

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

العلمي والبحث وزارة التعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

– تلمسان – بلقايد جامعة أبي بكر

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Énergie renouvelable en mécanique

Par : Bendahmane Mohammed Amine

Benameur Rayen

Sujet

**Réhabilitation énergétique des bâtiments anciens par
l'ajout de matériaux isolants écologiques**

Soutenu publiquement, le 17/06 / 2025, devant le jury composé de :

M ROSTANE Brahim	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme Sichaib Amel	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme BENAHMED Lamia	MAB	Université de Tlemcen	Encadreur
M ALIANE Khaled	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant qui nous a guidés jusqu'à la fin de ce parcours et a illuminé notre chemin vers la connaissance suprême

*Tous d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante **Mme BENAÏMED Lamia** pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à **M. ALIANE Khaled** qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Nous avons eu le plaisir de travailler sous vos directions. Nous vous remercions pour votre gentillesse et spontanéité avec lesquelles vous avez dirigé ce travail, ainsi que pour vos conseils qui nous ont permis d'améliorer notre projet.

Nous tenons, d'autre part, à remercier les respectables membres du jury pour bien vouloir nous accorder de leur temps à discuter et juger notre travail.

Nous aimerions également adresser nos chaleureux remerciements à tout le personnel et aux enseignants du département de génie mécanique, pour leur soutien constant et leur encouragement tout au long de notre formation.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, leur apport a été précieux.

Dédicace

Au nom d'Allah, le tout miséricordieux, le très miséricordieux.

Je tiens à dédier ce travail à ma famille :

Mes parents et mes frères, avec tous mes sentiments de respect, d'amour et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour m'assurer une éducation dans les meilleures conditions.

A mes professeurs sans exception, pour leurs efforts afin de m'assurer une formation solide.

A tous mes amis,

A tous ceux pour qui ma réussite leur tient au cœur.

A toute la promo 2025.

AMINE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents qui ont consacré leur

Jeunesse pour mon auspice ;

A mes frères et à toute la famille ;

A mes proches grands et petits

A Tous mes amis

A tous ceux qui ont participé de près

ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Résumé :

Ce mémoire traite de la réhabilitation énergétique des bâtiments anciens en utilisant des matériaux isolants écologiques. L'étude commence par une analyse approfondie des caractéristiques thermiques du bâti ancien et met en évidence ses faiblesses en matière d'isolation. Une approche de rénovation a été appliquée sur un cas concret, en intégrant des matériaux tels que la laine de bois et le double vitrage. Les résultats montrent une amélioration significative : réduction des pertes de chaleur, diminution de la consommation énergétique, baisse des coûts de chauffage et de climatisation, et amélioration du confort thermique. Le mémoire conclut en soulignant les bénéfices écologiques, économiques et patrimoniaux de cette approche, qui peut être généralisée à d'autres projets similaires.

Mots clés : Réhabilitation énergétique Bâti ancien ; Isolation thermique ; Matériaux écologiques ; Confort thermique.

ABSTRACT

This thesis focuses on the energy rehabilitation of old buildings by incorporating eco-friendly insulating materials. It begins with an in-depth analysis of the thermal behavior of traditional buildings, highlighting their insulation weaknesses. A practical case study is presented using wood wool and double glazing. The results show clear improvements: reduced heat loss, lower energy consumption, decreased heating and cooling costs, and enhanced thermal comfort. The study concludes that this approach provides ecological, economic, and heritage-related benefits, and supports its broader application in similar renovation projects.

Keywords: Energy rehabilitation; Old buildings; Thermal insulation; Ecological materials; Thermal comfort

المخلص

يتناول هذا البحث موضوع إعادة تأهيل المباني القديمة من الناحية الطاقوية، وذلك باستخدام مواد عزل بيئية. يبدأ البحث بتحليل مفصل لخصائص العزل الحراري في المباني القديمة، مع إبراز نقاط ضعفها. ثم يتم تطبيق إستراتيجية تأهيل عملي على منزل حقيقي باستخدام مواد مثل صوف الخشب والزجاج المزدوج. أظهرت النتائج تحسناً كبيراً في الأداء الطاقوي، حيث تم تقليل فاقد الحرارة وخفض استهلاك الطاقة وتكاليف التدفئة والتكييف، إلى جانب تحسين الراحة الحرارية. يخلص البحث إلى أن هذا النهج لا يقدم فقط فوائد بيئية واقتصادية، بل يساهم أيضاً في الحفاظ على التراث، ويمكن تعميمه على مشاريع أخرى مشابهة.

الكلمات المفتاحية: إعادة التأهيل الطاقوي، المباني القديمة، العزل الحراري، المواد البيئية، الراحة الحراري.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Bâtiments anciens : caractéristiques et enjeux énergétiques	2
I.2.1. Le bâti ancien	2
I.2.2. Les caractéristiques du bâti ancien	3
I.2.2.1. Un bâti « écologique ».....	3
I.2.2.2. Une architecture bioclimatique.....	4
I.2.3. Les principales typologies architecturales.....	5
I.2.3.1. La grange-étable	5
I.2.3.2. La maison rurale	6
I.2.3.3. La maison de village et de bourg.....	7
I.2.3.4. L'habitation bourgeoise	8
I.2.4. Typologie des bâtiments anciens	9
I.2.5. Bâti ancien historique et transformation vers le bâti moderne.....	10
I.2.6. Les matériaux et techniques constructives	11
I.2.7. Atouts et faiblesses des constructions anciennes en milieu urbain	12
I.2.8. Comportement thermique du bâti ancien	12
I.2.8.1 Le comportement thermique d'hiver : les points forts du bâti ancien.....	13
I.2.8.2. La gestion du chauffage.....	13
I.2.8.3. Le comportement thermique d'hiver : les points faibles du bâti ancien.....	13
I.2.8.4. Les pertes thermiques par les ouvertures.....	14
I.2.8.5. L'effet de paroi froide sur le corps.....	14
I.2.8.6. Particularité des murs anciens	15
I.2.8.7 Le comportement thermique d'été : un confort naturel pour le bâti ancien	15
I.2.8.7.1. Le rôle fondamental de l'inertie	15
I.2.8.7.2. Les autres sources du confort d'été.....	15
I.2.9. Caractéristiques constructives des bâtiments	15
I.2.9.2. L'inertie thermique	16
I.2.10. Confort thermique	16
I.3. Enjeux environnementaux et économiques.....	18
I.3.1. Objectifs et bénéfices de la réhabilitation thermique	19
I.3.2. Les enjeux de la réhabilitation responsable du bâti ancien	19

Sommaire

I.3.2.1. Enjeux patrimoniaux.....	20
I.3.2.2. Enjeux techniques.....	20
I.3.2.3. Enjeux énergétiques et environnementaux	20
I.3.3. Bâtiments existants & économies d'énergie	20
I.3.3.1. La nécessaire réduction des consommations énergétiques des bâtiments existants	20
I.3.4. Impact environnemental des bâtiments anciens	21
I.3.4.1. Analyse de cycle de vie ACV	22
I.4. Importance de l'utilisation de matériaux écologiques	23
I.4.1. Contribution à la réduction des émissions de CO ₂	23
I.4.1.1. Des attentes fortes sur la décarbonation du secteur du bâtiment.....	23
I.4.2. Conformité aux objectifs de développement durable.....	24
I.4.3. L'économie circulaire.....	25
I.5. Normes et réglementations.....	26
I.5.1. Réglementation applicable	27
I.5.2. La future Réglementation Environnementale.....	27
I.5.3. Le contexte réglementaire	27
I.5.3.1. La directive européenne 2002/91/CE sur la performance énergétique des bâtiments existants	27
I.5.4. Réglementations spécifiques pour les bâtiments classés ou protégés	28
I.5.4.1. Le bilan de la protection	28
I.5.4.2. Conditions et procédure de protection.....	29
I.5.4.3. Effets de la protection.....	29
I.6. Conclusion	29

Chapitre II : Matériaux isolants écologiques

II.1 Introduction	32
II.2. Présentation des matériaux	32
II.2.1. Pourquoi choisir un isolant naturel ?	32
II.2.2. Historique de l'isolation thermique	32
II.2.3. Réglementation thermique des bâtiments existants (RT dans.....	33
L'existant).....	33
II.2.4. Les différents conditionnements des matériaux d'isolation.....	34
II.2.5. Présentation des matériaux isolants écologiques	36
II.2.5.1. L'argile expansée - Isolant minéral naturel.....	36

Sommaire

II.2.5.2. Le lin - Matière première recyclable	38
II.2.5.3. Le chanvre - Matière première renouvelable	39
II.2.5.4. Fibre de bois - Matière première renouvelable	40
II.2.5.5. Jute - Matière recyclable	42
II.2.5.6. Le liège - Matière première renouvelable	43
II.2.5.7. La laine de mouton - Matière première renouvelable	44
II.2.5.8. Algues - Matière première renouvelable	45
II.2.5.9. La paille - Matière première renouvelable	46
II.2.5.10. Ouate de Cellulose – Matière recyclable.....	47
II.2.6. Le principe de l'isolation thermique.....	49
II.2.6.1. Isolation intérieure.....	51
II.2.6.2. Isolation extérieure.....	51
II.2.6.3. Isolation répartie.....	52
II.3. Avantages et inconvénients	53
II.3.1. Performances thermiques.....	53
II.3.1.1. Valeur d'isolation	53
II.3.1.2. Ouverture à la vapeur	53
II.3.1.3. Protection contre les surchauffes.....	53
II.3.1.4. Isolation acoustique.....	54
II.3.1.5. Durée de vie	54
II.3.2. Quelques avantages des isolants naturels	55
II.3.2.1. Le bois d'œuvre.....	55
II.4. Critères de sélection des matériaux.....	56
II.4.1. Les propriétés physiques de construction des matériaux d'isolation.....	56
II.4.2. Classement feu (Euro class) des matériaux écologiques	58
II.4.3. Comparaison des matériaux d'isolation écologiques	58
II.4.3.1. Le lin	58
II.4.3.2. Le Chanvre	59
II.4.3.3. Le Liège.....	59
II.4.3.4. Laine de mouton.....	60
II.4.3.5. La Paille.....	60
II.4.3.6. Cellulose.....	61
II.4.4. Coûts d'isolation écologique.....	61

Sommaire

II.4.4.1. Comment les prix d'isolation sont-ils calculés ?.....	61
II.5. Conclusion.....	63

Chapitre III : étude de cas

III.1. Introduction :	65
III.2. Sélection des bâtiments	65
III.2.1. Caractéristiques géographiques	65
III.2.2. Radiations solaires	66
III.2.3. Température de l'air :.....	69
III.2.4. Les Besoins Energétiques et confort :	70
III.2.4.1. Les paramètres énergétiques	71
III.2.4.1.1. Pertes par transmission des parois et renouvellement d'air par ventilation	72
III.2.4.1.2. Apports par énergie solaire :.....	73
III.2.4.1.3. Apports internes par les occupants et les équipements électriques :	73
III.2.5. Notions du degré jours pour le chauffage et/ou refroidissement	74
III.2.5.1. Degré jour de chauffage :.....	74
III.2.5.2. Degré jour de refroidissement.....	75
III.6. Conclusion	78

Chapitre. IV : Analyse des résultats

IV.1 Introduction :	80
IV.2. Description de la Maison	80
IV.2.1. Stratégie d'isolation écologique appliquée à l'étage supérieur.....	85
IV.2.2. La mise en œuvre	86
IV.2.2.1. Réalisation de l'isolation intérieure avec support enduit :	87
IV.2.2.2. Isolation thermique de la toiture terrasse :	89
IV.2.2.3. Fenêtre double vitrage.....	89
IV.2.2.4. Changement de porte.....	90
IV.2.3. Ventilation naturelle	91
IV.3. Résultats et discussions	91
IV.3.1. Coefficient de transmission surfacique	91
IV.4. La consommation annuelle du chauffage et du climatisation à Tc	103
IV.4.1. Pour climatisation	104
IV.4.2. Le cout de consommation annuel en chauffage	105
IV.4.3. Le cout de consommation annuel en climatisation	106

Sommaire

IV.5 Conclusion.....	106
Conclusion générale	108

Liste des tableaux

TABLEAU I.1: OBJECTIFS ET BENEFICES DE LA REHABILITATION THERMIQUE DANS LE BATI ANCIEN.....	19
TABLEAU II. 2: PROPRIETES TECHNIQUES DES MATERIAUX ISOLANTS	54
TABLEAU II.3: VALEUR DE RESISTANCE A LA DIFFUSION DE LA VAPEUR D'EAU	57
TABLEAU II. 4: CLASSEMENT FEU	58
TABLEAU II. 5: COUTS DE MATERIAUX	62
TABLEAU III.6: DONNEES METEOROLOGIQUES ANNUELLES DE LA VILLE DE TLEMCEM	68
TABLEAU III.7: VARIATIONS SAISONNIERES DES TEMPERATURES	69
TABLEAU III. 8: CALCUL DU NOMBRE DE DEGRES JOURS MENSUEL (DJ)	77
TABLEAU IV. 9: TOTAL DES DEPERDITIONS D'ENERGIE DANS LE BATIMENT	83
TABLEAU IV. 10: TOTAL DES DEPERDITIONS D'ENERGIE DANS LE DEUXIEME ETAGE.....	86
TABLEAU IV.11: CARACTERISTIQUE DE L'ISOLANT	88
TABLEAU 12: CARACTERISTIQUE DES MURS ITE.....	91
TABLEAU IV.13: CARACTERISTIQUE DES MURS ITI.....	92
TABLEAU IV.14: CARACTERISTIQUE DU BETON.....	93
TABLEAU IV.15: CARACTERISTIQUE DES FENETRES.....	93
TABLEAU IV.16: CARACTERISTIQUE DES PORTES.....	94
TABLEAU IV. 17: TOTAL DES DEPERDITIONS D'ENERGIE DANS LE DEUXIEME ETAGE APRES ISOLATION	96
TABLEAU IV. 18: CONSOMMATION D'ENERGIE APRES ISOLATION.....	98
TABLEAU IV. 19: CONSOMMATION D'ENERGIE AVANT ISOLATION	100
TABLEAU IV. 20: COMPARAISON AVANT ET APRES ISOLATION.....	102
TABLEAU IV. 21: LA CONSOMMATION DU CHAUFFAGE SAISON D'HIVER	103
TABLEAU IV. 22: LA CONSOMMATION DU CHAUFFAGE SAISON D'ETE	103
TABLEAU IV. 23: LE COUT ANNUEL DU CHAUFFAGE SAISON D'HIVER.....	105
TABLEAU IV. 24: LE COUT ANNUEL EN CLIMATISATION SAISON D'ETE.....	106

Liste des figures

FIGURE I.1 : CONSOMMATION ENERGETIQUE MOYENNES DES BATIMENTS SELON LEURS DATES DE CONSTRUCTION	14
FIGURE I.2 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE	5
FIGURE I.3: MAISONS DE TYPE GRANGE-ETABLE	6
FIGURE I.4 : LES MAISONS RURALES	7
FIGURE I.5 : LES MAISONS DE VILLAGE ET DE BOURG	8
FIGURE I.6 : LES MAISONS BOURGEOISES	8
FIGURE I.7: TYPOLOGIES DU BATI ANCIEN	9
FIGURE I.8: PARCOURS HISTORIQUE	10
FIGURE I.9: MAISONS ANCIENNES	11
FIGURE I.10: BATI ANCIEN ET BATI RECENT	12
FIGURE I.11: MAISON ANCIENNE NON ISOLEE	13
FIGURE I.12: COMPORTEMENT THERMIQUE D'HIVER	14
FIGURE I.13: SCHEMA DES ECHANGES THERMIQUES DANS UN BATIMENT ANCIEN	16
FIGURE I.14: SCHEMA DES ECHANGES THERMIQUES DANS UN BATIMENT CONTEMPORAIN	17
FIGURE I.15: PART DU BATI ANCIEN DANS LE PARC EXISTANT, SOURCE CEREMA	18
FIGURE I.16 : CONSOMMATION D'ENERGIE FINALE PAR SECTEUR D'ACTIVITES, EN FRANCE –2006	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE I.17: CYCLE DE VIE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE I.18: ÉMISSIONS TOTALES SUR LE TERRITOIRE NATIONAL LIEES AUX BATIMENTS (EN MtCO _{2e})	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
FIGURE I.19: ÉVOLUTION DES EMISSIONS ANNUELLES TERRITORIALES FRANÇAISES PAR SECTEUR ENTRE 1990 ET 2023 (EN MtCO _{2e})	25
FIGURE I.20: LE CYCLE DE VIE D'UN BATIMENT	26
FIGURE I.21: ÉMISSIONS DE CO ₂ LIEES A LA COMBUSTION D'ENERGIE EN FRANCE – 2006	28
FIGURE II.22: ISOLANT SEMI-RIGIDES ET ROULEAUX	34
FIGURE II.23: ISOLANT EN VRAC	34
FIGURE II.24: L'ISOLATION DES COMBLES PAR SOUFFLAGE	35
FIGURE II.25: FEUTRE ISOLANT	36
FIGURE II.26: L'ARGILE EXPANSEE	37
FIGURE II.27: LE LIN	38
FIGURE II.28: LE CHANVRE	39
FIGURE II.29: FIBRE DE BOIS	41
FIGURE II.30: LA JUTE	42

Liste des figures

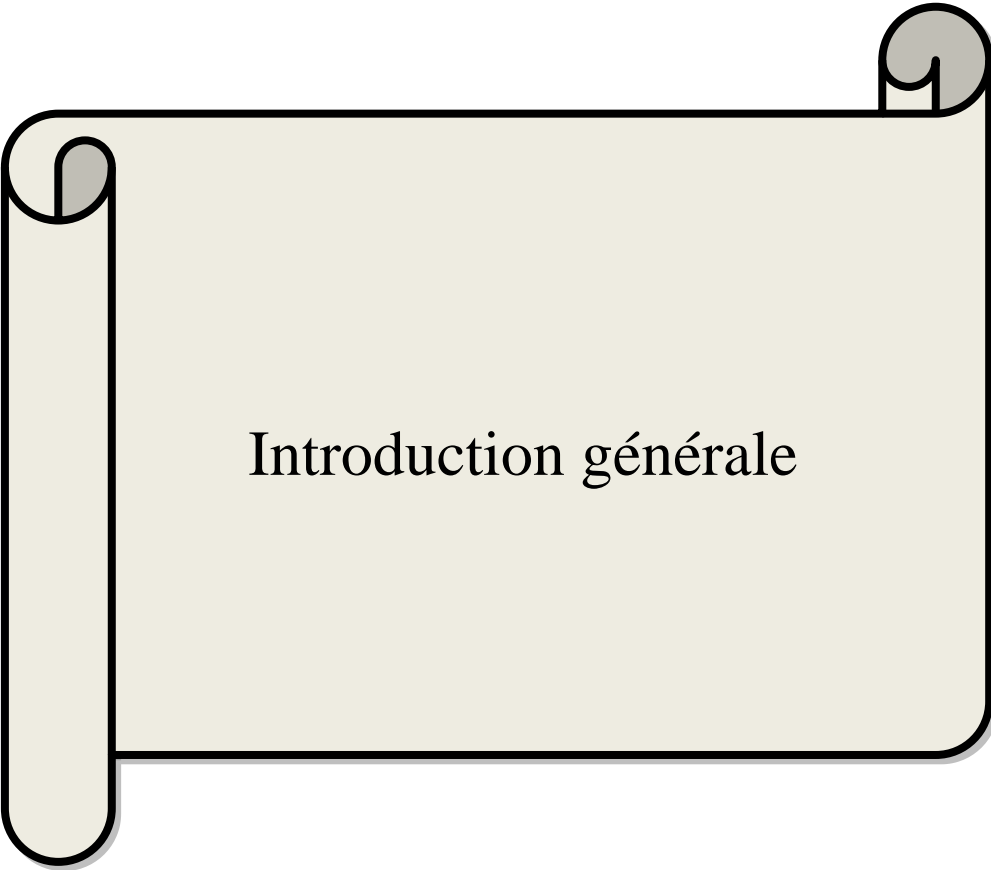
FIGURE II.31: LE LIEGE	43
FIGURE II.32: LA LAINE DE MOUTON	44
FIGURE II.33: LES ALGUES	45
FIGURE II.34: LA PAILLE.....	46
FIGURE II.35: LA OUATE DE CELLULOSE.....	48
FIGURE II.36: LIEUX DE PLACEMENT D'ISOLATION	50
FIGURE II. 37: ISOLATION INTERIEURE.....	51
FIGURE II.38: ISOLATION EXTERIEURE	52
FIGURE II.39: ISOLATION REPARTIE	53
FIGURE III.40: SITUATION DE LA VILLE DE TLEMCEN (CARTE D'ALGERIE)	66
FIGURE III.41: VARIATION DU RAYONNEMENT GLOBAL ET DIFFUS HORIZONTAL	67
FIGURE III.42: VARIATIONS SAISONNIERES DES TEMPERATURES DU SITE DE TLEMCEN	70
FIGURE III.43: VARIATION DES TEMPERATURES JOURNALIERES (MAX ET MIN) AMBIANTES ET AU SOL DU SITE DE TLEMCEN	76
FIGURE III.44: VARIATION JOURNALIERE DES TEMPERATURES AMBIANTES MOYENNES DIURNES (TMD) ET NOCTURNES (TMN) DU SITE DE TLEMCEN	77
FIGURE IV.45: LA MAISON ETUDIEE (VUE SUD – SUD EST)	81
FIGURE IV.46: PLANS DE LA MAISON ETUDIEE	82
FIGURE IV 47: SYSTEME D'ISOLATION THERMIQUE PAR L'EXTERIEUR (ITE) AVEC PANNEAUX EN LAINE DE BOIS	86
FIGURE IV.48: MAISON A TLEMCEN APRES LA MISE EN ŒUVRE.....	87
FIGURE IV.49: PANNEAUX LAINE DE BOIS A ENDUIRE POUR ISOLATION MURS INTERIEURS	88
FIGURE IV.50: TOITURE TERRASSE DE LA MAISON	89
FIGURE IV.51: DOUBLE VITRAGE DE RENOVATION.....	90
FIGURE IV.52: VENTILATION DOUCE (NATURELLE).	91
FIGURE IV. 53 : LA CONSOMMATION ANNUELLE DU CHAUFFAGE POUR LA SAISON D'HIVER AVANT ET APRES ISOLATION	103
FIGURE IV. 54 :LA CONSOMMATION ANNUELLE DE LA CLIMATISATION POUR LA SAISON D'ETE AVANT ET APRES ISOLATION	105
FIGURE IV. 55: LE COUT ANNUEL EN CLIMATISATION SAISON D'HIVER.....	105
FIGURE IV. 56: LE COUT ANNUEL EN CLIMATISATION SAISON D'ETE.....	106

Nomenclature

Symbole	Signification	Unité
λ	Conductivité thermique utile de chaque matériau	W/(m·°C)
U	Coefficient de transmission thermique	W/(m ² ·°C) ou W/(m ² ·K)
IRDRH	Irradiation du rayonnement direct	W/m ²
IRDFH	Irradiation du rayonnement diffus	W/m ²
Tair	Température de l'air	°C
Vit. Vent	Vitesse du vent	m/s
Hum. Rel	Humidité relative	%
Tc	Température de confort	°C
Tm	Température extérieure moyenne	°C
Temax	Température maximale journalière	°C
Temin	Température minimale journalière	°C
Ta	Température ambiante	°C
Ew	Énergie finale pour un chauffage	kWh
Qw	Besoins en chaleur	kWh
Qv	Somme des pertes en chaleur	kWh
Qh	Besoins pour le chauffage	kWh
Qww	Besoins pour l'eau chaude	kWh
Qt	Besoins en chaleur par transmission	kWh
Qi	Besoins en chaleur par ventilation	kWh
Qg	Apports en chaleur	kWh
Qf	Chaleur interne et externe	kWh
fg	Taux d'utilisation de la chaleur	%
Qti	Pertes par élément (toiture, paroi, fenêtre, plancher)	kWh
Ai	Surface de l'élément	m ²
ki	Facteur k de l'élément	W/(m ² ·K)
TCH	Taux de chauffage	K·jour/an
Qs	Apports par énergie solaire	kWh
Qp	Apports par les occupants	kWh
Qe	Apports par équipements électriques	kWh
RH	Rayonnement global par jour de chauffage	W/m ²
fb	Facteur de réduction (ombrage, poussière)	-
g	Taux global de transmission	%

Nomenclature

fr	Surface du vitrage (sans cadre)	m ²
Af	Surface des fenêtres	m ²
Cp	Chaleur dégagée par occupant	W/occupant
P	Nombre d'occupants	-
hp	Présence par jour	h/jour
NJC	Nombre de jours chauffés	jours/an
Ee	Consommation d'électricité	kWh/(m ² ·an)
fc	Facteur de réduction	-
Dj	Degrés-jours	Jours·°C
DBP	Déperditions de base par transmission	W/°C
DBR	Déperditions de base par renouvellement d'air	W/°C
G	Coefficient de déperdition volumique	W/(m ³ ·°C)
Vh	Volume de la maison	m ³
Gij	Flux de chaleur solaire radiative pour le j ^e mur/plafond	W/m ²
h0	Coefficient de transmission de chaleur de la surface extérieure	W/(m ² ·K)
Tsol j	Température sol-air pour le j ^e mur/plafond	°C
To	Température extérieure	°C
α	Coefficient d'absorption pour le rayonnement solaire	-
Ltj	Différence de longueur d'onde rayonnement env. et mur	μm
ε	Coefficient d'émissivité pour le rayonnement thermique	-
GT	Rayonnement total sur surface inclinée	W/m ²
Gb	Rayonnement de faisceau sur surface horizontale	W/m ²
Gd	Rayonnement diffus sur surface horizontale	W/m ²
G	Rayonnement total sur surface horizontale	W/m ²
β	Angle d'inclinaison de la surface	rad
ρg	Réflectivité diffuse de la terre	%
θ	Angle d'incidence (faisceau/normal à la surface)	rad



