

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° : PH/ ENR/07/2024



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Énergétique et
Energies renouvelables

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : BEN ABDERRAHMANE Fatima Zohra

Intitulé

Etude numérique de l'effet de l'isolation sur le
confort thermique de l'habitat

Soutenu le 29/ 09/2025 devant le jury composé de :

NAHOUI Azzeddine	Dr. Université de M'sila	Président
BEN MANSOUR Nadia	Dr. Université de M'sila	Rapporteur
HADDAD Zakaria	Dr. Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avec l'aide de Dieu tout puissant, j'ai pu accomplir ce modeste travail.

*Je voudrais en tout premier lieu remercier chaleureusement Madame **Nadia BEN MANSOUR** docteur au département de physique, qui a suivi et encadré ce travail et pour ses encouragements et ses remarques pertinentes, c'est bien elle qui a dirigé ce mémoire avec une disponibilité permanente ; elle a guidé mes travaux avec patience tout le long de la préparation.*

*Je remercie vivement les membres de mon jury d'avoir accepté de juger ce travail et en particulier docteur **NAHOUI Azzeddine** et docteur **HADDAD Zakaria**.*

Dédicace

Au profond de mon cœur je dédie ce travail

*À la mémoire de mon père **Ben Abderrahmane El- Hocine**, mon oncle **Mokrani Echikh**, et mon cher professeur **Merzougui Mostafa**.*

À ma mère, mes sœurs et mes frères.

*À mes amis qui m'ont offert leur soutien tout au long de cette période, spécialement **M^{lle} YAHOUI Nour** et **M^{lle} BABI Chaima**.*

Remerciement

Dédicace

Table des matières

Nomenclature I

Liste des Figures III

Liste des Tableaux VI

Introduction Générale

Chapitre I : Fondements Théoriques de l'Isolation Thermique et du Confort des Bâtiments

I.1	Introduction	5
I.2	Confort thermique	5
I.2.1	Définition	5
I.2.2	Paramètres affectant le confort thermique	5
I.3	Isolation thermique	7
I.3.1	Définition	7
I.3.2	Principaux critères thermiques	7
I.3.2.1	Modes de transfert de chaleur dans une paroi	7
I.3.2.2	Caractéristiques principales de l'isolation thermique	10
I.4	Matériaux d'isolation thermique	13
I.4.1	Propriétés et performances d'un matériau isolant	13
I.4.2	Classification des matériaux d'isolation thermique	14
I.4.2.1	Matériaux d'isolation thermique conventionnels	14
I.4.2.2	Matériaux d'isolation thermique biosourcés	16
I.4.2.3	Super-isolants	20
I.5	Placement des isolants	22
I.5.1	Isolation thermique intérieure	22
I.5.2	Isolation thermique extérieure	22
I.5.3	Isolation intégrée au matériau porteur (isolation répartie)	22
I.6	Problèmes de l'isolation thermique	23
I.6.1	Ponts thermiques	23
I.6.1.1	Définition d'un pont thermique	23
I.6.1.2	Types de pont thermique	23
I.6.2	Condensation	24
I.7	Avantages d'isolation thermique	24
I.8	Conclusion	25

Chapitre II : Techniques et Solutions de l'Isolation Thermique

II.1	Introduction	27
------	--------------	----

II.2	<i>Méthodes d'isolation thermique</i>	27
II.2.1	<i>Murs</i>	27
II.2.1.1	<i>Isolation par l'intérieur : historique et techniques</i>	27
II.2.1.2	<i>Isolation par l'extérieure (ITE) : techniques et avantages</i>	32
II.2.2	<i>Toitures</i>	35
II.2.2.1	<i>Techniques d'isolation thermique de la toiture inclinée</i>	35
II.2.2.2	<i>Techniques d'isolation thermique de la toiture plate</i>	36
II.2.3	<i>Planchers</i>	38
II .2.3.1	<i>Techniques d'isolation thermique des planchers</i>	38
II.2.4	<i>Parois vitrées</i>	39
II.2.4.1	<i>Techniques d'isolation d'une paroi vitrée</i>	41
II.3	<i>Normes et réglementation thermique appliquée au bâtiment</i>	41
II.3.1	<i>Norme ASHRAE (USA)</i>	41
II.3.2	<i>Norme RT 2012 (France)</i>	42
II .3.3	<i>Réglementation thermique algérienne</i>	44
II .3.3.1	<i>Documents techniques règlementaires (DTR)</i>	44
II .4	<i>Comparaison des matériaux : conventionnels et biosourcés</i>	45
II.4.1	<i>Tableau comparative</i>	46
II.5	<i>Conclusion</i>	47

Chapitre III : Etude bibliographique

Chapitre IV : Simulation et Analyse avec TRNSYS

IV.1	<i>Introduction</i>	56
IV.2	<i>Présentation du logiciel TRNSYS</i>	56
IV.2.1	<i>Historique et développement du logiciel TRNSYS</i>	56
IV.3	<i>Domaines d'applications de TRNSYS</i>	57
IV.4	<i>Simulation des bâtiments avec TRNSYS</i>	58
IV.4.1	<i>Principaux caractéristiques de TRNSYS</i>	58
IV.4.2	<i>Environnement TRNSYS</i>	59
IV.4.2.1	<i>TRNSYS Simulation Studio</i>	59
IV.4.2.2	<i>TRNBUILD</i>	59
IV.4.3	<i>Utilisation du logiciel TRNSYS</i>	60
IV.4.4	<i>Outils de TRNSYS</i>	61
IV.5	<i>Avantage de logiciel TRNSYS</i>	62
IV.6	<i>Limites de logiciel TRNSYS</i>	62
IV.7	<i>Conclusion</i>	63

Chapitre V : Modélisation, Résultats et Discussion

V.1	<i>Introduction</i>	65
-----	---------------------	----

V.2	<i>Contexte Géographique et Données Climatiques</i>	65
V.2.1	<i>Coordonnées géographiques et zone climatique</i>	65
V.2.2	<i>Base de données météorologiques</i>	65
V.3	<i>Modélisation Géométrique et Physique du Local</i>	66
V.3.1	<i>Description de la zone thermique</i>	66
V.3.2	<i>Caractérisation thermophysique des parois (Cas 0 : Référence)</i>	66
V.4	<i>Intégration des matériaux d'isolation thermique</i>	66
V.5	<i>Environnement de Simulation et Phases de Travail</i>	67
V.6	<i>Définition des Scénarios d'Étude</i>	72
V.7	<i>Résultats et Discussion</i>	72
V.7.1	<i>Analyse Comparative : Impact de l'isolation sur le comportement thermique (Cas 0 vs Cas 1)</i>	72
V.7.1.1	<i>Comportement thermique annuel global</i>	73
V.7.1.2	<i>Comportement thermique détaillé en période hivernale (Mois de Janvier / Février / Mars)</i>	73
V.7.1.3	<i>Comportement thermique détaillé en période estivale critique (Mois de Juillet / Août)</i>	75
V.7.1.4	<i>Comportement thermique détaillé en période de transition (Mois d'Octobre / Novembre / Décembre)</i>	76
V.7.2	<i>Analyse Comparative : Impact de l'isolation sur le comportement thermique (Mode Actif : Cas 2)</i>	77
V.7.2.1	<i>Comportement global et régulation</i>	77
V.7.2.2	<i>Période Hivernale</i>	78
V.7.2.3	<i>Période Estivale</i>	79
V.7.2.4	<i>Impact Direct sur la Consommation Énergétique</i>	80
V.7.3	<i>Analyse Quantitative de la Consommation Énergétique (Mode Actif : Cas 2)</i>	80
V.7.3.1	<i>Besoins en climatisation (Saison chaude)</i>	80
V.7.3.2	<i>Besoins en chauffage (Saison froide)</i>	81
V.8	<i>Conclusion</i>	82

Conclusion générale	84
----------------------------	-----------

Références

Résumés

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
a	Diffusivité	m^2/s
A	Surface intérieure	m^2
b	Effusivité thermique	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2}$
C	Chaleur spécifique	$J/kg.K$
e	Epaisseur entre les parois	m
h	Coefficient d'échange convectif	$W.m^2.K$
l	Longueur de la liaison	m
R	Résistance thermique	$m^2.K/W$
S/A	Surface du contact	m^2
$T_{opérative}$	Chaleur spécifique à pression constante	K
T_{air}	Température du nœud représentant la zone thermique	K
T_{parois}	Température de surface d'une paroi	K
T_P	Température de la paroi	K
T_{∞}	Température loin de la paroi	K
U_g	Coefficient de transmission thermique d'une paroi vitrée	$W/m^2.K$
U_{global}	Coefficient de transmission thermique surfacique global	$W/m^2.K$
U	Coefficient de transmission thermique surfacique	$W/m^2.K$

Symbole Grecque

$\emptyset$	Flux thermique par conduction	W
$\emptyset_{ém}$	Flux thermique par rayonnement	W
λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
ΔT	Différence de température	K
ε	Emissivité de la surface	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W.m^2.K^{-4}$
ρ	Masse volumique	kg/m^3
θ	Température adimensionnelle	K
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
Ψ	Coefficient linéique	$W/m.K$

ABREVIATIONS

ASHRAE	<i>American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers</i>
ADEME	<i>Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie</i>
BBC	<i>Bâtiments de Basse Consommation</i>
BEPOS	<i>Bâtiments à Energie Positive</i>
CLO	<i>Échanges radiatifs de courtes longueurs d'ondes</i>
CDER	<i>Centre de Développement des Energies Renouvelables</i>
CNERIB	<i>Centre National d'Etude et de Recherche Intégré du Bâtiment</i>
CFC	<i>Chlorofluorocarbures</i>
CVC	<i>Chauffage, ventilation et climatisation</i>
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
EPS	<i>Polystyrène expansé</i>
DTR	<i>Documents techniques réglementaires</i>
HFC	<i>Hydrofluorocarbures</i>
HCFC	<i>Hydrochlorofluorocarbures</i>
ITE	<i>Isolation par l'extérieure</i>
IECC	<i>International Energy Conservation Code</i>
POLY	<i>Polystyrène</i>
PFPD	<i>Polymère + Fibre de palmier Dattier</i>
PSX	<i>Polystyrène extrudé</i>
PSE	<i>Polystyrène expansé</i>
PUR	<i>Polyuréthane</i>
P_v	<i>Pression de vapeur</i>
P_{vs}	<i>Pression de saturation</i>
RT	<i>Règlementation thermique</i>

Liste Des Figures

Figure	Titre	Page
Chapitre I		
Figure I.1	<i>Echanges thermiques entre l'ambiance et l'homme [9]</i>	7
Figure I.2	<i>Flux de chaleur par conduction [16]</i>	8
Figure I.3	<i>Flux de chaleur par convection [16]</i>	9
Figure I.4	<i>Flux de chaleur par rayonnement [16]</i>	10
Figure I.5	<i>Conductivité thermique λ [17]</i>	11
Figure I.6	<i>Isolants minérales : (a) laine de verre, (b) laine de roche [22]</i>	15
Figure I.7	<i>Isolants synthétiques : (a) polystyrène expansé, (b) polystyrène extrudé et (c) polyuréthane [22]</i>	16
Figure I.8	<i>Ouate de cellulose [22]</i>	17
Figure I.9	<i>Exemple d'isolation en denim [22]</i>	17
Figure I.10	<i>Isolants d'origine animale : (a) plume de canard, (b) laine de moutons [22]</i>	18
Figure I.11	<i>Isolants d'origine végétale : (a) laine de bois, (b) béton de chanvre et (c) liège expansé [22]</i>	19
Figure I.12	<i>Différentes parties d'un palmier dattier [30]</i>	20
Figure I.13	<i>Constitution d'un Panneau Isolant sous Vide (PIV) [32]</i>	21
Figure I.14	<i>Aérogel de silice après séchage supercritique (a) [14] Exemple d'aérogel pour l'isolation thermique des bâtiments (b) [34]</i>	21
Figure I.15	<i>Procédés d'isolation interne, externe, et répartie. [17]</i>	23
Figure I.16	<i>Types de pont thermiques les plus courants [41]</i>	24
Figure I.17	<i>Condensation</i>	24
Chapitre II		
Figure II.1	<i>Déperditions thermiques</i>	27
Figure II.2	<i>Schéma représentatif des murs construits en France dans les années 60 [23]</i>	27
Figure II.3	<i>Schéma représentatif des murs construits en France à partir de 1975 [22]</i>	28
Figure II.4	<i>Systèmes d'isolation par l'intérieur [44]</i>	30
Figure II.5	<i>(a) Liaison avec un mur intérieur (coupe horizontale), (b) Fondation (coupe verticale), (c) Exemple de moisissures liées à un pont thermique [44]</i>	31
Figure II.6	<i>Exemple de moisissures dues à la condensation [42]</i>	31
Figure II.7	<i>Solutions d'isolation par l'extérieur sous enduit (a), sous vêtture (b) et sous bardage (c) [23]</i>	33
Figure II.8	<i>Comparaison entre isolation par l'intérieur (a) et par l'extérieur (b) au niveau de la dalle. [43]</i>	33

