié dans le chapitre précédent présentent une conductance thermique relativement élevée ( $K = 1,11 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ), entraînant d'importantes pertes de chaleur en hiver et une surchauffe en été. Afin d'améliorer leur performance thermique, une solution d'isolation par l'extérieur (ITE) a été retenue, en utilisant un matériau innovant et à très haute efficacité : **l'aérogel de silice**.

L'isolation par l'extérieur présente plusieurs avantages majeurs :

- Suppression des ponts thermiques (aux jonctions plancher/façade),
- Préservation de la surface intérieure habitable,

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

- Amélioration de l'inertie thermique des murs,
- Protection des parois contre les chocs thermiques et l'humidité extérieure.

### Choix de l'isolant : aérogel de silice

L'aérogel de silice est un isolant très performant grâce à sa **structure nanoporeuse**, qui limite fortement les transferts thermiques. Il est utilisé ici sous forme de **panneaux rigides** d'épaisseur **30 mm**, directement appliqués sur les murs extérieurs, puis recouverts d'un enduit de finition renforcé.

Les caractéristiques thermiques du matériau sont les suivantes :

- **Conductivité thermique  $\lambda$**  : environ **0,014 W/m·K**,
- **Résistance thermique R** : environ **2,14 m<sup>2</sup>·K/W** pour 30 mm,
- **Comportement au feu** : excellent (inorganique, incombustible),
- **Hydrophobe** : adapté à une pose en façade avec finition étanche.

### Performances thermiques après intervention

La résistance thermique totale du mur (structure existante + aérogel) augmente significativement, ce qui permet de réduire la conductance de **K = 1,11 W/m<sup>2</sup>·°C** à environ **K ≈ 0,33 W/m<sup>2</sup>·°C**. Cette amélioration contribue fortement à la baisse globale des besoins en chauffage et en climatisation.

*Tableau IV.1 coefficient de conductance K avant et après l'isolation de murs*

Élément	K avant [W/m <sup>2</sup> ·K]	R isolant ajouter [m <sup>2</sup> ·K/W]	K après [W/m <sup>2</sup> ·K]
Mur de façade	1.11	≈ 2.14 (aérogel 30 mm)	≈ 0.33

#### IV.1.1.2 Isolation de plancher (terrasse) par polystyrène expansé (PSE)

Le bâtiment étudié est couvert par une toiture terrasse de type **dalle pleine**, dont les caractéristiques thermiques dans l'état initial révèlent une **conductance thermique élevée (K = 2,16 W/m<sup>2</sup>·°C)**, comme présenté dans le chapitre précédent. Cette configuration provoque des **pertes thermiques importantes en hiver** et un **réchauffement excessif en été**, en particulier dans les pièces situées en étage.

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

Pour améliorer ce comportement, une **isolation répartie** a été mise en place au niveau de la toiture terrasse, en utilisant un isolant courant mais efficace : le **polystyrène expansé (PSE)**.

### Choix de l'isolant : polystyrène expansé (PSE)

Le **PSE** est un isolant synthétique utilisé fréquemment pour les toitures, grâce à ses performances thermiques correctes, sa légèreté et son bon rapport qualité/prix. Il est ici intégré sous forme de **panneaux rigides de 80 mm d'épaisseur**, posés sur l'élément porteur de la dalle pleine, avant la mise en œuvre de la chape et de l'étanchéité.

Les caractéristiques du matériau sont les suivantes :

- **Conductivité thermique  $\lambda$**  : environ **0,035 W/m·K**,
- **Résistance thermique  $R$**  :  $\approx 2,29 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  pour 80 mm,
- **Comportement au feu** : acceptable pour usage en toiture (classé E),
- **Bonne compatibilité avec les systèmes d'étanchéité bitumineux ou synthétiques.**

### Performance thermique après intervention

Avec l'ajout du PSE, le plancher bénéficie d'un **renforcement thermique conséquent**, ce qui fait baisser le coefficient de transmission thermique **K** de **2,16** à environ **0,41 W/m<sup>2</sup>·°C**.

*Tableau IV.2 coefficients de conductance K avant et après l'isolation de plancher (terrasse)*

Élément	K avant [W/m <sup>2</sup> ·K]	R isolant ajouter [m <sup>2</sup> ·K/W]	K après [W/m <sup>2</sup> ·K]
Plancher (terrasse)	2.16	$\approx 2.29$ (PSE 80 mm)	$\approx 0.36$

### IV.1.2 Choix d'équipement

#### IV.1.2.1 Remplacement de la chaudière

Dans le cadre de la rénovation énergétique du bâtiment, l'amélioration de l'isolation thermique a permis de réduire les besoins en chauffage. Il est donc cohérent d'installer une chaudière mieux adaptée aux nouveaux besoins, plus performante et plus économe.

Le choix s'est porté sur une chaudière à gaz à condensation, connue pour son haut rendement énergétique. Ce type de chaudière permet de récupérer la chaleur contenue dans les fumées, ce qui améliore son efficacité et réduit la consommation de gaz par rapport à une chaudière classique.

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### Avantages de la nouvelle chaudière :

- **Consomme moins de gaz**, grâce à son bon rendement.
- **S'adapte aux besoins réels**, évitant le gaspillage d'énergie.
- **Fonctionnement silencieux et modulable**, selon la température demandée.
- Peut-être **pilotée par un thermostat programmable**, pour plus de confort et d'économie.

Cette chaudière constitue ainsi une solution efficace, durable et parfaitement adaptée à un bâtiment bien isolé. Elle contribue à la réduction globale de la consommation énergétique et à l'amélioration du confort des occupants.

#### IV.1.2.2 Climatisation

Vu qu'on a isolé notre maison, on va diminuer la durée d'utilisation par jour en heure et ainsi la consommation.

#### IV.1.2.3 Les électroménagers

- ✓ Réfrigérateur : Samsung RT29 avec une consommation de 200 watts donc le client va réduire la consommation de 80 watts (Annexe 13)
- ✓ Congélateur : Samsung RZ32 avec une consommation de 200 watts donc le client va réduire la consommation de 100 watts (Annexe 14)
- ✓ Four électrique : Bosch Electroménager noir avec une consommation de 2500 watts donc on va diminuer la consommation de 900 watts. (Annexe 15)
- ✓ Micro-onde : SCHNEIDER SMW20VMB avec une consommation de 220 watts on va diminuer la consommation de 480 watts. (Annexe 16)
- ✓ Plaque de cuisson : on va utiliser une plaque a gaz au lieu d'une plaque électrique avec une consommation de 2579.54 kcal. (Annexe 17)
- ✓ Machine à laver : Whirlpool FFB D85 V IT avec une consommation de 1830 watts donc le client va réduire la consommation 470 watts. (Annexe 18)

#### IV.1.2.4 L'éclairage

On a opté pour des lampes LED plus économique de 12 watts au lieu de 75 watts et des lampes LED de 10 watts au lieu de 18 watts. (Annexe 19-20)

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### IV.1.3 Fenêtre à double vitrage

Dans l'état initial, la maison est équipée de fenêtres à simple vitrage, présentant une conductance thermique de  $K = 2,1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Ce type de vitrage offre une isolation thermique limitée, entraînant d'importantes pertes de chaleur en hiver. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'enveloppe du bâtiment, il est recommandé d'opter pour des fenêtres à double vitrage, dont la conductance est réduite à  $K = 1,2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Ce remplacement permettrait de réduire les déperditions thermiques par les fenêtres d'environ 43 %, contribuant ainsi à un meilleur confort thermique et à une diminution significative des besoins en chauffage, ce qui se traduit par une baisse notable de la facture énergétique.