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Dès les premiers temps, l'homme a construit des abris pour se protéger des intempéries, en utilisant le feu comme unique source de chauffage. Avec l'évolution des techniques de construction, les méthodes de chauffage se sont également perfectionnées. Après la Seconde Guerre mondiale, la nécessité de reconstruire a entraîné une augmentation du nombre de logements, de la surface habitable par personne et du niveau de confort. Dans un contexte de croissance économique rapide, les solutions les moins coûteuses ont été privilégiées. L'énergie, abondante et peu chère, a conduit à négliger l'isolation des bâtiments. À l'époque, la rareté des ressources énergétiques n'était pas une préoccupation, et l'énergie semblait inépuisable. Les enjeux écologiques étaient perçus différemment, et l'impact des activités humaines sur le climat restait méconnu. [1]

Le premier choc pétrolier de 1973 a marqué un tournant, révélant la finitude des ressources pétrolières. La flambée des prix a suscité une prise de conscience et a conduit à la recherche d'économies d'énergie. En France, cela s'est traduit par la mise en place de la première réglementation thermique en 1974 et par une « chasse au gaspillage ». Des mesures ont été prises pour améliorer l'isolation des combles et des murs et pour généraliser les doubles vitrages dans les constructions neuves. La rénovation du parc immobilier existant a également été encouragée. En trente ans, ces efforts ont permis une amélioration de 34 % de la performance thermique des bâtiments, réduisant la consommation énergétique moyenne d'un logement de près de 400 kWh/m²/an à moins de 250 kWh/m²/an. [1]

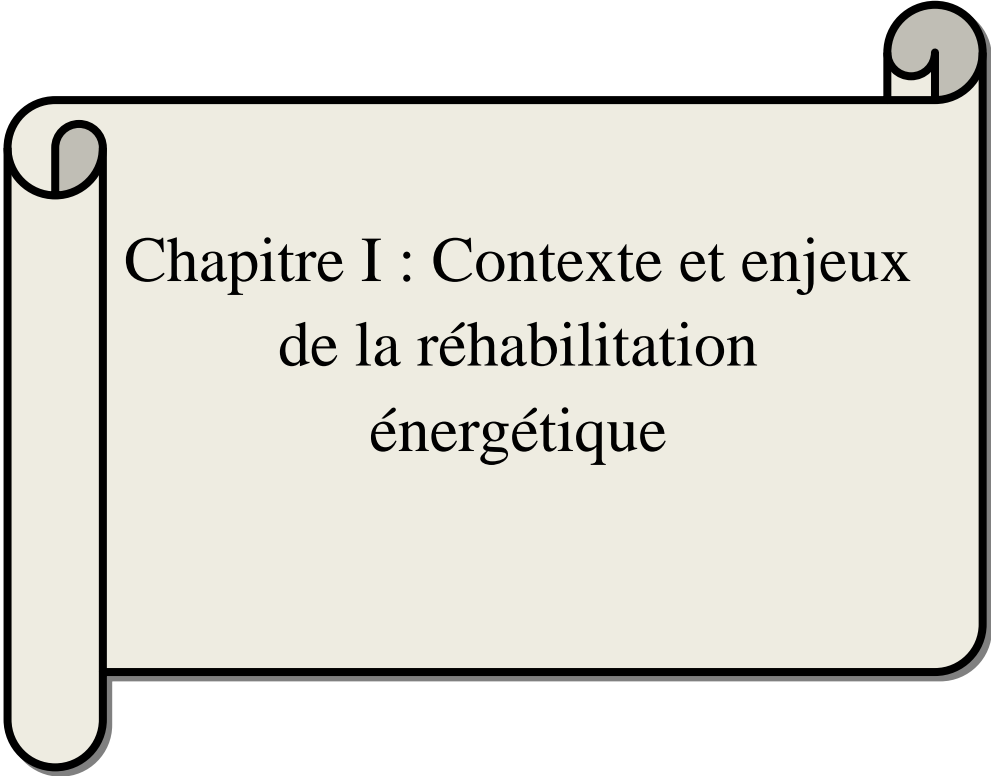
Aujourd'hui, l'accent est mis sur l'amélioration de l'isolation des bâtiments existants, afin de limiter les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. Il est essentiel de souligner que moderniser un système de chauffage sans renforcer l'isolation de l'enveloppe du bâtiment est inefficace, car les déperditions thermiques d'une maison mal isolée sont considérables : 25 à 30 % par le toit, 15 à 20 % par le sol, 15 à 20 % par les murs, 15 % par les portes et fenêtres, 10 à 15 % par les ponts thermiques, et 15 à 20 % dus au renouvellement d'air. Une isolation performante permet donc de réduire significativement les pertes de chaleur et les besoins énergétiques. [2]

Dans ce cadre, la sélection des matériaux d'isolation est cruciale pour optimiser la performance énergétique des édifices. Effectivement, une partie importante des pertes de chaleur a lieu à travers l'enveloppe du bâtiment, ce qui rend indispensable le recours à des

Introduction générale

isolants de haute performance. Il est nécessaire que ces matériaux possèdent non seulement une faible conductivité thermique, mais qu'ils s'adaptent également aux conditions météorologiques, à l'exposition et aux matériaux de construction. Leur choix est aussi conditionné par des facteurs pratiques comme la disponibilité et le prix, en plus de leur influence sur l'environnement. De nos jours, des options d'isolation écologiques telles que la laine de bois, le liège ou la ouate de cellulose sont de plus en plus privilégiées pour leur efficacité thermique et leur caractère écoresponsable. [3]

Pour répondre à ces défis, cette étude sera divisée en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre abordera le contexte et les enjeux de la réhabilitation énergétique des bâtiments anciens. Le deuxième chapitre se concentrera sur les matériaux isolants écologiques, en détaillant leurs caractéristiques, avantages et critères de choix. Le troisième chapitre présentera des études de cas et la méthodologie d'analyse utilisée pour évaluer les performances énergétiques avant et après réhabilitation. Enfin, le quatrième chapitre analysera les résultats, incluant les gains énergétiques, économiques et environnementaux, et proposera des recommandations pour une réhabilitation durable



Chapitre I : Contexte et enjeux
de la réhabilitation
énergétique

I.1. Introduction

L'optimisation de l'efficacité énergétique des bâtiments est devenue cruciale face aux défis environnementaux et économiques actuels. Le secteur du bâtiment constitue une part significative de la consommation énergétique mondiale et des émissions de gaz à effet de serre, le plaçant ainsi au cœur des politiques de transition énergétique. Dans ce cadre, la rénovation des bâtiments anciens se révèle être une solution efficace pour améliorer leur performance thermique tout en conservant leur valeur patrimoniale.

I.2. Bâtiments anciens : caractéristiques et enjeux énergétiques

I.2.1. Le bâti ancien

Le bâti ancien est défini soit comme les bâtiments construits avant 1975 (première réglementation thermique), soit avant 1948 (début de la reconstruction post-Seconde Guerre mondiale). Les constructions d'avant 1948 utilisaient des matériaux locaux et étaient adaptées au climat, tandis que celles d'après 1948, issues d'une reconstruction rapide et peu coûteuse, privilégiaient des matériaux industrialisés, sans considération énergétique ou environnemental.[4]

Le parc de logements français est divisé en trois catégories :

- Avant 1948 : Performance énergétique proche des normes de 2000 (étiquette C à D).
- 1948-1975 : Performance moins bonne (étiquette F).
- Après 1975 : Soumis aux réglementations thermiques modernes.

Le niveau de performance des bâtiments d'avant 1948 est à peu près similaire à celui des immeubles construits selon la réglementation thermique de 2000. Il correspond à l'étiquette énergétique de C à D (de 91 à 230 kWh/m²/an) contre F (331 à 450) pour les bâtiments d'après-guerre et d'avant-choc pétrolier [5]. Cependant, ces valeurs valables pour certains bâtiments à l'échelle nationale, ne sont pas nécessairement valables pour les typologies qui seront étudiées caractérisées par un grand inconfort thermique et des déperditions énergétiques trop élevées. [6]

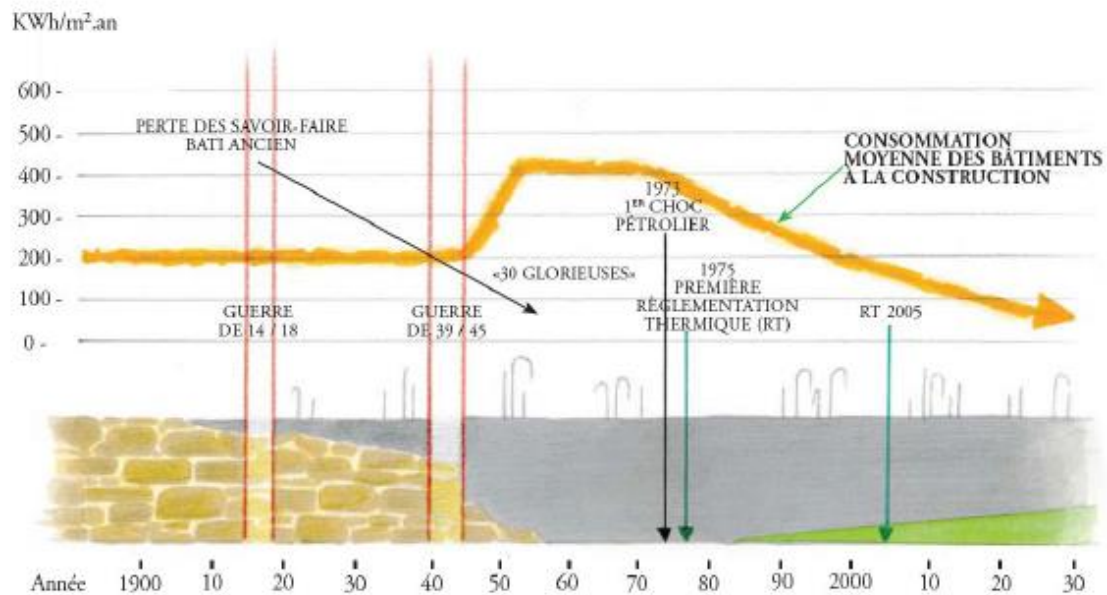


Figure I.1 : consommation énergétique moyennes des bâtiments selon leurs dates de construction [6]

I.2.2. Les caractéristiques du bâti ancien

I.2.2.1. Un bâti « écologique »

Grâce à son implantation, le bâti ancien s'intègre harmonieusement à son environnement pour se protéger des intempéries (pluie, vent, froid) tout en tirant parti des apports solaires. Les matériaux de construction sont majoritairement issus du site ou de ses environs : pierre et bois locaux, sable des rivières, lauzes ou ardoises extraites des carrières proches. Seuls certains éléments industriels, comme la chaux ou les tuiles, sont importés. Cette utilisation de ressources locales confère à ces bâtiments une faible empreinte carbone, les rendant vertueux sur le plan environnemental.

D'un point de vue constructif, la densité des matériaux employés offre à ces constructions une inertie thermique remarquable, créant un déphasage qui ralentit la propagation du froid et de la chaleur à travers les murs. Bien que souvent qualifiées de « passoires thermiques », les maisons anciennes possèdent en réalité des qualités thermiques et hygrothermiques qui facilitent la régulation des températures et de l'humidité.

Préserver et rénover le bâti ancien permet de réduire le transport de matériaux neufs, limitant ainsi la production de carbone. L'énergie grise est également diminuée grâce au réemploi des structures existantes. Enfin, la rénovation contribue à limiter l'étalement urbain, préservant les terres agricoles et les espaces naturels. [7]

I.2.2.2. Une architecture bioclimatique

Le bâti ancien s'intègre harmonieusement à son environnement, en interaction constante avec le terrain, l'eau, l'air et le climat. Cette symbiose confère aux constructions anciennes des qualités de conception et de construction remarquables, directement liées aux caractéristiques de leur milieu : topographie, géologie, végétation, etc. Ainsi, ces bâtiments tirent parti des atouts du site tout en se protégeant de ses contraintes.

- **Implantation et organisation** : grâce à une implantation réfléchie et une organisation intérieure optimisée, le bâtiment capte les apports solaires (orientations est et sud) tout en se protégeant de la pluie et des vents froids (orientations nord et ouest).
- **Volume compact** : la compacité de la construction réduit naturellement les surfaces de déperdition thermique.
- **Ouvertures bien positionnées** : les ouvertures sont judicieusement réparties en fonction de l'orientation : plus nombreuses au sud et à l'est pour maximiser les apports solaires, et réduites au nord pour limiter l'exposition au froid.
- **Pièces de service en espaces tampons** : les pièces de service (cellier, cuisine, souillarde, etc.) sont placées au nord, servant de zone tampon entre les murs froids et les pièces de vie.
- **Protection par l'environnement proche** : le relief, la végétation persistante ou les haies sont utilisés pour se protéger des vents dominants.
- **Arbres à feuilles caduques** : des arbres à feuilles caduques sont plantés pour offrir une protection solaire en demi-saison et en été, tout en laissant passer la lumière en hiver. [7]

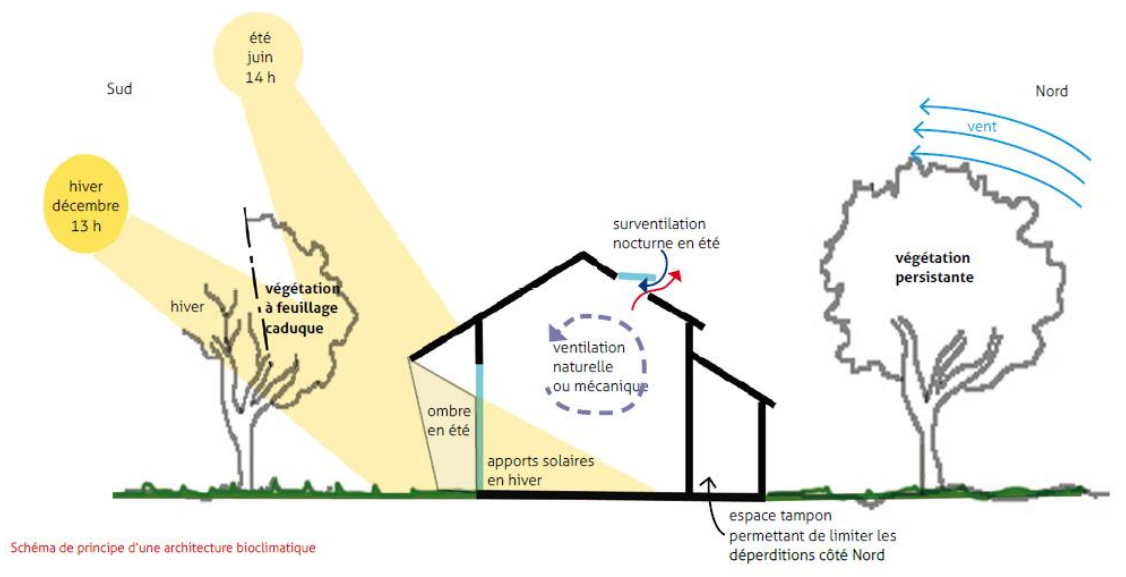


Figure I.2 : Schéma de principe d'une architecture bioclimatique

I.2.3. Les principales typologies architecturales

I.2.3.1. La grange-étable

La grange traditionnelle est un bâtiment sobre et fonctionnel, conçu pour répondre aux besoins agricoles et s'adapter au terrain, qu'il soit plat ou en pente. Lorsque le terrain est en pente, le rez-de-chaussée est partiellement enterré, permettant un accès de plain-pied à la fois pour l'étable située au niveau inférieur et pour le fenil à l'étage. Les murs, généralement en maçonnerie de pierre, sont rarement enduits, car l'usage agricole ne nécessite pas une étanchéité à l'air parfaite. La partie fenil est souvent dotée d'un bardage en bois sur le pignon sud. Ce bardage, non jointif, favorise la ventilation du comble, essentielle pour conserver le foin. Les dimensions de la porte sont adaptées au passage du bétail au rez-de-chaussée et au chargement du foin à l'étage. Les autres ouvertures, destinées à la ventilation, sont de petite taille, sans vitrage et équipées de volets en bois. Enfin, la charpente en bois est recouverte, selon la région, de tuiles, d'ardoises ou de lauzes, reflétant les matériaux locaux disponibles. Ainsi, la grange traditionnelle allie simplicité, fonctionnalité et adaptation à son environnement. [7]



Figure I.3: maisons de type grange-étable

I.2.3.2. La maison rurale

Dans les villages, les terres étaient principalement consacrées aux cultures, essentielles à la vie quotidienne. Pour préserver ces parcelles, les maisons étaient construites de manière regroupée et mitoyenne, avec une emprise au sol réduite. Lorsque la maison avait une vocation agricole, le rez-de-chaussée pouvait accueillir le bétail, tandis que le premier étage était réservé à l'habitation et les combles au stockage des récoltes. Si la maison était mitoyenne avec une grange, le rez-de-chaussée servait alors de pièce de vie. D'un point de vue constructif, les murs étaient réalisés en pierre locale, souvent recouverts d'un enduit à base de chaux et de sable, leur conférant une couleur en parfaite harmonie avec l'environnement. Les fenêtres, toujours en bois, étaient de dimensions modestes, plus hautes que larges aux étages d'habitation. Les combles, quant à eux, étaient éclairés et ventilés par de petites ouvertures carrées. Enfin, la toiture reposait sur une charpente en bois brut et était recouverte, selon la région, de tuiles, d'ardoises ou de lauzes, reflétant les matériaux disponibles localement. Ainsi, ces maisons villageoises alliaient fonctionnalité, économie d'espace et intégration harmonieuse dans leur environnement.



Figure I.4 : Les maisons rurales

I.2.3.3. La maison de village et de bourg

La plupart des maisons de village sont mitoyennes, au moins sur un côté, et s'alignent le long des rues et ruelles. Leur surface au sol est généralement plus grande que celle des maisons rurales. Le rez-de-chaussée est souvent aménagé pour l'habitation ou destiné à un usage commercial, tandis que la maison s'élève sur deux étages. Lorsque la hauteur le permet, les combles sont également aménagés pour être habitables. Ces maisons, construites en pierre, sont systématiquement enduites. Les encadrements des ouvertures sont en bois ou en pierre, et les menuiseries, ainsi que les volets, sont également en bois. Les toitures, quant à elles, sont couvertes de tuiles ou d'ardoises, et les avant-toits reposent sur des génoises ou des corniches. Ainsi, ces maisons de village allient fonctionnalité, esthétique et intégration harmonieuse dans le tissu urbain traditionnel. [7]



Figure I.5 : Les maisons de village et de bourg

I.2.3.4. L'habitation bourgeoise Figure I.5: Les maisons de village et de bourg

Elle se trouve exclusivement dans les bourgs les plus importants. Elle peut soit s'intégrer à un alignement de façades sur rue, soit être isolée au cœur d'un jardin. La composition de sa façade est très ordonnée, avec des fenêtres parfaitement alignées. Comparée à la maison de village, elle présente davantage d'éléments décoratifs : pierres de taille pour les chaînages d'angle et les soubassements, encadrements d'ouvertures laissés.



Figure I.6 : Les maisons bourgeoises

I.2.4. Typologie des bâtiments anciens

Les bâtiments anciens présentent une typologie variée selon leur période de construction. Avant 1850, les maisons rurales et de bourg étaient souvent construites en pierre apparente ou enduites à la chaux, avec des toitures en tuiles petit moule et des ouvertures irrégulières. Les murs étaient généralement sans soubassement ni encadrement et les fenêtres de petite taille. De 1850 à 1950, les constructions évoluent avec des maisons à façade de plâtre présentant des modénatures comme des corniches et des moulures. Les maisons en pierre de rocaille montrent des façades en meulière avec des joints incrustés de petites pierres et des ornements en plâtre. Les maisons à nervures de brique utilisent la brique en modénature, avec des toitures à débords en tuiles plates, mécaniques ou en ardoises. [8]



Figure I.7: Typologies du bâti ancien

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

I.2.5. Bâti ancien historique et transformation vers le bâti moderne

Le bâti ancien est une construction dont les matériaux sont directement issus des environs du chantier : sable, pierres, chaux et terre. Ces matériaux sont mis en œuvre grâce à des savoir-faire artisanaux, transmis de génération en génération, qui donnent à ces bâtiments une âme et une histoire. Entre la Première et la Seconde Guerre mondiale, le bâti ancien commence à évoluer vers le bâti moderne. L'industrialisation, combinée aux lourdes pertes humaines de la guerre, entraîne peu à peu la disparition des techniques de construction traditionnelles. Les artisans laissent place aux machines, et les méthodes ancestrales s'effacent progressivement. Avec l'essor de l'industrialisation, de nouveaux matériaux de construction font leur apparition : le béton, le métal, des ressources non locales qui révolutionnent le secteur. L'urgence de reconstruire après la guerre accélère la production de logements, et les constructions mécanisées prennent le pas sur les méthodes artisanales. Aujourd'hui, l'industrie du bâtiment est confrontée à de nouveaux défis. Elle est devenue énergivore et polluante, et les matières premières comme le métal et le sable s'épuisent. Face à cette réalité, l'utilisation de matériaux renouvelables, à faible empreinte carbone, s'impose comme une nécessité.

Ainsi, le bâti ancien, autrefois symbole de traditions et de savoir-faire, a traversé les époques pour devenir le bâti moderne, puis le bâti récent. De 1890 à nos jours, en passant par les deux guerres mondiales et le choc pétrolier des années 1970, l'histoire du bâti reflète les transformations de la société, des techniques et des enjeux environnementaux. Une histoire qui continue de s'écrire, entre héritage et innovation. [8]

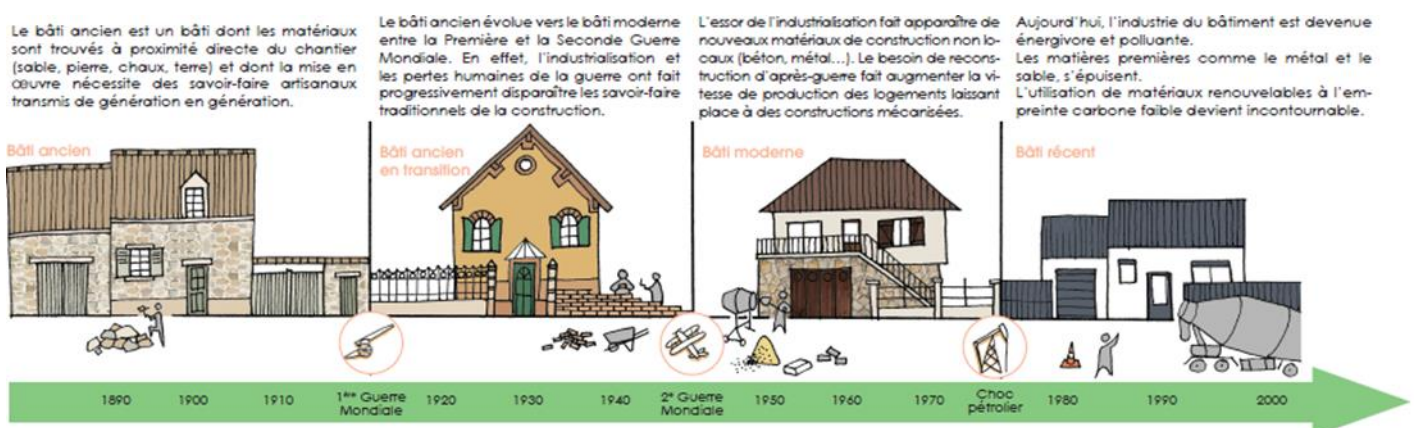


Figure I.8: parcours historique

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

I.2.6. Les matériaux et techniques constructives

De 1850 à 1950, les constructions évoluent avec des maisons à façade de plâtre présentant des modénatures comme des corniches et des moulures. Les maisons en pierre de rocaille montrent des façades en meulière avec des joints incrustés de petites pierres et des ornements en plâtre. Les maisons à nervures de brique utilisent la brique en modénature, avec des toitures à débords en tuiles plates, mécaniques ou en ardoises. [7]

Murs : les murs sont construits en pierre, terre cuite, ossature à pan de bois, galet ou brique crue (en plaine). La pierre peut être montée sans joint (pierre sèche) ou hourdée avec du mortier de terre, de chaux ou de sable.

Charpentes : les charpentes sont réalisées en bois brut assemblé.

Couvertures : les toitures sont couvertes de tuiles creuses dites « canal », d'ardoise ou de lauze de schiste. Selon le matériau, la pente du toit varie. Les ardoises sont soit clouées, soit posées au crochet. [7]

Revêtements de façades : les façades sont revêtues d'enduits à la chaux ou à la terre pour les habitations, tandis que les greniers et fenils des granges sont souvent recouverts d'un bardage en bois.

Sols sur terre-plein : les sols sont dallés en pierre ou en terre cuite.

Planchers : les planchers sont constitués de larges lames de bois posées sur des solives en bois.

Menuiseries et encadrements : les menuiseries et encadrements sont également en bois, reflétant l'importance de ce matériau dans la construction de l'époque.



Figure I.9: maisons anciennes

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

I.2.7. Atouts et faiblesses des constructions anciennes en milieu urbain

Le bâti ancien présente une consommation énergétique relativement élevée (en moyenne 200 kWh/m²/an), mais celle-ci reste nettement inférieure à celle des constructions en parpaing et béton des années 1950 à 1980. Ces dernières, malgré l'ajout de cloisons de doublage, ne comportaient aucune isolation et atteignaient environ 350 kWh/m²/an. Le bâti ancien bénéficie d'une réduction importante des déperditions thermiques (environ 30 % en moyenne) grâce à la mitoyenneté des logements. De plus, il profite d'un microclimat plus chaud d'environ 2°C par rapport aux zones plus ouvertes environnantes. [7]

I.2.8. Comportement thermique du bâti ancien

Si le bâti moderne est généralement conçu pour être étanche à l'air et à l'eau, avec une ventilation artificielle, le bâti ancien, en revanche, fonctionne plutôt comme un système ouvert.