Figure II.9	<i>Variation du coefficient de transmission surfacique global en fonction de l'épaisseur d'isolation. [41]</i>	34
Figure II.10	<i>Techniques d'isolation thermique de la toiture inclinée [46]</i>	36
Figure II.11	<i>Toiture "SARKING" [44]</i>	36
Figure II.12	<i>Techniques d'isolation : (a) Toiture chaude, (b) Toiture froide [45]</i>	37
Figure II.13	<i>Isolation des planchers [46]</i>	38
Figure II.14	<i>Isolation de plancher : (a) sur vide-sanitaire, (b) Plancher sur terre-plein [47]</i>	39
Figure II.15	<i>Réflexion et transmission à travers une paroi vitrée [48]</i>	39
Figure II.16	<i>Performance thermique de double et triple vitrage</i>	40
Figure II.17	<i>Règlementations thermiques [49]</i>	43
Figure II.18	<i>Page d'accueil de RETA. [50]</i>	45

Chapitre IV

Figure IV.1	<i>Interface du logiciel TRNSYS</i>	59
Figure IV.2	<i>Interface du logiciel TRNBuild</i>	60
Figure IV.3	<i>Fichiers nécessaires au lancement de la simulation</i>	61

Chapitre V

Figure V.1	<i>Fenêtre principale d'où il y'a le menu principal et les commandes principaux du présent logiciel.</i>	67
Figure V.2	<i>Fenêtre pour la création d'un nouveau projet</i>	68
Figure V.3	<i>Représentation de zone étudiée</i>	68
Figure V.4	<i>Dimensionnement des zones (suite).</i>	68
Figure V.5	<i>Orientation et localisation des zones.</i>	69
Figure V.6	<i>Fenêtres pour l'infiltration et ventilation, climatisation et chauffage</i>	69
Figure V.7	<i>Fenêtre de Gains et Eclairage</i>	70
Figure V.8	<i>Fenêtre de l'achèvement de création du projet</i>	70
Figure V.9	<i>Représentation visuel du projet.</i>	70
Figure V.10	<i>Fenêtre pour TRNbuild</i>	71
Figure V.11	<i>Fenêtres pour TRNbuild (Activer le chauffage et la climatisation)</i>	71
Figure V.12	<i>Fenêtre pour nouveau type de calque</i>	71
Figure V.13	<i>Fenêtre gestionnaire de type de mur.</i>	72
Figure V.14	<i>Évolution annuelle de la température intérieure de la zone d'étude</i>	73
Figure V.15	<i>Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période froide</i>	74
Figure V.16	<i>Évolution horaire de la température intérieure sur une semaine type du mois de janvier</i>	74

Figure V.17	<i>Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période chaude</i>	75
Figure V.18	<i>Évolution horaire de la température intérieure sur une semaine type du mois de juin.</i>	76
Figure V.19	<i>Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant les derniers mois de l'année.</i>	77
Figure V.20	<i>Évolution annuelle de la température intérieure en Mode Actif (Cas2)</i>	78
Figure V.21	<i>Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période froide (Cas2)</i>	78
Figure V.22	<i>Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période chaude (Cas2).</i>	79
Figure V.23	<i>Consommation mensuelle d'énergie pour la climatisation (kWh) avec et sans isolation.</i>	80
Figure V.24	<i>Consommation mensuelle d'énergie pour le chauffage (kWh) avec et sans isolation.</i>	81

Liste des Tableaux

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau II.1</i>	<i>Comparaison des performances thermiques du vitrage.</i>	40
<i>Tableau II.2</i>	<i>Comparaison : isolants conventionnels vs isolants biosourcés</i>	46
<i>Tableau V.1</i>	<i>Temps de janvier à Décembre avec TRNSYS</i>	65
<i>Tableau V.2</i>	<i>Propriétés thermophysiques des parois de l'état initial (Cas 0).</i>	66
<i>Tableau V.3</i>	<i>Propriétés thermophysiques des matériaux étudiés</i>	67
<i>Tableau V.4</i>	<i>Différence de consommation énergétique (Cas 2 : Mode Actif)</i>	81

Introduction générale

Le réchauffement de la planète et les changements climatiques sont principalement causés par la forte émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le secteur énergétique étant mondialement le plus important émetteur de ces gaz, plusieurs pays ont renforcé la priorité donnée à l'efficacité énergétique et à l'utilisation des énergies renouvelables par la mise en œuvre de politiques adaptées à leurs spécificités économiques, sociales et climatiques. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, dans 20 pays représentant 85% de la consommation totale d'énergie finale en 2018, le secteur du bâtiment résidentiel, avec une part moyenne d'environ 21%, représentait la troisième consommation d'énergie finale la plus élevée. De plus, le chauffage et le refroidissement des locaux représentaient jusqu'à 55% de l'énergie totale consommée dans le secteur du bâtiment. Aussi, les préoccupations mondiales en matière d'environnement et d'énergie ont conduit à une croissance rapide de l'obligation de construire des habitations plus économes en demande d'énergie notamment pour les besoins de chauffage et de refroidissement.

Cette forte consommation est due, en grande partie, aux besoins en chauffage et en climatisation, nécessaires pour maintenir un confort thermique adapté aux occupants. Dans un contexte de transition énergétique et de lutte contre le changement climatique, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est devenue un enjeu crucial.

L'isolation thermique constitue l'un des moyens les plus efficaces pour réduire les déperditions de chaleur, optimiser la consommation énergétique et améliorer le confort intérieur. Elle permet non seulement de limiter les transferts thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment, mais aussi de garantir un environnement intérieur plus stable et agréable.

Le confort thermique, qui dépend de plusieurs paramètres tels que la température de l'air, l'humidité, la vitesse de l'air et le rayonnement, est fortement influencé par la qualité de l'isolation. L'étude de cette relation entre isolation et confort revêt donc une importance particulière, tant du point de vue de l'efficacité énergétique que du bien-être des occupants.

Ainsi, l'isolation thermique et le confort thermique ne sont pas uniquement des notions techniques, mais des leviers essentiels pour concilier performance énergétique, bien-être des occupants et réduction de l'impact environnemental du secteur du bâtiment. Leur étude permet d'éclairer les stratégies à mettre en œuvre pour concevoir des bâtiments durables, économes en énergie et adaptés aux besoins des usagers.

Dans le cadre du développement durable, les nouvelles réglementations en matière d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, incitent les scientifiques à la recherche de nouveaux matériaux pour constituer des systèmes économes en énergie tout en assurant le confort de l'habitat. En général, la construction durable a pour but d'apporter une réponse

cohérente à trois questions fondamentales : confort, impact sur l'environnement et santé. Elle vise à limiter les impacts de la construction sur l'environnement tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables.

Pour mieux comprendre et évaluer ces phénomènes, plusieurs outils numériques de simulation ont été développés. Parmi eux, le logiciel TRNSYS occupe une place importante grâce à sa flexibilité et sa capacité à modéliser des systèmes thermiques et énergétiques complexes. Bien que ce travail n'inclue pas d'application pratique, il propose une présentation théorique du logiciel TRNSYS, de ses fonctionnalités et de son rôle dans l'analyse de la performance énergétique des bâtiments.

Ce mémoire est scindé donc en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les bases théoriques relatives à l'isolation thermique et au confort dans les bâtiments, les différents types des matériaux isolants et leurs caractéristiques thermiques.

Le deuxième chapitre est consacré aux techniques et solutions d'isolation thermique ainsi que les normes associées afin de limiter les déperditions thermique.

Dans le troisième chapitre, on établit une étude bibliographique sur les différents travaux réalisés dans ce thème.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons le logiciel TRNSYS, mettant en évidence son intérêt et son apport dans l'étude des bâtiments.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude d'un modèle virtuel à Dar el Beida à l'aide du logiciel TRNSYS, c'est un modèle simple virtuel choisis pour étudier l'effet de chacun de chauffage, climatisation, et l'isolation thermique sur la variation de la température de l'air à l'intérieur d'une chambre, ainsi que la consommation d'énergie dans cette zone.

Finalement, une conclusion générale synthétise les résultats de cette recherche.

Chapitre I
Fondements Théoriques de l'Isolation thermique et du
Confort des bâtiments

I.1 Introduction

L'homme passe une partie de plus en plus importante de son temps à l'intérieur de bâtiments que ce soit son lieu de travail ou son logement. La notion de confort, notamment thermique devient donc prépondérante par rapport à celle de simple protection face aux intempéries. Cette fonction de confort thermique passe par le maintien d'une température stable selon les saisons et adaptée aux différentes pièces du logement. Ceci passe par une isolation performante des lieux de vie. De nos jours, suite à la considération du coût environnemental et économique des différents modes de chauffage, on observe une demande en matériaux d'isolation en constante augmentation poussée par les réglementations thermiques successives.

I.2 Confort thermique

I.2.1 Définition

Le confort thermique est une sensation subjective vis-à-vis de l'ambiance thermique existant dans le local. Il est propre à chaque individu et dépend des saisons. Pendant l'hiver, le confort thermique est synonyme d'une sensation suffisante de chaleur. Pour l'été il est synonyme d'être à l'abri des surchauffes [1].

Le confort thermique exprime la satisfaction et le bien-être de l'utilisateur par rapport à un environnement thermique. Ce qui implique des mécanismes d'interaction entre un environnement caractérisé par des grandeurs physiques (température de l'air, température moyenne radiante, humidité relative, vitesse de l'air) ; et l'occupant caractérisé par un ensemble de mécanismes physiologiques (homéothermie, régulation des échanges thermiques et de masse) et psychologiques (perception du confort et adaptation). La plupart des définitions sur le confort thermique mettent en avant les deux points de vue que sont l'occupant et l'environnement thermique [2]. Certains le définissent avec l'occupant comme référence : « le degré de désagrément ou de bien être provoqué par les caractéristiques d'un environnement intérieur en interaction avec l'occupant » [3]. L'ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers) a défini le confort thermique comme « l'état d'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique » [4]. D'autres le définissent comme étant l'ensemble des interactions entre l'occupant et son environnement où l'individu est considéré comme un élément du système thermique [5].

I.2.2 Paramètres affectant le confort thermique

La sensation de confort ou d'inconfort thermique dépend des paramètres objectifs (la température et de l'hygrométrie ambiante, des éventuels courants d'air) ainsi que du

métabolisme de chacun, cette sensation reste cependant une notion personnalisée, dans la mesure où les individus sont différents [6].

a. Température de l'air

La température de l'air est un facteur important qui influence le confort thermique. Elle est le résultat de l'échauffement et refroidissement de la surface de la Terre, par des processus indirects. La température de l'air d'un environnement affecte l'échange de chaleur du corps par convection et rayonnement. Selon Givoni, (1978), cet échange dépend du mouvement de l'air et du niveau d'habillement [6].

La température de confort ressentie (appelée aussi "température opérative" ou "température résultante sèche") est définie par l'équation suivante :

$$T^{\circ} \text{ opérative} = (T^{\circ} \text{ air} + T^{\circ} \text{ parois}) / 2 \quad (\text{I.1})$$

b. Température moyenne radiante

La température moyenne radiante est un paramètre important qui influence fortement le confort thermique de l'être humain. Elle exprime l'effet radiatif de l'ensemble de l'environnement [7].

c. Vitesse de l'air

La vitesse de l'air est un paramètre important pour le confort thermique, car elle influe sur les échanges de chaleur par convection. A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que le confort thermique des occupants est assuré tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0.5 m/s [8].

d. Métabolisme

C'est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 37°C. Le niveau d'activité physique a une influence sur la quantité de chaleur produite par le corps humain et donc sur la perception d'un environnement chaud ou froid [9].

e. Habillement

L'habillement est un moyen de lutte contre les échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Il est considéré comme une résistance thermique permettant de limiter ces transferts de chaleur. L'unité de cette résistance est le **clo**, où $1\text{clo} = 0,155 \text{ W/m}^2/\text{K}$, correspondant à une tenue «classique» d'hiver [10].

f. Humidité relative de l'air

Le taux d'humidité s'exprime en % et évalué à l'aide d'un hygromètre. Il est indissociable à la température ambiante de l'air et veut littérairement dire la quantité d'eau contenue dans l'air. Pour assurer un bon confort thermique, le taux d'humidité doit être dans une fourchette de 40% à 60% [1].