*Tableau IV.3 coefficients de conductance K des fenêtres*

Élément	K avant [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ]	K après [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ]
Fenêtre	2,1	1,2

### IV.1.4 Tableau comparatif des performances des parois isolées

Suite à l'ajout de l'isolation thermique sur les murs extérieurs et la toiture, un bilan synthétique des performances thermiques permet de visualiser les améliorations apportées par les nouveaux matériaux. Le tableau ci-dessous compare les valeurs de conductance thermique (K) avant et après isolation, en intégrant les résistances thermiques des isolants ajoutés.

*Tableau IV.4 comparaisons des performances des parois isolées*

Élément de paroi	Isolant utilisé	Épaisseur isolant	$\lambda$ ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )	R ajoutée ( $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ )	K avant ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )	K après ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )
Murs de façade (ITE)	Aérogel de silice	30 mm	0.014	2.14	1.11	0.33
Plancher (terrasse)	Polystyrène expansé (PSE)	80 mm	0.035	2.29	2.16	0.36
Poteaux	Aérogel de silice	30 mm	0.014	2.14	1.81	0.37
Poutres longitudinales	Aérogel de silice	30 mm	0.014	2.14	2.45	0.39
Poutres transversales	Aérogel de silice	30 mm	0.014	2.14	2.63	0.40
Fenêtres	Double vitrage	/	/	/	2,1	1,2

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

Ces nouvelles valeurs de **K** après travaux traduisent une **réduction significative des transferts thermiques** à travers les parois opaques. Ainsi :

- Les murs voient leur transmission thermique divisée **par presque 3**,
- Le plancher voit sa conductance thermique réduite de près de **84 %**.
- Les poteaux voient sa conductance thermique réduite de près de **80 %**.
- Les poutres longitudinales voient sa conductance thermique réduite de près de **84 %**.
- Les poutres transversales voient sa conductance thermique réduite de près de **85 %**.
- Les fenêtres voient sa conductance thermique réduite de près de **43 %**.

Ces améliorations vont impacter favorablement les **déperditions globales du bâtiment**, qui seront recalculées dans la section suivante afin de mesurer les économies d'énergie réelles.

### IV.2 Recalcul des déperditions après isolation

À la suite des travaux d'amélioration énergétique détaillés précédemment, un **recalcul des déperditions thermiques** du bâtiment est nécessaire afin de quantifier les gains apportés par l'isolation. Ce recalcul prend en compte les **nouvelles résistances thermiques** des parois modifiées ainsi que les coefficients de conductance mis à jour.

#### IV.2.1 Calcul des déperditions surfaciques après isolation

Formule utilisée :

$$D_s' = K \times A \text{ (en W/°C)}$$

*Tableau IV.5 Nouvelle déperditions surfaciques vers l'extérieur*

Élément	Surface A (m <sup>2</sup> )	K (W/m <sup>2</sup> .°C)	Ds (W/°C)
Plancher (terrasse)	105.88	0.36	38.12
Plancher bas	105.88	1.55	164.11
Murs extérieurs (ITE)	71.9	0.33	23.73
Fenêtres	7.2	1.2	8.64
Portes	4.914	3.5	17.2
Poteaux	18.56	0.37	6.87
Poutres longitudinales	10.53	0.39	4.11
Poutres transversales	7.24	0.40	2.89

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

👉 Nouvelle déperdition surfacique totale :

$$D_S' = 265.67 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

### IV.2.2 Déperditions par renouvellement d'air (inchangé)

Le renouvellement d'air n'ayant pas été modifié, sa déperdition reste la même que dans le chapitre 3 :

$$D_R = 80.53 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

### IV.2.3 Déperdition totale après travaux

$$D_T' = D_S' + D_R$$

$$D_T' = 265.67 + 80.53 = 346.2 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

*Tableau IV.6 Comparaison avec l'état initial*

Paramètre	Avant travaux	Après isolation	Gain (%)
$D_S$ (surf.) [W/°C]	582.85	265.67	<b>-54.5 %</b>
$D_R$ (air) [W/°C]	80.53	80.53	Inchangé
<b><math>D_T</math> total [W/°C]</b>	<b>663.38</b>	<b>346.2</b>	<b>-41.8 %</b>

Grâce à l'utilisation combinée de l'aérogel de silice pour les murs de façade et du polystyrène pour la toiture, les **pertes thermiques globales du bâtiment ont été réduites de plus d'un tiers**, ce qui représente une **amélioration significative de l'efficacité énergétique**. Ces résultats serviront de base pour le recalcul des besoins en chauffage et climatisation dans la section suivante.

## IV.3 Recalcul des besoins en chauffage et en climatisation

Suite à la réduction significative des déperditions thermiques grâce à l'isolation des murs par l'extérieur (aérogel de silice) et de la toiture (polystyrène expansé), les besoins énergétiques du bâtiment en chauffage et en climatisation ont été recalculés afin d'estimer les économies réalisables.

La méthode utilisée repose toujours sur l'approche des **degrés-jours (DJ)**, comme présentée dans le chapitre 3, avec la même base de température de confort :

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

- 20 °C pour le chauffage.
- 25 °C pour la climatisation.

### IV.3.1 Rappel de la formule de calcul des besoins énergétiques

$$C = 24 \times G \times V_i \times DJ$$

Avec :

- **C** : consommation énergétique en kWh,
- **G** : coefficient de déperdition volumique [ $W/m^3 \cdot ^\circ C$ ] =  $DT / V_i$ ,
- **V<sub>i</sub>** : volume intérieur du bâtiment = 315.84 m<sup>3</sup>,
- **DJ** : degré-jours (chauffage ou climatisation),
- Le facteur **24** représente les heures par jour.