Le bâti ancien exploite son environnement pour réguler l'air intérieur, la température et la vapeur d'eau. Ses caractéristiques constructives présentent des différences fondamentales, notamment une inertie thermique importante et la micro-porosité de ses matériaux de structure. Ces propriétés, souvent méconnues, lui confèrent un comportement thermique distinct de celui du bâti moderne, aussi bien en été qu'en hiver. Il est crucial de les comprendre et de les préserver. Dans la plupart des cas, ces propriétés doivent être restaurées avant d'entreprendre d'autres travaux d'amélioration. [8]

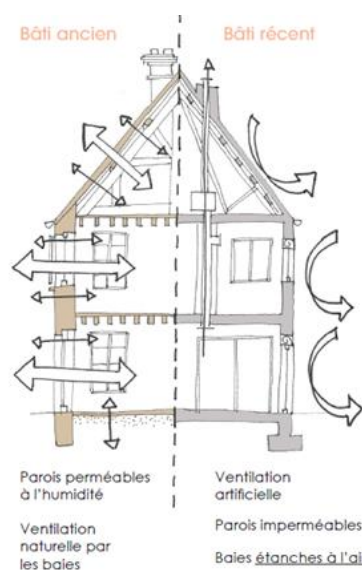


Figure I.10: bâti ancien et bâti récent

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

I.2.8.1 Le comportement thermique d'hiver : les points forts du bâti ancien

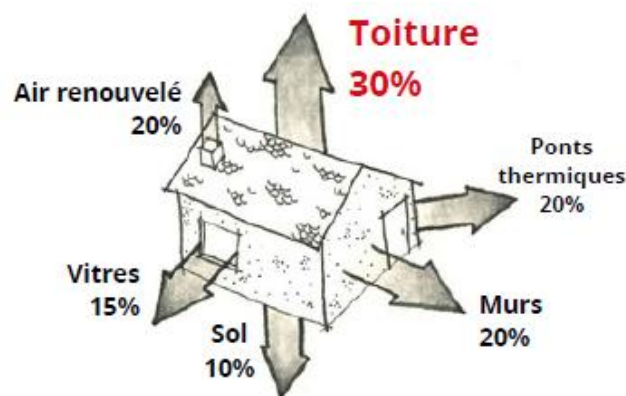
Le bâti ancien se distingue par des propriétés architecturales, bioclimatiques et une inertie thermique qu'il est essentiel de respecter et de valoriser. Grâce à une implantation réfléchie sur le site, fruit d'une longue expérience locale, et à une disposition optimisée des espaces intérieurs, il est conçu pour capter les apports solaires tout en se protégeant des vents froids.

I.2.8.2. La gestion du chauffage

En période d'occupation régulière, l'inertie importante des murs anciens peut être exploitée pour une stratégie de chauffage adaptée : mise en route sur des plages réduites, en début de soirée par exemple pour assurer une température minimale la nuit. Les apports de chaleur étant, en journée, assurés par le soleil et par les murs qui restituent la chaleur emmagasinée. Les modes de chauffage par rayonnement (qui privilégient le chauffage des corps plutôt que de l'air) sont ainsi très adaptés au bâti ancien. Le comportement hydrique du bâti ancien jouant un rôle important, il doit être pris en compte également. [9]

I.2.8.3. Le comportement thermique d'hiver : les points faibles du bâti ancien

Les principales déperditions thermiques se font par le toit, le plancher bas et les défauts d'étanchéité à l'air. Moins par les parois verticales, si elles offrent une inertie suffisante (murs épais) et qu'elles sont imperméables à l'air.



Répartition des principales causes de déperdition énergétique sur le bâti ancien (en %)

Figure I.11: maison ancienne non isolée

I.2.8.4. Les pertes thermiques par les ouvertures

Pour les fenêtres à simple vitrage, les pertes de chaleur sont généralement significatives. Cela est dû à la fois au vitrage lui-même et aux infiltrations d'air entre la menuiserie et le mur, ainsi qu'au niveau de l'ouvrant. Cependant, il faut être vigilant car ces fenêtres représentent souvent la principale source de ventilation du logement. Il est essentiel de maintenir un taux de renouvellement d'air minimal (éventuellement de manière mécanique) pour garantir la qualité de l'air intérieur et préserver l'intégrité du bâtiment. [9]

I.2.8.5. L'effet de paroi froide sur le corps

En plus des considérations d'économie d'énergie, des problèmes d'inconfort peuvent apparaître dans les bâtiments anciens. Notre corps réagit non seulement à la température de l'air, mais aussi à celle des surfaces environnantes. Cela est particulièrement vrai pour les murs non enduits et les ouvertures qui "rayonnent" le froid. Heureusement, cet effet peut être atténué sans travaux majeurs, par exemple en appliquant des enduits intérieurs appropriés. Cela améliorera considérablement le confort en hiver et réduira indirectement les besoins de chauffage.

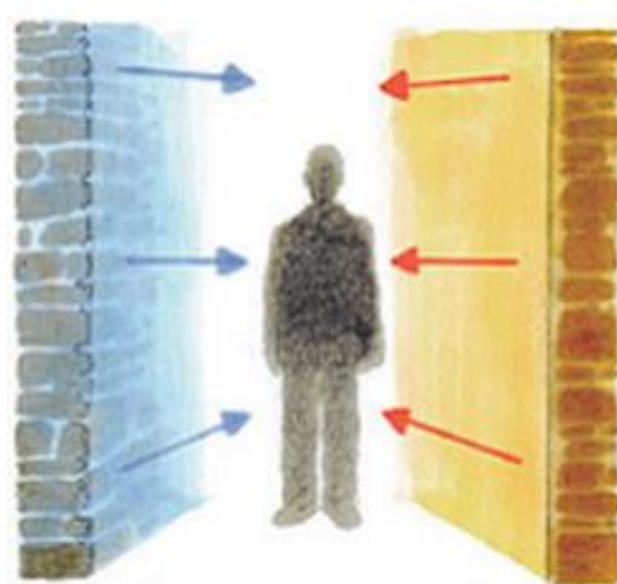


Figure I.12: comportement thermique d'hiver

I.2.8.6. Particularité des murs anciens

Dans le cas des murs anciens, l'évaluation des déperditions thermiques est complexe en raison de l'hétérogénéité des matériaux, des liants utilisés et de la présence de vides d'air dans les parois, qui affectent significativement les échanges thermiques. Pour les murs, il est courant de surestimer ces déperditions, alors qu'elles ne représentent qu'une faible partie des pertes totales de la construction. Ainsi, l'isolation des murs ne s'impose pas toujours comme une solution évidente. De plus, elle ne devrait être envisagée qu'avec des traitements préservant les propriétés d'inertie et de perméabilité à la vapeur d'eau des murs. En revanche, les murs et les ouvertures peuvent créer un effet de paroi froide notable, défavorable au confort en hiver, mais cet inconvénient peut être facilement corrigé. [9]

I.2.8.7 Le comportement thermique d'été : un confort naturel pour le bâti ancien

I.2.8.7.1. Le rôle fondamental de l'inertie

La masse des structures anciennes (murs et planchers) apporte une forte inertie au bâtiment. En été, elle permet de stocker puis de distribuer la fraîcheur nocturne avec un déphasage pouvant atteindre une douzaine d'heure au moment le plus chaud de la journée.

I.2.8.7.2. Les autres sources du confort d'été

- ✓ Les protections solaires extérieures, telles que les volets, contrevents, masques végétaux ou structures bâties, peuvent bloquer le rayonnement solaire avant qu'il ne pénètre dans le logement.
- ✓ Une organisation intérieure traversante : la disposition des pièces favorise généralement une circulation d'air efficace, permettant de rafraîchir naturellement le logement pendant la nuit.
- ✓ L'évaporation : l'eau contenue dans les murs anciens génère une sensation de fraîcheur en s'évaporant sous l'effet des rayons du soleil. [9]

I.2.9. Caractéristiques constructives des bâtiments

Les bâtiments anciens possèdent des propriétés thermiques intrinsèques grâce à leurs matériaux et techniques de construction. Contrairement aux idées reçues, ils ne sont pas des "passoires thermiques". Leur performance thermique est difficile à évaluer avec les logiciels modernes, car ils bénéficient d'une intelligence vernaculaire et d'un savoir-faire bioclimatique intégré, optimisant le confort thermique par l'orientation, l'agencement des pièces, l'épaisseur des murs et les espaces tampons.

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

Aujourd'hui, la conception contemporaine privilégie une "boîte Thermos" (ultra-isolée et étanche), minimisant les déperditions de chaleur. À l'inverse, les bâtiments anciens, moins étanches, permettent une gestion dynamique de l'humidité et offrent une excellente inertie thermique grâce à l'utilisation de matériaux écologiques. [10]

I.2.9.2. L'inertie thermique

L'inertie thermique des bâtiments anciens est favorisée par la présence d'éléments lourds (refends en brique, planchers lourds, etc.). Elle permet de stocker et de restituer la chaleur en hiver ou la fraîcheur en été, régulant ainsi les températures intérieures.

- **En été**, l'inertie crée un décalage entre les températures intérieures et extérieures, maintenant un confort thermique tout au long de la journée.
- En hiver, elle stocke la chaleur et permet une gestion intermittente du chauffage, maintenant une température agréable même lorsque le chauffage est réduit.
- **En mi-saison**, l'inertie saisonnière, combinée aux apports gratuits, retarde le besoin de chauffage. [4]

I.2.10. Confort thermique

Les bâtiments anciens suivent une logique de construction qui leur est propre. Leur gestion thermique repose souvent sur des traditions ancestrales adaptées au climat local. Sans aborder les spécificités de chaque cas, il est essentiel de comprendre le comportement des bâtiments traditionnels et de souligner leurs différences par rapport aux constructions contemporaines (fig. I.13). [11]

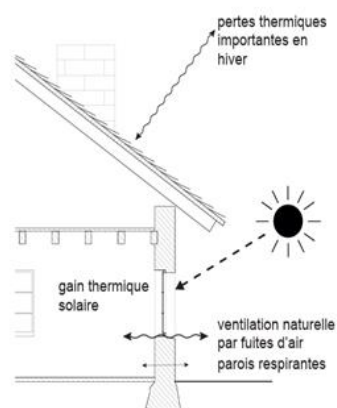


Figure I.13: Schéma des échanges thermiques dans un bâtiment ancien

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

En hiver, le confort thermique de ces bâtiments reposait sur un mode de vie en adéquation avec leurs caractéristiques, où l'on vivait principalement dans des espaces intérieurs réduits. Les activités se concentraient dans les pièces chauffées, tandis que les autres espaces servaient de zones tampons. La forte inertie des murs massifs permettait de limiter les variations thermiques, assurant une stabilité climatique jour et nuit. Globalement, la température intérieure était moins élevée qu'aujourd'hui.

Le confort hivernal dépendait d'une gestion active par les occupants : allumer un feu en cas de froid et fermer les volets la nuit pour réduire les pertes de chaleur par rayonnement. En été, en revanche, le confort thermique nécessitait peu d'interventions. L'inertie importante des murs décalait les apports de chaleur solaire vers la nuit, maintenant ainsi une fraîcheur constante à l'intérieur du bâtiment. Dans les constructions contemporaines, où la masse de l'enveloppe joue un rôle secondaire, l'objectif est de créer une séparation totale entre le climat intérieur et le climat extérieur. La régulation du climat intérieur doit donc être très précise et est souvent assurée par un système mécanisé de ventilation (fig.I.14). Ce système repose sur une isolation renforcée des façades et sur la recherche d'une température uniforme dans toutes les pièces. Si les faibles déperditions thermiques en hiver sont facilement compensées par un apport de chauffage, les surchauffes estivales, en revanche, sont beaucoup plus difficiles à maîtriser, d'autant que la faible inertie des bâtiments modernes ne permet pas d'atténuer les pics de chaleur quotidiens. [11]

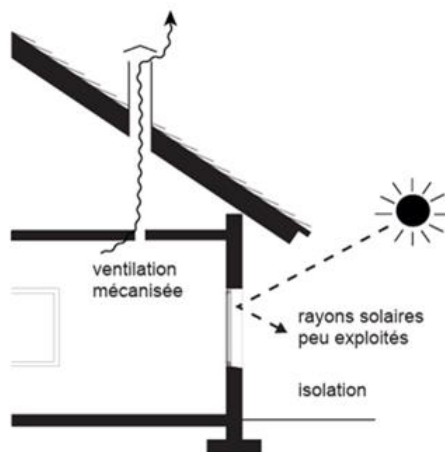


Figure I.14: Schéma des échanges thermiques dans un bâtiment contemporain

I.3. Enjeux environnementaux et économiques

Le secteur du bâtiment est confronté à un enjeu énergétique et environnemental majeur, nécessitant une massification de la rénovation. Cependant, les rénovations actuelles sont insuffisantes en nombre et en ambition (souvent partielles et peu performantes). Le parc immobilier français comprend 16 millions de logements construits avant 1975, 533 millions de m² de bâtiments tertiaires antérieurs à 1976, et 14 millions de logements construits entre 1975 et aujourd'hui. Le potentiel d'économies d'énergie est considérable : 240 TWh pour le chauffage des logements anciens, 10 à 15 TWh pour l'eau chaude, et 80 TWh pour le tertiaire, soit 18 % de la consommation totale d'énergie en France. [12]

Rénover ces bâtiments apporterait de nombreux avantages

- ✓ Réduction de la facture énergétique pour les usagers et la France.
- ✓ Diminution du déficit commercial et de la dette nationale.
- ✓ Lutte contre le changement climatique.
- ✓ Réduction de la précarité énergétique.

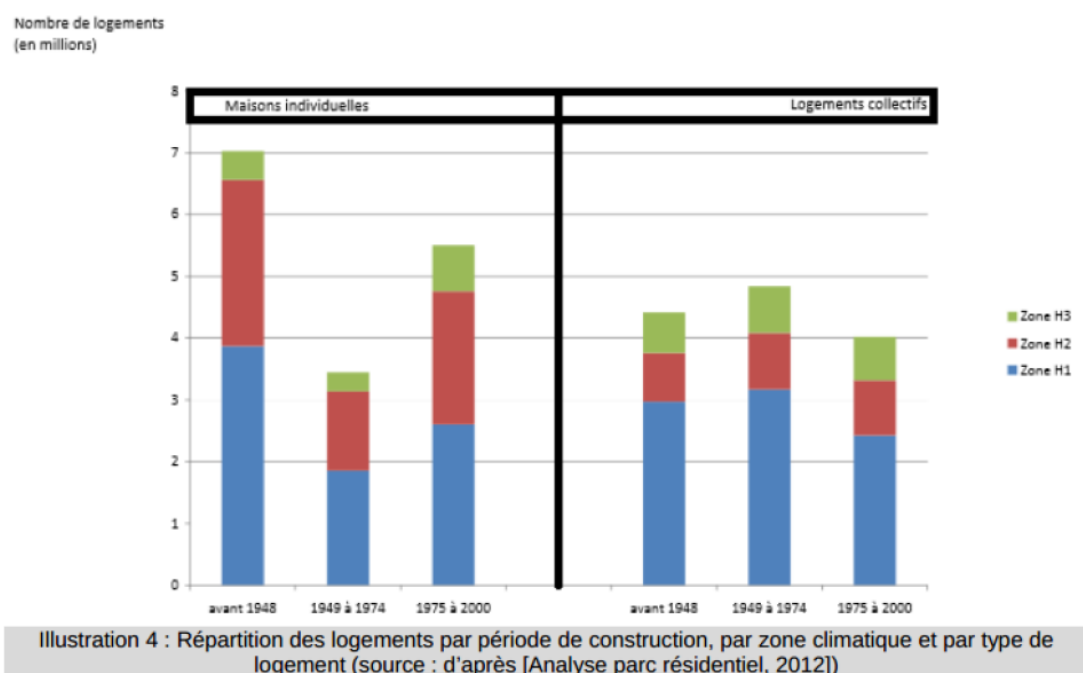


Figure I.15: part du Bâti ancien dans le parc existant, source CEREMA

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

I.3.1. Objectifs et bénéfices de la réhabilitation thermique

Tableau I.1: Objectifs et bénéfices de la réhabilitation thermique dans le bâti ancien

Objectifs	Bénéfices
Économiser les énergies fossiles	Réduit la consommation énergétique, contribue à l'indépendance énergétique et préserve les ressources non renouvelables.
Réduire les émissions de gaz à effet de serre	Participe à la lutte contre le réchauffement climatique, en accord avec les objectifs du Grenelle de l'environnement.
Améliorer le confort des habitants	Offre un meilleur confort thermique (température agréable, absence de courants d'air), un éclairage naturel amélioré et un cadre de vie plus agréable.
Réduire les dépenses des ménages	Diminue les coûts de chauffage, d'eau chaude et d'éclairage, allégeant les charges des foyers (malgré les investissements initiaux).
Anticiper les hausses des tarifs de l'énergie	Prépare les habitants à faire face à l'augmentation future des prix de l'énergie en réduisant les besoins énergétiques.
Améliorer globalement le patrimoine bâti ancien	Va au-delà des économies d'énergie : inclut l'entretien, la mise aux normes d'habitabilité et l'adaptation aux modes de vie modernes, renforçant l'attractivité et la pérennité des bâtiments. [13]

I.3.2. Les enjeux de la réhabilitation responsable du bâti ancien

La charte pour la réhabilitation responsable du bâti ancien, élaborée par les membres fondateurs du Centre de Ressources pour la Réhabilitation responsable du Bâti Ancien - CREBA, constitue une démarche méthodologique pour préparer une opération de réhabilitation responsable de bâtiments construits avant 1948 selon des techniques, des savoir-faire et des matériaux traditionnels (pierre, bois, terre crue, etc.). Elle a été conçue afin d'apporter des éléments d'aide à la décision face aux questions et problématiques rencontrées lors de projets de réhabilitation du bâti ancien qui se situent à la croisée de nombreux enjeux : [14]

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

I.3.2.1. Enjeux patrimoniaux

Une grande partie du patrimoine architectural est constituée de bâtiments anciens qui ne bénéficient pas de protections spécifiques. Qu'ils soient protégés ou non, ces constructions représentent un héritage à préserver et une ressource non renouvelable. Leur réhabilitation soulève des enjeux de conservation et de valorisation. [14]

I.3.2.2. Enjeux techniques

Les bâtiments anciens se distinguent par des caractéristiques constructives et un comportement physique très différents de ceux des constructions modernes. Leurs parois offrent généralement une bonne inertie thermique et sont constituées de matériaux perméables à la vapeur d'eau. Ces spécificités exigent l'utilisation de techniques et de matériaux adaptés, afin de préserver les propriétés d'origine du bâti et d'éviter l'apparition de pathologies. [14]

I.3.2.3. Enjeux énergétiques et environnementaux

Avec leur niveau de consommation énergétique moyen et leur importance dans le parc immobilier (représentant environ 33 % des bâtiments existants), les bâtiments anciens jouent un rôle clé dans l'atteinte des objectifs nationaux de réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment.

Au travers de ces différents enjeux, il apparaît que la réhabilitation du bâti ancien nécessite une approche globale, intégrant bien d'autres critères que la seule performance thermique. Une opération de réhabilitation d'un bâti ancien est considérée comme « responsable » dès lors qu'elle intègre bien les dimensions patrimoniales, techniques, énergétiques et environnementales du bâtiment. Elle doit par conséquent faire l'objet d'une étude justifiant les choix opérés et les résultats attendus, en tenant compte de l'ensemble des contraintes et exigences associées à chacune des dimensions précédentes. [14]

I.3.3. Bâtiments existants & économies d'énergie

I.3.3.1. La nécessaire réduction des consommations énergétiques des bâtiments existants

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

Dans le contexte actuel de préoccupations environnementales, marqué par la signature du protocole de Kyoto pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'économie d'énergie est devenue une priorité. En France, le secteur du bâtiment est le principal consommateur d'énergie, représentant 43,6 % de la consommation finale d'énergie du pays. Ce secteur dépasse les transports, qui comptent pour 31,5 %, et l'industrie, qui représente 23,1 %. [15]

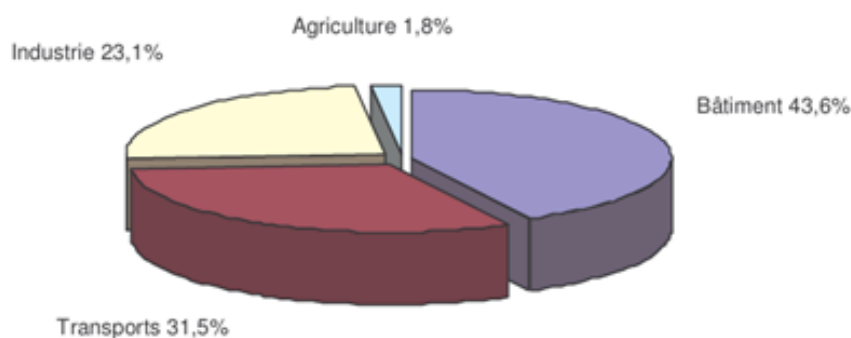


Figure I.16 : Consommation d'énergie finale par secteur d'activités, en France – 2006 [16]

Figure I.17: cycle de vie Figure I.18 : Consommation d'énergie finale par secteur d'activités, en France – 2006 [16]

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, le secteur du bâtiment se classe en deuxième position, juste après les transports. Ainsi, pour atteindre l'objectif global de réduction des émissions de gaz à effet de serre par un facteur 4 d'ici 2050, il est clair que l'effort principal doit être concentré sur la réhabilitation énergétique du parc immobilier existant. [17]

I.3.4. Impact environnemental des bâtiments anciens

Les bâtiments anciens ont un impact environnemental non négligeable. Tout d'abord, ils consomment beaucoup d'énergie, souvent en raison d'une isolation défectueuse et de systèmes de chauffage obsolètes. En général, on estime qu'un bâtiment ancien peut consommer jusqu'à 70 % d'énergie en plus par rapport à un bâtiment réhabilité selon les normes modernes. Ensuite, il y a la question des matériaux utilisés. Beaucoup de ces bâtiments sont construits avec des matériaux difficilement recyclables ou ayant une empreinte carbone élevée. La déconstruction de vieux bâtiments peut également générer des déchets considérables. Plutôt que de les démolir, une réhabilitation responsable permet de réduire les déchets et de réutiliser des éléments existants, tout en préservant le patrimoine. Les systèmes de chauffage au fioul ou au gaz naturel, encore répandus dans les bâtiments anciens, contribuent aux émissions de

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

gaz à effet de serre. Ces systèmes sont en contradiction avec les objectifs de réduction des émissions fixés par l'État.

En somme, si l'on ne prend pas conscience de ces enjeux, les bâtiments anciens continueront d'alimenter la crise climatique. Il est donc essentiel de les réhabiliter en intégrant des pratiques respectueuses de l'environnement. [18]

I.3.4.1. Analyse de cycle de vie ACV

Pour réduire l'impact environnemental des bâtiments anciens, il est essentiel de ne pas se limiter à la seule performance énergétique d'un système constructif, mais d'évaluer l'ensemble des impacts environnementaux qu'il génère tout au long de son cycle de vie. Cette approche permet d'obtenir une vision globale de l'empreinte environnementale du système mis en œuvre [19] Pour y parvenir, il est nécessaire d'adopter une démarche multicritère, intégrant tous les aspects environnementaux, tels que la consommation de matières premières et d'énergie, les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que la production de déchets. Cette analyse doit également couvrir toutes les étapes du cycle de vie, de l'extraction des matières premières et de l'énergie à la fabrication, au transport, à l'utilisation et à la fin de vie de chaque composant du système constructif [20] La méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) est particulièrement adaptée pour répondre à ces enjeux. Elle nécessite une connaissance précise des composants du système, des modes de transport, des procédés de fabrication et des scénarios de fin de vie, afin de définir les flux entrants (matières et énergies) et sortants (déchets et émissions) associés au système [21] L'ACV est une méthode reconnue et normalisée (ISO 14040-44, 2006), qui permet d'éviter les transferts d'impacts environnementaux entre les différentes phases du cycle de vie [22]. Par exemple, il serait contre-productif d'utiliser des matériaux permettant des économies d'énergie en phase d'utilisation si leur fabrication est extrêmement énergivore.



Figure I.19: cycle de vie

Figure I.20: cycle de vie

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

Enfin, les systèmes constructifs doivent rester fonctionnels en respectant des contraintes techniques, telles que les propriétés physiques, mécaniques, hygrométriques et thermiques, tout en minimisant leur empreinte environnementale et en préservant les caractéristiques identitaires des façades concernées.

I.4. Importance de l'utilisation de matériaux écologiques

I.4.1. Contribution à la réduction des émissions de CO₂

Le secteur du bâtiment est un gros émetteur de CO₂ en France et joue un rôle clé dans la lutte contre le changement climatique. Il est aussi vulnérable aux risques climatiques (inondations, sols argileux, canicules), ce qui renforce la nécessité d'agir pour réduire son impact environnemental tout en améliorant sa résilience. Pour réduire les émissions de CO₂, une approche globale est essentielle. La planification écologique, portée par le ministère de la Transition écologique, vise à atteindre cet objectif en combinant réglementations strictes, outils comme le diagnostic de performance énergétique (DPE) et une vision intégrant les enjeux sociaux et environnementaux. Les travaux du Secrétariat général à la planification écologique (SGPE) montrent une baisse des émissions de GES dans le secteur du bâtiment ces dernières années, grâce notamment à des réglementations efficaces. Cependant, des défis persistent, comme les débats récents sur le DPE et les restrictions sur les logements les moins performants. En résumé, la réduction des émissions de CO₂ dans le bâtiment passe par des mesures réglementaires, des outils comme le DPE, et une vision globale qui prend en compte les enjeux climatiques, sociaux et économiques. [23]

I.4.1.1. Des attentes fortes sur la décarbonation du secteur du bâtiment

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment proviennent principalement de deux sources :

La consommation énergétique des bâtiments (77 % des émissions totales), répartie entre le résidentiel (60 %) et le tertiaire (40 %).

Les matériaux de construction et équipements (16 % des émissions), avec une forte contribution de la construction neuve (80 %) par rapport à la rénovation (20 %).