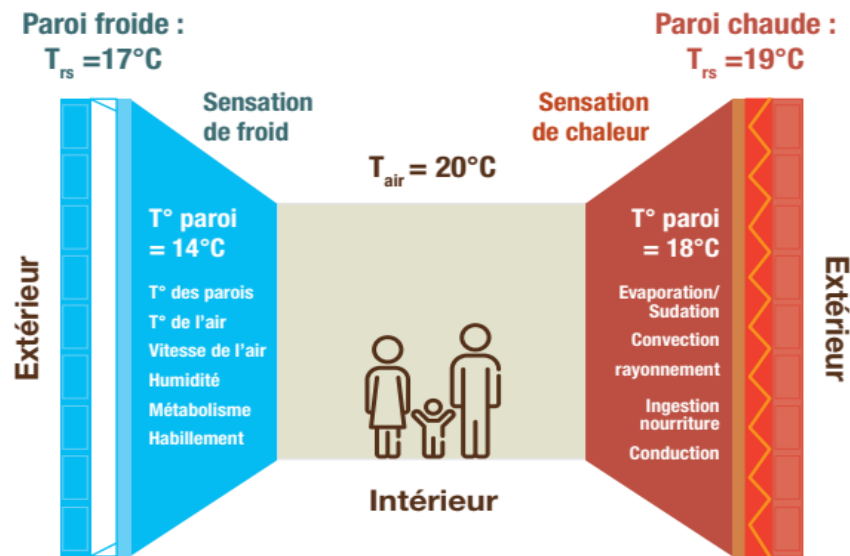


Figure I.1 : *Echanges thermiques entre l'ambiance et l'homme [9]*

I.3 Isolation thermique

I.3.1 Définition

L'isolation thermique est définie comme une méthode visant à réduire la consommation d'énergie en limitant les transferts de chaleur dans les bâtiments. Il améliore l'efficacité énergétique, essentielle pour répondre à la demande énergétique mondiale croissante qui devrait augmenter de 25 % d'ici 2040 en raison de la croissance démographique [11].

Dans la littérature, l'isolation thermique fait référence au matériau ou à la combinaison de matériaux qui retarde le flux de chaleur. Il joue un rôle crucial dans la conservation de l'énergie dans les bâtiments, en réduisant de manière significative les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été. Une isolation thermique efficace est essentielle pour réduire les coûts de chauffage et de climatisation, contribuant ainsi au confort thermique global des bâtiments passifs. Les matériaux utilisés peuvent être adaptés à différentes tailles, formes et surfaces, améliorant ainsi leur efficacité dans les applications économes en énergie [12].

L'isolation thermique est définie comme la capacité d'un matériau à réduire le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement, améliorant ainsi l'efficacité énergétique des bâtiments en maintenant les différences de température à travers l'enveloppe du bâtiment, améliorant ainsi la résistance thermique et le confort des occupants [13].

I.3.2 Principaux critères thermiques

I.3.2.1 Modes de transfert de chaleur dans une paroi

Un bâtiment peut être vu comme un système thermodynamique complexe en interaction avec son environnement extérieur et intérieur. On peut l'approximer à une enveloppe (les parois) et à

une ou plusieurs zones thermiques représentant un volume d'air de température unique. Le bâtiment est soumis à des influences thermiques internes telles que les occupants, les équipements et l'éclairage, et à des influences thermiques externes telles que le vent, le rayonnement solaire, le rayonnement grandes longueurs d'onde provenant du ciel et de l'environnement proche. La connaissance de ces transferts thermiques est essentielle pour le dimensionnement de systèmes de chauffage/refroidissement ainsi que pour le confort des occupants [14].

La chaleur échangée entre le bâtiment et son environnement se fait de différentes façons :

a. Par conduction

C'est un mode de transfert thermique qui s'effectue par une simple interaction des molécules sans déplacement de matière. En présence d'une forte température, les molécules présentes dans la zone la plus chaude vibrent et se heurtent vivement entre elles. Elles transmettent alors leur énergie aux molécules voisines qui à leur tour retransmettent cette énergie ; la chaleur est transmise [15].

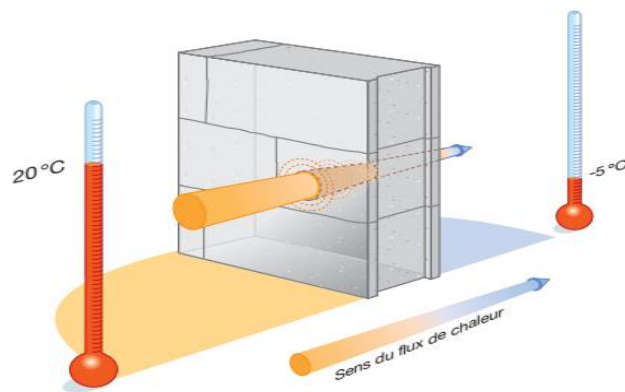


Figure I.2 : Transfert de chaleur par conduction [16]

La conduction est mesurée par la loi de Fourier. On prend deux parois de surface 'S' avec différentes températures T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$) ; distantes d'une épaisseur 'e' et la matière qui sépare les deux parois est caractérisée par une conductivité thermique ' λ '. le flux thermique qui passe entre les parois peut être mesuré par la loi suivante [10] :

$$\Phi = \frac{\lambda S}{e} \Delta T \quad (I.2)$$

- Φ : Flux thermique par conduction (en W)
- λ : Conductivité thermique (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- e : Epaisseur entre les parois (en m)
- S : Surface des parois en m^2

b. Par convection

On définit la convection comme un déplacement de chaleur au sein d'un fluide (eau, air) via un déplacement d'ensemble de molécules d'un point à un autre. En effet, quand un fluide est chauffé, il se dilate, devient plus léger et monte. Ce fluide est alors remplacé par un fluide plus froid qui est à son tour réchauffé : une convection naturelle se met alors en place. Si un apport extérieur permet d'accélérer cette transmission de chaleur, on parle alors de convection forcée [15].

Le flux de chaleur transmis par convection, entre une paroi à température et un fluide à température T_{∞} (Température mesurée loin de la paroi), peut s'écrire sous la forme (loi de Newton) :

$$\Phi = hS(T_P - T_{\infty}) \quad (I.3)$$

Avec :

- h : Coefficient d'échange convectif (en $W.m^2.K$)
- T_P : Température de la paroi
- T_{∞} : Température loin de la paroi
- S : surface du contact en m^2

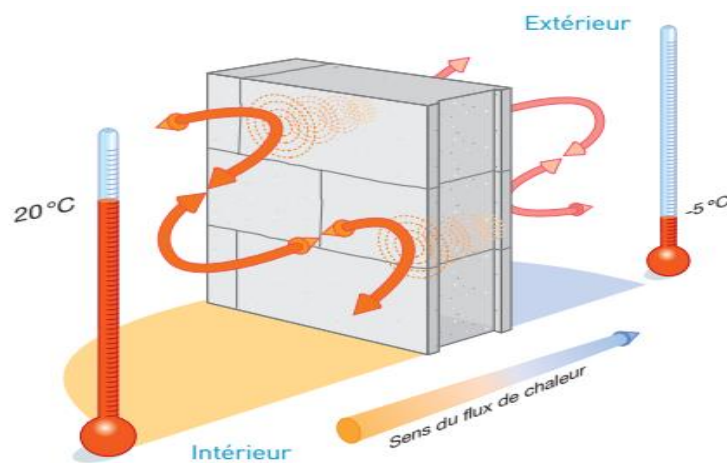


Figure I.3 : Transfert de chaleur par convection [16]

c. Par rayonnement

Le rayonnement se manifeste quand des corps chauds émettent des rayons porteurs d'énergie qui sont absorbés par d'autres corps et alors transformés en chaleur.

Au niveau d'une paroi, le rayonnement se traduit par celui des émetteurs de chaleur cédant leur chaleur à la paroi [16].

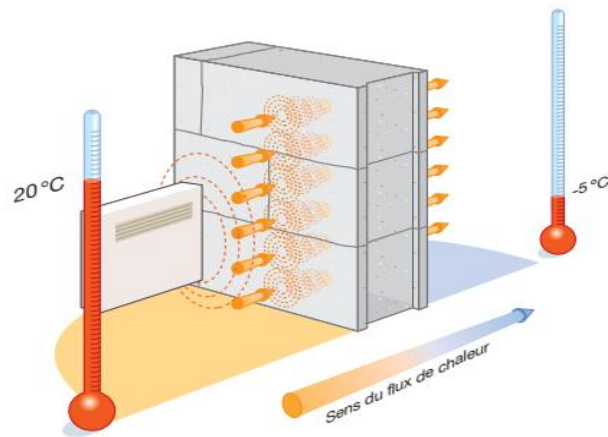


Figure I.4 : Transfert de chaleur par rayonnement [16]

✓ **Loi fondamentale du rayonnement (loi de Stefan-Boltzmann)**

Le flux de chaleur rayonné par un milieu de surface (S) et de température (T) s'exprime grâce à la loi de Joseph Stefan (1835-1893) et Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906).

$$\phi_{ém} = \epsilon \sigma S T^4 \quad (I.4)$$

Tel que :

- ϵ : Emissivité de la surface sans unité et T en (K)
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} en $W.m^2.K^{-4}$)
- S : Surface du corps en (m^2)

I.3.2.2 Caractéristiques principales de l'isolation thermique

a. Conductivité thermique λ

Le coefficient de conductivité thermique représente le flux de chaleur par mètre carré traversant 1 m de matériau homogène, pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces en une seconde [17].

Elle est dénommée λ (lambda) et exprimée en **W/m.K**. La conductivité thermique λ est une caractéristique constante, intrinsèque et propre à chaque matériau. Elle permet d'évaluer l'aptitude du matériau en question à plus ou moins laisser passer un flux de chaleur[16]. Plus le λ est faible, plus le matériau est isolant.

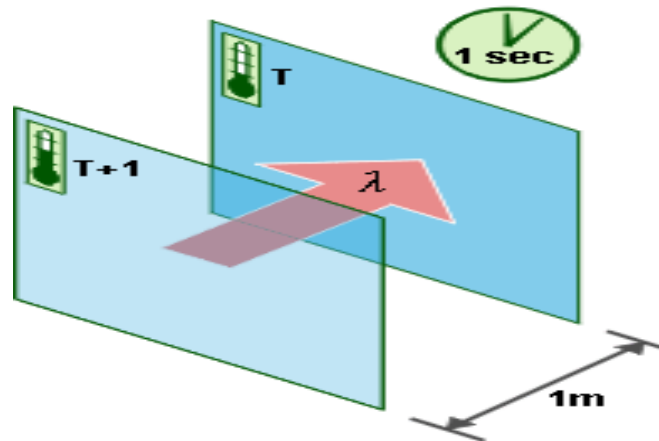


Figure I.5 : Conductivité thermique λ [17]

b. Résistance thermique R

La résistance thermique des matériaux est un élément devenu incontournable pour les calculs de performances énergétiques d'un bâtiment. Elle dirige directement la notion de « confort thermique », la consommation énergétique et l'efficacité de l'isolation. Elle caractérise la capacité d'une paroi à s'opposer au passage de chaleur.

Pour les matériaux homogènes, elle est égale au rapport de l'épaisseur du matériau en mètres par sa conductivité thermique [17].

Plus la valeur de R est élevée, plus le matériau est isolant. Elle s'exprime en $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ et se calcule avec la formule suivante :

$$R = e / \lambda \quad (\text{I.5})$$

- R : Résistance thermique ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)
- e : Épaisseur du matériau (m)
- λ (lambda) : Conductivité thermique du matériau ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

Une bonne résistance thermique permet de :

- ✓ Réduire les pertes de chaleur en hiver et limiter la surchauffe en été.
- ✓ Diminuer la consommation énergétique du chauffage et de la climatisation.
- ✓ Améliorer le confort thermique à l'intérieur du bâtiment.

c. Transmission thermique U

Pour caractériser une paroi, on utilise aussi fréquemment le coefficient de transmission surfacique (U), qui est l'inverse de la résistance thermique (R) :

$$U = 1/R \quad (\text{I.6})$$

Ce coefficient est exprimé en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. Plus la valeur de U est faible, plus la paroi est performante thermiquement. U est également utilisé pour quantifier la performance des vitrages (U_g , g

comme Glass), des menuiseries (U_f , f comme Frame) et des fenêtres (ensemble menuiserie et vitrage) (U_w , w comme Window) [18].

d. Capacité thermique massique (ou chaleur spécifique) C

C'est la capacité du matériau à emmagasiner la chaleur par rapport à son poids. Elle caractérise la quantité de chaleur à apporter à 1 kg de matériau pour élever sa température de 1°C. Elle est exprimée en J/kg K.

e. Masse volumique ρ

La masse volumique ou densité d'un matériau est exprimée en kg/m³. Il s'agit de la masse du matériau par unité de volume. D'une manière générale, les matériaux apportant de l'inertie possèdent une forte masse volumique.

f. Déphasage thermique

Le déphasage thermique définit le temps que met un front de chaleur pour traverser une épaisseur donnée de matériau. Cette notion dynamique dépend également principalement de la masse volumique et de la capacité thermique massique du matériau. La prise en compte du déphasage thermique est notamment utile en été pour décaler au cœur de la nuit plus fraîche la pénétration de la chaleur reçue par les parois extérieures durant la journée [18].

g. Inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker la chaleur et à retarder les variations de température. Elle dépend principalement de la masse volumique et de la capacité thermique massique du matériau. Plus ces dernières sont élevées, plus un matériau présente une inertie importante. Ce sont donc généralement les parois lourdes (mur ou dalle maçonnés, chape, cloison lourde, etc.) qui participent à l'inertie thermique d'un bâtiment permettant de lisser les variations de sa température intérieure [18].