### IV.3.2 Calcul du nouveau coefficient G après isolation

$$D_T' = 346.2 W/^\circ C$$

$$V_i = 315.84 \text{ m}^3$$

$$\Rightarrow G = D_T' / V_i = 346.2 / 315.84 = 1.1 \text{ W/m}^3 \cdot ^\circ C$$

$G < 2.5$  donc cette maison est bien isolée

### IV.3.3 Recalcul des besoins annuels en chauffage et climatisation

*Tableau IV.7 les besoins en Chauffage et en climatisation annuel C (KWh) après l'isolation*

Type	DJ annuel (Chapitre 3)	G (Après l'isolant)	Besoin annuel C (KWh)
Chauffage	1240	1.1	10339.34
Climatisation	585	1.1	4877.83

*Tableau IV.8 les besoins en Chauffage et en climatisation mensuelle C (KWh) avant et après l'isolation*

Besoins	C (KWh) avant	C (KWh) après	Gain (%)
Chauffage	2819.8	1477.05	48 %
Climatisation	1862.4	975.56	48 %

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### IV.4 Bilan de puissance après les modifications

#### IV.4.1 Pour la saison d'été

*Tableau IV.9 La consommation d'électricité après les modifications pour la saison d'été*

Les appareils	Nombre d'appareil	Puissance d'appareil (W)	Temps de travail	Nombre de jours d'utilisation par mois	Energie Consommée (KWh)
Lampe	10	12W	6 heures	30	21.6
Lampe (LED)	5	10W	6 heures	30	9
Congélateur	1	200W	8 heures	30	48
Réfrigérateur	1	200W	8 heures	30	48
TV Plasma	2	150W	5 heures	30	45
Machine à laver	1	1830W	1 heure	15	27.45
Four électrique	1	2500 W	0,5heur	20	25
Micro-onde	1	220W	0,25heur	30	1.65
Prise 16A	6	65W	3 heures	30	35.1
Prise 16A	4	100W	2 heures	30	24
Climatiseur	2	875W	4.5 heures	30	236.25
				<b>Totale</b>	<b>521.05</b>

*Tableau IV.10 La consommation du gaz après les modifications*

Équipement	Nombre	Puissance unitaire en kcal/h	Durée d'utilisation par jours en (h)	Nombre de jours d'utilisation par mois	Totale kcal/h
Plaque de cuisson	1	2579.54	3	30	232161.3
Chaudière	1	3990.4	2	30	239424
				<b>Total en thermie</b>	<b>471.585</b>

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### Remarque

Le plus proche modèle standard est un **climatiseur de 9 000 BTU/h** ( $\approx 2,6$  kW) par unité. Les climatiseurs n'utilisent pas toute leur puissance en continu, mais s'adaptent à la charge réelle, fonctionnant en moyenne à environ **70 %** de leur capacité.

La chaudière à installer doit donc avoir une **puissance minimale de 3990.4 kcal/h**, afin de répondre efficacement à la demande énergétique du bâtiment en eau chaude sanitaire.

### IV.4.2 Pour la saison d'hiver

*Tableau IV.11 La consommation de l'électricité après les modifications pour la saison d'hiver*

Les appareils	Nombre d'appareil	Puissance d'appareil (W)	Temps de travail	Nombre de jours d'utilisation par mois	Energie Consommée (KWh)
Lampe	10	12W	6 heures	30	21.6
Lampe (LED)	5	10W	6 heures	30	9
Congélateur	1	200W	8 heures	30	48
Réfrigérateur	1	200W	8 heures	30	48
TV Plasma	2	150W	5 heures	30	45
Machine à laver	1	1830W	1 heure	15	27.45
Four électrique	1	2500 W	0,5 heure	20	25
Micro-onde	1	220W	0,25 heure	30	1.65
Prise 16A	6	65W	3 heures	30	35.1
Prise 16A	4	100W	2 heures	30	24
				<b>Total</b>	<b>284.8</b>

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

*Tableau IV.12 La consommation du gaz après les modifications pour la saison d'hiver*

Équipement	Nombre	Puissance unitaire en kcal/h	Durée d'utilisation par jours en (h)	Nombre de jours d'utilisation par mois	Totale kcal/h
Plaque de cuisson	1	2579.54	3	30	232161.3
Chaudière	1	6290.36	8	30	1509687
				<b>Total en thermie</b>	<b>1741.848</b>

### Remarque

La chaudière à installer doit donc avoir une puissance minimale de **6290.36 kcal/h**, afin de répondre efficacement à la demande énergétique du bâtiment en chauffage et en eau chaude sanitaire.

### IV.4.3 La consommation mensuelle d'électricité et du gaz

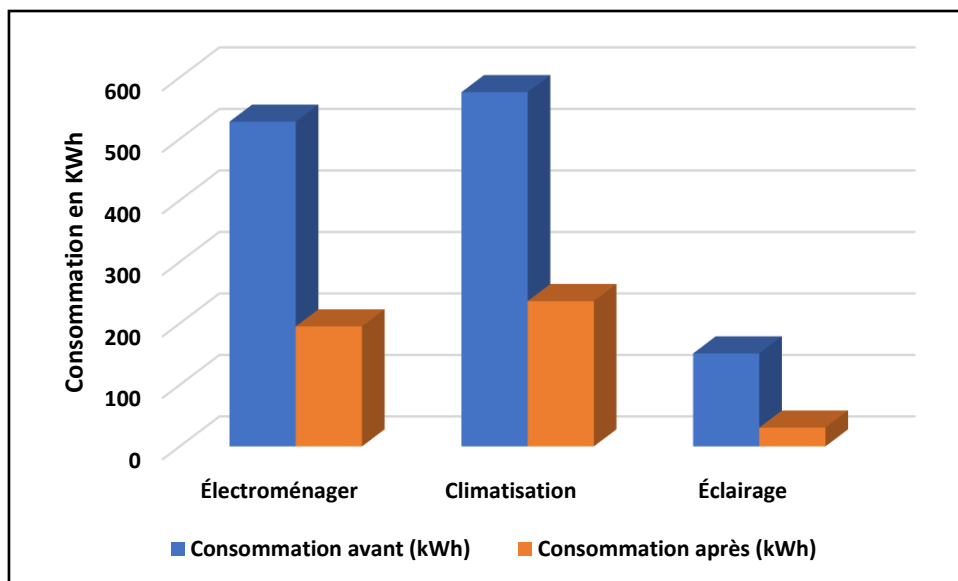
#### IV.4.3.1 Électricité

*Tableau IV.13 La consommation mensuelle d'électricité des équipements en été après les modifications*

Appareillage	Consommation avant (kWh)	Consommation après (kWh)
Électroménager	527,95	195,1
Climatisation	576	236.25
Éclairage	151,2	30,6

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

Le diagramme en colonnes représente la consommation mensuelle de l'électricité par type d'équipements avant et après les modifications.



*Figure IV.1 La répartition de la consommation mensuelle d'électricité par type d'équipements avant et après les modifications*

### IV.4.3.2 Gaz

#### Pour l'été

Les calculs nous ont donné une consommation mensuelle du gaz égale à 471.585 thermies.

*Tableau IV.14 La consommation mensuelle du gaz des équipements en été après les modifications*

Appareillage	Consommation mensuelle du gaz (thermie)
Plaque de cuisson	232.1613
Chaudière	239.424

#### Pour l'hiver

Les calculs nous ont donné une consommation mensuelle du gaz égale à 1741.848 thermies.