Enfin, l'artificialisation des sols représente 6 % des émissions, une part non négligeable. Ces données, issues de l'analyse du Secrétariat général à la planification écologique (SGPE) en

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

2023, montrent que la réduction des émissions du secteur du bâtiment doit cibler à la fois l'efficacité énergétique, les matériaux de construction et la limitation de l'artificialisation.[23]

I.4.2. Conformité aux objectifs de développement durable

Le secteur du bâtiment est responsable de 29 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES), ce qui en fait la deuxième source d'émissions après les transports (31 %). Pour décarboner ce secteur, plusieurs leviers sont bien identifiés :

- Abandon des énergies fossiles,
- Amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments
- Réutilisation des matériaux. [23]

Les obstacles à cette transition sont principalement d'ordre organisationnel et financier plutôt que technique, nécessitant une coordination efficace des politiques publiques. Depuis 2015, la France s'est engagée dans une stratégie climatique ambitieuse avec la stratégie nationale bas carbone (SNBC), qui fixe des objectifs de réduction des émissions pour chaque secteur d'ici

2030 et 2050. En 2023, cette stratégie a été renforcée par la planification écologique, qui précise les leviers de réduction pour atteindre ces objectifs. Huit ans après le lancement de la SNBC, le bilan est encourageant. Selon le dernier rapport du CITEPA, les émissions territoriales françaises (hors UTCATF) ont diminué depuis 2015, avec une réduction significative en 2023. Cette baisse permet d'atteindre l'objectif de -17 % d'émissions entre 2015 et 2023, conformément aux ambitions de la SNBC. Ces résultats montrent que la France progresse dans ses engagements en matière de développement durable et de lutte contre le changement climatique, tout en soulignant la nécessité de poursuivre les efforts pour atteindre les objectifs à long terme. Conformité aux objectifs de développement durable :

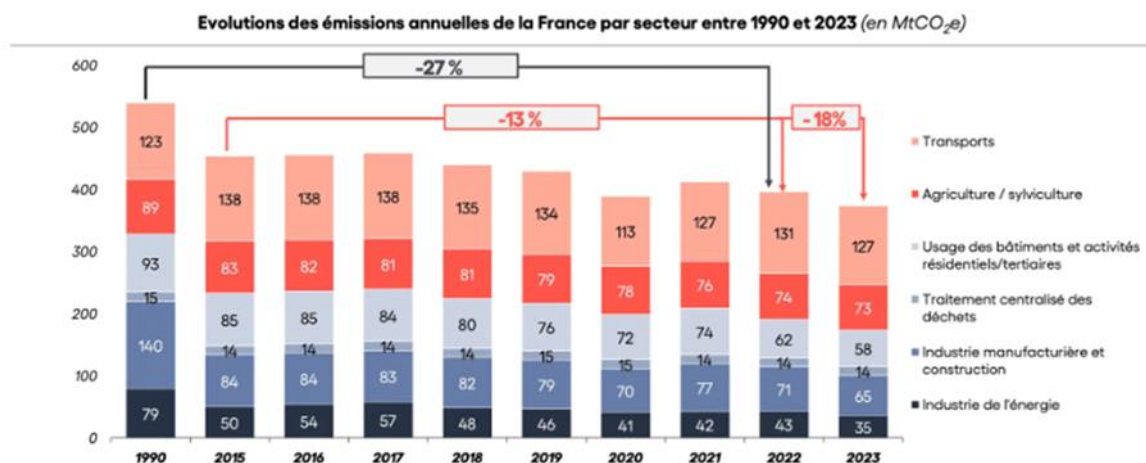


Figure I.18: Évolution des émissions annuelles territoriales françaises par secteur entre 1990 et 2023 (en MtCO₂e) [24]

I.4.3. L'économie circulaire

L'économie circulaire est l'un des objectifs majeurs de la loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte. En effet, le modèle économique actuel, basé sur une logique linéaire (extraire, produire, consommer, jeter), a atteint ses limites et ne permet plus de répondre efficacement aux défis humains et environnementaux actuels.

L'économie circulaire propose une alternative durable en privilégiant, entre autres, les circuits courts et le recyclage. Cette approche vise à réduire l'extraction des ressources naturelles, la production de déchets et la consommation d'énergie. En adoptant une dynamique plus respectueuse des écosystèmes, elle contribue à diminuer les impacts environnementaux tout en améliorant le bien-être des populations. [7]

Dans le secteur du bâtiment, cette transition implique une approche innovante des projets. Cela passe par l'intégration des aspects écologiques dès la phase de conception, la prise en compte des impacts environnementaux des matériaux sur l'ensemble de leur cycle de vie, ainsi que la promotion du réemploi et du recyclage sur les chantiers. De plus, elle encourage le recours aux circuits courts pour les matériaux et les ressources, renforçant ainsi la durabilité des constructions.

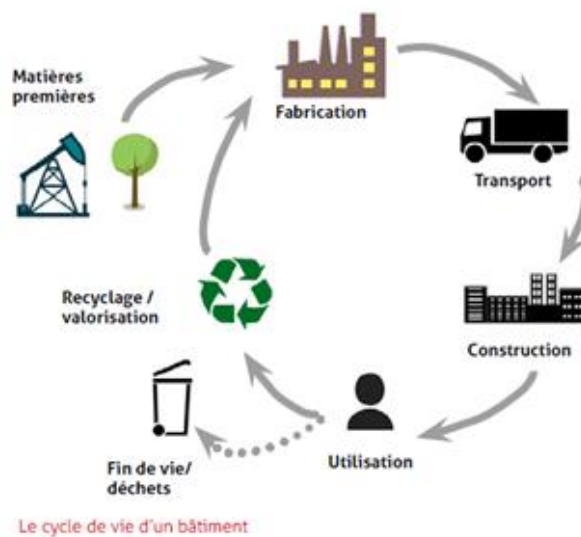


Figure I.19: Le cycle de vie d'un bâtiment

I.5. Normes et

Le secteur du de la stratégie du relever le défi de la énergétique : des objectifs et priorités pour tenter de répondre à ce vaste projet.

réglementations

bâtiment est au cœur gouvernement pour transition diverses lois fixent définissent des

Figure I.20: Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France – 2006 [26]

Figure I.20: Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France – 2006 [26] Figure I.19: Le cycle de vie d'un bâtiment

- ❖ 2009 : Loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement : Art.5 « L'État se fixe comme objectif de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici à 2020 »
- ❖ 2015 : Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte : Art.3 « La France se fixe comme objectif de rénover énergétiquement 500 000 logements par an à compter de 2017
- ❖ Art.5 « Avant 2025, tous les bâtiments privés résidentiels dont la consommation en énergie primaire est supérieure à 330 kilowattheures d'énergie primaire par mètre carré et par an (kWh/m2.an) doivent avoir fait l'objet d'une rénovation énergétique. »
- ❖ 2018 : la Loi ELAN trace les nouveaux contours de l'obligation de travaux d'économie d'énergie en précisant, entre autres, les règles générales de construction concernant les performances environnementales du bâtiment tout au long de son cycle de vie, la qualité sanitaire et le confort d'usage du logement. [7]

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

I.5.1. Réglementation applicable

La réglementation thermique RT 2012 s'applique exclusivement aux constructions neuves. Son objectif principal est de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de 50 kWhEP/m².an en moyenne.

Pour les constructions existantes, c'est la RT Existant qui est en vigueur. Cette réglementation s'applique lorsqu'un élément du bâtiment est installé ou remplacé (comme la ventilation mécanique, les parois opaques ou vitrées, les systèmes de chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, le refroidissement, l'éclairage ou les énergies renouvelables). Elle impose des niveaux de performance minimale pour chaque élément remplacé ou installé. Les exigences en matière de performance thermique et énergétique ont été mises à jour par l'arrêté du 22 mars 2017, qui modifie l'arrêté du 3 mai 2007. [7]

I.5.2. La future Réglementation Environnementale

(RE 2020) qui remplacera la réglementation thermique actuellement en vigueur sera rédigée suite à l'expérimentation E+C- (Énergie Positive et Réduction Carbone) en cours depuis

2016. Celle-ci teste des bâtiments réalisés et en projet sur leur consommation énergétique et leur émission de gaz à effet de serre (GES). Des niveaux de performances seront définis pour les constructions neuves sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, depuis la production des matériaux jusqu'à la démolition du bâtiment (sur une durée conventionnelle de 50 ans).

Ainsi, les nouvelles constructions devront favoriser l'efficacité énergétique mais aussi la réduction des gaz à effet de serre et le déploiement des énergies renouvelables, dans un modèle de développement local et d'économie circulaire. [7]

I.5.3. Le contexte réglementaire

I.5.3.1. La directive européenne 2002/91/CE sur la performance énergétique des bâtiments existants

Compte tenu des objectifs définis par le protocole de Kyoto, il était essentiel de mettre en place un cadre réglementaire pour encourager des actions concrètes visant à réaliser des économies d'énergie dans le secteur des bâtiments existants. C'est dans cette optique que la directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil de l'Union européenne a été publiée au Journal officiel des Communautés européennes le 4 janvier 2003. L'objectif

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

principal de cette directive est de favoriser l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments au sein de l'Union européenne. Cette amélioration doit tenir compte des conditions climatiques, des spécificités locales, des exigences en matière de confort intérieur et du rapport coût-efficacité. La directive impose à tous les États membres l'application, à partir de 2006, d'une méthode de calcul pour évaluer la performance énergétique des bâtiments, s'inscrivant dans un cadre général défini. Par ailleurs, les bâtiments neufs, ainsi que les bâtiments existants de grande taille lorsqu'ils font l'objet de rénovations importantes, doivent respecter des exigences minimales en matière de performance énergétique.[25]

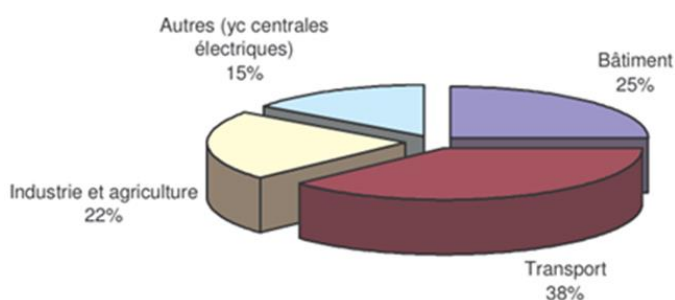


Figure I.20: Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France – 2006 [26]

Figure I.20: Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France – 2006 [26]

Figure I.20: Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France – 2006 [26]

Figure I.20: Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France – 2006 [26]

I.5.4. Réglementations spécifiques pour les bâtiments classés ou protégés

I.5.4.1. Le bilan de la protection

Au 1^{er} janvier 2023, 44 769 immeubles sont protégés en tant que monuments historiques, dont 14 273 sont classés et 30 496 inscrits. Ce bilan annuel offre un aperçu de la protection en termes de statistiques, typologies, datation et nature des propriétaires. Les bâtiments protégés incluent divers types de structures (édifices, ouvrages d'art, parcs, jardins, grottes ornées, etc.) et de toutes époques, y compris le patrimoine industriel, scientifique et technique. Toutefois, la protection ne s'applique généralement pas aux immeubles de moins de 50 ans, qui peuvent bénéficier du label Architecture contemporaine remarquable. L'intérêt historique ou artistique de l'immeuble est le critère déterminant pour sa protection. L'inscription est décidée au niveau

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

régional (par le préfet de région), tandis que le classement est décidé au niveau national (par le ministre de la Culture). [27]

I.5.4.2. Conditions et procédure de protection

La protection des monuments historiques peut concerner un immeuble dans sa totalité ou seulement ses parties les plus remarquables (façade, toiture, escalier, etc.). La demande de protection peut être initiée par le propriétaire, une collectivité territoriale, une association ou les services de l'État.

La procédure de protection nécessite une description détaillée de l'immeuble, des éléments historiques et architecturaux, ainsi que des photographies et des documents graphiques. L'inscription est prononcée par arrêté du préfet de région, tandis que le classement est prononcé par arrêté du ministre de la Culture, après avis des commissions compétentes. En cas de menace sur la conservation d'un immeuble, une instance de classement peut être décidée, plaçant le bien sous un régime de protection temporaire pendant 12 mois. [27]

I.5.4.3. Effets de la protection

Le propriétaire d'un immeuble classé ou inscrit est responsable de sa conservation. Toute intervention nécessite une autorisation préalable et les travaux doivent être réalisés sous le contrôle scientifique et technique des services de l'État. En cas de défaillance du propriétaire, l'État peut exécuter les travaux nécessaires d'office ou engager une procédure d'expropriation. Pour les immeubles inscrits, les travaux sont soumis à un permis de construire ou à une déclaration préalable, avec l'accord du préfet de région. [27]

I.6. Conclusion

La rénovation énergétique des édifices anciens constitue une chance primordiale pour faire face aux enjeux environnementaux et économiques contemporains. Même si ces édifices sont fréquemment jugés consommateurs d'énergie, ils détiennent des attributs thermiques et architecturaux qu'il est primordial de sauvegarder et d'améliorer. L'emploi de mesures appropriées, comme l'isolation thermique, le recours à des matériaux respectueux de l'environnement et l'amélioration des systèmes de chauffage, contribue à rehausser leur efficacité énergétique sans compromettre leur caractère historique. Les implications de cette transition vont bien au-delà de la seule efficacité énergétique. Ils incluent aussi des éléments

Chapitre I : Contexte et enjeux de la réhabilitation énergétique

relatifs au patrimoine, à l'économie et à la réglementation, requérant une démarche holistique et unifiée. Par conséquent, un réaménagement réussi doit allier préservation de l'ancien bâti et adaptation aux standards modernes, pour assurer un environnement de vie pérenne et agréable pour les habitants.



Chapitre II : Matériaux isolants écologiques

Figure II.21: isolant semi-rigides et rouleaux

II.1 Introduction

Confrontés aux enjeux environnementaux et énergétiques, l'isolation thermique des bâtiments occupe une place essentielle dans la diminution des consommations énergétiques et des émissions de CO₂. Le recours à des matériaux isolants écologiques, provenant de ressources renouvelables ou recyclées, s'intègre dans une approche de construction durable et de protection de l'environnement. À l'inverse des isolants traditionnels, souvent gourmands en énergie et polluants, ces matériaux biosourcés ou naturels présentent des performances thermiques et acoustiques avantageuses tout en réduisant l'empreinte écologique des constructions.

II.2. Présentation des matériaux

II.2.1. Pourquoi choisir un isolant naturel ?

L'isolation thermique est un élément essentiel dans la construction ou la rénovation d'un bâtiment. Une mauvaise isolation entraîne des déperditions de chaleur à travers la toiture, les murs, les fenêtres et autres points faibles thermiques. Un bâtiment mal isolé subit des températures extrêmes : une chaleur étouffante en été et un froid glacial en hiver. À l'inverse, une isolation performante améliore le confort intérieur, réduit les factures énergétiques et augmente la valeur immobilière du bien. Cependant, les isolants traditionnels souffrent souvent d'une mauvaise réputation, notamment en raison de :

- ❖ Leur impact environnemental négatif (production énergivore, émissions de CO₂).
- ❖ Leur composition chimique, qui peut nuire à la santé des occupants (émissions de composés organiques volatils, irritations, etc.).

Ces critiques ne s'appliquent pas à tous les isolants. En effet, il existe des isolants naturels (également appelés « isolants écologiques », « biosourcés » ou « durables ») qui sont parfaitement compatibles avec l'environnement et la santé humaine. Ces matériaux, issus de ressources renouvelables, contribuent à la préservation de la nature tout en offrant des performances thermiques et acoustiques de qualité. [28]

II.2.2. Historique de l'isolation thermique

Avant 1974, il n'existait aucune obligation réglementaire en matière d'isolation thermique des bâtiments. Par conséquent, de nombreuses constructions anciennes ont été réalisées sans

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

isolation adéquate, ce qui entraîne aujourd'hui des déperditions thermiques importantes et une performance énergétique médiocre.

Pour améliorer l'isolation thermique de ces maisons anciennes, une évaluation individuelle est essentielle. Cette évaluation doit prendre en compte les caractéristiques spécifiques de la construction, notamment :

- La nature des murs (pierre, brique, terre crue, etc.)
- La structure de la toiture (charpente, matériaux de couverture)
- Les ponts thermiques et les points faibles existants

Le choix de la solution d'isolation doit être adapté à ces caractéristiques pour éviter tout risque de dégradation des parois, comme l'apparition d'humidité ou de moisissures. Par exemple, l'utilisation de matériaux perspirants (comme la chaux ou les fibres végétales) permet de préserver l'équilibre hygrothermique des murs anciens.

Enfin, il est crucial de maintenir une bonne ventilation pour assurer une isolation efficace et durable. Une ventilation adéquate permet d'évacuer l'humidité et d'améliorer le confort intérieur, tout en préservant l'intégrité du bâti. [29]

II.2.3. Règlementation thermique des bâtiments existants (RT dans L'existant)

Depuis novembre 2007, la réglementation thermique définit les exigences à respecter pour les travaux d'isolation thermique réalisés par les propriétaires dans leur logement. Bien que ces travaux ne soient pas obligatoires, la réglementation impose des normes de performance à atteindre, notamment pour réduire les besoins en énergie du logement grâce à une isolation améliorée. [29]

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

II.2.4. Les différents conditionnements des matériaux d'isolation

Les matériaux d'isolation écologiques sont disponibles sous différentes formes. L'aspect que peut prendre les matériaux isolants est déterminé par la ressource première et son utilisation. Généralement on distingue sept formes :

Panneaux, matelas ou isolant semi-rigides et rouleaux : Panneaux sont disponibles sous une forme rigide tandis que comme son nom l'indique les isolants semi-rigides sont un peu plus souples. Ils sont donc très adaptés à l'isolation par l'extérieur et sur chevrons. En raison de leur nature plus souple et leur maniabilité, les matériaux d'isolation en rouleaux conviennent pour l'isolation entre chevrons. [28]



Figure II.21: isolant semi-rigides et rouleaux

Remplissage :
d'isolation en vrac
utilisés pour isoler
compenser les
plancher ou
pour isoler les
pour niveler

Figure II.22: isolant en vrac

Figure II.22: isolant en vrac

Figure II.22: isolant en vrac

Figure II.23: l'Isolation des combles par soufflage

Figure II.23: l'Isolation des combles par soufflage

Figure II.24: Feutre isolant

Figure II.23: l'Isolation des combles par soufflage

Les matériaux
sont principalement
les cavités et
inégalités du
encore sont utilisés
espaces creux et
inégalités du sol.

Isolation

Les
d'isolation
des
disponibles
granulés ou
l'aide



par soufflage :
matériaux
par soufflage sont
matériaux en vrac
sous forme de
de flocons. À
d'une machine à

soufflage les matériaux isolants sont librement propagés et généralement introduits dans les cavités ou insérés pour l'isolation de comble.

Figure II.23: l'Isolation des combles par soufflage

Figure II.24: Feutre isolant

Figure II.24: Feutre isolant

Isolation

Les
d'isolation
granulé en
en
d'autres

Figure II.25: L'argile expansée

Figure II.24: Feutre isolant

par injection :
matériaux
fibreux et lâche
vrac sont utilisés
complément
matériaux pour

rembourrer les joints, les fissures et combler les cavités.

Feutre isolant : Les feutres isolants peuvent être sous formes de toisons ou tapis denses qui conviennent principalement pour une isolation contre les bruits d'impact de pas qu'on dispose sous le revêtement de sol avec une sous-couche. [28]

II.2.5. des matériaux écologiques

II.2.5.1. L'argile minéral naturel

L'argile expansée minérale obtenue d'argile brute. Tout production de cuite, l'argile exploitée dans des La matière ensuite broyée d'une poudre qui de l'eau et chauffée degrés Celsius. Le combustion l'expansion de cinq fois son

Figure II.24: Feutre isolant

Figure II.25: L'argile expansée

Figure II.25: L'argile expansée

Figure II.26: Le lin

Figure II.25: L'argile expansée



Présentation isolants

expansée - Isolant

est une matière de l'extraction comme dans la briques en terre expansée est mines à ciel ouvert. argileuse est jusqu'à obtention est ensuite mixée à à plus de 1 200 processus de provoque l'argile jusqu'à volume initial.

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

L'argile expansée ne nécessite pas d'additifs chimiques. Après traitement, on obtient des billes. Le matériau isolant est surtout utilisé en vrac pour isoler les plafonds de l'étage supérieur. [28]



Figure II.25: L'argile expansée

Cadre

- Isolation des
- Remplissage des et isolation des toits.
- Intégration dans les isolation des poutres.

Figure II.26: Le lin

Figure II.26: Le lin

Figure II.27: Le chanvre

d'utilisation :

combles.
cavités dans les murs
chapes de sol et
plafonds avec

Inconvénient

- Performances thermiques limitées : Moins efficace que d'autres isolants thermiques.
- Sensibilité à l'eau : En cas d'humidité, elle doit sécher pour retrouver ses propriétés isolantes.
- Encombrement : Son volume peut être important pour une isolation optimale.

Avantages d'utilisation :

- Excellentes propriétés acoustiques : Idéal pour réduire les bruits et améliorer le confort sonore.
- Incombustible : Résiste au feu et ne contribue pas à la propagation des flammes.
- Sécurité en cas d'incendie : Ne dégage aucune substance toxique lors d'un incendie.

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

II.2.5.2. Le lin - Matière première recyclable

Issu du monde végétal, la plante de lin est par exemple cultivée en Allemagne et dans le nord de la France, notamment en Normandie. La plante était déjà utilisée dans le Période néolithique pour la fabrication des vêtements. De plus, l'huile de lin produite à partir de graines de lin est connue depuis longtemps. Pour la production de matériaux d'isolation, les fibres courtes de la plante de lin issues des déchets non utilisés de la production industrielle de textile sont traitées. Ensuite, les fibres sont feutrées mécaniquement pour la transformation en panneaux semi-rigide, rigide ou en vrac. Les différentes nappes de feutre sont ensuite superposées pour former des panneaux isolants d'épaisseur variable. La fécule de pomme de terre sert d'adhésif naturel qui lie fermement les feutres entre eux. [28]



Figure II.26: Le lin

Cadre

Figure II.27: Le chanvre Figure II.26: Le lin

Figure II.27: Le chanvre

Figure II.28: Fibre de bois Figure II.27: Le chanvre Figure II.26: Le lin

Figure II.27: Le chanvre Figure II.26: Le lin

d'utilisation :

- Panneaux et rouleaux : Utilisés pour l'isolation entre chevrons.
- Panneaux : Idéaux pour les cloisons, les murs intérieurs et l'isolation sous chevrons.

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

- En vrac : Parfait pour les joints de portes et fenêtres, ainsi que pour l'isolation des espaces difficiles d'accès.
- Feutres : Excellents pour réduire les bruits de pas et les impacts, améliorant ainsi le confort acoustique.

Inconvénient d'utilisation :

- Sensibilité au feu : Nécessite un parement coupe-feu pour assurer la sécurité.
- Utilisation limitée : Peu adapté à l'isolation périmétrique, des façades et des toits.
- Restrictions techniques : Son utilisation est moins polyvalente que d'autres matériaux isolants.

Avantages d'utilisation :

- Excellente isolation acoustique : Réduit efficacement les bruits pour un meilleur confort sonore.
- Résistance aux rongeurs : Insensible aux attaques de rongeurs, garantissant une durabilité accrue.
- Sécurité et santé : Ne dégage aucun gaz toxique en cas d'incendie et possède un bon pouvoir hygroscopique, sans effet néfaste sur la santé.

II.2.5.3. Le chanvre - Matière première renouvelable

Le chanvre est considéré comme l'une des variétés de plante la plus ancienne au monde. La matière première fût déjà utilisée en Europe 5 500 ans avant Jésus-Christ. La culture et l'extraction du chanvre se font principalement en Allemagne mais des quantités conséquentes sont aussi présentes en Roumanie et en France.

Pour la production des matériaux isolants, on utilise à la fois des fibres longues et des fibres courtes (fragments de plante de chanvre). Tandis que les fibres longues de chanvre sont transformées en feutres, en panneaux et en rouleaux

isolant en vrac sont utilisées pour la production de matériau notamment la chènevotte.

La soude est ajoutée ici

[28]



Figure II.27: Le chanvre

Figure II.28: Fibre de bois
Figure II.27: Le chanvre

Figure II.28: Fibre de bois

Figure II.29: La jute
Figure II.28: Fibre de bois
Figure II.27: Le chanvre

Figure II.28: Fibre de bois
Figure II.27: Le chanvre

Cadre d'utilisation :

- Rouleaux et panneaux : Utilisés pour l'isolation entre chevrons et sous chevrons.
- Isolation intérieure : Idéaux pour les murs intérieurs et les cloisons.
- Façade ventilée : Adaptés pour les façades ventilées à l'arrière, améliorant l'isolation et la gestion de l'humidité.

Inconvénients d'utilisation :

Nécessite une préparation car sa mise en œuvre est spécifique. Il peut se putréfier s'il est longtemps soumis à l'humidité. Utilisation limitée dans l'isolation périmétrique.

Avantages d'utilisation :

Très bon isolant acoustique, il est non consommable par les rongeurs. Bonne qualité hygroscopique, sans effets nocifs pour la santé et avec un bon bilan environnemental. Se dégrade difficilement avec une bonne mise en œuvre et une bonne densité.

II.2.5.4. Fibre de bois - Matière première renouvelable

Les matériaux isolants en fibres de bois sont parmi les plus anciens matériaux isolants naturels produits industriellement. Ils s'agit des résidus issus de la transformation industrielle de bois. Ces résidus de bois proviennent généralement d'épicéas, de sapins et de pins. Les fibres de bois sont transformées soit en panneaux soit en fibres en vrac pour l'isolation par soufflage. Il existe différents procédés afin de parvenir à ce résultat. Dans le processus sec, l'ajout d'une résine synthétique aux fibres de bois qui sont pressées par la suite en forme de

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

panneaux. Dans le processus humide, l'ajout de l'eau et sans additifs chimiques, les fibres de bois sont chauffées à une haute température puis pressée en forme de plaque. [28]

Cadre d'utilisation :

- Panneaux : Utilisés chevrons, sur chevrons, combles.
- Soufflage : Idéal pour isoler les combles bois.
- Constructions en bois : Adapté pour l'isolation panneaux de bois, performance thermique

Figure II.28: Fibre de bois

Figure II.29: La jute

Figure II.29: La jute

Figure II.30: Le liège

Figure II.29: La jute

pour l'isolation entre les cloisons et les combles, remplir les cavités, perdus et les cadres en panneaux de bois : des structures en offrant une et acoustique optimale.

Inconvénients d'utilisation :

Energie grise élevée, nécessite un produit ignifuge et dans l'isolation périmétrique et

Avantages d'utilisation :

Très bon isolant acoustique et consommable par les rongeurs. difficilement inflammable et bonne stabilité avec une bonne mise en



frein-vapeur lors de sa pose et des adjuvants. Utilisation limitée l'isolation profonde des cavités.

phonique des sols, il est non inflammable. Bonne contribution au confort été, régulateur hygroscopique. Bonne œuvre et une bonne densité.