Les principales caractéristiques de l'inertie thermique sont :

• Diffusivité thermique

La diffusivité thermique « a » exprime la vitesse à laquelle la chaleur se propage, par conduction, dans un corps. Plus la diffusivité thermique est élevée, plus le matériau s'échauffe ou se refroidit rapidement. Tandis que, plus elle est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. La diffusivité thermique s'exprime selon l'équation suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (I.7)$$

Où :

- a : Diffusivité en (m²/s).
- λ : Conductivité thermique en (W/m K).

- ρ : Masse volumique en (kg/m^3).
- C : Chaleur spécifique en (J/kg K).

• Effusivité thermique

L'effusivité thermique « b » exprime l'aptitude de la surface d'un matériau à stocker ou à restituer de la chaleur. Elle caractérise donc la capacité des matériaux à réagir plus au moins rapidement à un apport de chaleur au logement. Elle accroît avec la conductivité et la capacité thermique. Elle s'exprime en ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{1/2}$) est donnée par la formule suivante :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (\text{I.8})$$

Pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois d'enveloppe devront présenter une faible diffusivité thermique et une forte effusivité.

Dans le contexte de la démarche bioclimatique, une inertie très lourde, associée à une bonne gestion des apports solaires (captage en hiver et protection en été) devient un critère décisif de la construction, notamment pour le confort de l'été, qu'il s'agisse des températures maximales atteintes ou des variations de températures jour/nuit.

À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité d'un déplacement des calories à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories. Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe d'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

I.4 Matériaux d'isolation thermique

Par définition, un matériau isolant thermique est un matériau qui conduit mal la chaleur, que ce soit par conduction, convection ou rayonnement. Avec une épaisseur relativement faible, il présente une résistance thermique suffisante pour les besoins envisagés. Les principes physiques utilisés dans les matériaux isolants sont les suivants :

- Pour éliminer la conduction, il faut éliminer la matière. Le vide ne conduit pas la chaleur. On diminue la conduction en utilisant des matériaux peu conducteurs (notamment l'air, des gaz de préférence lourds, ou des solides non métalliques).
- Pour éliminer la convection, il faut immobiliser ou supprimer les fluides. Il n'y a de convection possible ni dans le vide, ni dans un fluide immobilisé.
- Pour éliminer le rayonnement, il faut des écrans opaques au rayonnement, ou des surfaces réfléchissant le rayonnement infrarouge [19].

I.4.1 Propriétés et performances d'un matériau isolant

Les propriétés des matériaux isolants sont traditionnellement subdivisées en trois groupes principaux :

Propriétés physiques : qui décrivent le comportement du matériau en termes de densité, de résistance mécanique, de capacité d'isolation thermique, d'absorption acoustique, de résistance à l'humidité et au feu, etc. Ces propriétés physiques traditionnelles sont assez faciles à déterminer et à certifier, car des normes spécifiques existent au niveau national depuis plus de 30 ans [20].

Propriétés environnementales : Traitant de l'impact environnemental des matériaux isolants. Ce groupe comprend des caractéristiques telles que l'énergie primaire incorporée, les émissions de gaz pour la production du matériau, l'utilisation d'additifs contre les impacts biologiques, la classification de leur traitement comme déchets, etc., leur réutilisabilité et recyclabilité ainsi que l'impact environnemental du matériau, sur la base de l'analyse du cycle de vie selon la norme ISO 14025-00 [20].

Propriétés de la santé : qui concernent la santé publique, pendant la production, l'utilisation et à la dernière étape de l'élimination des matériaux. Ce groupe comprend des propriétés telles que les émissions de poussières et de fibres, la biopersistance, la toxicité en cas d'incendie, etc [20].

I.4.2 Classification des matériaux d'isolation thermique

Bien que tous les matériaux d'isolation servent le même objectif, à savoir réduire le taux de dégagement/gain de chaleur dans l'espace clos souhaité, certains matériaux particuliers jouent un rôle spécifique, d'où leur classement en catégories. Ces catégories classent les matériaux d'isolation selon leur fonction, leur forme et leur composition.

I.4.2.1 Matériaux d'isolation thermique conventionnels

Les matériaux d'isolation thermique classiques sont plus souvent employés en vue de leur bonne performance thermique et de leur coût abordable. Ils comprennent notamment les laines minérales et les isolants synthétiques tels que le polystyrène ou le polyuréthane. Ces matériaux se caractérisent par une conductivité thermique relativement basse. Actuellement, la plupart des matériaux d'isolation traditionnels présentent des pores ou des cavités de l'ordre du millimètre ou du micromètre [21]. Ces catégories d'isolation thermique sont succinctement décrites ci-dessous :

- a. Laine minérale,** la laine minérale correspond à la laine de verre (fibre de verre) et à la laine de roche, produite normalement sous forme de plaques et de rouleaux, mais parfois aussi sous forme de matériau de remplissage. Ces laines minérales ont une bonne conductivité thermique, mais sont totalement perméables à l'air et à la vapeur d'eau. D'un point de vue mécanique, ces laines ont une très faible résistance au délaminage. Les isolants d'origines minérales dégagent peu des composés organiques volatils (COV) et sont très résistants au feu.

Leur impact écologique est plus faible, mais leur procédé de fabrication reste tout de même énergivore [14].

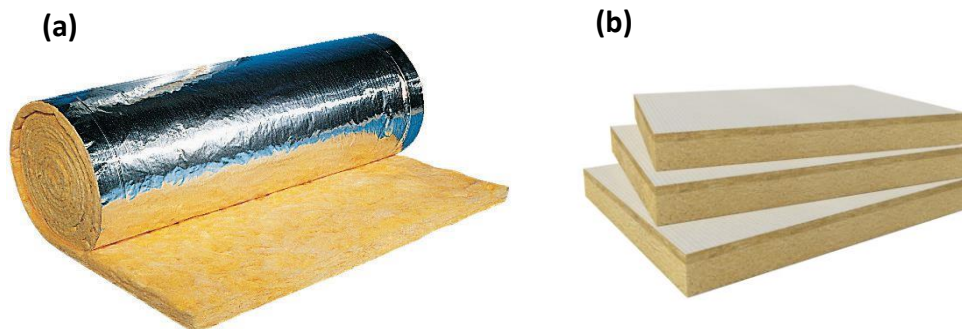


Figure I.6 : Isolants minérales : (a) laine de verre, (b) laine de roche [22]

b. Polystyrène expansé et extrudé ((EPS - XPS))

Le polystyrène se présente sous deux formes de panneaux : le PSE (polystyrène expansé) et le PSX (polystyrène extrudé).

- Le PSE est obtenu par polymérisation de monomère de styrène (pétrole) en utilisant le pentane comme agent d'expansion. L'émission du i-pentane est importante pendant sa mise en œuvre et elle décroît au fil du temps jusqu'à devenir négligeable.
- Le PSX est produit à l'aide de solvants et de gaz d'expansion (CFC, HCFC et HFC). Interdits en 1995 car responsables de la destruction de la couche d'ozone, les CFC (chlorofluorocarbures) ont été remplacés par les HCFC (hydrochlorofluorocarbures) et HFC (hydrofluorocarbures) qui sont de puissants gaz à effet de serre.

En cas d'incendie, les polystyrènes sont responsables de puissants dégagements de monoxydes de carbones et de gaz carboniques [23].

Ces valeurs standard de conductivité thermique sont comprises entre 0,030 et 0,040 W/m K. Les polystyrènes extrudés diffèrent essentiellement des polystyrènes expansés par leur plus grande résistance à la compression et à l'humidité.

c. Polyuréthane (PUR)

Polyuréthane (PUR) est formé par une réaction entre des isocyanates et des polyols (alcools contenant plusieurs groupes hydroxyle). Au cours du processus d'expansion, les pores fermés sont remplis avec l'expansion gaz, le HFC, du CO₂ ou C₆H₁₂. Le matériau d'isolation est réalisé en tant que panneaux ou en continu sur une ligne de production. PUR peut être utilisé en tant que mousse en expansion au niveau du site de construction, par exemple, pour sceller le tour des fenêtres, des portes et remplir les différentes cavités. Les valeurs de conductivité thermique typiques pour PUR sont comprises entre 20 et 30 mW/m.K varient en fonction de la température,

du taux d'humidité et de la densité ; il peut croître de 25 W/m.K à 46 W/m.K avec l'augmentation corrélative du taux d'humidité de 0 % à 10 % en volume [24]. Le polyuréthane libère d'importantes quantités d'isocyanates au moment de sa mise en œuvre. Irritantes pour la peau, les yeux et les voies respiratoires, ces émissions s'estompent quand le produit durcit. En cas d'incendie, le polyuréthane libère du monoxyde de carbone, de l'isocyanate et surtout de l'acide cyanhydrique qui entraîne céphalées, vertiges, oppressions thoraciques, coma pouvant évoluer vers la mort en quelques minutes [23].

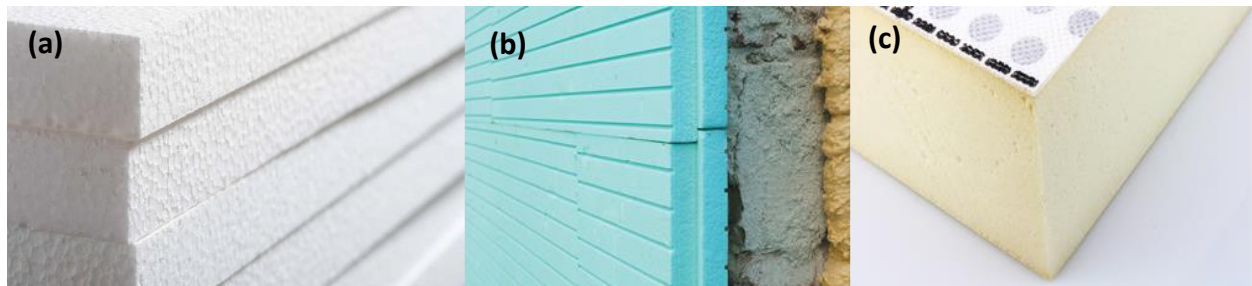


Figure 1.7 : *Isolants synthétiques : (a) polystyrène expansé, (b) polystyrène extrudé et (c) polyuréthane [22]*

I.4.2.2 Matériaux d'isolation thermique biosourcés

On appelle matériaux biosourcés, l'ensemble des matériaux dont l'un au moins de leurs composants est issu de la biomasse. Cette dernière regroupe toute matière première d'origine biologique végétale telle que bois, chanvre, paille, bambou, coco, bananier, bagasse, lin, etc ou d'origine biologique animale telle que comme peau, graisse, etc, à l'exception des matières de formation géologique ou fossile, ainsi que de matières premières recyclées telle que la ouate de cellulose, isolants en textile recyclé (les résidus de denim)[25,26].

Dans le secteur du bâtiment actuellement, les matériaux biosourcés peuvent être utilisés de différentes manières. Ils peuvent être utilisés comme matériaux d'isolation thermique tels que les fibres de coco, les fibres de banane, les fibres de bagasse, la laine de bois, les bottes de paille, la ouate de cellulose, la chènevotte, etc. Ils peuvent également être utilisés comme des matériaux porteurs ou de remplissages pour assurer la solidité du bâtiment tels que le bois, le béton de chanvre, de lin, etc. En fin, ils peuvent être utilisés comme matériaux d'enduisages tels que des mélanges de chanvre–chaux et de terre-paille [25].

a. Recyclage

- **Ouate de cellulose**, composée principalement de journaux recyclés et déchiquetés, auxquels sont ajoutés des additifs pour assurer la résistance au feu et aux moisissures du produit. Elle est probablement à ce jour l'isolant d'origine naturelle le plus utilisé (depuis les années 1930). On

l'utilise sous forme d'isolant soufflé ou de natte semi-rigide. Elle contient du borax qui est toxique, surtout en cas de contact avec l'aluminium. Sa durabilité peut être compromise en cas d'humidité. La ouate a peu de résistance structurelle à la compression et risque de se tasser. Sa conductivité thermique est généralement comprise entre 0.035 et 0.040 W/m.K [18, 23, 26].



Figure I.8 : *Ouate de cellulose [22]*

- **Isolants en textile recyclé**, la production de matériaux de construction à base de textile recyclé est réalisée principalement grâce aux chutes de l'industrie textile et aux vêtements usagés des ménages qui sont rapportés dans des bennes de tri. Les tissus sont découpés, hachés et défibrés puis mélangés dans des proportions constantes de coton, laine et acrylique. Les fibres sont ensuite thermoliées avec du polyester pour former des rouleaux ou panneaux semi-rigides de densité variable.

Ils sont plus légers que la ouate, permet donc de traiter en rénovation des zones où il n'est pas possible d'ajouter du poids [27].



Figure I.9 : *Exemple d'isolation en denim [22]*

b. Animal

- **Laine de mouton**, est lavée pour éliminer le suint et les impuretés, puis y sont ajoutés des additifs antimites et des fibres de texturation pour constituer les produits finis d'isolation.

Malgré les compromis faits pour la conservation et la texturation de la fibre, la laine de mouton reste un très bon isolant écologique.

On peut la trouver en rouleau ou en panneau utilisé pour une isolation rapportée entre ossature, ou encore en vrac sous forme d'écheveaux pour le remplissage des cavités. La conductivité thermique peut varier de 0.035 à 0.042 W/m.K [28].