*Tableau IV.15 La consommation mensuelle du gaz des équipements en hiver après les modifications*

Appareillage	Consommation mensuelle du gaz (thermie)
Plaque de cuisson	232.1613
Chaudière	1509.687

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### IV.4.4 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz

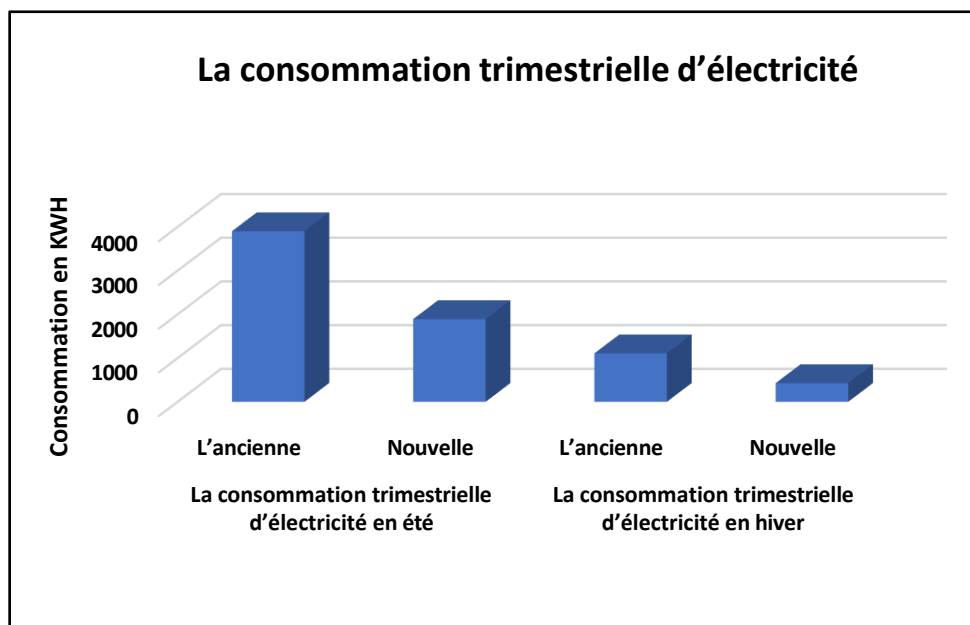
#### IV.4.4.1 Pour l'électricité

Le total de la consommation trimestrielle d'électricité pour les saisons d'été et d'hiver nous a donné les valeurs mentionnées dans le tableau IV.16.

*Tableau IV.16 La consommation trimestrielle d'électricité en été et en hiver*

La consommation trimestrielle d'électricité en été		La consommation trimestrielle d'électricité en hiver	
L'ancienne	Nouvelle	L'ancienne	Nouvelle
3942.75	1563.15	2214,75	854,4

L'histogramme schématise la consommation trimestrielle de l'électricité en été et en hiver.



*Figure IV.2 La consommation trimestrielle d'électricité pour les saisons d'été et d'hiver.*

#### IV.4.4.2 Pour le gaz

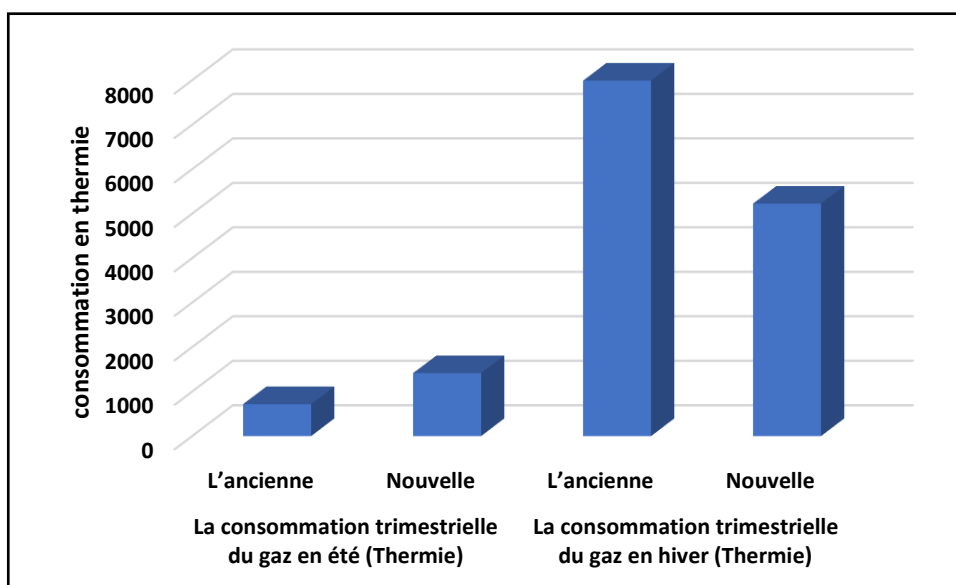
Le total de la consommation trimestrielle du gaz pour les saisons d'été et d'hiver nous a donné les valeurs mentionnées dans le tableau IV.17.

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

*Tableau IV.17 La consommation trimestrielle du gaz en été et en hiver*

La consommation trimestrielle du gaz en été (Thermie)		La consommation trimestrielle du gaz en hiver (Thermie)	
L'ancienne	Nouvelle	L'ancienne	Nouvelle
718,272	1414,755	7990,344	5225,544

L'histogramme schématise la consommation trimestrielle du gaz en été et en hiver.



*Figure IV.3 La consommation trimestrielle du gaz pour les saisons d'été et d'hiver.*

### IV.5 Estimation de la facture

#### IV.5.1 L'estimation de la facture pour l'été

*Tableau IV.18 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en hiver après les modifications*

La consommation trimestrielle de l'électricité en kWh	La consommation trimestrielle du gaz en thermie
3781,08	1414.755

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### IV.5.1.1 Pour l'électricité

*Tableau IV.19 le cout d'électricité pour l'été après les modifications*

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	1272.018
4	563.15	5.4796	3085.83	
		<b>Total</b>	<b>7439.53</b>	<b>1339.041</b>
		<b>(DA)</b>	<b>8778.571</b>	

### IV.5.1.2 Pour le gaz

*Tableau IV.20 le cout de gaz pour l'été après les modifications*

Tranche	Consommation (Th)	Prix unitaire (DA/Th)	Prix total (DA)	TVA (DA)
1	1125	0,1682	189.225	53.8176
2	289.755	0,3245	94.0255	
3	0	0,4025	0	0
4	0	0,4599	0	
		<b>Total</b>	<b>283.2505</b>	<b>53.8176</b>
		<b>(DA)</b>	<b>337.068</b>	

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### IV.5.2 L'estimation de la facture pour l'hiver

*Tableau IV.21 La consommation trimestrielle d'électricité et du gaz en hiver après les modifications*

La consommation trimestrielle de l'électricité en kWh	La consommation trimestrielle du gaz en thermie
854,4	5225,544

#### IV.5.2.1 Pour l'électricité

*Tableau IV.22 le cout d'électricité pour l'hiver après les modifications*

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	354.4	4.812	1705.3728	324.02
4	0	5.4796	0	
<b>Total</b>			<b>2450.073</b>	<b>391.043</b>
			<b>(DA)</b>	<b>2841.1158</b>