II.2.5.5. Jute - Matière recyclable

Le jute est une fibre végétale issue de la plante Corète. Les principales zones de culture de la plante de jute sont le Bangladesh et l'Inde. Pour la production de l'isolant naturel en jute, aucun endommagement ou aucune extraction supplémentaire des éléments naturels n'est effectué. Car le matériau isolant est issu de sacs de jute usagés qui ont servi à importer les fèves de cacao et de café. Pour la production du matériau isolant, les sacs de jute sont transformés en fibres de haute qualité dans une usine de préparation des fibres. Les fibres naturelles sont ensuite mélangées à une sorte de liant et de la soude comme protection contre le feu, puis collées dans un feutre. [28]

Figure II.29: La jute

Cadre

Figure II.30: Le liège Figure II.29: La jute

Figure II.30: Le liège

Figure II.31: La laine de mouton Figure II.30: Le liège Figure II.29: La jute

Figure II.30: Le liège Figure II.29: La jute



d'utilisation :

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

- Isolation entre chevrons : Idéal pour remplir les espaces entre les chevrons, offrant une isolation thermique et acoustique efficace.
- Isolation sous et sur chevrons : Utilisé pour isoler sous les chevrons (plafonds) ou sur les chevrons (toitures), selon les besoins du projet.
- Isolation des planchers et plafonds avec poutres en bois : Parfait pour isoler les planchers et les plafonds à poutres apparentes, tout en conservant l'esthétique du bois.

Inconvénients d'utilisation :

Utilisation limitée dans l'isolation périmétrique.

Avantages d'utilisation :

Produit durable et recyclable, faible conductivité thermique et bon régulateur, protection contre le froid en hivers et contre les chaleurs estivales. Isolation phonique. Non consommable par les rongeurs ou insectes.

II.2.5.6. Le liège - Matière première renouvelable

Le liège est l'écorce extérieure du chêne-liège. A partir de 20 ans d'existence, l'arbre peut être écorcé tous les dix ans sans le mettre en danger. Il s'agit donc d'un matériel rare, le plus souvent utilisé en complément d'autres isolants. Dans le processus de production de matériaux isolants, l'écorce de liège est broyée en granulés. Elle est traitée à la vapeur surchauffée, ce qui la fait se dilater. Cela produit du liège, qui peut déjà être utilisé comme isolant en vrac. Dans le cas des panneaux de liège, le granulat est expansé sous une autre forme. À l'aide des résines du liège, qui agissent comme liants, des blocs sont créés, ceux-ci peuvent être découpés en panneaux. [28]

Figure II.30: Le liège

Figure II.31: La laine de mouton
Figure II.30: Le liège

Figure II.31: La laine de mouton

Cadre d'utilisation :

- En vrac : Utilisé pour remplir les cavités et

Figure II.32: les Algues
Figure II.31: La laine de mouton
Figure II.30: Le liège

Figure II.31: La laine de mouton
Figure II.30: Le liège

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

isoler le sol sous la chape, offrant une isolation thermique et acoustique efficace.

- Panneaux et rouleaux : Idéal pour l'isolation entre chevrons et sur chevrons, ainsi que pour les plafonds.
- Façade ventilée : Adapté pour les façades ventilées à l'arrière, améliorant l'isolation et la gestion de l'humidité.

Inconvénients d'utilisation :

- Utilisation limitée : Peu adapté à l'isolation périmétrique, ce qui réduit ses applications dans certains projets.
- Restrictions techniques : Nécessite des conditions spécifiques pour une performance optimale.
- Polyvalence réduite : Moins flexible que d'autres matériaux isolants pour des usages variés.

Avantages d'utilisation :

Excellent isolant thermique et phonique, non consommable par les rongeurs ou insectes, bonne résistance au feu et à l'humidité.

II.2.5.7. La laine de mouton - Matière première renouvelable

Les moutons ne sont pas élevés spécifiquement pour la production de matériaux d'isolation. La laine de mouton est plutôt un sous-produit de la production de viande de mouton. Avant que la laine brute puisse être transformée en matériau d'isolation, elle est lavée et dégraissée. Dans un processus ultérieur, un agent de protection de la laine est ajouté aux matériaux isolants pour le protéger contre les insectes. D'autres additifs peuvent être intégrés sous la forme de fibres synthétiques. L'ajout de fibres rend les matériaux isolants plus rigides, ce qui facilite leur installation. [28]

Figure II.31: La laine de mouton

Figure II.32: les Algues
Figure II.31: La laine de mouton

Figure II.32: les Algues

Cadre d'utilisation :

Figure II.33: La paille
Figure II.32: les Algues
Figure II.31: La laine de mouton

Figure II.32: les Algues
Figure II.31: La laine de mouton

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

- Rouleaux : Utilisés pour l'isolation des combles, sur et entre chevrons, et les murs de cloison.
- Panneaux : Idéaux pour l'isolation acoustique, réduisant les bruits aériens.
- Laine à épandre et feutres : Parfaits pour combler les joints, cavités, fissures et pour l'isolation acoustique contre les bruits de pas

Inconvénients d'utilisation :

- Utilisation limitée : Peu adaptée à l'isolation périmétrique, ce qui réduit ses applications dans certains projets.
- Sensibilité à l'humidité : Nécessite un traitement anti-humidité pour éviter les problèmes de moisissures.
- Coût élevé : Son prix peut être plus élevé que celui d'autres isolants naturels.

Avantages d'utilisation :

Bon isolant thermique en été comme en hivers, excellent isolant acoustique, non consommable par les rongeurs et traité contre les insectes. Résistant au feu.

II.2.5.8. Algues - Matière première renouvelable

Les algues sont des plantes marines, que l'on trouve dans presque toutes les mers du monde. La mer nettoie les algues et les dépose sur plage où elles sont considérées comme déchets. Elles ont une forme sphérique causée par les mouvements des vagues au fond de la mer. Après l'assemblage des algues sur la plage, elles sont nettoyées des résidus de sable sur une table à tamis. Les boules d'algues sont ensuite acheminées vers un moulin de découpe où elles sont broyées pour la production de matériaux d'isolation. L'herbe de mer peut être transformée en matériau isolant sans l'ajout de produits chimiques. [28]

Figure II.32: les Algues



Figure II.33: La paille

Figure II.33: La paille

Figure II.34: La Ouate de Cellulose

Cadre d'utilisation :

- Panneaux : Utilisés pour l'isolation sous et entre

Figure II.33: La paille

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

chevrons, offrant une isolation thermique et acoustique efficace.

- En vrac : Idéales pour l'isolation des combles, des planchers et des plafonds à poutres de bois.
- Rembourrage et soufflage : Adaptées pour le rembourrage et le soufflage de façade, améliorant l'isolation et la gestion de l'humidité.

Inconvénients d'utilisation :

- Disponibilité limitée : Les algues ne sont pas encore largement disponibles sur le marché, ce qui peut rendre leur accès difficile.
- Coût élevé : Leur production et transformation peuvent être plus coûteuses que celles d'autres isolants traditionnels.
- Sensibilité à l'humidité excessive : Bien qu'elles régulent bien l'humidité, une exposition prolongée à des niveaux d'humidité très élevés peut affecter leurs performances.

Avantages d'utilisation

Hautement durable, bon isolant thermique et ignifuge.

II.2.5.9. La paille - Matière première renouvelable

La variété de paille pour céréales à longs grains comme le seigle, l'épeautre et le blé est la meilleure matière première pour l'isolation issue de cette matière. Pour la production de matériaux d'isolation, on utilise de la paille, qui est un déchet provenant de la récolte de céréales. Tout d'abord, la faucheuse-batteuse sépare le grain de la paille. Ensuite, la presse paille ramasse la paille et la comprime en couches. Une mise en pratique la plus courante des matériaux d'isolation à base de paille est la construction de stands en bois. Les constructions en bois rembourrées avec de la paille sont généralement enduits d'argile. [28]

Figure II.34: La Ouate de Cellulose
Figure II.33: La paille

Figure II.34: La Ouate de Cellulose

Figure II.35: Lieux de placement d'isolation
Figure II.34: La Ouate de Cellulose
Figure II.33: La paille

Figure II.34: La Ouate de Cellulose
Figure II.33: La paille

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

Cadre d'utilisation :

- Isolation sur et entre chevrons : Utilisée pour isoler les toitures et les plafonds, offrant une isolation thermique et acoustique efficace.
- Isolation extérieure des murs : Idéale pour l'isolation sous enduit (plâtre) ou en façade ventilée.
- Planchers, plafonds à poutres et cloisons : Adaptée pour l'isolation des planchers, des plafonds à poutres apparentes et des murs de cloison.

Inconvénients d'utilisation :

Utilisation limitée dans l'isolation périmétrique et l'isolation central mur à double paroi, réagit mal à l'humidité.

Avantages d'utilisation :

- Écologique et renouvelable : Ressource naturelle, abondante et à faible impact environnemental.
- Performance thermique et acoustique : Excellente isolation thermique et réduction des bruits.
- Économique et régulation de l'humidité : Coût abordable et capacité à réguler naturellement l'humidité

II.2.5.10. Ouate de Cellulose – Matière recyclable

Il s'agit de vieux papier déchiqueté. En gros se sont les journaux non lus provenant des kiosques ou des stands à journaux qui sont transformés en matériaux isolants à base de cellulose. En outre, le sel de bore est rajouté au matériau isolant afin d'optimiser les propriétés de protection contre les incendies. L'isolant est disponible en vrac et sous forme de panneaux. Pour la production des panneaux, les flocons de cellulose sont combinés à la vapeur d'eau, pressés. Après séchage découpé en panneaux. [28]



Figure II.34: La Ouate de Cellulose

Cadre

- Panneaux : Utilisés et entre chevrons, les planchers et les de bois.

- Soufflage : Idéale cavités, isoler les plafonds à poutres

- Façade ventilée : façades ventilées à l'isolation et la gestion de l'humidité.

Figure II.35: Lieux de placement d'isolation

Figure II.35: Lieux de placement d'isolation

Figure II.36: Isolation intérieure

Figure II.35: Lieux de placement d'isolation

d'utilisation :

pour l'isolation sur les murs de cloison, plafonds à poutres

pour remplir les planchers et les de bois.

Adaptée pour les l'arrière, améliorant

Inconvénients d'utilisation :

- Sensibilité à l'humidité : Bien qu'elle régule bien l'humidité, une exposition prolongée à des niveaux d'humidité très élevés peut affecter ses performances.
- Tassement possible : Au fil du temps, la ouate de cellulose peut se tasser, réduisant légèrement son efficacité isolante.
- Nécessité d'un équipement spécialisé : Le soufflage de la ouate de cellulose nécessite des machines et une expertise spécifique, ce qui peut augmenter les coûts d'installation.

Avantages d'utilisation :

Bon isolant thermique, bon équilibre hygrométrique, bonne qualité acoustique, avec un traitement au borax celui-ci qui est un minéral naturel, celui-ci est résistant au feu.

II.2.6. Le principe de l'isolation thermique

L'isolation est un travail qui doit être réalisé avec soin. Un isolant inadapté ou mal posé, ou une paroi non traitée, peuvent affaiblir les performances de l'ensemble de l'isolation. L'isolation concerne les murs extérieurs, les combles et le sol, mais aussi les parois (murs, cloisons) ou planchers en contact avec une cave, un garage ou un escalier desservant ces locaux. En règle générale, on doit isoler toutes les parois en contact avec l'extérieur ou des locaux non chauffés. Pour un appartement en immeuble collectif, les murs en contact avec des circulations communes non chauffées sont aussi pris en compte. Tout l'espace habitable doit constituer un ensemble isolé, indépendamment des autres locaux. Si on le désire, la cave et le garage peuvent aussi être isolés en cas d'occupation régulière de ces locaux en période froide (atelier dans le garage par exemple). [28]

L'isolation des sols sur terre-plein peut poser un problème dans un projet de rénovation. En effet, la seule possibilité d'isolation implique une réfection de ce sol et la pose d'un isolant sous la chape. Les déperditions par le sol représentent à peu près 15 % des déperditions totales de l'habitation. Il est donc utile de comparer le surcoût occasionné par la réfection du sol par rapport au coût des déperditions. On dispose sur le marché d'une large gamme de produits adaptés à toutes les situations (figure 36).



Figure II.35: Lieux de placement d'isolation

Figure II.36: Isolation intérieure Figure II.35: Lieux de placement d'isolation

Figure II.36: Isolation intérieure

Figure II.37: Isolation extérieure Figure II.36: Isolation intérieure Figure II.35: Lieux de placement d'isolation



Figure II.36: Isolation intérieure Figure II.35: Lieux de placement d'isolation

Il existe trois grands principes d'isolation :

- L'isolation intérieure
- L'isolation extérieure
- L'isolation répartie

II.2.6.1. Isolation intérieure

L'isolation intérieure est la solution la plus répandue, notamment en rénovation. Elle est économique et relativement simple à mettre en œuvre, ce qui la rend accessible à tout bon bricoleur. La pose des isolants se fait par l'intérieur de l'habitation, au niveau des murs extérieurs, des combles et des sols. Cependant, cette solution présente un inconvénient : l'épaisseur des isolants peut réduire de manière significative la surface habitable. [30]

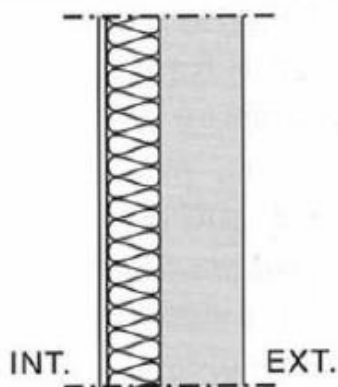


Figure II.36: Isolation intérieure

II.2.6.2. Isolation

L'isolation extérieure sur tous les murs ensuite d'un enduit de bardage. La toiture peut le même procédé. œuvre de cette solution nécessite d'assurer d'installer un

Figure II.37: Isolation extérieure
Figure II.36: Isolation intérieure

Figure II.37: Isolation extérieure

Figure II.38: Isolation répartie
Figure II.37: Isolation extérieure
Figure II.36: Isolation intérieure

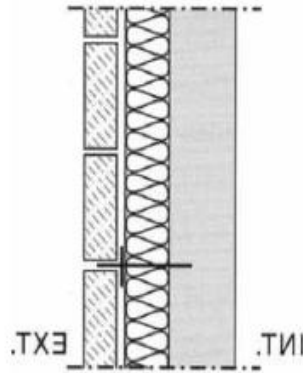
Figure II.37: Isolation extérieure
Figure II.36: Isolation intérieure

extérieure

consiste à poser un isolant extérieurs, recouvert ravalement ou d'un également être isolée selon Cependant, la mise en est délicate, car elle l'étanchéité de la façade et échafaudage. Il est donc

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

recommandé de confier ces travaux à un professionnel. Cette solution est envisageable si le ravalement de l'habitation nécessite une réfection. Il est de même pour la toiture, car ce type d'isolation ne peut être réalisé sur une toiture existante sans travaux importants. [30]



travaux à un professionnel. si le ravalement de l'habitation est de même pour la toiture, car réalisé sur une toiture existante

Figure II.37: Isolation extérieure

II.2.6.3. Isolation répartie

L'isolation répartie de construction implique la construction des matériaux isolants, tels que des briques à alvéoles multiples ou du béton cellulaire. L'isolation des combles est réalisée en isolation intérieure ou extérieure, tandis que l'isolation des sols se fait en isolation répartie. Cette solution peut également être adoptée en rénovation, notamment en cas de création d'un niveau supplémentaire ou de surélévation de la maison. [30]

Figure II.38: Isolation répartie

Figure II.38: Isolation répartie

Tableau II. 2: Propriétés techniques des matériaux isolants

Figure II.38: Isolation répartie



repartie

concerne les matériaux de l'habitation. Elle concerne les murs extérieurs avec des briques à alvéoles multiples ou du béton cellulaire. Cette solution est réalisée en isolation intérieure. Cette solution est adoptée en rénovation, notamment en cas de création d'un niveau supplémentaire ou de surélévation de la maison. [30]

II.3. Avantages et

Figure II.38: Isolation repartie

inconvénients

II.3.1. Performances

II.3.1.1. Valeur d'isolation

La performance thermique seulement de la valeur isolante Construire de manière étanche à les ponts thermiques, est tout performance thermique d'un déterminée par deux aspects : conductivité thermique (λ). Plus matériau conduira la chaleur, et épais avec une conductivité aussi performant qu'un isolant thermique très faible. [31]

Tableau II. 3: Propriétés techniques des matériaux isolants
Figure II.38: Isolation repartie

Tableau II. 4: Propriétés techniques des matériaux isolants

Tableau II.5: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau
Tableau II. 6: Propriétés techniques des matériaux isolants
Figure II.38: Isolation repartie

Tableau II. 7: Propriétés techniques des matériaux isolants
Figure II.38: Isolation repartie

thermiques

d'une habitation ne dépend pas des éléments de construction. l'air et au vent, ainsi qu'éviter aussi important. La matériau d'isolation est l'épaisseur du matériau et sa la valeur λ est faible, moins le mieux il isolera. Un isolant thermique modérée peut être mince avec une conductivité

II.3.1.2. Ouverture à la

vapeur

L'enveloppe extérieure d'une maison doit être composée de matériaux ouverts à la vapeur pour évacuer l'humidité produite à l'intérieur. Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (μ) indique l'ouverture à la vapeur d'un matériau. Les matériaux isolants renouvelables ont généralement une faible valeur μ , ce qui les rend plus adaptés pour une maison écologique et saine. [31]

II.3.1.3. Protection contre les surchauffes

Les matériaux qui isolent bien en hiver ne protègent pas toujours suffisamment contre les excès de chaleur en été. La capacité thermique ($\rho \cdot c$) et le coefficient de diffusion thermique (a) sont des indicateurs clés pour évaluer la performance thermique d'un matériau en été. Les matériaux à faible coefficient de diffusion thermique permettent de maintenir une température intérieure stable, en restant plus frais en été et plus chauds en hiver. [31]

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

II.3.1.4. Isolation acoustique

La qualité de l'isolation acoustique est donnée par les grandeurs R_w (bruits aériens) et L_n, w (bruits d'impact). Une bonne isolation acoustique contribue également au confort thermique global. [31]

II.3.1.5. Durée de vie

La durée
de vie d'un
matériau

Conductivité de la chaleur [W/mK]	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ [-]	Perméabilité à la vapeur?	Poids spécifique [kg/m ³]	Densité volumique [kg/m ³]	Coefficient de diffusion thermique (moyen) [p.c. (W.cm ² /J)]	Inflammable?	Isolation acoustique	Durée de vie [an]
--------------------------------------	---	---------------------------	--	--	--	--------------	----------------------	-------------------

Tableau II. 8: Propriétés techniques des matériaux isolants

Cellulose
Fibres de
Lin
Chanvre
Laine de m
Liège expi

Tableau II.9: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau
Tableau II. 10: Propriétés techniques des matériaux isolants

Tableau II.11: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Tableau II. 12: Classement feu
Tableau II.13: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur
d'eau
Tableau II. 14: Propriétés techniques des matériaux isolants

Tableau II.15: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau
Tableau II. 16: Propriétés techniques des matériaux isolants

son environnement. Les matériaux écologiques, comme la cellulose ou la fibre de bois, ont une durée de vie comparable à celle des matériaux conventionnels, à condition d'être correctement installés. [31]

II.3.2. Quelques avantages des isolants naturels

Ecologique :

- ✓ Respectueux de l'environnement aussi bien au moment de construire ou de déconstruire
- ✓ Matières premières renouvelables
- ✓ Nécessite peu d'énergie lors de sa fabrication
- ✓ Facile à recycler
- ✓ Evite par conséquent la création de déchets dangereux [28]

Respectueux de la santé et du bien-être :

- ✓ Favorise une atmosphère intérieure saine
- ✓ Dépourvue de polluants et de matières toxiques
- ✓ Traitement respectueux de la santé

Avantageux pour la structure de la construction :

- ✓ Qualité prouvée et reconnue en matière de protection contre la chaleur estivale
- ✓ Régulateur d'humidité
- ✓ Bonne performance en matière d'isolant

II.3.2.1. Le bois d'œuvre

La valorisation du bois local a donné lieu à plusieurs travaux, études et publications de la part du Parc depuis plusieurs années. Le présent document ne reprend donc pas ces éléments, d'autant plus que le volume de bois d'œuvre en rénovation est bien plus faible qu'en construction ou en extension. L'enjeu de la filière bois pour l'éco-rénovation réside sur le volet isolant (fibre de bois notamment) dont la demande croît assez régulièrement en France et qui peut donner des opportunités à des scieurs de valoriser des coproduits de leur activité.

II.4. Critères de sélection des matériaux

II.4.1. Les propriétés physiques de construction des matériaux d'isolation

❖ Densité ou masse volumique en kg/m^3

Il s'agit de la capacité thermique d'un matériau à stocker ou retenir la chaleur par rapport à sa masse. Une faible densité signifie certes une bonne isolation, mais aussi une mauvaise insonorisation acoustique et une plus faible résistance à la compression. Tandis que plus la valeur est élevée, plus le matériau est capable d'emmagasiner la chaleur et la retenir. En général, une densité brute favorable est comprise entre 20 et 100 kg/m^3 . [28]

❖ Conductivité thermique λ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

La conductivité thermique est une unité de mesure qui permet de déterminer la capacité isolante d'un matériau. Ceci indépendamment de l'épaisseur du matériau. Elle n'évalue pas la construction et est définie par la valeur de conductivité thermique λ . [28]

Bon à savoir : Plus précisément, la conductivité thermique définit le flux de chaleur qui traverse un mètre de matériaux de construction de même épaisseur et permet ainsi de comparer la capacité à isoler.

Important à savoir : Plus la conductivité thermique est faible, moins le matériau laisse passer la chaleur et est isolant. Les valeurs inférieures à 0,050 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ indiquent une bonne isolation thermique. Une mauvaise conductivité thermique peut être compensée en augmentant l'épaisseur du matériau isolant.

❖ Valeur U en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

La valeur U est le coefficient de transfert de chaleur. Elle détermine la quantité de chaleur qui passe en une seconde à travers une surface d'un mètre carré d'un élément de construction (mur, toit, fenêtre...), lorsqu'il y'a une différence de température de 1 degré Celsius entre l'intérieur et l'extérieur. [28]

Bon à savoir : La valeur U indique la quantité de chaleur qui traverse un mètre carré d'un matériau isolant lorsque la différence de température des couches adjacentes est d'un Kelvin. Alors que la valeur λ est calculée avec la différence de température du matériau, la valeur U inclut la différence de température de l'air dans le calcul.

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

Important à savoir : Plus la valeur U est faible, moins la chaleur est conduite à travers l'élément de construction en conséquence la puissance d'isolation thermique augmente.

❖ Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

La valeur de la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ indique la perméabilité avec laquelle un matériau de construction empêche la diffusion (pénétration) de la vapeur d'eau en fonction du matériau et de l'épaisseur de la couche. [28]

Bon à savoir : La valeur décrit à quel degré le matériau isolant est plus dense qu'une couche d'air de même épaisseur. Par exemple, les balles de paille comprimées ont une valeur μ de 2, ce qui signifie qu'elles sont deux fois plus denses que l'air.

Important à savoir : Plus la valeur μ est élevée, plus le matériau est dense et plus la vapeur d'eau pénètre difficilement le matériau isolant. Pour les matériaux isolants, des valeurs μ basses sont plus avantageuses, car cela favorise le transport de la vapeur d'eau. Si la vapeur d'eau qui est produite entre autres lors de la cuisson et des bains, ne peut s'échapper vers l'extérieur, il y a un risque de formation de moisissures dans le bâtiment

Tableau II.17: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Tableau II. 18: Classement feu Tableau II.19: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Tableau II. 20: Classement feu

Tableau II. 21: coûts de matériaux Tableau II. 22: Classement feu Tableau II.23: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Tableau II. 24: Classement feu Tableau II.25: Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau

Valeur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	Classification
Moins de 10	Très forte diffusion (recommandée)
De 10 à 50	Diffusion moyenne
De 50 à 100	Diffusion restreinte

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

II.4.2. Classement feu (Euro class) des matériaux écologiques

Le classement feu, ou Euro class, indique la réaction au feu ou la résistance au feu des matériaux de construction, y compris les matériaux écologiques. Ce classement est essentiel pour garantir la sécurité des bâtiments tout en respectant les normes environnementales. Les matériaux écologiques, bien que souvent renouvelables et respectueux de l'environnement, doivent également répondre à des exigences de sécurité incendie. Par exemple, certains isolants naturels comme la laine de mouton ou la ouate de cellulose peuvent être classés B1 (difficilement inflammable), tandis que d'autres, comme l'argile expansée, sont classés A1 (incombustible). Ce critère est donc un élément clé dans le choix des matériaux écologiques pour l'isolation thermique. [28]

Tableau II. 26: Classement feu




Tableau II. 27: coûts de matériaux Tableau II. 28: Classement feu

Tableau II. 29: coûts de matériaux

Tableau II. 30: coûts de matériaux Tableau II. 31: Classement feu

Tableau II. 32: coûts de matériaux Tableau II. 33: Classement feu

B3 inflammable (non autorisé dans le secteur de la construction)

II.4.3. Comparaison des matériaux d'isolation écologiques

II.4.3.1. Le lin

Atouts et inconvénients

- Bonne isolation thermique
- Résistant aux moisissures et aux ravageurs
- Très bonne régulation de l'humidité
- Faible consommation d'énergie lors de la fabrication

Densité brute : Le lin a une densité brute comprise entre 20 et 40 kg/m³.

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

Euro classe : Il est classé B2, ce qui signifie qu'il est combustible mais moyennement inflammable.

Conductivité thermique : Sa conductivité thermique est de 0,040 W/(m·K).

Résistance à la diffusion de vapeur : se situe entre $\mu = 1-2$. [28]

II.4.3.2. Le Chanvre

Atouts et inconvénients

- Bonne isolation thermique
- Résistant aux moisissures et aux ravageurs
- Habitable par les rongeurs
- Difficile à recycler/mauvaise compo stabilité avec des fibres synthétiques

Densité brute : Le chanvre a une densité brute comprise entre 20 et 40 kg/m³.