Plumes de canard, l'isolant pour le bâtiment à base de plume de canard est une innovation permettant de valoriser des déchets d'abattoirs.

Les isolants sont fabriqués à partir de 70% de plume de canard, de 10% de laine de mouton pour une meilleure élasticité et de 20% de fibre textile pour la stabilité.

La laine est recouverte d'un voile en polyester micro perforé sur une face pour une meilleure stabilité lors de la pose. La plume de canard est très perméable à la vapeur d'eau, elles peuvent emmagasiner jusqu'à 70% de leur poids en eau et retrouver leur qualité après séchage. La conductivité thermique peut varier de 0.033 à 0.042 W/m.K [28]

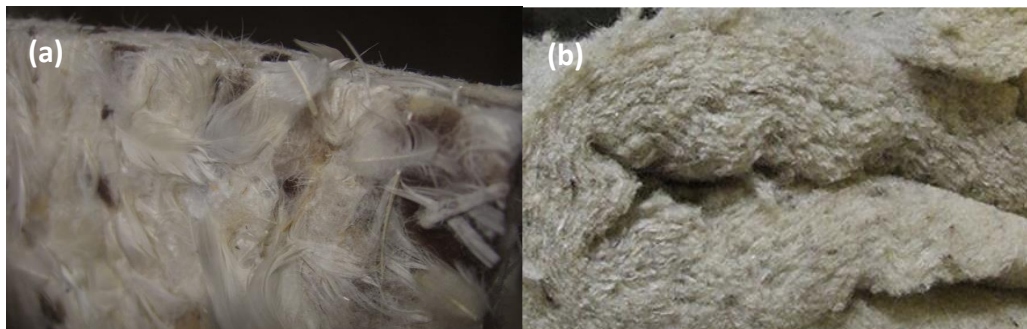


Figure I.10 : Isolants d'origine animale : (a) plume de canard, (b) laine de moutons [22]

c. Végétal

- **Liège expansé**, est un isolant naturel (écorce du chêne liège), qui est utilisé sous forme brute pour faire des bouchons, sous forme de granulats comprimés et liés pour des sols, pour l'isolation aux bruits d'impact et des joints, et sous forme expansée par la chaleur comme isolant thermique. Les panneaux de liège expansé sont difficilement inflammables et résistent à une température de 130°C. Ils ont une faible dilatation thermique et peuvent de ce fait être directement crépis. Le liège absorbe peu l'eau, mais il pourrit s'il reste trop longtemps humide. Il a beaucoup été utilisé, notamment en panneaux de déchets agglomérés au bitume, pour les toitures plates. Son prix fait qu'il est actuellement remplacé par les matériaux synthétiques [19].

- **Béton de chanvre**, Le chanvre (*cannabis setiva*) est une plante annuelle utilisée depuis près d'un millénaire en France qui est le premier pays producteur européen.

Agronomiquement intéressante puisqu'elle ne nécessite que très peu d'intrants (traitement, engrais, irrigation), l'ensemble de la plante est valorisé. Si les fibres constituant la périphérie de la tige de chanvre sont utilisées dans le textile ou pour la fabrication de laine isolante, l'intérieur

de la tige, appelé chènevotte, est également valorisé, par exemple sous forme de béton de végétal dans le secteur du bâtiment.

En association avec un liant (chaux, ciment,...) prescrit avec des dosages variant selon les applications et les couples liant-chanvre utilisés, ce matériau de remplissage peut alors être mis en forme sur chantier selon différentes techniques particulièrement adaptées à la rénovation du bâti ancien. sa Conductivité thermique λ 0,06 à 0,15 W/m.K selon dosage et application [18].

- **Laine de bois**, est constituée de fibres de bois, texturée sous forme de rouleaux ou de panneaux par l'ajout de fibres polymères (polyester principalement) auxquelles sont ajoutés des adjuvants pour assurer la résistance au feu et aux moisissures des produits.

Leur durabilité est excellente. Leur conductivité thermique est généralement comprise entre 0.038 et 0.042 W/m.K [18,23].



Figure I.11 : Isolants d'origine végétale : (a) laine de bois, (b) béton de chanvre et (c) liège expansé [22]

- **Fibre de palmier dattier**, les palmiers dattiers (*Phoenix Dactylifera*) sont cultivés dans de nombreuses régions du monde, notamment dans les zones arides. Les résidus du palmier dattier, tels que les feuilles, les pétioles et les grappes, sont généralement considérés comme des déchets. Les quatre types de fibres du palmier dattier sont composés de structures fibreuses, notamment des fibres de feuilles dans la tige, des fibres de baste dans la tige, des fibres de bois dans le tronc et des fibres de surface situées dans le tronc. Les fibres de palmier dattier sont illustrées à la figure I.12. Oushabi A et al [29] ont mené une étude sur la conductivité thermique. Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NF ISO 88941 avec le dispositif CT mètre. Les fibres du palmier dattier ont été séparées en fibres individuelles et les mesures ont été effectuées à 25° C. Les résultats de cette étude indiquent que la conductivité thermique la plus basse de la fibre de palmier dattier est de 0,041 W/m.K [21].



Figure I.12 : *Différentes parties d'un palmier dattier [30]*

I.4.2.3 Super-isolants

Afin de répondre aux exigences de performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment, toute une classe de matériaux a été développée pour augmenter la résistance thermique des parois. Ces isolants thermiques ont généralement un rôle purement thermique et non structural. Le principe de tous ces isolants conventionnels est le même : il s'agit d'utiliser un matériau à forte porosité et à faible taille de pore, l'air statique emprisonné dans le volume poreux ayant une conductivité thermique inférieure de plusieurs ordres de grandeurs à celle des matériaux de construction classique. Dans ces isolants, le transfert thermique total est dominé par la conduction gazeuse, à laquelle s'ajoutent deux contributions plus faibles de conduction solide (à travers la matrice) et de transfert radiatif. Les super-isolants thermiques, définis comme des matériaux ayant une conductivité thermique plus basse que celle de l'air immobile 25 mW/m.K à pression atmosphérique [24].

a. Panneaux isolants sous vide (VIP), le panneau d'isolation sous vide, également connu sous le nom de (VIP), constitue une nouvelle génération de matériau d'isolation thermique dans le secteur de la construction, satisfaisant à des normes thermiques optimales [21]. Les PIV sont des systèmes constitués de deux éléments principaux : un matériau de cœur, qui assure la très basse conductivité, et une enveloppe barrière aux gaz atmosphériques. Le matériau de cœur est généralement à base de silice nanoporeuse (silice pyrogénée), ce matériau permettant d'assurer au PIV une plus grande durabilité que les matériaux macroporeux par une relative insensibilité aux remontées de pression. Ce matériau de cœur doit rester sous vide pour garder sa très faible conductivité thermique, cette fonction est assurée par une enveloppe constituée d'une membrane barrière aux gaz [31]. La complexe barrière peut quant à lui être constitué de feuilles

d'aluminium laminées, ou bien d'une super position de couches de polymères métallisées [32]. Ces panneaux présentent une conductivité de l'ordre de 0.005 W/m.K .

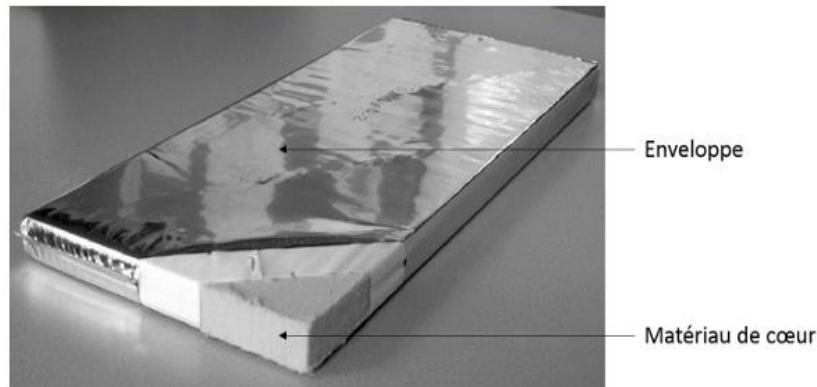


Figure I.13 : *Constitution d'un Panneau Isolant sous Vide (PIV) [32]*

b. Aérogel, Les aérogels possèdent des propriétés qui les placent à la limite de ce qu'un matériau solide peut offrir en terme de densité, de porosité, de structure et par voie de conséquence de pouvoir isolant. Certains aérogels sont en effet annoncés comme étant des super-isolants, matériaux dont la conductivité thermique est inférieure à celle de l'air (soit 0.026 W/m.K) et d'autres affichent une masse volumique pouvant descendre à 2 Kg/m^3 , autant dire de l'air figé. Le secret de telles performances réside dans leur mode de fabrication. En effet, un aérogel est obtenu par un type de séchage supercritique d'un gel, durant lequel la phase liquide du gel est remplacé par du gaz [33].

L'aérogel de silice est le principal matériau réalisé en ce sens. Il peut être semi-transparent et présente une conductivité thermique variant entre $0,01$ et $0,02 \text{ W/m.K}$, tout en étant quasiment ininflammable et hydrophobe. Il peut se présenter sous forme de matelas, en béton, ou intégré dans des produits comme par exemple la laine de roche [18].



Figure I.14 : *Aérogel de silice après séchage supercritique (a) [14]*

Exemple d'aérogel pour l'isolation thermique des bâtiments (b) [34]

I.5 Placement des isolants

La position de l'isolation peut être jouée beaucoup sur le comportement hygrothermique de la paroi d'un bâtiment. D'une manière générale, les isolants doivent être placés sur les principaux composants de l'enveloppe du bâtiment où le transfert de chaleur est plus prépondérant. Ces endroits peuvent être les parois (murs/toitures), les portes et les fenêtres.

I.5.1 Isolation thermique intérieure

L'isolation thermique par l'intérieure consiste à isoler directement un bâtiment dans son espace intérieur en apposant une couche d'isolant sur la face intérieure de sa paroi [5]. Ce type d'isolation est le plus utilisé par les constructeurs à cause de sa facilité de mise en œuvre. L'isolation par l'intérieur présente de nombreux inconvénients. En effet, elle conduit à une réduction de l'espace intérieur du bâtiment et peut générer des ponts thermiques (discontinuité de l'isolation à travers la paroi du bâtiment). Elle peut également diminuer la performance des parois en régions tropicales humides dans les périodes pluvieuses puisqu'elle est susceptible d'accumuler de l'humidité. Par contre, elle ne change pas l'aspect extérieur du bâtiment isolé. L'isolation thermique intérieure a fait l'objet des études théorique et expérimentale dans les travaux de Cherier, 2010 [40].

I.5.2 Isolation thermique extérieure

L'isolation thermique par l'extérieur, couramment utilisée dans les bureaux et les maisons, est une technique d'isolation qui consiste à installer l'isolant sur la surface extérieure de la paroi du bâtiment[5]. Cette technique d'isolation peut-être très coûteuse mais elle peut être également très performante. L'isolation thermique par l'extérieur offre de nombreux avantages et inconvénients en même temps. En effet, elle permet de protéger la beauté extérieure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure du bâtiment isolé. Elle peut également accroître la durabilité de l'enveloppe, réduire les variations de températures ainsi que les défauts liés à l'humidité à l'intérieur de l'enveloppe dans notre climat. Malgré les avantages offerts, ce type d'isolation est cependant interdit à mettre en œuvre sur certains édifices anciens et sur les bâtiments patrimoniaux (historiques) en raison de la nécessité de préserver leur apparence ancienne et distinctive [41].

I.5.3 Isolation intégrée au matériau porteur (isolation répartie)

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est généralement utilisée en construction neuve. Elle est performante et durable [35].

- a. **Béton cellulaire**, Il est fabriqué à partir de ressources naturelles, il est composé pour sa majeure partie 64 % de sable blanc, très pure. Il doit être très hydrophile et craindrait l'eau, Il apporte une bonne inertie thermique au bâtiment ce qui est utile notamment pour le confort d'été, Il possède un coefficient de conductivité thermique entre (0.09 et 0.13 W/m K) [28].
- b. **Blocs mono murs**, C'est un matériau de maçonnerie en terre cuite qui se met en œuvre de manière classique, sa conductivité thermique varie entre (0.12 W/m.K et 0.18W/m.K), et peut descendre jusqu'à 0.07 W.m⁻¹ K⁻¹ avec le remplissage des alvéoles par un matériau isolant comme la laine de roche. Il offre également une faible inertie thermique et régule par sa structure microporeuse l'humidité de l'habitat [28].