#### IV.5.2.2 Pour le gaz

*Tableau IV.23 le cout de gaz pour l'hiver après les modifications*

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	2725.544	0.4025	1097.03	208.436
4	0	0.4599	0	
<b>Total</b>			<b>1732.444</b>	<b>265.623</b>
			<b>(DA)</b>	<b>1998.067</b>

## Chapitre 4 : Optimisation énergétique et interprétations des résultats

### IV.6 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus après l'isolation thermique et l'optimisation des équipements montrent des améliorations significatives sur plusieurs plans : **thermique, énergétique, économique et environnemental.**

#### ✓ Amélioration thermique :

La déperdition thermique totale du bâtiment (DT) a été réduite de **plus de 41 %**, ce qui signifie que le bâtiment perd beaucoup moins de chaleur en hiver, et se réchauffe moins en été. Cela se traduit directement par un meilleur **confort pour les occupants** et une **moindre sollicitation des équipements de chauffage et de climatisation.**

#### ✓ Réduction des besoins énergétiques :

Les besoins en chauffage et en climatisation ont diminué de près de **48 %**, ce qui confirme que l'enveloppe du bâtiment joue un rôle clé dans la performance énergétique. Les besoins ont été recalculés précisément en fonction des nouveaux coefficients de transmission thermique (K) après isolation.

#### ✓ Consommation et facture :

La consommation d'électricité a été réduite en moyenne de **60 à 62 %** selon la saison, et celle de gaz de **35 %**. Cela a entraîné une **réduction importante des factures énergétiques.**

#### ✓ Rentabilité :

Même si les travaux d'isolation et de remplacement d'équipements ont un **coût initial**, les **économies annuelles** réalisées montrent un **retour sur investissement à moyen terme**, surtout si l'on ajoute les bénéfices en confort, santé et durabilité.

#### ✓ Impact environnemental :

La baisse de consommation d'énergie implique également une **réduction des émissions de gaz à effet de serre**, notamment liées au gaz naturel. L'utilisation de matériaux innovants (aérogel, PSE) et d'appareils à haut rendement renforce cette démarche éco-responsable.

## Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en œuvre et d'évaluer une **stratégie d'amélioration énergétique complète** du bâtiment étudié. À travers l'isolation thermique des murs par l'extérieur (aérogel de silice), de la toiture (polystyrène expansé) et le remplacement des équipements (chaudière à condensation, climatiseurs inverter, éclairage LED, etc.), une transformation notable de la performance énergétique a été obtenue.

Les recalculs ont montré une **réduction significative des déperditions thermiques (-41,8 %)** ainsi qu'une **diminution des besoins annuels en chauffage et en climatisation (-48 %)**. La consommation d'électricité et de gaz a été sensiblement réduite, entraînant une **baisse importante de la facture énergétique**.

Ces résultats confirment que **les choix techniques appliqués sont efficaces, réalistes et adaptés au contexte local**, tant sur le plan thermique qu'économique. Ils prouvent aussi qu'une rénovation énergétique bien conçue permet d'**améliorer le confort, réduire les coûts et limiter l'impact environnemental**, tout en maintenant des conditions de vie satisfaisantes.

Ce travail ouvre ainsi la voie à une **généralisation de ces solutions** à d'autres bâtiments résidentiels similaires, notamment dans les régions soumises à des variations climatiques marquées.

### *Conclusion générale*

Ce mémoire a permis d'étudier en profondeur la performance énergétique d'un bâtiment résidentiel et d'évaluer les effets d'une rénovation thermique bien ciblée. En partant d'un diagnostic énergétique complet (chapitre 3), basé sur les caractéristiques constructives du bâtiment et les consommations existantes, un ensemble de solutions techniques a été proposé et analysé dans une démarche d'optimisation.

Les travaux réalisés notamment l'isolation des murs par l'extérieur avec un aérogel de silice, l'isolation de la toiture par polystyrène expansé, le remplacement des fenêtres par du double vitrage et la modernisation des équipements (chaudière à condensation, climatisation inverter, éclairage LED) ont permis de réduire considérablement les déperditions thermiques, les besoins en chauffage et climatisation, ainsi que la consommation énergétique globale.

Les résultats obtenus sont significatifs :

- Les déperditions thermiques totale du bâtiment ont été réduites de plus de **40 %** ;
- Les besoins annuels en chauffage et en climatisation ont diminué de près de **48 %** ;
- La consommation d'électricité et de gaz a été fortement réduite, entraînant une baisse importante des factures énergétiques ;
- Le temps de retour sur investissement est raisonnable, compte tenu des économies annuelles réalisées ;
- L'impact environnemental est également réduit grâce à une baisse des émissions de gaz à effet de serre.

Ces résultats confirment l'efficacité des choix techniques opérés, tout en soulignant l'importance d'une approche globale qui combine à la fois isolation de l'enveloppe, amélioration des équipements et optimisation de la régulation.

Ce travail s'inscrit pleinement dans la logique de construction durable et peut servir de référence pour des projets similaires, en particulier dans les zones climatiques où la maîtrise de la consommation énergétique est un enjeu majeur. Il montre qu'il est possible d'améliorer fortement la performance d'un bâtiment existant tout en préservant la viabilité économique de l'intervention.

Enfin, ce mémoire ouvre la voie à d'autres pistes d'étude : intégration d'énergies renouvelables (solaire, pompe à chaleur), étude du comportement en été avec ventilation naturelle, ou encore modélisation dynamique pour évaluer plus finement les gains sur le long terme.