Euro classe : Il est classé B2, ce qui signifie qu'il est combustible mais moyennement inflammable.

Conductivité thermique : Sa conductivité thermique varie entre 0,040 et 0,045 W/(m·K).

Résistance à la diffusion de vapeur : se situe entre $\mu = 1-2$. [28]

II.4.3.3. Le Liège

Atouts et inconvénients

- Bonne isolation thermique (panneaux)
- Bonne régulation de l'humidité
- Disponible limité
- Odeur propre relativement forte

Densité brute : Le liège en panneaux à une densité brute comprise entre 100 et 220 kg/m³, tandis qu'en granulat, elle varie entre 65 et 150 kg/m³.

Euro classe : Il est classé B2, ce qui signifie qu'il est combustible mais moyennement inflammable.

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

Conductivité thermique : Le liège offre une bonne isolation thermique, bien que la valeur exacte ne soit pas précisée ici.

Résistance à la diffusion de vapeur : Le liège est connu pour sa bonne régulation de l'humidité, bien que la valeur exacte ne soit pas précisée ici. [28]

II.4.3.4. Laine de mouton

Atouts et inconvénients

- Bonne/très bonne isolation thermique
- Résistant aux moisissures
- Sensible aux ravageurs sans additifs
- Présence possible de résidus de pesticides

Densité brute : La laine de mouton a une densité brute comprise entre 20 et 25 kg/m³.

Euro classe : Elle est classée B2, ce qui signifie qu'elle est combustible mais moyennement inflammable.

Conductivité thermique : Sa conductivité thermique varie entre 0,035 et 0,045 W/(m·K).

Résistance à la diffusion de vapeur : se situe entre $\mu = 1-5$. [28]

II.4.3.5. La Paille

Atouts et inconvénients

- Isolation thermique moyenne
- Bonne régulation de l'humidité
- Disponibilité en grande quantité régionale
- Moins de flexibilité
- Grands murs

Densité brute : La paille a une densité brute comprise entre 90 et 125 kg/m³.

Euro classe : Elle est classée B2, ce qui signifie qu'elle est combustible mais moyennement inflammable.

Conductivité thermique : Sa conductivité thermique varie entre 0,052 et 0,072 W/ (m·K).

Résistance à la diffusion de vapeur : Sa résistance à la diffusion de vapeur est de 2. [28]

II.4.3.6. Cellulose

Atouts et inconvénients

- Bonne isolation thermique
- Bonne protection contre la chaleur
- Très faible consommation d'énergie lors de la production [28]

Densité brute : La cellulose en panneaux a une densité brute comprise entre 60 et 80 kg/m³, tandis qu'en vrac, elle varie entre 40 et 60 kg/m³.

Euro classe : Elle est classée B2, ce qui signifie qu'elle est combustible mais moyennement inflammable.

Conductivité thermique : Sa conductivité thermique est de 0,040 W/ (m· K) pour les panneaux, et entre 0,040 et 0,045 W/(m· K) pour la cellulose en vrac.

Résistance à la diffusion de vapeur : se situe entre $\mu = 1-2$.

II.4.4. Coûts d'isolation écologique

Les matériaux d'isolation écologiques peuvent varier en termes de coûts, certains se positionnant dans une gamme de prix moyens, tandis que d'autres sont plus onéreux. Cela s'explique en partie par les processus de production, qui peuvent nécessiter plus de ressources ou de main-d'œuvre. Cependant, certains matériaux écologiques, comme la cellulose en vrac (processus d'injection), sont compétitifs en termes de prix. Le jute et la paille se situent également dans une fourchette de prix accessible.

Il est important de noter que les coûts des matériaux d'isolation ne dépendent pas uniquement du prix du matériau lui-même, mais aussi de ses propriétés techniques et de son application. Par exemple, certains matériaux écologiques sont particulièrement adaptés à des usages spécifiques, comme la régulation de l'humidité ou l'isolation thermique, ce qui peut justifier leur coût. [28]

II.4.4.1. Comment les prix d'isolation sont-ils calculés ?

Coûts par mètre cube (€/m³) : Afin de comparer et calculer les différents coûts des matériaux isolants, il faut choisir des matériaux isolants de conductivité thermique de même niveau (λ).

Chapitre. II : Matériaux isolants écologiques

Coûts par mètre carré (€/m²) : Les matériaux isolants avec une indication de prix par mètre carré sont comparables les uns par rapport aux autres, lorsqu'ils réunissent la même norme en termes de chaleur. Par exemple la même valeur U, 0,20 W/ (m²·K). Ainsi ils peuvent avoir différentes épaisseurs et appartenir à différentes valeurs de conductivité thermique.

Les coûts de l'isolation ne dépendent pas seulement des coûts relatifs au matériel, mais aussi du traitement et des travaux qui vont en dépendre. [28]

Faire appel à un bricoleur plutôt qu'à un artisan professionnel peut réduire considérablement les coûts. Cependant, les experts soulignent que l'installation des matériaux isolants doit être soigneusement planifiée et réalisée avec précision, en tenant compte des spécificités du bâtiment. Une mauvaise installation peut compromettre l'efficacité de l'isolation.

Les matériaux comme les panneaux rigides, semi-rigides ou les rouleaux peuvent être posés par un bricoleur compétent. La méthode par soufflage, bien que plus technique, est également réalisable avec une certaine expérience. Pour l'isolation des combles par soufflage (par exemple, avec de la cellulose), les coûts de traitement varient généralement entre 6 et 10 €/m², en fonction de la surface à isoler. [28]

Aperçu des coûts de matériaux écologiques :

Tableau II. 34: coûts de matériaux

Tableau II. 35: coûts de matériaux

Tableau II. 36: coûts de matériaux

Tableau II. 37: coûts de matériaux

Jute Lambda WLS 038	Rouleaux	180	15
Liège Lambda WLS 040	Panneaux liège	180	30 - 75
Laine de mouton Lambda WLS 044	Rouleau	200	32
Algues marines Lambda WLS 040	En vrac	180	28 - 43
Paille Lambda WLS 052	Ballots de pailles	360	14
Cellulose Lambda WLS 042	Panneaux rigides	180	38
	Epanchage en vrac	180	10

II.5. Conclusion

L'adoption des matériaux isolants écologiques dans le secteur du bâtiment marque une étape clé vers une construction plus durable et respectueuse de l'environnement. Ces matériaux, grâce à leurs performances thermiques et acoustiques, constituent une alternative efficace aux isolants traditionnels, tout en limitant l'empreinte carbone des constructions. Cependant, leur déploiement à grande échelle exige une sensibilisation accrue, ainsi que la mise en place de mesures incitatives, économiques et réglementaires. En alliant innovation et techniques ancestrales, les isolants écologiques participent non seulement à l'optimisation de l'efficacité énergétique, mais aussi à la création d'un environnement de vie plus sain et durable pour les générations à venir.



Chapitre III : étude de cas

Figure III.39: Situation de la ville de Tlemcen (Carte d'Algérie) [29]

III.1. Introduction :

Le secteur du bâtiment est un grand consommateur d'énergie, principalement en raison des pertes thermiques. Pour y remédier, l'optimisation de l'isolation et l'utilisation de matériaux écologiques constituent des solutions efficaces.

Ce chapitre propose une analyse des résultats d'une étude menée sur une maison individuelle, visant à observer l'évolution des déperditions thermiques avant et après sa transformation en maison écologique.

L'objectif est d'évaluer la consommation énergétique réelle d'une habitation et d'identifier les stratégies les plus pertinentes pour la réduire. Les résultats mettent en évidence des écarts significatifs en termes d'énergie, de coût et d'impact environnemental, renforçant l'optimisme quant aux perspectives des habitats écologiques dans notre pays.

III.2. Sélection des bâtiments

III.2.1. Caractéristiques géographiques

Tlemcen, située au nord-ouest de l'Algérie (34.56°N, -1.19°E, altitude 830 m), présente un climat méditerranéen marqué par des étés chauds et secs et des hivers froids. Ces conditions climatiques exigeantes en font un site idéal pour évaluer l'efficacité des matériaux écologiques dans la régulation thermique des bâtiments.

La proximité de la mer (45 km) atténue légèrement les extrêmes climatiques, offrant un contexte réaliste pour tester la performance des isolants durables (comme la laine de mouton, la fibre de bois ou la ouate de cellulose) dans un environnement urbain semi-aride. Cette étude permettra de mesurer leur capacité à :

- ✓ Réduire les besoins en chauffage l'hiver
- ✓ Limiter la surchauffe estivale
- ✓ Maintenir un confort thermique optimal [29]

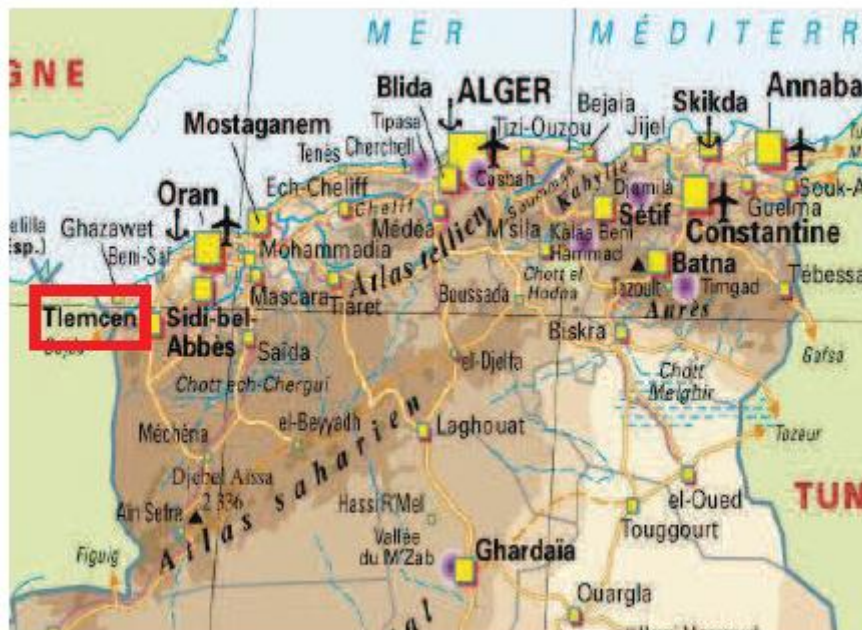


Figure III.39: Situation de la ville de Tlemcen (Carte d'Algérie) [29]

Figure III.40: Variation du rayonnement global et diffus horizontal

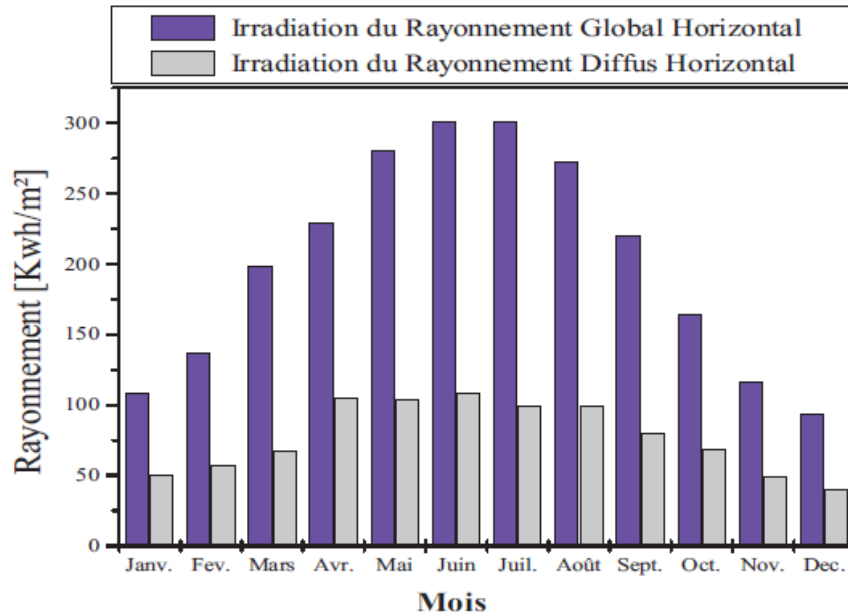
Figure III.40: Variation du rayonnement global et diffus horizontal

Tableau III.38: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]

Figure III.40: Variation du rayonnement global et diffus horizontal

III.2.2. Radiations solaires

Les radiations solaires constituent un paramètre fondamental dans l'étude des performances énergétiques des bâtiments, nécessitant une analyse précise des conditions climatiques locales. Comme le démontre la Figure 40, l'évolution annuelle du rayonnement à Tlemcen présente des caractéristiques marquées : une augmentation significative entre février et mars, suivie d'un pic en juillet pour le rayonnement horizontal, tandis que le rayonnement global sur plan incliné montre une relative stabilité de mars à octobre. Notons que le rayonnement diffus représente une part importante du total, variant entre 35% et 44% annuellement. Ces données



solaires, essentielles pour évaluer le potentiel énergétique passif des constructions, guident directement le choix et l'optimisation des matériaux écologiques en fonction des variations saisonnières. [30]

Figure III.40: Variation du rayonnement global et diffus horizontal

Tableau III.39: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]Figure III.40: Variation du rayonnement global et diffus horizontal

Tableau III.40: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]

Tableau III.41: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]Figure III.40: Variation du rayonnement global et diffus horizontal

Tableau III.42: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]Figure III.40: Variation du rayonnement global et diffus horizontal

Tableau III.43: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]

Tableau III.44: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]

Tableau III.45: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]

Tableau III.46: Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]

Tableau III.6 : Données Météorologiques annuelles de la ville de Tlemcen [31]

Mois	IRGH	IRDH	T air	Vit. Vent	Hum. Rel
Unité	[W/m ²]	[w/m ²]	[°C]	[m/s]	[%]
Janvier	59	50	10.8	2.2	73
Février	80	57	11.3	1.8	72
Mars	131	68	13.7	1.7	71
Avril	124	105	15.5	2.3	65
Mai	177	104	18.7	2.3	62
Juin	193	109	23.4	2.5	56
Juillet	201	100	25.7	2.4	54
Août	174	99	26.1	2.2	58
Septembre	140	80	22.9	2.1	64
Octobre	96	69	19.4	1.8	68
Novembre	68	49	14.3	2.1	73
Décembre	54	40	11.7	2.2	74
Moy. Année	125	78	17.8	2.1	66

Chapitre. III : étude de cas

III.2.3. Température de l'air :

La notion de confort thermique dans un habitat reste complexe à définir précisément, car elle dépend étroitement des variations climatiques saisonnières et des températures atteintes. Cette relation dynamique crée une "zone de confort" dont l'étendue varie selon l'interaction entre ces paramètres.

L'approche adaptative permet d'établir un lien entre la température de confort intérieur et les conditions extérieures, offrant ainsi des bases objectives pour la conception des espaces bâtis. Concrètement, la température de confort (T_c) se calcule à partir des températures extérieures moyennes (T_m), avec un suivi mensuel qui intègre également les extrêmes journaliers (T_{max} et T_{min}) et la température moyenne extérieure [32]. Cette méthodologie fournit des indicateurs précieux pour optimiser les performances thermiques des bâtiments.

Tableau III.51: Variations saisonnières des températures [31]

Figure III.41: Variations saisonnières des températures du site de Tlemcen
Tableau III.52: Variations saisonnières des températures [31]

Figure III.41: Variations saisonnières des températures du site de Tlemcen

Figure III.42: Variation des Températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de TLEMEN
[40]Figure III.41: Variations saisonnières des températures du site de Tlemcen
Tableau III.53: Variations saisonnières des températures [31]

Figure III.41: Variations saisonnières des températures du site de Tlemcen
Tableau III.54: Variations saisonnières des températures [31]



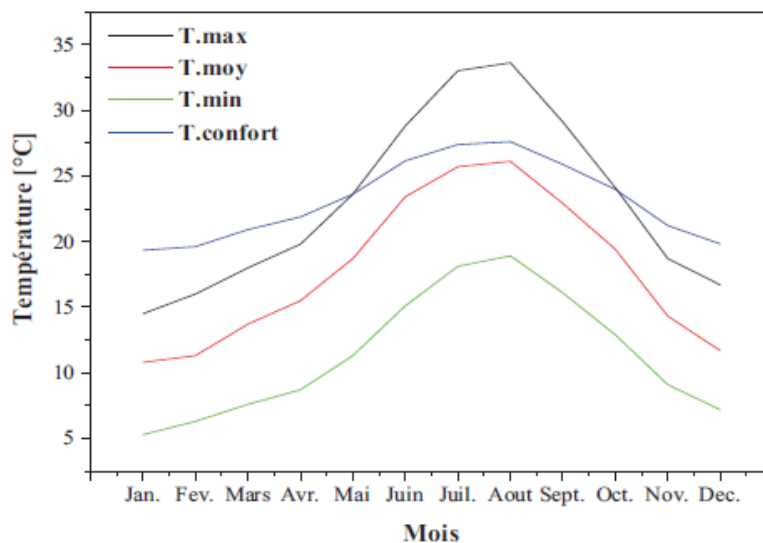


Figure III.41: Variations saisonnières des températures du site de Tlemcen

Les courbes de températures de confort, de températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de TLEMCCEN [40]

Figure III.42: Variation des Températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de TLEMCCEN [40]

Figure III.42: Variation des Températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de TLEMCCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCCEN [40]

Fig.4
2,
mont

Figure III.42: Variation des Températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de TLEMCCEN [40]

rent les variations saisonnières de la température moyenne de confort, T_c , à Tlemcen, et son rapport avec la moyenne journalière maximum, minimum et la température extérieure moyenne T_m . La relation utilisée pour calculer la température de confort à partir de la température extérieure est donnée par Humphreys (1978). [33]

III.2.4. Les Besoins Energétiques et confort :

De nombreux travaux ont proposé un indice fondé sur la théorie de l'échange thermique, considéré comme la réponse la plus probable à l'ensemble des facteurs influents. Parmi ces recherches, on peut citer celles de Nevins et Gagge (1972) [34], qui ont introduit la notion de

Chapitre. III : étude de cas

température effective (ET) ainsi que sa version améliorée, la température effective standard (SET), ayant servi de référence pour les normes de construction aux États-Unis.[35] De même, Humphreys [36], en 1978, a établi un lien entre la température de confort et la température ambiante.

$$T_C = 13.5 + 0.54T_a \quad (1)$$

T_c : Température de Confort (°C)

T_a : Température ambiante (°C)

III.2.4.1. Les paramètres énergétiques

L'énergie finale, qu'elle soit électrique (E_e) ou thermique (E_w), consommée par un bâtiment résidentiel, sert à compenser l'ensemble des pertes thermiques causées par les parois, la ventilation et les équipements de conversion énergétique. Les méthodes de calcul des différentes composantes du bilan énergétique varient selon les conditions climatiques et les spécificités de chaque pays [37, 38]. Elles sont régulièrement mises à jour afin de répondre aux exigences des normes en vigueur et de favoriser l'utilisation d'équipements à faible consommation d'énergie. L'énergie finale nécessaire au chauffage du local est déterminée par l'expression suivante :

$$E_w = Q_w + Q_v \quad (2)$$

Q_w : Besoins en chaleur.

Q_v : Somme des pertes en chaleur.

$$Q_w = Q_h + Q_{ww} \quad (3)$$

Q_h : Besoins pour le chauffage.

Q_{ww} : Besoins pour l'eau chaude.

$$Q_h = (Q_t + Q_1) - Q_g \quad (4)$$

Chapitre. III : étude de cas

Q_t : Besoins en chaleur par transmission

Q_1 : Besoins en chaleur par ventilation.

Q_g : Apports en chaleur.

$$Q_g = f_g \times Q_f \quad (5)$$

Q_f : Chaleur interne et externe.

f_g : Taux d'utilisation de la chaleur.

III.2.4.1.1. Pertes par transmission des parois et renouvellement d'air par ventilation

Les pertes thermiques dues à la transmission à travers les parois du bâtiment et au renouvellement de l'air sont particulièrement significatives dans les habitations individuelles, atteignant leur maximum durant la saison hivernale. Elles dépendent de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, tandis que leur réduction est fortement influencée par la qualité des matériaux isolants employés. Pour compenser ces pertes, plusieurs sources de chaleur interviennent :

Les apports solaires, qui contribuent à chauffer l'espace intérieur.

Les apports internes générés par l'activité des occupants et le fonctionnement des équipements électriques.

Les relations permettant de quantifier les pertes thermiques des différentes parois et celles liées au renouvellement de l'air sont les suivantes :

$$Q_t = Q_{t \text{ Toit}} + Q_{t \text{ parois}} + Q_{t \text{ Fenetres}} + Q_{t \text{ Plancher}} \quad (6)$$

$$Q_{t_i} = A_i \times K_i \times TCH \times 24 \times (1/1000) \quad (7)$$

Q_{t_i} : Pertes par élément 'toiture, paroi, fenêtre, plancher (kWh)

A_i : Surface de l'élément (m²)

k_i : Facteur k de l'élément (W/m². K)

TCH : Taux de chauffage (K x jour/an)

$$Q_l = n \times V \times C_p \times \rho_l \times TCH \times 24 \times (1/3600) \quad (8)$$

Les apports internes et externes sont donnés par la relation ci-après :

$$Q_f = Q_s + Q_p + Q_e \quad (9)$$

Q_s : Apports par énergie solaire

Q_p : Apports par les occupants

Q_e : Apports par les équipements électriques.

III.2.4.1.2. Apports par énergie solaire :

Les périodes de forte captation solaire, qui s'étendent de mai à septembre, ne coïncident pas avec les besoins en chauffage, concentrés entre octobre et avril. Le dispositif de captage repose sur des façades vitrées orientées sud (+/- 30°), permettant une absorption directe de l'énergie solaire. Toutefois, durant la saison estivale, des mesures doivent être mises en place pour éviter la surchauffe. Lors de l'étude architecturale, une attention particulière doit être portée à ces éléments afin de garantir un choix optimal des matériaux.

L'expression permettant de calculer les apports solaires à travers les parois vitrées est la suivante :

$$Q_s = RH \times f_b \times g \times f_r \times A_f \quad (10)$$

RH : Rayonnement global par jour de chauffage

f_b : facteur de réduction (ombrage et poussière)

g : Taux global de transmission

f_r : Surface du vitrage (sans cadre)

A_f : Surface des fenêtres.

III.2.4.1.3. Apports internes par les occupants et les équipements électriques :

La chaleur produite par les habitants du bâtiment ainsi que par les équipements électriques qu'ils utilisent constitue les apports internes en énergie thermique. Pour les occupants, le niveau d'activité influence directement la quantité de chaleur dégagée par le corps humain, à

Chapitre. III : étude de cas

travers des mécanismes tels que la convection, le rayonnement, ainsi que l'évaporation liée à la respiration et à la sudation [39].

Les contributions thermiques des occupants sont déterminées par :

$$Q_p = C_p \times P \times h_p \times NJC \pm 1/1000 \quad (11)$$

La chaleur apportée par les équipements électriques est donnée par l'expression suivante :

$$Q_e = E_e \times f_e \times NJC/365 \pm 1/1000 \quad (12)$$

C_p : Chaleur dégagée par occupant (W/occupant)

P : Nombre d'occupant

h_p : Présence par jour (h/jour)

NJC : Nombre de jours chauffés (jours/an)

E_e : Consommation d'électricité (kWh/m²an)

f_e : Facteur de réduction.

III.2.5. Notions du degré jours pour le chauffage et/ou refroidissement

L'analyse des besoins énergétiques d'un bâtiment implique de considérer la différence de température entre l'environnement intérieur et extérieur, qui varie selon les régions. Pour quantifier la consommation de chaleur sur une période de chauffage déterminée et comparer les performances énergétiques de bâtiments situés dans différentes zones climatiques, le concept de degré jour a été introduit.

III.2.5.1. Degré jour de chauffage :

Le nombre de degrés jours correspondant à une période de chauffage est déterminé en multipliant le nombre de jours chauffés par l'écart entre la température intérieure moyenne du local et la température extérieure moyenne :

Chapitre. III : étude de cas

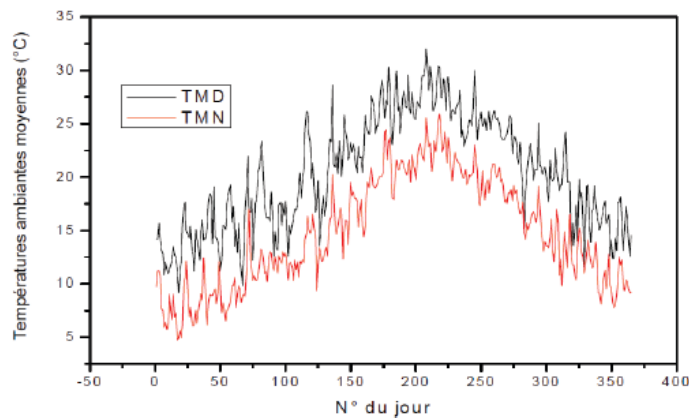
$DJ = \text{Nombre de jours chauffés} \times (\text{Température intérieure moyenne} - \text{Température extérieure moyenne})$

En réalité, le calcul des degrés jours prend également en compte les apports solaires spécifiques au bâtiment pour affiner l'évaluation des besoins énergétiques.

III.2.5.2. Degré jour de refroidissement

Le degré-jour de climatisation fonctionne sur le même principe que le degré-jour de chauffage, mais il permet d'évaluer les besoins en climatisation durant les mois chauds de l'été. En règle générale, ces besoins sont proportionnels à l'écart positif par rapport au seuil de 1°C.

Les degrés-jours unifiés (DJU) sont utilisés pour estimer la consommation d'énergie thermique en fonction de la rigueur hivernale. Pour déterminer le nombre de DJU relatifs au chauffage et au refroidissement du site de Tlemcen, il est essentiel de connaître les températures moyennes horaires et mensuelles. Ces données sont indispensables pour dimensionner correctement les génératrices photos thermiques, les serres agricoles et les systèmes de climatisation résidentiels. À cet effet, les résultats de la modélisation des températures ambiantes du site de Tlemcen sont présentés dans la figure 43. [40]



D'après
les
résultats
illustrés
dans la
Fig.40,
l'écart
entre les
températ
ures
maximale
s et
minimale
s
enregistré

Figure III.42: Variation des Températures journalières (Max et Min) ambiantes et au sol du site de TLEMCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

es sur le site de Tlemcen reste inférieur à 10°C, indépendamment de la saison.