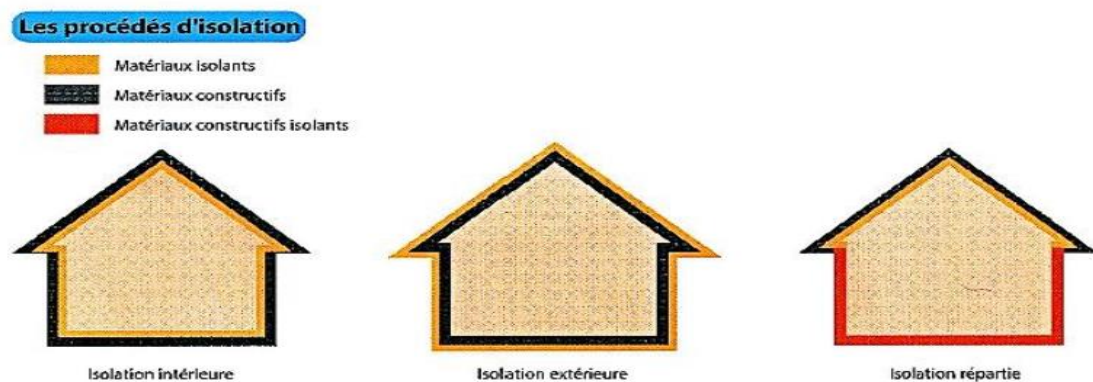


Figure I.15 : Procédés d'isolation interne, externe, et répartie [17]

I.6 Problèmes de l'isolation thermique

De nombreux phénomènes jouent si une isolation thermique n'est pas mise en place. Le but est notamment d'éviter deux phénomènes :

I.6.1 Ponts thermiques

I.6.1.1 Définition d'un pont thermique

Un pont thermique est une zone localisée de faible résistance thermique où la chaleur peut s'échapper facilement, c'est le cas par exemple à l'intersection entre un plancher intermédiaire et les murs extérieurs. Dans un bâtiment ancien, les ponts thermiques représentent couramment 20 % des déperditions totales. Cependant, avec l'augmentation des épaisseurs d'isolant (et dans le cas des isolations par l'intérieur), leur influence en pourcentage, ne cesse de croître. Un pont thermique est donc créé si :

- Il y a changement de la géométrie de l'enveloppe.
- Il y a changement de matériaux et ou de résistance.

I.6.1.2 Types de pont thermique

Les ponts thermiques peuvent être en deux formes :

- **Linéaires** : lorsqu'ils se produisent à la jonction de deux éléments du bâtiment par exemple, d'un plancher intermédiaire et d'un mur extérieur).
- **Ponctuels** : lorsqu'une paroi isolée est perforée par un élément ayant une conductivité thermique élevée ou dans des angles de bâtiments par exemple, un ancrage traversant une paroi isolée).

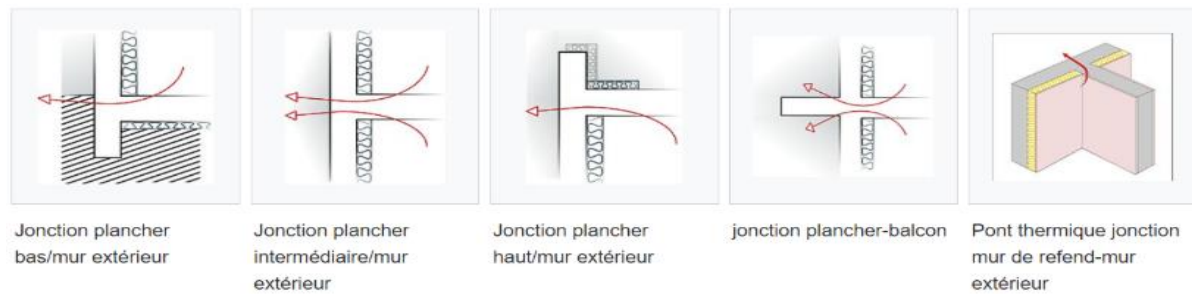


Figure I.16 : Types de pont thermiques les plus courants [41]

I.6.2 Condensation

La vapeur d'eau contenue dans l'air ou dans une paroi se condense à partir d'une certaine température pour un taux d'humidité donné. Si le taux d'humidité d'une pièce à 25°C est de 50% et que la température de la paroi est à 14°C, alors l'humidité va se condenser en surface sur le mur. Cette condensation va alors dégrader les matériaux de la paroi et provoquer des dangers sanitaires tels que moisissures et problèmes d'humidité. Si la paroi avait été à 20°C, il n'y aurait pas eu d'apparition de condensation [15].

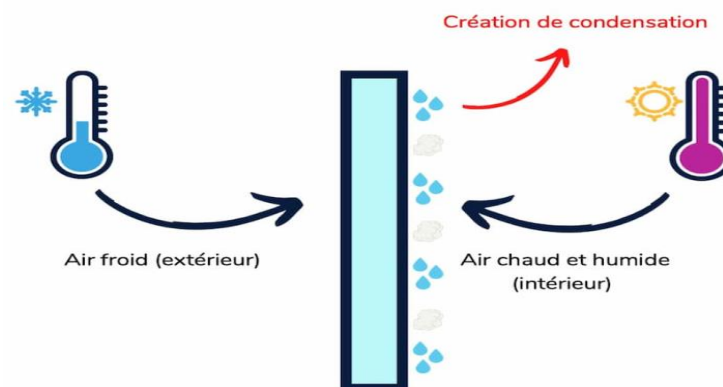


Figure I.17 : Condensation

I.7 Avantages d'isolation thermique

L'intérêt principal de l'isolation thermique c'est qu'elle permet de réduire la dépendance sur les systèmes (mécanique/ électrique) pour exploiter le bâtiment confortablement et, par conséquent, conserve l'énergie et les ressources naturelles associées. En plus de confort

thermique, il existe également plusieurs autres avantages de l'utilisation d'isolation thermique dans le bâtiment qui peuvent être résumées comme suit :

- a. Avantage économique :** Des économies d'énergie importantes peuvent être atteintes à l'aide d'utilisation d'isolation thermique, avec peu de dépenses en capital. Il réduit les coûts d'exploitation de l'énergie.
- b. Avantage environnemental :** L'utilisation d'isolation thermique non seulement réduit les coûts d'exploitation de l'énergie, mais entraîne également des avantages environnementaux comme la valorisation des déchets rejetés qui causent des émissions polluantes.
- c. Réduire le niveau de bruit :** L'isolation peut réduire le bruit gênant provenant des espaces voisins ou de l'extérieur. Cela améliore le confort acoustique des bâtiments isolés.
- d. Intégrité structurale d'un bâtiment :** Les fortes variations de température peuvent causer des mouvements thermiques indésirables, ce qui pourrait endommager la structure du bâtiment. La préservation des bâtiments avec des fluctuations minimales de température contribue à la préservation de l'intégrité des structures de bâtiments. Ceci peut être réalisé par l'utilisation d'une isolation thermique appropriée en augmentant ainsi la durée de vie des structures du bâtiment.
- e. Prévention de la condensation de vapeur :** Bonne installation de l'isolation thermique aide à prévenir la condensation de vapeur sur la surface de bâtiment. Cependant, il faut faire attention à éviter les effets néfastes de la structure du bâtiment dommageable, qui peuvent résulter de mauvaise installation de matériaux d'isolation ou une mauvaise conception. En plus, les pare-vapeur sont généralement utilisés pour empêcher la pénétration d'humidité dans un isolant à basse température.
- f. Protection contre le feu :** Si le matériau isolant approprié est choisi et correctement installé, il peut aider à retarder la chaleur et à empêcher la propagation des flammes dans la construction en cas d'incendie.

I.8 Conclusion

La question de l'isolation des bâtiments peut paraître évidente, pour de nombreuses raisons que nous pensons tous connaître plus ou moins, elle est bénéfique pour l'environnement, elle réduit les consommations et permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes de protection de l'environnement, de confort et d'économies financières. Alors afin d'améliorer le confort thermique dans un bâtiment et économiser de l'énergie, il est nécessaire de bien isoler et mettre en œuvre des matériaux particulièrement performants, apportant une bonne isolation thermique. Donc l'isolation thermique crée un environnement où l'on peut vivre, travailler et se divertir dans le confort, tout en réduisant sa consommation d'énergie.

Chapitre II

Techniques et Solutions de l'isolation thermique

II.1 Introduction

En hiver, les déperditions sont maximales au niveau de l'ensemble des parois opaques et vitrées et des liaisons structurelles. La ventilation naturelle n'est pas contrôlée et augmente les déperditions. En été, le soleil surchauffe l'ambiance intérieure.

Selon l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), la chaleur s'échappe d'une maison mal isolée à 30 % par les combles et la toiture (c'est donc la priorité en termes d'isolation), à 25 % par les murs, à 10 % ou 15 % par les vitres et fenêtres et à 7 % ou 10 % par les sols.

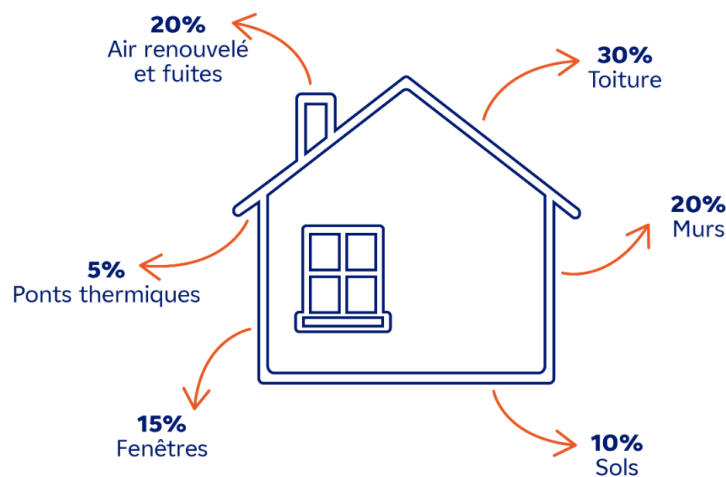


Figure II.1: Déperditions thermiques

II.2 Méthodes d'isolation thermique

II.2.1 Murs

II.2.1.1 Isolation par l'intérieur : historique et techniques

En France, dans les années 60, les constructions n'étaient pas isolées. Les habitudes étaient de placer une lame d'air entre le mur porteur et la cloison de doublage, afin d'éviter les problèmes d'humidité (Figure19). Les murs n'étaient ainsi pas isolés, et les déperditions de chaleur étaient alors importantes. Le prix de l'énergie à l'époque étant très faibles, ceci n'apparaissaient pas encore comme problématique [22].

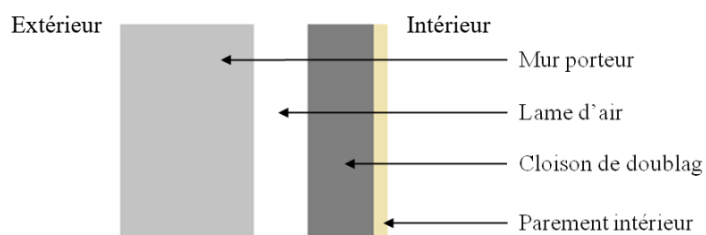


Figure II.2 : Schéma représentatif des murs construits en France dans les années 60[23]

Quand la première réglementation thermique est apparue, en 1975, suite aux chocs pétroliers, la logique a été de placer un isolant pour remplir la lame d'air. Cette solution a ensuite évolué avec l'apparition d'une nouvelle solution constructive : les complexes plâtres et isolant, devenant ainsi la solution française dite du « french cheap wall ».

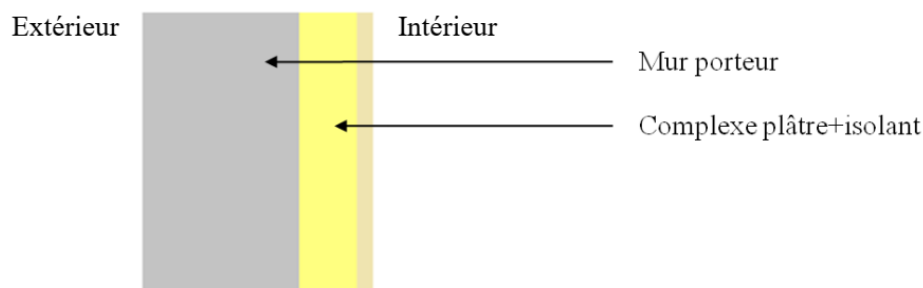


Figure II.3 : Schéma représentatif des murs construits en France à partir de 1975 [22]

Les deux modes constructifs d'isolation par l'intérieur utilisés aujourd'hui sont donc issus de ces évolutions. C'est pour ces raisons historiques qu'aujourd'hui l'isolation par l'intérieur est la solution privilégiée en plusieurs pays européens. Pourtant, cette solution n'est pas optimale thermiquement. En effet, le mur porteur isolé par l'intérieur est soumis à d'importants chocs thermiques (il est très froid en hiver et chaud en été) ce qui peut être la cause de dégradations et de fissures. De plus, l'isolation par l'intérieur annule l'effet d'inertie thermique des murs et perturbe l'hydrothermie du bâtiment car maintient le mur porteur froid en hiver tout en l'empêchant de sécher vers l'intérieur.