***Références bibliographiques***

- [1] Discussons Immo, "Visuel du Diagnostic de Performance Énergétique (DPE)", [Image], discussons-immo.fr. [En ligne]. Disponible sur : [https://discussions-immo.fr/wp-content/uploads/2021/03/DPE\\_VISUEL\\_DPE\\_730x400@2x-min-1024x687.jpg](https://discussions-immo.fr/wp-content/uploads/2021/03/DPE_VISUEL_DPE_730x400@2x-min-1024x687.jpg). [Consulté le : 29-avr-2025].
- [2] Augustine Musa, "Building Envelope", [Image]. Disponible sur : <https://th.bing.com/th/id/OIP.0gLCI5vZJStgm0xrLrT1EAHaB7?pid=ImgDet&w=100&h=100&c=7&dpr=1%D9%AB5> [Consulté le : 29-avr-2025].
- [3] Wonderglass, "Illustration (image-19)", [Image], wonderglass.fr. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.wonderglass.fr/wp-content/uploads/2022/09/image-19.png.webp>. [Consulté le : 29-avr-2025].
- [4] EPC de Sologne, "Fenêtres en aluminium, PVC et bois", [Image], epcdesologne.com. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.epcdesologne.com/wp-content/uploads/2015/05/fenetre\\_alu-pvc-bois1.jpg](http://www.epcdesologne.com/wp-content/uploads/2015/05/fenetre_alu-pvc-bois1.jpg). [Consulté le : 29-avr-2025].
- [5] Voir Vert, "Les matériaux à changements de phase", VoirVert.ca. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.voirvert.ca/communaute/wiki/les-materiaux-changements-de-phase>. [Consulté le : 29-avr-2025].
- [6] Bing Images, " Toitures végétalisées ", [Image], th.bing.com. [En ligne]. Disponible sur : [https://th.bing.com/th/id/R.2b5575429a5454da82cce2c2790910f5?rik=C3E%2biu%2byxOEQhg&pid=ImgR\\_aw&r=0](https://th.bing.com/th/id/R.2b5575429a5454da82cce2c2790910f5?rik=C3E%2biu%2byxOEQhg&pid=ImgR_aw&r=0). [Consulté le : 29-avr-2025].
- [7] Pro-Loc, "Caméra thermique", [Image], pro-loc.be. [En ligne]. Disponible sur : [https://pro-loc.be/433-image\\_product/camera-thermique.jpg](https://pro-loc.be/433-image_product/camera-thermique.jpg). [Consulté le : 29-avr-2025].
- [8] Cibor, " caméra d'imagerie thermique Cibor Eindhoven 1041", [Image], cibor.be. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cibor.be/content/uploads/2019/07/cibor-eindhoven-1041-600x400.jpg>. [Consulté le : 29-avr-2025].
- [9] ISO, "L'ISO et l'énergie", ISO.org. [En ligne]. Disponible sur : [https://www.iso.org/iso/fr/iso\\_and\\_energy.pdf](https://www.iso.org/iso/fr/iso_and_energy.pdf). [Consulté le : 29-avr-2025].
- [10] Schneider Electric, "Normes d'Efficacité Énergétique", Electrical Installation Wiki. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.electrical-installation.org/fr/wiki/Normes\\_d'Efficacit%C3%A9\\_Energ%C3%A9tique](https://fr.electrical-installation.org/fr/wiki/Normes_d'Efficacit%C3%A9_Energ%C3%A9tique). [Consulté le : 29-avr-2025].
- [11] Constructing a Sustainable Future, "Game of normes, les règles du jeu du bâtiment", Constructing-sustainable-future.com, 09/10/2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.constructing-sustainable-future.com/game-of-normes-les-regles-du-jeu-du-batiment/>. [Consulté le : 29-avr-2025].
- [12] Wikipédia, "Réglementation thermique en France", Wikipédia. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9glementation\\_thermique\\_en\\_France](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9glementation_thermique_en_France). [Consulté le : 29-avr-2025].
- [13] Activ'Expertise, "RT 2012 et RE 2020", ActivExpertise.fr. [En ligne]. Disponible sur : <https://activexpertise.fr/diagnostic/rt-2012/>. [Consulté le : 29-avr-2025].

- [14] Climamaison, « Isolant thermique : définition », *Climamaison*, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.climamaison.com/lexique/isolant-thermique.htm>. [Consulté le : 15 avril 2025].
- [15] Agence de la Transition Écologique (ADEME), « Comment bien isoler sa maison », *Agir pour la transition écologique*, 13 août 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/renovation/comment-bien-isoler-maison>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [16] Gouvernement français, « Décret n° 2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions », *Journal officiel de la République française*, 2010. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000023058231>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [17] Gouvernement français, « Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif à la réglementation environnementale des bâtiments neufs », *Journal officiel de la République française*, 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043884824>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [18] Agence de la transition écologique (ADEME), « Les isolants biosourcés et leur rôle dans la transition énergétique », 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/cadic/2646/les-isolants-biosources-et-leur-role-dans-la-transition-energetique.pdf>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [19] Mieux Rénover, « Innovations en isolation thermique : matériaux et techniques innovants », *Mieux Rénover*, [En ligne]. Disponible sur : <https://mieuxrenover.com/innovations-isolation-thermique/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [20] F. Mathieu, « Les dernières innovations dans les matériaux d'isolation thermique », *Mathieu Ravalement Orléans*, 25 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.mathieu-ravablement-orleans.fr/les-dernieres-innovations-dans-les-matériaux-d-isolation-thermique/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [21] Gedimat, « Isolation en 2025 : les nouvelles techniques », *Gedimat Matériaux & Construction*, 23 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.gedimat-materiaux-construction.be/actualites-et-promotions/isolation-en-2025-les-nouvelles-techniques>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [22] Thermo concept, « Méthodes de mesure de la conductivité thermique », *Thermo concept*, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.thermoconcept-sarl.com/methodes-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [23] « Isolation mince et efficace : ce matériau surpasse tous les autres à épaisseur égale », *Pause Maison, Ouest-France*, [En ligne]. Disponible sur : <https://pause-maison.ouest-france.fr/isolation-mince-et-efficace-ce-matériau-surpasse-tous-les-autres-a-épaisseur-égale/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [24] Isolation Info, « Les matériaux isolants thermiques : lequel choisir ? », *Isolation Info*, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.isolation-info.be/isolation/les-materiaux-isolants-thermiques-lequel-choisir/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [25] Conseils Thermiques, « Comparatif des matériaux isolants », *Conseils Thermiques*, [En ligne]. Disponible sur : [https://conseils-thermiques.org/contenu/comparatif\\_isolants.php](https://conseils-thermiques.org/contenu/comparatif_isolants.php). [Consulté le : 30 avril 2025].

- [26] Isolation Info, « Les matériaux isolants thermiques : lequel choisir ? », *Isolation Info*, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.isolation-info.be/isolation/les-materiaux-isolants-thermiques-lequel-choisir/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [27] Climamaison, « Isolant thermique : définition », *Climamaison*, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.climamaison.com/lexique/isolant-thermique.htm>. [Consulté le : 15 avril 2025].
- [28] Agence de la Transition Écologique (ADEME), « Comment bien isoler sa maison », *Agir pour la transition écologique*, 13 août 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://agirpouurlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/renovation/comment-bien-isoler-maison>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [29] Agence de la transition écologique (ADEME), « Les isolants biosourcés et leur rôle dans la transition énergétique », 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/cadic/2646/les-isolants-biosources-et-leur-role-dans-la-transition-energetique.pdf>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [30] Mieux Rénover, « Innovations en isolation thermique : matériaux et techniques innovants », *Mieux Rénover*, [En ligne]. Disponible sur : <https://mieuxrenover.com/innovations-isolation-thermique/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [31] F. Mathieu, « Les dernières innovations dans les matériaux d'isolation thermique », *Mathieu Ravalement Orléans*, 25 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.mathieu-ravalement-orleans.fr/les-dernieres-innovations-dans-les-materiaux-d-isolation-thermique/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [32] Gedimat, « Isolation en 2025 : les nouvelles techniques », *Gedimat Matériaux & Construction*, 23 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.gedimat-materiaux-construction.be/actualites-et-promotions/isolation-en-2025-les-nouvelles-techniques>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [33] Thermo concept, « Propriétés thermiques », *Thermo concept*
- [34] J. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*, Firmin Didot, 1822. [En ligne]. Disponible sur : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k90199g>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [35] Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), « Propriétés thermiques des matériaux », [En ligne]. Disponible sur : [https://metrologie-francaise.lne.fr/sites/default/files/media/document/03\\_proprietes-thermiques-materiaux.pdf](https://metrologie-francaise.lne.fr/sites/default/files/media/document/03_proprietes-thermiques-materiaux.pdf). [Consulté le : 30 avril 2025].
- [36] Matériauthèque, « Propriétés du béton léger », [En ligne]. Disponible sur : <https://www.materiauthèque.fr/beton/proprietes-du-beton-leger/>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [37] Info ciments, « Le béton léger », [En ligne]. Disponible sur : <https://www.infociments.fr/betons/le-beton-leger>. [Consulté le : 30 avril 2025].
- [38] ADEME, *Guide pratique de la rénovation énergétique des bâtiments*, Agence de la transition écologique, Éd. 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr>
- [39] CERIB, « Développement d'une gamme de béton ultra léger : Thermolitys® », Rapport d'études et recherches n°282.E, septembre 2015. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.cerib.com/wp-content/uploads/2017/05/282-e-beton-ultra-leger-thermolitys.pdf>. [Consulté le : 30 avril 2025].