Chapitre. III : étude de cas

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

Figure III.43: Variation journalière des températures ambiantes moyennes diurnes (TMD) et nocturnes (TMN) du site de TLEMCEN [40]

La Fig.44 illustre l'évolution des températures ambiantes moyennes journalières, permettant d'estimer le nombre de degrés jours sur l'ensemble de l'année pour un bâtiment situé à Tlemcen.

À partir des données enregistrées et présentées dans la Fig.44, les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau 3 ci-dessous. [41]

Tableau III. 55: Calcul du nombre de degrés jours mensuel (Dj) [41]

Mois	Tc	Température moyenne ambiante	Dj pour le chauffage			Dj pour la climatisation		
			15°C	Tc	18° C	22°C	Tc	25° C
Janvier	19.13	10.43	141.67	192.5	234.67			
Février	19.98	12.01	83.72	134	167.72			
Mars	21	13.9	50.06	146	127.1			
Avril	21.70	15.2	24	125.5	84			
Mai	23.16	17.89	5.24	91	33.82			
Juin	25.44	22.11				30.13	30	3.48
Juillet	26.71	24.46				77.98	8	12.52
Août	26.56	24.19				68.93	19	12.33
Septembre	25.58	22.38				18.18	27	1.53
Octobre	23.49	18.5	12.91	93.5				
Novembre	21.9	15.56	19.13	117.5	76.31			
Décembre	20.49	12.95	65.31	152	156.54			
Total			402.04	1052	880.16	195.22	84	29.86

Chapitre. III : étude de cas

Selon les données du tableau, le site de Tlemcen présente une période de chauffage prolongée, s'étendant d'octobre à mai. Le nombre de degrés jours correspondant à cette période reflète l'intensité des besoins en chauffage sur l'année.

- Pour une température de confort (15°C), $D_j = 402.04$
- Pour une température de confort (18°C), $D_j = 880.16$
- Pour la température de confort calculé pour chaque jour, $D_j = 1052$

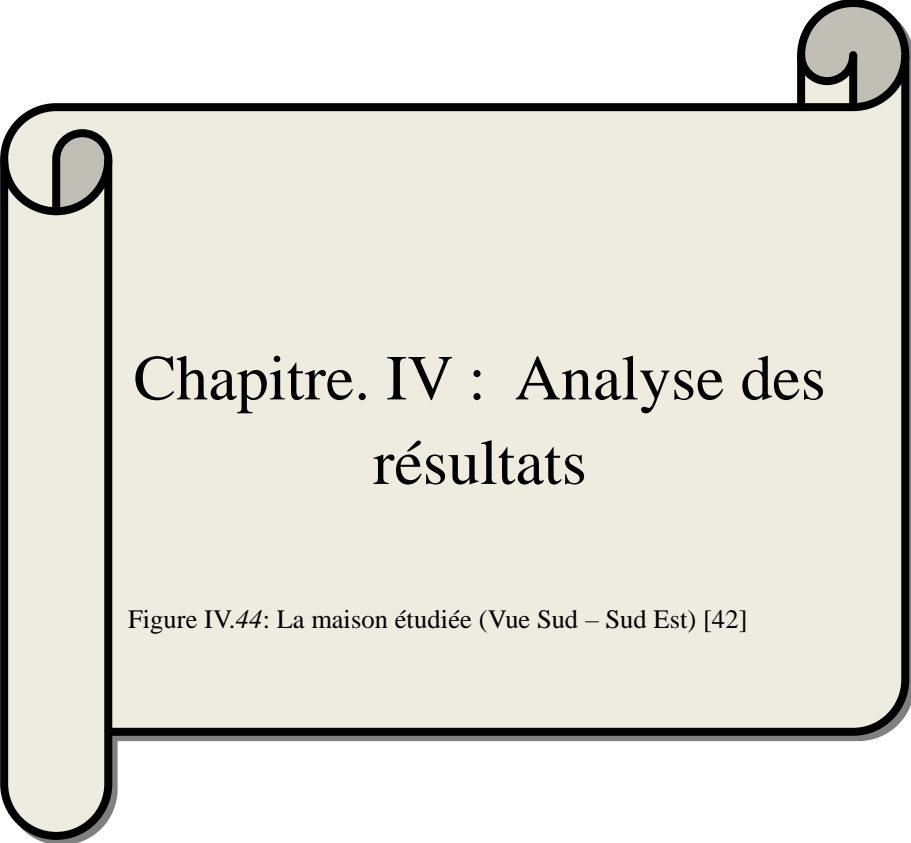
Et une courte durée de refroidissement de juin à septembre dont :

- Pour une température de confort (22°C), $D_j = 195.22$
- Pour une température de confort (25°C), $D_j = 29.86$
- Pour la température de confort calculé pour chaque jour, $D_j = 84$. [41]

III.6. Conclusion

L'examen des résultats issus de l'étude menée sur cette maison démontre de façon évidente que sa conversion en habitat écologique entraîne une réduction significative des déperditions thermiques. L'optimisation de l'isolation, couplée à l'emploi de matériaux écologiques, contribue directement à une diminution de la consommation énergétique.

Cette analyse souligne la pertinence de cette démarche dans notre contexte local, tant en matière d'efficacité énergétique que de préservation de l'environnement.



Chapitre. IV : Analyse des résultats

Figure IV.44: La maison étudiée (Vue Sud – Sud Est) [42]

IV.1 Introduction :

Ce chapitre présente et analyse les résultats de la réhabilitation énergétique d'un bâtiment ancien à Tlemcen, grâce à l'utilisation de matériaux isolants écologiques. Après un rappel des caractéristiques initiales de la maison, nous exposons les solutions techniques appliquées, en insistant sur l'impact de l'isolation sur les performances thermiques. L'objectif est d'évaluer l'efficacité des travaux sur les plans énergétique, économique et environnemental, afin d'en tirer des conclusions utiles pour d'autres projets de rénovation durable.

IV.2. Description de la Maison

La maison étudiée est implantée à Tlemcen, dans l'ouest algérien. Ce bâtiment de 100 m² de superficie s'élève sur trois niveaux (R+2), comme le montre la Figure 8. Au rez-de-chaussée se trouvent un hall d'entrée, un garage, un salon et une salle de bain. Le premier étage comprend un salon, une cuisine, un petit hall et une salle d'eau réduite. Le second étage abrite quant à lui trois chambres à coucher, un hall et une salle de bain complète, avec les surfaces détaillées sur la Figure 45.

L'architecture du bâtiment a été conçue selon des principes bioclimatiques, avec une orientation privilégiée des pièces de vie au sud-est et sud-ouest pour maximiser les apports solaires. D'un point de vue technique, les murs extérieurs présentent une double paroi en briques de 30 cm d'épaisseur (coefficient de transmission thermique $U = 3,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), tandis que les cloisons intérieures utilisent des briques simples de 13 cm. La dalle en béton fait 20 cm d'épaisseur ($U = 4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Les ouvertures comprennent des fenêtres en simple vitrage, des portes intérieures en bois ($U = 2,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) et des portes extérieures en fer ($U = 5,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), complétant cette configuration constructive traditionnelle mais partiellement optimisée pour le confort thermique.

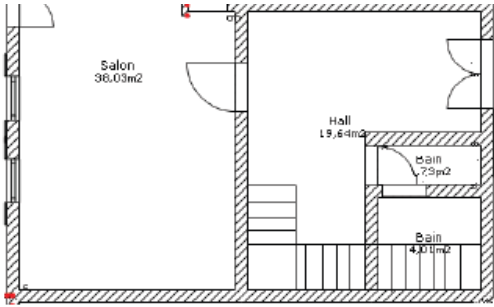


Figure IV.44: La maison étudiée (Vue Sud – Sud Est) [42]

Figure IV.44: La maison étudiée (Vue Sud – Sud Est) [42]

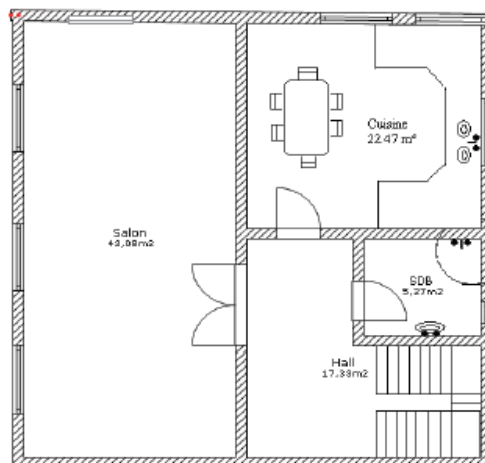
Figure IV.44: La maison étudiée (Vue Sud – Sud Est) [42]

Figure IV.44: La maison étudiée (Vue Sud – Sud Est) [42]

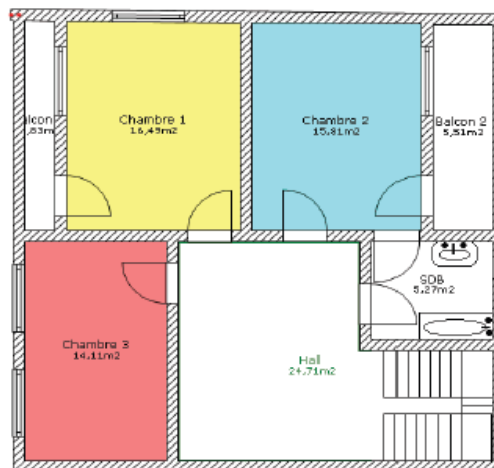


Rez-de-chaussée

Chapitre. IV : Analyse des résultats



1er Etage



Second Etage

Figure IV.45: Plans de la maison étudiée [42]

Tableau IV. 57: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment
Figure IV.45: Plans de la maison étudiée [42]

Tableau IV. 58: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment

Tableau IV. 59: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment
Figure IV.45: Plans de la maison étudiée [42]

Tableau IV. 60: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment
Figure IV.45: Plans de la maison étudiée [42]

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Le tableau 9 présente une synthèse des déperditions thermiques pour chaque composant du bâtiment. Ce calcul intègre systématiquement trois paramètres clés : la superficie des différentes pièces, le périmètre des murs, ainsi que les coefficients de transmission thermique (U) spécifiques à chaque élément constructif. Cette analyse détaillée permet une évaluation précise des performances énergétiques de l'ensemble de la structure.

Tableau IV. 61: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment

Tableau IV. 62: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment

Tableau IV. 63: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment

Tableau IV. 64: Total des déperditions d'énergie dans le bâtiment

Hall	S	52.11 - 9		9	19.64	
	U.S	150.885	-	37.35	78.56	251.94
Bain	S	11.8 – 1.8	-	1.8	6.74	
	U.S	35	-	4.5	26.96	66.46
1 ^{er} étage						
Cuisine	S	19.6-6.3	4.5	1.8	22.47	
	U.S	46.55	11.25	4.5	89.88	167.03
Salon	S	78.84 – 12.6	9	3.6	38.03	
	U.S	231.84	22.5	9	152.12	445.16
SDB	S	24.84-2.05	0.25	1.8	5.27	
	U.S	79.765	0.107	4.5	21.08	106.795
Hall	S	54 – 7.2	-	7.2	17.33	
	U.S	163.8	-	18	69.32	251.12
2 ^{ème} étage						
Chambre 1	S	45.9-8.1	4.5	3.6	16.49	
	U.S	132.3	11.25	14.94	65.96	233.36
Chambre 2	S	45.36-7.65	2.25	5.4	15.81	
	U.S	131.985	0.97	19.44	63.24	239.595
Chambre 3	S	43.74-6.3	4.5	1.8	14.11	
	U.S	93.6	11.25	8.04	56.44	186.58
Hall	S	63.72-7.2	-	7.2	24.71	
	U.S	197.82	-	18	98.84	338.42
SDB	S	24.48-3.85	0.25	3.6	5.27	
	U.S	72.205	0.107	9	21.08	115.615
		1718.16	74.38	227.4	980.6	3000.205 W°C

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Dans ces conditions, la somme totale des déperditions (pour $\Delta T=1^\circ\text{C}$) du bâtiment est de

$P = 3000.205 \text{ W}/^\circ\text{C}$, où le coefficient G de déperdition volumique vaut :

$$G = \frac{P}{V_H} = 3.07(\text{w}/\text{m}^3\text{C}) \quad (13)$$

Même si les exigences thermiques des occupants sont complexes à prendre en compte, une question essentielle se pose : sont-ils prêts à limiter l'usage de certaines pièces en hiver pour réduire les besoins en chauffage, ou en été pour minimiser l'usage de la climatisation ? En tenant compte de ces considérations, l'évaluation des besoins énergétiques peut être réalisée selon les critères suivants :

$$C = 24 \times G \times V_h \times D_j \quad (14)$$

Les besoins annuels en chauffage

- Pour une température de confort de 15°C , d'octobre à mai : $D_j = 402.04$

Soit $C = 28948.85 \text{ KWh}$ ($96.49 \text{ KWh}/\text{m}^2$) équivalent à une facture électrique de 22720 DA,

TTC, à raison de 7573.33 DA par trimestre.

- Pour une température de confort de 18°C , de novembre à mai : $D_j = 880.16$

Soit $C = 63375.85 \text{ KWh}$ ($211.25 \text{ KWh}/\text{m}^2$) équivalent à 25039 DA, TTC, à raison de 8346.33

DA par trimestre.

- Pour la température de confort calculée T_c , d'octobre à mai : $D_j = 1052$

Soit $C = 75749.17 \text{ KWh}$ ($252.49 \text{ KWh}/\text{m}^2$), équivalent 26875 DA, TTC, à raison de 8960 DA par trimestre.

Les besoins annuels en climatisation :

- Pour une température de confort de 22°C , de juin à septembre : $D_j = 195.22$

Soit $C = 14471 \text{ KWh}$ ($48.23 \text{ KWh}/\text{m}^2$) équivalent 5427 DA, TTC, par trimestre.

- Pour une température de confort de 25°C , de juin à septembre : $D_j = 29.86$

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Soit $C = 2216$ KWh (7.38 KWh/m²) équivalent 1936.50 DA, TTC, par trimestre.

- Pour la température de confort calculée T_c , de juin à septembre : $D_j = 84$

Soit $C = 6233.88$ KWh (20.78 KWh/m²) équivalent 3650 DA, TTC, par trimestre

IV.2.1. Stratégie d'isolation écologique appliquée à l'étage supérieur

Cette rénovation se concentre sur le deuxième étage d'une maison à deux niveaux, conformément à l'étude initiale. L'objectif est de limiter les pertes thermiques significatives dues à des parois insuffisamment isolées et composées de matériaux peu performants sur le plan énergétique.

L'intervention vise à renforcer l'efficacité énergétique du bâtiment en remplaçant ou en améliorant les éléments existants par des matériaux isolants écologiques, notamment la laine de bois. Ce matériau a été choisi pour ses propriétés thermiques optimales, sa capacité à réguler l'humidité et son faible impact sur l'environnement.

L'isolation intérieure a été réalisée avec des panneaux semi-rigides, tandis que les murs extérieurs et la toiture-terrasse ont été protégés avec des panneaux rigides en laine de bois, adaptés aux contraintes spécifiques de chaque surface. Pour assurer une étanchéité efficace, la toiture a également été dotée d'une membrane conforme aux normes techniques des toitures-terrasses.

En complément, les fenêtres à simple vitrage ont été remplacées par des modèles à double vitrage, et les portes existantes ont été substituées par des portes en bois massif, afin de réduire davantage les pertes thermiques.

L'impact de ces améliorations sera évalué en comparant les déperditions thermiques relevées avant la réhabilitation (présentées dans le tableau initial) avec les performances obtenues après la mise en œuvre des solutions écologiques.

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Tableau IV. 65: Total des déperditions d'énergie dans le deuxième étage

2 ^{ème} étage						
Déperditions	Murs		Fenêtres	Portes	Plafond	Total des déperditions
Coefficient U (W/m ² . K)	3.5		2.5	2.5/5.8	4	
Chambre 1	S	45.9 – 8.1	4.5	3.6	16.49	
	S. U	132.3	11.25	14.94	65.96	224.45
Chambre 2	S	45.36- 7.67	2.25	5.4	15.81	
	S. U	131.985	0.97	19.44	63.24	215.635
Chambre 3	S	43.74-6.3	4.5	1.8	14.11	
	S. U	93.6	11.25	8.04	56.44	169.33
Hall	S	63.72-7.2	-	7.2	24.71	
	S. U	197.82		18	98.84	314.66
SDB	S	24.48-3.85	0.25	3.6	5.27	
	S. U	72.205	0.107	9	21.08	102.392
La Somme						1026.467

IV.2.2. La mise en œuvre

- ❖ Pour isoler les murs extérieur et intérieur, nous avons posé des panneaux de laine de bois, en suivant ces étapes :

Préparation

- Nettoyage du mur + pose d'un rail à 20 cm du sol

Pose

- Collage (enduit respirant) + chevillage
- Jeu de 2-3 mm entre panneaux [42]

Figure IV46: Système d'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) avec Panneaux en laine de Bois

Figure IV.47: Maison à Tlemcen après la mise en œuvre
Figure IV46: Système d'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) avec Panneaux en laine de Bois

Figure IV.47: Maison à Tlemcen après la mise en œuvre

Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]
Figure IV.47: Maison à Tlemcen après la mise en œuvre
Figure IV46: Système d'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) avec Panneaux en laine de Bois

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Finitions

- Masticage des joints (>2 mm)
- 2 couches d'enduit à la chaux (avec trame en fibre de verre)
- Peinture à la chaux pour finir

Points clés :

- Pas de produits étanches (pour laisser respirer la laine de bois)
- Traitement des ponts thermiques aux jonctions. [42]

Comme en témoigne cette image de notre intervention, chaque étape a été soigneusement exécutée pour préserver les qualités naturelles de l'isolant.



Figure IV.47: Maison à Tlemcen après la mise en œuvre

IV.2.2.1. l'isolation support enduit :

Encore une fois, intérêt à choisir de bois avec le (0,038 m².K/W), maximum

Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]Figure IV.47: Maison à Tlemcen après la mise en œuvre

Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]

Figure IV.49: Toiture terrassé de la maison [42]Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]Figure IV.47: Maison à Tlemcen après la mise en œuvre


Réalisation de intérieure avec

nous avons tout les panneaux de fibre meilleur lambda afin de limiter au l'épaisseur de l'isolant

Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]Figure IV.47: Maison à Tlemcen après la mise en œuvre

Chapitre. IV : Analyse des résultats

pour ne pas trop empiéter sur l'espace de vie. Nous compterons au minimum 14 cm pour une

Caractéristiques Techniques				Pouvoir Isolant		Confort d'été	
	Nom	Marque	Épaisseur - cm	R - m ² .K/W		Ossature ou Parpaing	Brique
	Flex 55	Isonat	14.5	4	+	Insuffisant	Très bon
	Thermoflex	Gutex		4			
	Thermoflex	Gutex	16	4.4	++	Minimum	
	Flex 55	Isonat	16	4.4			

isolation efficace en hiver. [43]

Tableau IV.66: Caractéristique de l'isolant [43]

Pour le murs par chevillage de semi-rigides bois avant finition. est adaptée



doublage de collage et/ou panneaux de laine de enduit de Cette solution aux bâtiments

existants lorsqu'une isolation extérieure n'est pas envisageable, qu'on ne recherche pas une inertie par les murs et que la surface du mur est relativement plate. [43]

Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]

Figure IV.49: Toiture terrassé de la maison [42]Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]

Figure IV.49: Toiture terrassé de la maison [42]

Figure IV.50: Double vitrage de rénovationFigure IV.49: Toiture terrassé de la maison [42]Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]

Figure IV.49: Toiture terrassé de la maison [42]Figure IV.48: Panneaux laine de bois à enduire pour isolation murs intérieurs [42]

Chapitre. IV : Analyse des résultats

IV.2.2.2. Isolation thermique de la toiture terrasse :

Nous avons isolé notre toit en béton par l'extérieur avec de la laine de bois.

Préparation :

- Nettoyage de la
- Vérification de la

Pose de l'isolant :

- Pose de panneaux de 18 cm
- Fixation avec chevilles [42]



dalle béton
pente

de laine de bois

colle et

Protection :

- Mise en place d'une membrane d'étanchéité
- Ajout d'une dalle de protection. [42]

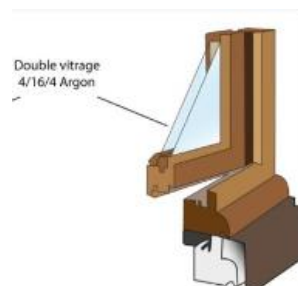


Figure IV.49: Toiture terrassé de la maison [42]

IV.2.2.3. Fenêtre

double vitrage

Nous avons remplacé nos anciennes fenêtres en simple vitrage par du double vitrage. Cette amélioration permet un meilleur confort thermique, supprime les problèmes de condensation et améliore l'isolation acoustique [44]

Figure IV.50: Double vitrage de rénovation

IV.2.2.4. Changement de

On a remplacé les anciennes en bois massif présentant ces techniques :

- Isolation : $\lambda = 0,13$
- Épaisseur : 45 mm

Figure IV.51: Ventilation douce (naturelle). [44]Figure IV.50: Double vitrage de rénovation

Figure IV.51: Ventilation douce (naturelle). [44]

Figure IV.52 : La consommation annuelle du chauffage pour la saison d'hiver avant et après isolationFigure IV.51: Ventilation douce (naturelle). [44]Figure IV.50: Double vitrage de rénovation

Figure IV.51: Ventilation douce (naturelle). [44]Figure IV.50: Double vitrage de rénovation

porte

portes par des portes caractéristiques

W/(m·K)

IV.2.3. Ventilation naturelle

Une ventilation douce a été sélectionnée pour ce projet, car, même si la ventilation est impérative pour maintenir une ambiance saine (évacuer la vapeur d'eau et l'air pollué ou vicié produit par les occupants, la cuisine, les appareils sanitaires et ménagers) et aussi éviter les condensations, les odeurs et les dégradations ; la ventilation peut devenir une réelle source de déperditions ou apports thermiques. [44]



Figure IV.51: Ventilation douce (naturelle). [44]

Figure IV.52 : La consommation annuelle du chauffage pour la saison d'hiver avant et après isolation

Figure IV.52 : La consommation annuelle du chauffage pour la saison d'hiver avant et après isolation

Murs

vité

Figure IV.53 : La consommation annuelle de la climatisation pour la saison d'été avant et après isolation

Figure IV.52 : La consommation annuelle du chauffage pour la saison d'hiver avant et après isolation

eurs + l'isolant

**IV.3.
Résultats et discussions**

Composition des murs extérieurs

Tableau 67: caractéristique des murs ITE

Chapitre. IV : Analyse des résultats

	construction		thermique W/(m·K)
1	Brique	0.13	0.48
2	Lame d'air	0.04	0.026
3	Brique	0.13	0.48
4	L'aine de bois (rigide)	0.16	0,036

IV.3.1. Coefficient de transmission surfacique

Dans le cas d'un mur séparant deux ambiances internes le coefficient (K) est donné par la formule :

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{e}{\lambda}} \quad (15)$$

- R : Résistance thermique. [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]
- $\sum R$: Représente la somme des résistances thermiques des différentes couches de matériaux constituant la paroi.
- e : épaisseur du matériau exprimée en mètre.
- $\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$ Représente la somme des coefficients d'échanges superficiels, prise conformément

Tableau IV.68: caractéristique des murs ITI

aux conventions adoptées.

$$\frac{1}{h_i} = 0.11 [m^2 \cdot ^\circ C/W] ; \frac{1}{h_e} = 0.06 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$$

$$k_2 = \frac{1}{0.11 + 0.06 + \frac{2 \times 0.13}{0.48} + \frac{0.04}{0.026} + \frac{0.16}{0.036}}$$

$$k_2 = 0.149 \text{ W} / m^2 \text{ k}$$

- ✚ Le coefficient $K_1 = 3,5 \text{ W} / m^2 \text{ k}$ avant isolation devient $K_2 = 0,149 \text{ W} / m^2 \text{ k}$ après travaux, avec $K_2 < K_1$, ce qui confirme l'amélioration thermique.

Composition des murs intérieur + l'isolant

Chapitre. IV : Analyse des résultats

$$1/h_i = 0.11 [m^2 \cdot ^\circ C/W] ; 1/h_e = 0.11 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$$

$$k_2 = \frac{1}{0.11 + 0.11 + \frac{0.13}{1.66} + \frac{0.16}{0.038}}$$

$$k_2 = 0.212 \text{ W / m}^2 \text{ k}$$

✚ Les déperditions thermiques ont été réduites par l'isolation intérieure, avec un coefficient $K = 0,212 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, marquant une nette amélioration de la performance thermique.