➤ Systèmes techniques d'isolation par l'intérieur

Dans le cadre de la recherche **ISOLIN** financée par le département Énergie et Bâtiment durable du Service Public de Wallonie, un guide sur l'isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines a été réalisé par la cellule de recherche Architecture et Climat. La présentation des différents systèmes d'isolation par l'intérieur est issue de ce guide [40].

a. Système à panneaux isolants collés

Ce système est généralement le plus simple à mettre en œuvre, mais la surface intérieure du mur doit être relativement plane : les défauts de planéité ne peuvent pas dépasser 15 mm sur une règle de 2 m, pour ce système on rencontre souvent le polystyrène expansé (EPS) ou extrudé (XPS), le polyuréthane (PUR) ou les panneaux en fibres de bois. Des panneaux sandwich avec isolant, des blocs ou des panneaux isolants en silicate de calcium collés entre eux et au support peuvent aussi être utilisés [44].

- **La mise en œuvre**, Doit être très soignée de façon à ce que les différents panneaux soient parfaitement jointifs et que les liaisons avec les autres parois soient aussi correctement réalisées. Les panneaux isolants peuvent être recouverts de plaques de finition ou d'un enduit (lequel peut être renforcé d'une trame).

b. Système à structure

Ce système permet de rattraper les défauts de planéité du mur. Un isolant souple est posé dans une ossature en bois ou métallique fixée au mur et formant des caissons. Un isolant en vrac peut également être insufflé dans l'ossature. Les éléments de structure diminuent le pouvoir isolant du complexe. Pour limiter cet effet, une plaque d'isolant rigide peut être posée sur les structures avant le pare-vapeur éventuel et la finition [40].

Les matériaux utilisés le plus couramment sont les rouleaux de laine minérale ou végétale, ou les isolants projetés comme la cellulose.

- **La mise en œuvre**, Doit être soignée. Il faut veiller à ce que les interruptions de l'isolant au droit de la structure soient limitées. La membrane pour réguler la vapeur doit être parfaitement continue.

c. Système d'isolation projetée

Certains isolants peuvent être directement projetés sur le mur existant en brique. Les irrégularités du mur ne posent alors plus de problèmes.

L'isolant le plus utilisé couramment est la mousse de polyuréthane (PUR) projetée recouverte d'un enduit (qui rend les panneaux jointifs). D'autres options existent : les mélanges chaux-chanvre, les enduits isolants à base de billes de polystyrène expansé (EPS) ou de vermiculite. La mousse de polyuréthane est projetée par couches successives, jusqu'à l'épaisseur souhaitée et sèche en quelques minutes [44].

- **La mise en œuvre**, Des mélanges chaux-chanvre sont plus délicates et plus longues et demande des temps de séchage beaucoup plus importants. Selon leur dosage en liant (à base de chaux aérienne), les mélanges chaux-chanvre peuvent être soit projetés directement sur le support (manuellement ou mécaniquement), soit contre le support. La finition est généralement réalisée à l'aide d'un enduit à la chaux dont il faut assurer la parfaite continuité.

d. Système avec contre-cloison maçonnée

Ce système permet de rajouter un matériau lourd devant l'isolant et donc de récupérer au moins une partie de l'inertie thermique perdue. Cette solution est toutefois rarement envisageable étant donné la perte d'espace qu'elle engendre. Le poids de la contre-cloison peut également poser un problème. Une paroi auto stable est réalisée à l'intérieur, parallèlement et à une certaine distance du mur. Les matériaux les plus utilisés sont les briques de terre cuite (ou

de terre crue), les carreaux de plâtre, les blocs de béton... L'isolant est incorporé entre la contre-cloison et le mur. Il peut être en vrac, ou en panneaux.

Au niveau des panneaux isolants, il peut s'agir de polystyrène expansé (EPS), de laine minérale semi-rigide ou de polyuréthane expansé (PUR) [44].

- **La mise en œuvre**, Doit être soignée afin de remplir complètement d'isolant l'espace entre le mur et la contre-cloison et d'éviter tout tassement. Lorsqu'on utilise un isolant en vrac pour la première partie du mur, des panneaux isolants peuvent être utilisés avant la pose des derniers rangs de briques pour faciliter la réalisation du mur en partie haute du mur [42].

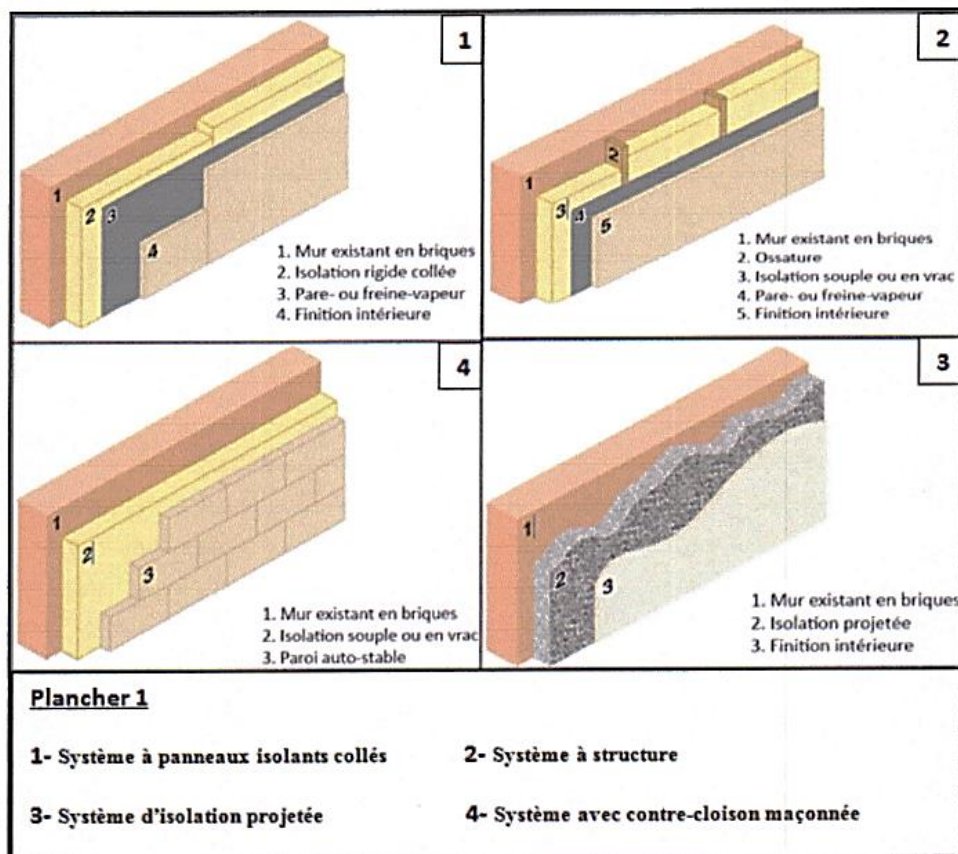


Figure II.4 : Systèmes d'isolation par l'intérieur [44]

➤ Risques majeurs liés à l'isolation par l'intérieur

L'isolation par l'intérieur peut provoquer divers phénomènes hygrothermiques et mécaniques qui nuisent à la durabilité des murs existants.

a. Risque de ponts thermiques et de condensation de surface

Outre les déperditions thermiques, les ponts thermiques peuvent entraîner des problèmes de condensations superficielles causant la formation de moisissures. En effet, les déperditions de chaleur plus importantes entraînent une diminution de la température de surface intérieure au droit des ponts thermiques. Si cette température descend sous la température de rosée, de la

condensation superficielle va apparaître dans cette zone. L'accumulation d'humidité combinée à d'autres conditions risque d'entraîner la formation de moisissures [40].

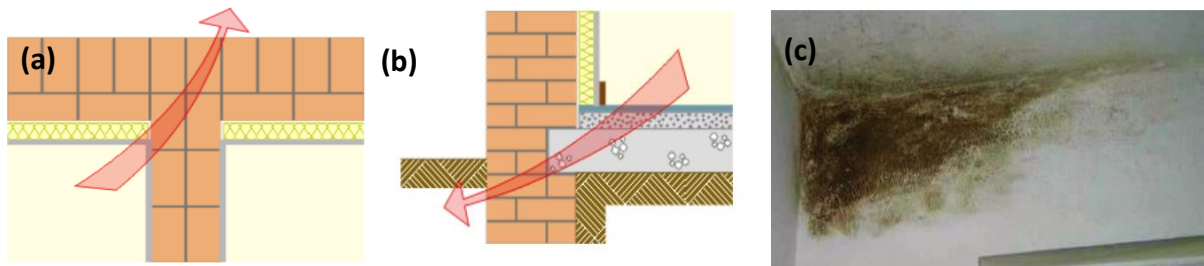


Figure II.5 : (a) Liaison avec un mur intérieur (coupe horizontale), (b) Fondation (coupe verticale), (c) Exemple de moisissures liées à un pont thermique) [44]

b. Risque de condensation interne par diffusion de vapeur

En hiver, la pression de vapeur P_v d'eau de l'air chaud à l'intérieur d'un bâtiment est toujours supérieure à celle de l'air extérieur.

La condensation interne, se produit si à un endroit d'une couche, la pression de vapeur P_v réelle devient égale à la pression de saturation P_{vs} correspondant à la température régnant à cet endroit.

Le risque de condensation interne est grand lorsque l'isolation par l'intérieur est réalisée avec un matériau isolant perméable à la vapeur (c'est à dire, peu résistant à la diffusion de vapeur) (*laine minérale par exemple*) sans pare-vapeur du côté intérieur (ou avec un pare-vapeur posé de manière discontinue). En effet, de l'intérieur vers l'extérieur, la chute de température (et avec elle, la chute de la pression de saturation) est grande dans l'isolant alors que la pression de vapeur est restée importante. Cette dernière va, à un moment donné, dépasser la pression de saturation : il y a condensation interne [42].

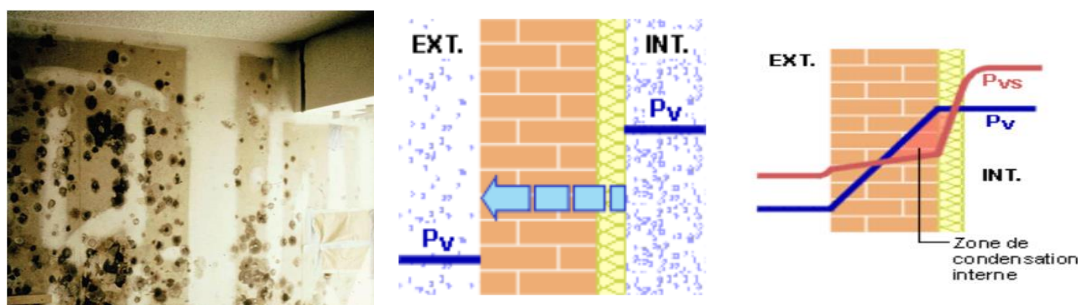


Figure II.6 : Exemple de moisissures dues à la condensation [42]

c. Diminution de l'inertie thermique et risque de surchauffes en été

La présence d'un isolant du côté intérieur du mur de façade diminue l'inertie thermique du bâtiment : le mur de façade isolé par l'intérieur ne peut plus accumuler puis restituer la chaleur (ou la fraîcheur) intérieure. Le local est rapidement chauffé, mais se refroidit tout aussi vite.

En été il y a risque de surchauffe. Cependant, les bâtiments avec des parois internes lourdes et épaisses (murs intérieurs, planchers), peuvent conserver une inertie thermique globale suffisante malgré la perte de l'inertie thermique des murs de façade.

II.2.1.2 Isolation par l'extérieure (ITE) : techniques et avantages

L'isolation thermique par l'extérieur est la solution adoptée par les allemands et par les pays au nord de l'Europe. Elle est conseillée par l'Agence pour le Développement et la Maîtrise de l'Energie (ADEME).

Cette technique nécessite généralement une épaisseur de l'isolant plus faible. Elle consiste à mettre un isolant sur le mur de l'habitation, côté extérieur. Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation, de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse, et moins intéressante du point de vue énergétique [35].

➤ Systèmes techniques d'isolation par l'extérieur

Il existe trois grandes techniques d'ITE [36] :

- a. L'ITE sous enduit** : est composée d'une isolation rigide (généralement du polystyrène, voire de la laine minérale), fixée à la paroi par collage et/ou mécaniquement à l'aide de chevilles ou de profilés, sur laquelle on vient rapporter un enduit pour assurer une protection aux intempéries. Cette technique, dite de filière humide, est la plus souvent utilisée et représentait près des 2/3 des chantiers en 2011.
- b. L'ITE sous bardage** : est un système de fixation mécanique permet de fixer l'isolant et les tasseaux qui supportent le bardage. La lame d'air créée entre le bardage et l'isolant constitue une zone tampon permettant d'atténuer les sollicitations extérieures.
- c. L'ITE sous vêtture/vêtage** : est une solution hybride ; des panneaux sandwich isolants sont fixés mécaniquement à la paroi et directement recouverts d'un parement sans créer de lame d'air.