[40] Bétons Feint, « Béton léger », [En ligne]. Disponible sur : <https://www.betonsfeidt.lu/betons/produits/betons-speciaux/beton-leger>. [Consulté le : 30 avril 2025].

[41] ADEME, *Baromètre rénovation énergétique 2021 : Freins, leviers et perceptions des ménages*, Agence de la transition écologique, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/relever/renovation-energetique-barometre>

[42] Cedar Lake Ventures, "Climat et météo moyenne toute l'année à Tlemcen, Algérie", Weather Spark. [En ligne]. Disponible sur : <https://weatherspark.com/y/40174/Average-Weather-in-Tlemcen-Algeria-Year-Round>. [Consulté le : 4-mai-2025].

[43] Wilaya de Tlemcen, "Vue de la wilaya de Tlemcen", [Image], wilaya-tlemcen.dz. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.wilaya-tlemcen.dz/W13-Ar/Images/Tlemcen.png>. [Consulté le : 4-mai-2025].

[44] WeatherSpark, « Météo moyenne à Tlemcen, Algérie tout au long de l'année », WeatherSpark.com, [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.weatherspark.com/y/40174/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-%C3%A0-Tlemcen-Alg%C3%A9rie-tout-au-long-de-l'ann%C3%A9e>. [Consulté le : 8-mai-2025].

[45] Mme L. BENAHMED, « Thermique du bâtiment et efficacité énergétique », support de cours, Département de Génie Mécanique, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algérie, 2025

### ***Références bibliographiques***

---

# *ANNEXES*

---

## Les appareillages existants

---

### Annexe 01 : Chaudière



<b>Fiche technique</b>	
Famille	Chaudière
Marque	FERROLI
Combustible	Gaz
Poids	166 kg
Installation	Sol
Catégorie	Basse température
Dimensions	850x500x500 mm
Consommation en kcal	11097.7
Corps de chauffe	Fonte
Circulateur	30 watts
Référence	0ihj4awa

## Annexe 02 : Climatiseur



<b>Fiche technique</b>	
<b>Modèle</b>	MSFA-09HRN1-Q
<b>Marque</b>	MIDEA
<b>Type</b>	Climatiseur Split
<b>Capacité en refroidissement</b>	9000 BTU/h
<b>Mode</b>	Chaud et Froid
<b>Courant</b>	4,5 (refroidissement/ en pompe à chaleur)
<b>Puissance (Mode Froid)</b>	1940 Watts
<b>Autres</b>	Fonction sommeil Fonction de protection contre la détection de fuite de réfrigérant.
<b>Porté</b>	Pour des surfaces jusqu'à 20 m <sup>2</sup> .
<b>Dimension (Unité extérieure)</b>	Unité intérieure : 790 x 190 x 275 mm Unité extérieure : 700 x 235 x 535 mm

## Annexe 03 : Réfrigérateur



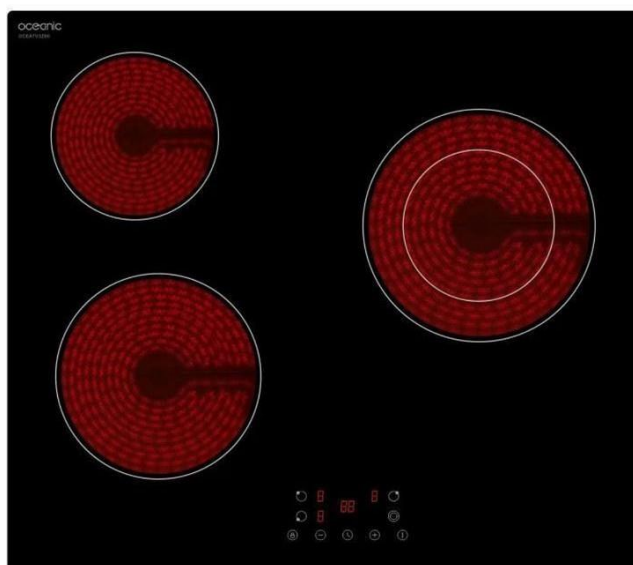
<b>Fiche technique</b>	
<b>Marque</b>	BOSCH
<b>Numéro de modèle</b>	KGV36VBEAS
<b>Couleur</b>	Noire
<b>Dimensions du produit (L x l x h)</b>	65 x 60 x 186 cm
<b>Capacité</b>	308 Litres
<b>Puissance</b>	280 Watts
<b>Voltage</b>	220-240 Volts
<b>Matériau</b>	Acier inoxydable
<b>Classe d'énergie</b>	A to G
<b>Niveau sonore</b>	39 dB
<b>Poids de l'article</b>	55 kg

## Annexe 04 : Congélateur



<b>Fiche technique</b>	
Marque	WHIRLPOOL
Numéro de modèle	WVE26562NFW
Couleur	Blanche
Dimensions du produit (L x l x h)	60 x 120 x 90 cm
Capacité	260 Litres
Puissance	300 Watts
Voltage	220-240 Volts
Matériau	Acier inoxydable
Classe d'énergie	A to G
Niveau sonore	38 dB
Poids de l'article	60 kg

## Annexe 05 : Plaque de cuisson (électrique)



<b>Fiche technique</b>	
Marque	OCEANIC
Nom du produit	Plaque de cuisson vitrocéramique OCEANIC 3 foyers
Catégorie	PLAQUE VITROCÉRAMIQUE
Référence	OCEATV3Z60
Type de Produit	Vitrocéramique - 3 plaques de cuisson
Format	60 cm
Type d'énergie	Électrique
Consommation d'énergie	3000 watts