Composition de la dalle

Tableau IV.69: Caractéristique du Béton

La dalle	Matériaux de construction	Epaisseur (m)	Conductivité thermique $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
1	Béton	0.20	1.66
2	L'aine de bois (rigide)	0.16	0.036

$$1/h_i = 0.09 [m^2 \cdot ^\circ C/W] ; 1/h_e = 0.05 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$$

Murs intérieur	Matériaux de construction	Epaisseur (m)	Conductivité thermique $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
1	Brique	0.13	0.48
2	L'aine de bois (semi rigide)	0.16	0.038

$$k_2 = \frac{1}{0.09 + 0.05 + \frac{0.20}{1.66} + \frac{0.16}{0.038}}$$

$$k_2 = 0.213 \text{ W / m}^2 \text{ k}$$

Composition fenêtre double vitrage

Tableau IV.70: Caractéristique des fenêtres

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Fenêtre double vitrage	Matériaux de construction	Epaisseur (m)	Conductivité thermique W/(m·K)
1	Verre	0.004	1
2	Lame d'air	0.016	0.024
3	Verre	0.004	1

$$1/h_i = 0.125 [m^2 \cdot ^\circ C/W] ; 1/h_e = 0.04 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$$

$$k_2 = \frac{1}{0.125 + 0.04 + \frac{0.016}{0.024} + 2 \times 0.004}$$

$$k_2 = 1.191 \text{ W} / m^2 \text{ k}$$

$$K_2 = 1.19 \text{ W} / m^2 \text{ k} < K_1 = 2.5 \text{ W} / m^2 \text{ k}$$

Composition de la Porte

Tableau IV.71: Caractéristique des portes

Fenêtre double vitrage	Matériaux de construction	Epaisseur (m)	Conductivité thermique W/(m·K)
1	Bois massif	0.045	0.13

$$1/h_i = 0.11 [m^2 \cdot ^\circ C/W] ; 1/h_e = 0.06 [m^2 \cdot ^\circ C/W]$$

$$k_2 = \frac{1}{0.11 + 0.06 + \frac{0.045}{0.13}}$$

$$k_2 = 1.937 \text{ W} / m^2 \text{ k}$$

	2^{ème} Étage
--	------------------------------

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Dépériditions	Murs ITE		Murs ITI	Fenêtres Double vitrage	Portes Bois massif	Plafond	Total des déperditions
Tableau IV. 72: Total des déperditions d'énergie dans le deuxième étage après isolation							
Coefficient U (W/m². K)		0.149	0.212	1.191	1.937	0.213	
Chambre 1	S	45.9 – 8.1	45.9 -8.1	4.5	3.6	16.49	
	S. u	5.632	8.013	5.360	6.973	3.512	29.49
Chambre 2	S	45.36 -7.67	45.36 -7.67	2.25	5.4	15.81	
	S. u	5.615	7.990	2.679	10.459	3.368	30.111
Chambre 3	S	43.74 -6.3	43.74 -6.3	4.5	1.8	14.11	
	S. u	5.579	7.937	5.360	3.486	3.00	25.362
Hall	S	63.72 -7.2	63.72 -7.2	-	7.2	24.71	
	S. u	8.421	11.982	-	13.946	5.263	39.612
SDB	S	24.48 -3.85	24.48 -3.85	0.25	3.6	5.27	
	S. u	3.073	4.374	0.297	6.973	1.122	15.839
La somme		92.052	30.975	13.685	41.688	16.041	140.414

Dans ces conditions, la somme totale des déperditions (pour $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$) du bâtiment est de

$P = 140.414 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$, où le coefficient G de déperdition volumique vaut :

$$G = \frac{P}{V_H} = 0.432 \quad (w/m^3 \text{ } ^\circ C) \quad (13)$$

Même s'il est plus complexe de considérer les besoins thermiques des occupants, ceux-ci seraient-ils prêts à renoncer à l'utilisation de certaines pièces en hiver (pour limiter le chauffage) ou en été (pour réduire la climatisation) ? Dans cette optique, une estimation des besoins peut être établie comme suit :

$$C = 24 \times G \times V_h \times D_j \quad (14)$$

$$C = 1354.71 \text{ KWh}$$

+ Les besoins annuels en chauffage varient en fonction de la température de confort choisie :

Mais avant de procéder au calcul des besoins - avant et après réhabilitation - il est important de préciser que le coût de l'électricité est réparti en quatre tranches, comme l'indique le tableau suivant :

$$TTC = HT + (HT \times TVA) \quad (15)$$

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Tableau IV. 73: Consommation d'énergie après isolation

Tranche De consommation	Quantité (KWh)		Prix unitaire (DA / KWh)	Total HT (DA)	TVA (%)	Montant TVA (DA)	Total TTC (DA)
0 – 125 kWh	125		1.7787	222.34	9%	20.01	242.35
125 – 250 kWh	125		4.1789	522.36	9%	47.01	569.37
250 – 1000 kWh	750		4.8120	3609.00	19%	685.71	4294.71
> 1000 kWh	15 °C	354.71	5.4796	1944.36	19%	369.43	2313.79
Total			-		-		7420.22
	18°C	1965.585	5.4796	10770.620	19%	2046.417	12817.037
Total							17923.467
	Tc	2544.819	5.4796	13944.590	19%	2649.472	16594.062
Total							21700.492
	22°C	6.578	5.4796	36.044	19%	6.848	42.892
Total							5149.322
	25°C	899.384	5.4796	4928.265	19%	936.370	5864.635
Total							10971.065
	Tc	716.954	5.4796	3928.621	19%	746.438	4675.059
Total							9781.489

- ❖ Pour une température de confort de 15 °C, d'octobre à mai : Dj = 402.04
Soit C = **1354,71** kWh (soit 13.547 kWh/m² selon la surface utilisée), équivalant à une facture électrique de 7420,22 DA TTC, à raison de 1855,05 DA par trimestre.
- ❖ Pour une température de confort de 18°C, de novembre à mai : Dj = 880.1

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Soit $C = 2965.585$ kWh (soit 29.655 kWh/m² selon la surface utilisée), équivalant à une facture électrique de 17923.467 DA TTC, à raison de 4480.866 DA par trimestre.

- ❖ Pour la température de confort calculée T_c , d'octobre à mai : $D_j = 1052$

Soit $C = 3545.819$ KWh (17.05 KWh/m²), équivalent 21700.492 DA, TTC, à raison de 5425.123 DA par trimestre.

✚ Les besoins annuels en climatisation :

- ❖ Pour une température de confort de 22°C, de juin à septembre : $D_j = 195.22$

Soit $C = 657.813$ KWh (6.578 KWh/m²) équivalent 1287.331 DA, TTC, par trimestre.

- ❖ Pour une température de confort de 25°C, de juin à septembre : $D_j = 29.86$

Soit $C = 100.616$ KWh (0.48 KWh/m²) équivalent 2742.766 DA, TTC, par trimestre.

- ❖ Pour la température de confort calculée T_c , de juin à septembre : $D_j = 84$

Soit $C = 283.046$ KWh (2.830 KWh/m²) équivalent 2445.372 DA, TTC, par trimestre

Avant isolation

Le tableau obtenu avant isolation se trouve page 79. Le même calcul s'effectue ensuite

$$G = \frac{P}{V_H} = 3.15 \quad (w/m^3 \cdot C)$$

Chapitre. IV : Analyse des résultats

- ✚ Les besoins annuels en chauffage et en climatisation dépendent de la température de confort sélectionnée :

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

$$C = 9878.122 \text{ KWh}$$

Tableau IV. 74: Consommation d'énergie avant isolation

Tranche De consommation	Quantité (KWh)	Prix unitaire (DA / KWh)	Total HT (DA)	TVA (%)	Montant TVA (DA)	Total TTC (DA)	
0 – 125 kWh	125	1.7787	222.34	9%	20.01	242.35	
125 – 250 kWh	125	4.1789	522.36	9%	47.01	569.37	
250 – 1000 kWh	750	4.8120	3609.00	19%	685.71	4294.71	
> 1000 kWh	15 °C	9878.122	5.4796	54128.157	19%	284885.036	64412.506
Total		-				69518.936	
	18°C	20624.057	5.4796	113011.582	19%	21472.201	134483.782
Total						139590.212	
	Tc	25847.64	5.4796	141634.726	19%	745445.926	168545.324
Total						173651.754	
	22°C	4796.555	5.4796	26283.202	19%	138332.642	31277.010
Total						36383.44	
	25°C	733.660	5.4796	4020.163	19%	21158.752	4783.993
Total						9890.423	
	Tc	2063.88	5.4796	11309.236	19%	59522.294	13457.990
Total						18564.42	

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Les besoins annuels en chauffage

Pour une température de confort de 15°C, d'octobre à mai : $D_j = 402.04$

Soit $C = 9878.12$ KWh (98.78 KWh/m²), équivalent à une facture électrique de 62998.12 DA TTC, à raison de 15749.53 DA par trimestre.

Pour une température de confort de 18°C, de novembre à mai : $D_j = 880.16$

Soit $C = 21625.53$ KWh (216.26 KWh/m²), équivalent à 139530.212 DA TTC, à raison de 34897.553 DA par trimestre.

Pour la température de confort calculée T_c , d'octobre à mai : $D_j = 1052$

Soit $C = 25847.64$ KWh (258.48 KWh/m²), équivalent à 173651.754 DA TTC, à raison de 43412.939 DA par trimestre.

Les besoins annuels en climatisation

Pour une température de confort de 22°C, de juin à septembre : $D_j = 195.22$

Soit $C = 4796.56$ KWh (47.97 KWh/m²), équivalent à 9095.86 DA TTC, par trimestre.

Pour une température de confort de 25°C, de juin à septembre : $D_j = 29.86$

Soit $C = 733.66$ KWh (7.34 KWh/m²), équivalent à 2472.605 DA TTC, par trimestre.

Pour la température de confort calculée T_c , de juin à septembre : $D_j = 84$

Soit $C = 2063.88$ KWh (20.64 KWh/m²), équivalent à 4641.105 DA TTC, par trimestre.

Chapitre. IV : Analyse des résultats

Tableau IV. 75: comparaison avant et après isolation

Aspect	Avant isolation	Après isolation	Observation / Bilan
Consommation chauffage	Élevée (jusqu'à 25 847,64 kWh/an)	Très réduite (env. 3 544,82 kWh/an)	Économie d'énergie de 86 % grâce à l'isolation thermique
Consommation climatisation	Élevée (jusqu'à 4 796,56 kWh/an)	Très réduite (env. 657,81 kWh/an)	Économie similaire (86 %) en été, amélioration du confort thermique
Facture énergétique	Coût élevé (chauffage + climatisation)	Coût réduit de manière significative	Économies financières importantes sur les factures annuelles
Confort thermique	Inconfort en hiver (parois froides) et en été (surchauffe)	Température intérieure stable, meilleure régulation hiver/été	Amélioration notable du confort intérieur
Impact environnemental	Fort (surconsommation d'énergie, émissions de CO ₂)	Réduit (moins de consommation, matériaux écologiques)	Réduction de l'empreinte carbone du bâtiment
Performance thermique	Mauvaise (déperditions par les murs, toiture, fenêtres...)	Excellente (limitation des pertes thermiques, inertie améliorée)	Isolation écologique efficace et adaptée au bâti ancien
Durabilité du bâtiment	Faible résistance aux variations climatiques	Amélioration de la durabilité et de la valeur patrimoniale	Réhabilitation durable et valorisation du patrimoine bâti

Chapitre. IV : Analyse des résultats

IV.4. La consommation annuelle du chauffage et du climatisation à Tc

Tableau IV. 76: La consommation du chauffage saison d'hiver

Consommation d'énergie avant et après isolation	
L'ancienne consommation hiver	Novelle consommation hiver
25847.64	3545.819

Pour chauffage

- ❖ L'histogramme schématise la consommation annuelle du chauffage en hiver.

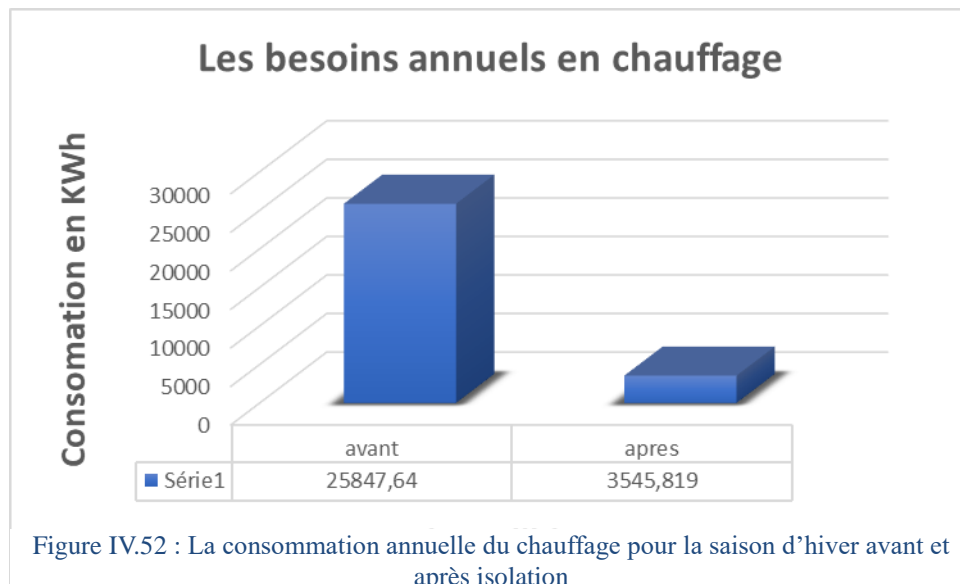


Figure IV.53 : La consommation annuelle de la climatisation pour la saison d'été avant et après isolation

Figure IV.53 : La consommation annuelle de la climatisation pour la saison d'été avant et après isolation

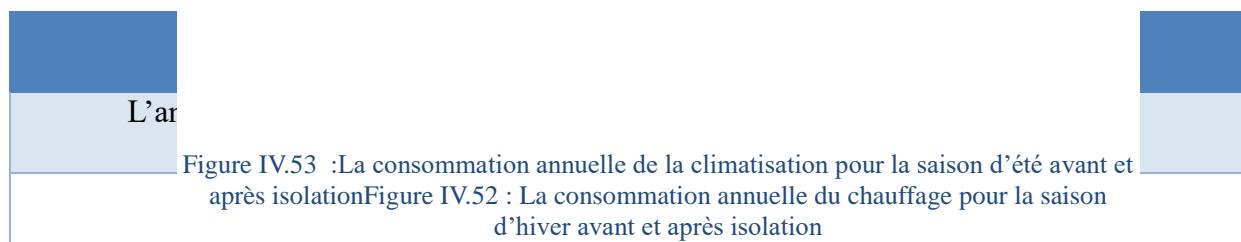


Figure IV.53 : La consommation annuelle de la climatisation pour la saison d'été avant et après isolation

IV.4.1. Pour climatisation

Chapitre. IV : Analyse des résultats

❖ L'histogramme schématise la consommation annuelle de la climatisation en été.

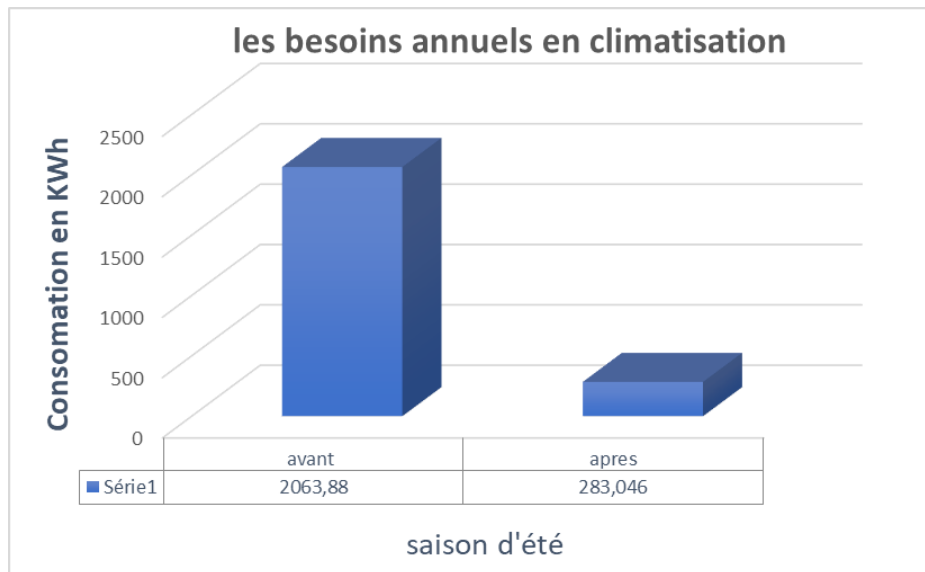


Figure IV.53 : La consommation annuelle de la climatisation pour la saison d'été avant et après isolation

IV.4.2. Le cout de consommation annuel en chauffage

Tableau IV. 78: le cout annuel du chauffage saison d'hiver

Consommation d'énergie avant et après isolation	
L'ancien cout hiver (DA)	Nouveau cout hiver (DA)
43412.939	5425.123



Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été Figure IV.54: le cout annuel en climatisation saison d'hiver

Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été

Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été Figure IV.54: le cout annuel en climatisation saison d'hiver

Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été Figure IV.54: le cout annuel en climatisation saison d'hiver

Chapitre. IV : Analyse des résultats

IV.4.3. Le cout de consommation annuel en climatisation

Tableau IV. 79: le cout annuel en climatisation saison d'été

Consommation d'énergie avant et après isolation	
L'ancien cout été (DA)	Nouveau cout été (DA)
4641.105	2445.372

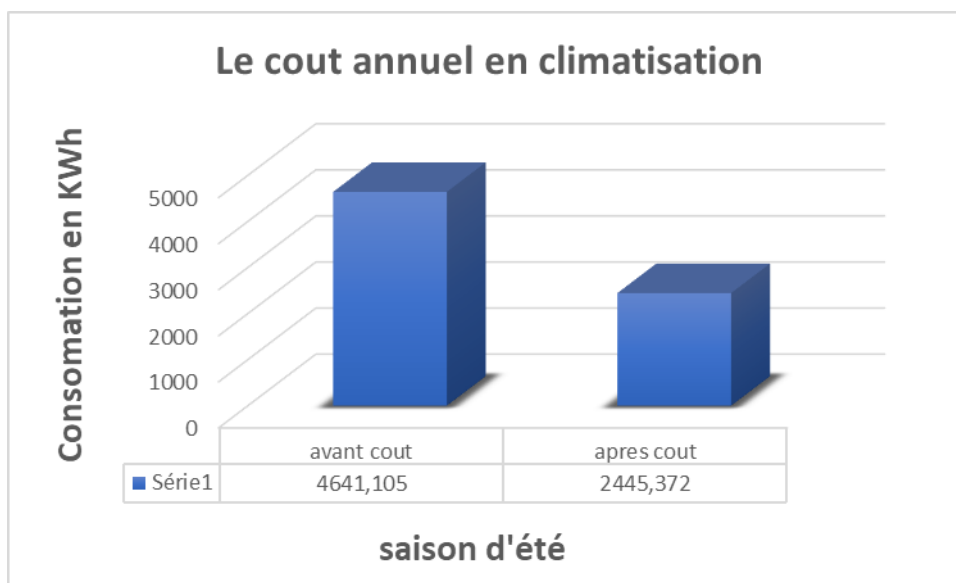


Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été

Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été

Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été

Figure IV.55: le cout annuel en climatisation saison d'été

IV.5 Conclusion

L'étude des résultats obtenus après l'installation des isolants écologiques révèle une nette amélioration des performances énergétiques du bâtiment. La diminution des déperditions thermiques, la baisse significative de la consommation d'énergie en toutes saisons, ainsi que

Chapitre. IV : Analyse des résultats

la réduction des dépenses liées au chauffage et à la climatisation attestent de l'efficacité des matériaux choisis, en particulier la laine de bois et le double vitrage. De plus, l'amélioration du confort thermique et la réduction de l'impact carbone mettent en lumière les avantages à la fois écologiques et socio-économiques de cette approche. Ces conclusions confirment la validité de la méthode employée et encouragent son extension à d'autres projets de rénovation dans la région.

Conclusion générale

Conclusion générale

La rénovation énergétique du bâti ancien s'impose comme un enjeu clé pour concilier transition écologique, efficacité énergétique et sauvegarde du patrimoine. Ce mémoire en apporte la preuve tangible : l'utilisation d'isolants écologiques se révèle une solution optimale, alliant performance technique et faible impact environnemental, comme en témoignent les résultats chiffrés de cette étude.

L'analyse détaillée du cas d'étude a permis d'identifier les faiblesses thermiques initiales du bâtiment et de quantifier les progrès accomplis après rénovation. Les chiffres parlent d'eux-mêmes : isolation renforcée, besoins énergétiques réduits et confort accru. La combinaison de matériaux biosourcés (laine de bois), de principes bioclimatiques et de techniques passives a fait ses preuves, démontrant qu'excellence énergétique et préservation architecturale sont parfaitement compatibles.

Plus qu'une simple amélioration technique, cette approche incarne une réhabilitation holistique où s'entremêlent bénéfices écologiques (baisse des émissions), avantages socio-économiques (qualité de vie améliorée, coûts maîtrisés) et valorisation des ressources locales.

Cette étude ouvre ainsi la voie à une généralisation de ces méthodes, particulièrement dans les zones climatiques sensibles. Elle prouve qu'innovation responsable et respect du bâti traditionnel peuvent – et doivent – aller de pair pour répondre aux défis énergétiques contemporains.

Bibliographie

- [1] David FEDULLO, Thierry GALLAUZIAUX, « L'isolation thermique », 2^{ème} édition, Eyrolles, 2011.
- [2] Penu GINA, « La thermique du bâtiment », 2^{ème} édition, DUNOD, Paris 2015.
- [3] CREBA, « Rénovation du bâti ancien en Ariège : isoler, respecter, valoriser », Centre de ressources pour la réhabilitation responsable du bâti ancien, France.
- [4] O. Sidler, « Rénovation à basse consommation d'énergie ; énergie des logements en France, » 2007.
- [5] Maisons Paysannes de France, « Comprendre le comportement thermique du bâti ancien », France.
- [6] P. ATHEBA, « Amélioration Thermique du Bâti Ancien, » 2010.
- [7] Direction de l'architecture et du patrimoine bâti, « Isolation des façades anciennes », Canton de Vaud, Suisse.
- [8] CREBA, « Guide pour la rénovation énergétique du bâti ancien », Centre de ressources pour la réhabilitation responsable du bâti ancien, France.
- [9] CREBA, « Charte pour une réhabilitation responsable du bâti ancien », France, 2022.
- [10] CREBA, « Connaissance du bâti ancien – CETE Est », France, 2021.
- [11] Action Climatique, « Rénovation énergétique des bâtiments anciens : bonnes pratiques et incitatifs gouvernementaux », France.
- [12] Maquignon Marc, « La ville durable est-elle à la portée des sciences ? », ResearchGate, France, 2019.
- [13] Carbone 4, « Réduction des émissions dans le secteur du bâtiment », France.
- [14] Ministère de la Culture, « Protéger des immeubles au titre des monuments historiques », France.
- [15] CETE Est, Connaissance du bâti ancien, Rapport, Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction, 2007, 72 pages
- [16] de l'Est, C. E. T. E. (2007). Connaissance Des Bâtiments Anciens Economies D'Énergie.

Bibliographie

- [17] Émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie en France - 2006 (source : ADEME)
- [18]. Habitat et développement durable : bilan rétrospectif et prospectif, avril 2001
- [19] Mequignon M., Mignot J.-P., Aissani Y., Teresi L., Ait Haddou H., La ville durable est-elle à la portée des sciences
- [20] Eco-conception dans le bâtiment en 37 fiches outils – évaluation environnementale par la méthodologie d'analyse du cycle de vie, Dunod, coll. Cahiers techniques, Paris, 384 pages, EAN13 : 9782100704156
- [21] ADEME (Agence de l'Énergie, de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie). Les bâtiments : un enjeu prioritaire pour la maîtrise de l'énergie, novembre 2012.
- [22] ADEME, L'isolation thermique – comprendre, agir, économiser, Agence de la transition écologique, 2011. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr>, consulté le 26 mai 2025.
- [23] Carbone 4, Les émissions du bâtiment sont en baisse ! 25 octobre 2024
- [24] ADEME, L'isolation thermique – comprendre, agir, économiser, Agence de la transition écologique, 2011. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr>, consulté le 26 mai 2025.
- [25]. -GALLAUZIAUX, T., DEDULLO, D. L'isolation thermique. Eyrolles, Paris, (2011). 416 pages
- [26] ADEME. (2021). Empreinte projet : évaluer l'empreinte environnementale d'un projet. Agence de la Transition Écologique
- [27] Ministère de la Culture, Protéger des immeubles au titre des monuments historiques
- [28] BENZ24, Matériaux d'isolation écologiques : Vue d'ensemble, comparaison des isolants, coûts, domaines d'application, 2020, 37 pages.
- [29] Améliorez le confort de votre maison - l'isolation thermique, ADEME, 2008
- [30] Bréville, B., & Allacker, K. (2014). Analyse du cycle de vie des bâtiments – Application au secteur du bâtiment. CSTB Éditions.
- [31] Bruxelles Environnement, Isolation thermique et acoustique : opter pour des matériaux sains présentant un écobilan favorable, Info-fiche écoconstructions MAT14, mars 2009, 12 pages.

Bibliographie

- [32] M A Boukli Hacene, N E Chabane Sari, B Benyoucef, S Amara, « L'impact Environnemental d'une Habitation Écologique », Revue des Energies Renouvelables. Vol 13, N°10 ; p 545-559 (2010).
- [33] – Santamouris. M, Asimakopoulos. D, (2001), «Passive cooling of buildings ».
- [34] – Remund. J, Kunz. S, (Novembre 2004), «METEONORM version 5.1, Global meteorological database for applied climatology ».
- [35] –Amara. S, (2009), « Optimisation des apports d'énergies hybrides dans l'habitat économe. Application au site de Tlemcen », Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid -Tlemcen
- [36] Humphreys. M. A, Nicol. J. F, (2002), «The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every day thermal environments», in Energy and Buildings, 34(6), 667-684.
- [37] Nevins. R, Gagge. P, (1972), «The New ASHRAE comfort chart», In ASHRAE Journal, 14, 41-43.
- [38] Fanger. P. O, (1970), «Thermal Comfort», Copenhagen, Danish Technical Press. [39] Humphreys. M. A, (1978), «Outdoor temperatures and comfort indoors in Buildings», Research and Practice, 6(2), 92-105.
- [39] Klarsfeld, A., & De Ponte, J.-C. (2002). Isolation thermique des bâtiments : principes, techniques, performances. Editions Eyrolles.
- [40] O. Humm, «Niedrig Energie Häuser, Theorie und Praxis », Okobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 1990.
- [41] W. Weber, « Soleil et Architecture - Guide Pratique pour les Projets », 3000 Bern, Suisse.
- [42] C. Hamouda A. Malek, « Analyse théorique et expérimentale de la consommation d'énergie d'une habitation individuelle dans la ville de Batna ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°3 (2006) 211 –228.
- [43] Amara. S, Zidani. C, Benaissa. D, Benyarou. F, Benyoucef. B, (2006), « Modélisation des températures diurnes et nocturnes du site de TLEMEN », Physical and Chemical News, Volume 27, 59-64.

Bibliographie

[44] –Amara. S, (2009), « Optimisation des apports d'énergies hybrides dans l'habitat économe ». Application au site de Tlemcen, Thèse de Magister, Université Abou Bakr Belkaid–Tlemcen.