## Annexe 06 : four électrique



<b>Fiche technique</b>	
Taille	595 x 594 x 548 mm
Marque	Bosch Électroménager
Couleur	Inox
Mode de cuisson	Convection
Classe énergétique	A
Type d'énergie utilisée	Électrique
Type d'installation	Intégré
Watt	3400 Watts
Dimensions de l'article L x l x H	54.8 x 59.4 x 59.4 centimètres
Poids	34 Kilogrammes
Tension	220 Volts

## Annexe 07 : micro-onde



<b>Fiche technique</b>	
Nom de modèle	NN-E20JWMEPG
Marque	Panasonic
Couleur	Blanc
Matériau	Verre
Entrée de l'interface Humaine	Boutons
Puissance	700 watts
Type d'installation	Installation libre.
Capacité	5.3 Litres
Efficacité	A
Dimensions de l'article L x l x H	44.3 x 34 x 25.8 centimètres
Poids de l'article	12 Kilogrammes

## Annexe 08 : Télévision



<b>Fiche technique</b>	
Type de produit	TV LCD rétroéclairée par LED - Smart TV
Modèle	Samsung
Classe de diagonale	108 cm (43")
Année de modèle	2020
Plate-forme	Tizen OS
Interface vidéo	HDMI
Processeur vidéo	Crystal 4K
Consommation électrique en mode Marche	150 Watt

**Annexe 09 : machine à lavée**

<b>Fiche technique</b>	
Type de produit	Machine à laver - chargement frontal
Consommation d'eau annuelle	9400 litres
Vitesse d'essorage	Variable - 1400 tours/min (maximum)
Caractéristiques du tambour	Tambour Diamond
Programme de lavage standard	Coton + intensif
Classe énergétique	Classe A
Facteur de forme	Indépendant
Niveau sonore (essorage)	72 dB (A)
Couleur extérieure	Blanc
Capacité de charge	9 kg

## Annexe 10 : Lampe 75W



<b>Fiche technique</b>	
Type de lampe	Incandescence
Puissance	75 Watts
Voltage	220 - 240 Volts
Flux lumineux	Environ 1050 lumens
Température de couleur	2700 K (blanc chaud)
Durée de vie moyenne	Environ 1000 heures
Matériau du bulbe	Verre transparent
Utilisation recommandée	Éclairage domestique intérieur
Classe d'énergie	E à G (très faible efficacité énergétique)
Dimensions approximatives	Ø 60 mm x H 105 mm

## Annexe 11 : Lampe LED 18 W



<b>Fiche technique</b>	
Type de lumière	LED, incandescente
Puissance	18 Watts
Couleur de la lumière	Blanc chaud
Marque	Philips
Base de l'ampoule	E27 (gros culot à vis)
Dimensions de l'article	Ø 70 mm x H 125 mm
Volt	220 - 240 Volts
Type de prise	Câble électrique
Température de couleur	2700 K (blanc chaud) à 6500 K (blanc froid)

## Les appareillages proposés

---

### Annexe 12 : Chaudière



<b>Fiche technique</b>	
Famille	Chaudière
Marque	Ferroli
Combustible	Gaz
Poids	136 kg
Installation	Sol
Consommation en kcal	6290.36
Catégorie	Basse température
Dimensions	500x850x615 mm
Corps de chauffe	Fonte
Circulateur	30 watts

## Annexe 13 : Réfrigérateur



<b>Fiche technique</b>	
Marque	Samsung
Référence	RT29
Dimensions du produit (L x l x h)	67.5 x 66.8 x 178.5 cm ; 67 kilogrammes
Numéro du modèle de l'article	RT29K5535S9/ES
Capacité	101 Litres
Puissance	200 Watts
Volume congélateur	89 Litres
Type d'installation	Libera
Couleur	Acier inoxydable
Nombre de tiroirs	4
Porte	Droite

## Annexe 14 : congélateur



Fiche technique	
Marque	Samsung
Numéro de modèle	RZ32
Couleur	NOIR
Dimensions du produit (L x l x h)	55 x 110 x 90 cm
Capacité	240 Litres
Puissance	200 Watts
Voltage	220-240 Volts
Matériau	Acier inoxydable
Classe d'énergie	A++
Niveau sonore	38 dB
Poids de l'article	56 kg

## Annexe 15 : Four électrique



<b>Fiche technique</b>	
Marque	Bosch Électroménager
Couleur	Noir
Mode de cuisson	Convection
Type d'énergie utilisée	Électrique
Watt	2500 Watts
La classe	A+
Dimensions de l'article L x l x H	54.8 x 59.4 x 59.4 centimètres
Poids	34 Kilogrammes
Fréquence	50 Hz
Caractéristique spéciale	Minuteur
Tension	220 Volts

## Annexe 16 : Micro-onde



<b>Fiche technique</b>	
Marque	SCHNEIDER
Référence	SMW20VMB
Dimensions du produit (L x l x h)	34.8 x 25.6 x 45.1 cm
Numéro du modèle de l'article	SMW20VMB
Capacité	20 Litres
Type d'installation	Autonome
Référence	SMW20VMB
Couleur	Noire
Watt	220 Watts
Matériau	Métal, Verre
Poids	10 Kilogrammes

## Annexe 17 : Plaque de cuisson (à gaz)



<b>Fiche technique</b>	
Marque	Bosch Électroménager
Référence	POP6B6B10
Dimensions du produit (L x l x h)	59 x 52 x 4.5 cm
Numéro du modèle de l'article	POP6B6B10
Type d'installation	Encastré
Référence	POP6B6B10
Type de foyer	Verre
Nombre de foyers	4
Couleur	Noire
Kcal	2579,54
Type d'énergie utilisée	Gaz

## Annexe 18 : Machine à laver



<b>Fiche technique</b>	
Marque	Whirlpool
Référence	FFB D85 V IT
Dimensions du produit (L x l x h)	63 x 59.5 x 84.5 cm; 72.2 kilogrammes
Numéro du modèle de l'article	FFB D85 V IT
Consommation	1830 watts
Capacité	8 Kilogrammes
Référence	8003437048982
Type de chargement	Charge frontale
Composants inclus	Machine à laver

## Annexe 19 : Lampe LED 12 W



<b>Fiche technique</b>	
Caractéristique spéciale	Variateur de lumière
Type de lumière	LED, incandescente
Puissance	12 Watts
Couleur de la lumière	Blanc chaud
Marque	Philips
Base de l'ampoule	GU10
Dimensions de l'article L x l x H	5 x 56 x 103 millimètres
Volt	220 - 240 Volts
Type de prise	Câble électrique

## Annexe 20 : Lampe LED 10 W



<b>Fiche technique</b>	
Type de lumière	LED, incandescente
Puissance	10 Watts
Couleur de la lumière	Blanc chaud
Marque	Philips
Base de l'ampoule	E27
Puissance de la source de Lumière	10 Watts
Dimensions de l'article L x l x H	6 x 6 x 10.8 centimètres
Volt	220 - 240 Volts
Type de prise	Câble électrique
Température/Rendu des Couleurs	2700 Kelvin