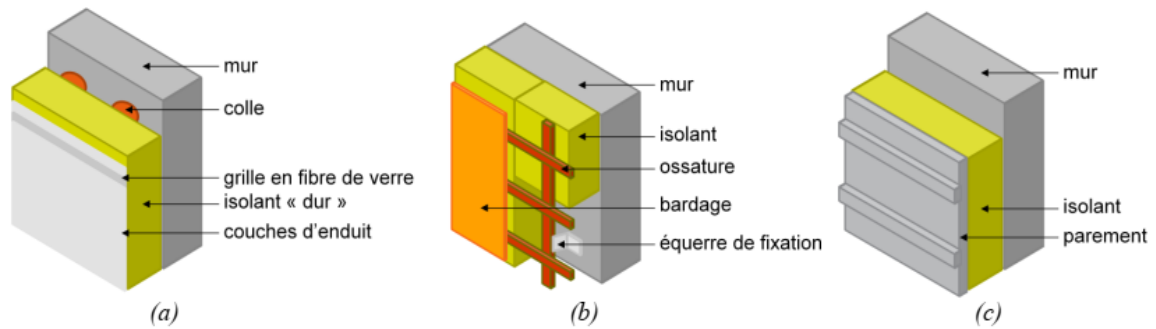


Figure II.7 : Solutions d'isolation par l'extérieur sous enduit (a), sous vêtture (b) et sous bardage (c) [23]

➤ Performance thermique de l'isolation par l'extérieur

L'isolation thermique par l'extérieur est plus performante que celle par l'intérieur. En effet, elle assure la continuité de l'isolation et permet de diminuer ou d'annuler les pertes à travers les ponts thermiques dus à la structure du bâtiment aux liaisons façade-plancher, et ce contrairement à une isolation par l'intérieur. De plus, l'isolation protège le mur porteur des chocs thermiques : celui-ci étant à l'intérieur, il ne subit que peu de variations de température, contrairement à un mur situé à l'extérieur qui subit les variations de températures journalières.

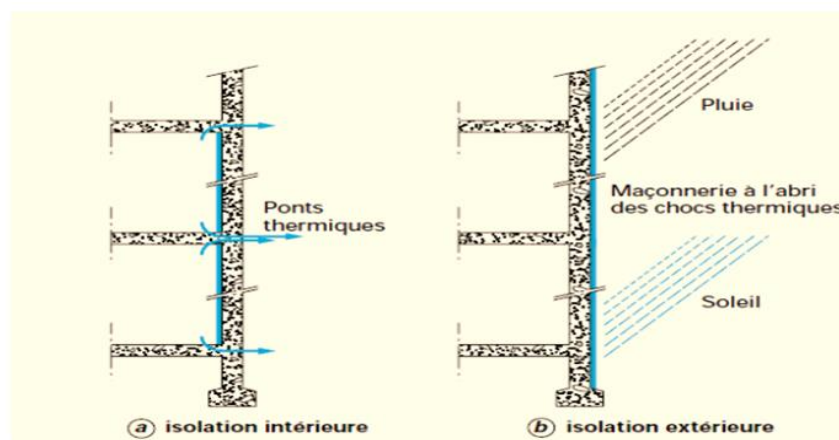


Figure II.8 : Comparaison entre isolation par l'intérieur (a) et par l'extérieur (b) au niveau de la dalle [43]

L'ensemble des déperditions thermiques ramené à la surface des parois est exprimée par le coefficient de transmission surfacique global de la paroi.

$$U_{global} = \frac{\sum UA + \sum \psi l}{A} \quad (II.1)$$

Avec :

- U ($W.m^{-2}.K^{-1}$) le coefficient de transmission surfacique.
- ψ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) le coefficient de transmission linéique.

- S (m^2) la surface intérieure.
- L (m) la longueur de la liaison.

Le terme $\frac{\sum \psi l}{A}$ représente les déperditions linéiques, qui sont importantes dans le cas de l'isolation par l'intérieur (il s'agit des pertes dans les ponts thermiques). L'incidence de ce terme est d'autant plus importante en isolation par l'intérieur que l'épaisseur de l'isolant croît [41].

La figure suivante trace l'évolution des déperditions thermiques en fonction de l'épaisseur d'isolant pour une isolation par l'intérieur et une isolation par l'extérieur. Pour chaque cas, les pertes surfaciques et linéiques sont explicitées. Dans le cas de l'isolation par l'intérieur, les pertes linéiques sont constantes. Elles sont équivalentes aux pertes surfaciques dans le cas d'une isolation de 9cm. Elles ne sont donc pas négligeables. En isolation par l'extérieur, les pertes linéiques sont faibles comparées aux pertes surfaciques. Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a plus de ponts thermiques. Les calculs montrent qu'est bien plus faible dans le cas d'un mur isolé par l'extérieur que par rapport à un mur isolé par l'intérieur. Ceci est d'autant plus vrai que l'épaisseur de l'isolant est importante. L'isolation par l'extérieur est donc de plus en plus préconisée, au fur et à mesure que les exigences de la réglementation imposent de fortes épaisseurs d'isolant.

On constate ainsi dans cet exemple **qu'une isolation par l'extérieur de 6cm correspond à une isolation par l'intérieur de 15cm** [43].

A noter tout de même que l'ajout de rupteurs de pont thermique permet de diminuer les pertes de chaleur en isolation par l'intérieur.

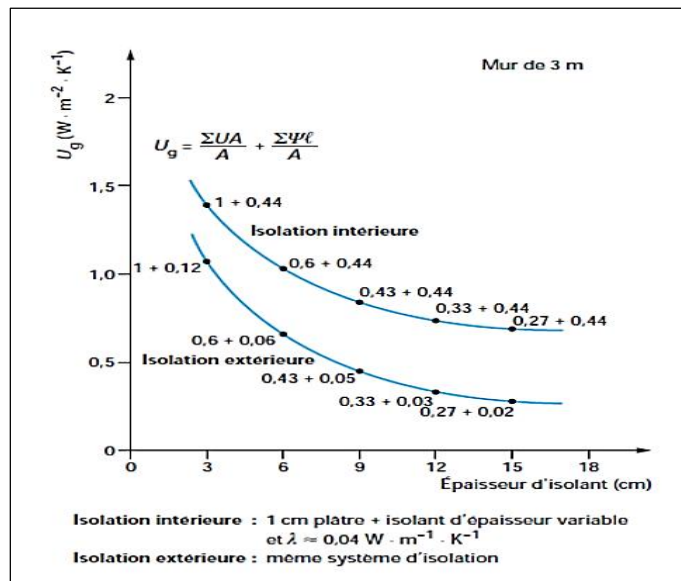


Figure II.9 : Variation du coefficient de transmission surfacique global en fonction de l'épaisseur d'isolation [41]

II.2.2 Toitures

Selon l'ADEME, la toiture est responsable de 30% des déperditions thermiques d'une maison. Le toit est donc une importante source de perte de chaleur et engendre une augmentation de la consommation énergétique, ayant un coût non négligeable dans le budget. L'isolation de la toiture peut être réalisée de plusieurs manières et le choix de la méthode dépend de plusieurs facteurs, dont le type de toiture, sa structure et son état, ainsi que les contraintes budgétaires.

II.2.2.1 Techniques d'isolation thermique de la toiture inclinée**a. Isolation des combles perdus (isolation du toit par l'intérieur)**

Les combles sont dits perdus quand ils ne sont pas aménagés. Soit parce que leurs dimensions (hauteur sous comble et volume utilisable) sont insuffisantes, soit par choix des propriétaires. La méthode d'isolation par soufflage est souvent la plus utilisée pour ce type de toiture. Elle consiste à injecter des flocons d'isolants (laine minérale en vrac) dans les combles à l'aide d'une machine. De plus, cette technique est facile à mettre en œuvre, le soufflage de l'isolant dans les combles perdus nécessite simplement d'avoir un accès aux combles et peut être réalisé rapidement.

b. Isolation des combles aménageables

Les combles habitables sont la partie d'une construction située sous une toiture inclinée et dont l'utilisation nécessite le chauffage puisqu'on y habite.

Deux techniques d'isolation existent :

- **l'isolation sous rampants**, avec parement de finition (plâtre, bois) La pose de l'isolant peut être effectuée en une seule couche sous la charpente ou en deux couches : la première entre les chevrons, la seconde sous les chevrons. La ventilation de la couverture est indispensable Il faut ménager une lame d'air d'au moins 3 cm entre l'isolant et la couverture, sur toute la sous-face de la toiture Celle-ci doit être portée à 6 cm en cas de couverture étanche à l'air (tôle, zinc) et doit être ventilée
- **l'isolation sur toiture**, réalisée au moyen de panneaux de toiture porteurs qui comprennent le support ventilé de couverture, l'isolation et le cas échéant le parement de sous-face Cette technique augmente le volume habitable, assure une isolation continue et durable, préserve la charpente des variations de température et d'humidité et garantit la ventilation de la couverture [46].

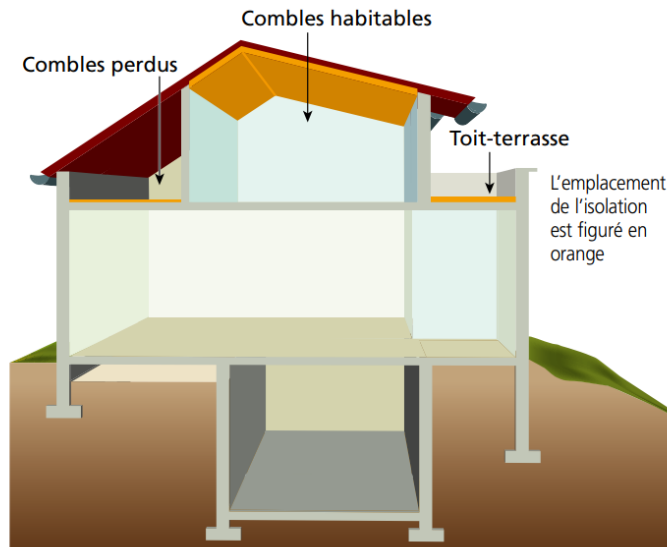


Figure II.10 : Techniques d'isolation thermique de la toiture inclinée [46]

c. Isolation par l'extérieur (Sarking)

Le système Sarking est un procédé d'isolation thermique des toitures inclinées caractérisé par la pose de panneaux isolants rigides au-dessus des chevrons ou des fermettes.

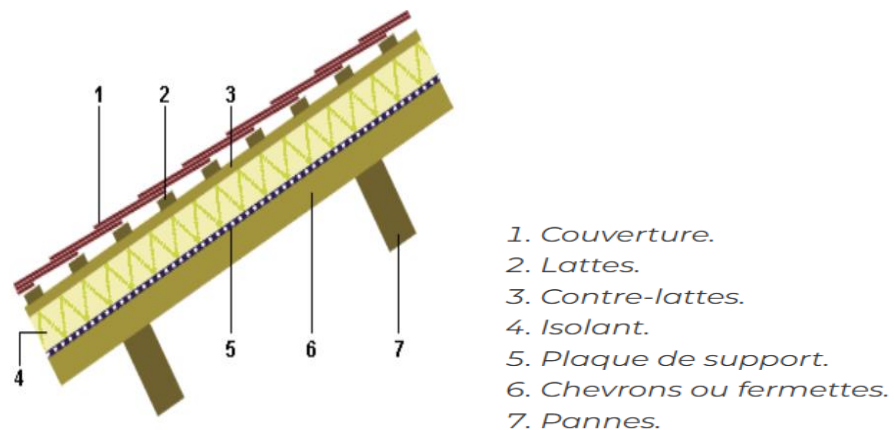


Figure II.11 : La toiture "SARKING" [44]

II.2.2.2 Techniques d'isolation thermique de la toiture plate

Les maisons de style moderne ont souvent des toitures plates ou à très faible pente. Ici aussi, on peut techniquement isoler par l'intérieur, mais il est plutôt recommandé d'isoler par l'extérieur.

a. Isolation par l'intérieur (toiture froide) :

Cette méthode consiste à isoler le toit plat par l'intérieur, en plaçant la couche d'isolation sous le support d'étanchéité. Une lame d'air ventilée sépare l'isolant de ce support. Ici,

l'isolation n'enveloppe qu'une partie de la structure : le support et l'étanchéité ne sont pas protégés [45].

Matériaux isolants pour une toiture froide

- **Laine minérale** : les rouleaux isolants en laine minérale (laine de verre ou laine de roche) sont flexibles et peuvent être posés entre les poutres. Le rapport qualité-prix est intéressant, les performances d'isolation thermique sont bonnes et sur le plan acoustique, la laine de roche est excellente.
- **Panneaux isolants rigides** : les panneaux isolants rigides peuvent être collés ou vissés sous le support. Comme mentionné ci-dessus, les isolants disponibles sous forme de panneaux sont le polyuréthane (PUR), le polystyrène expansé (PSE) et le polystyrène extrudé (XPS).

b. Isolation par l'extérieur (toiture chaude) :

Avec cette méthode, la toiture est dite « chaude » car l'isolation protège toute la structure. La couche d'isolation est posée vers l'extérieur de la toiture, au-dessus du support. Un écran pare-vapeur doit d'abord être posé entre le support et l'isolation pour empêcher la condensation de pénétrer dans l'isolant. Au-dessus de l'isolant, on pose le revêtement de toiture, aussi appelé l'étanchéité. Les revêtements les plus courants pour les toitures plates sont le bitume, l'EDPM et la toiture végétalisée [45].

Matériaux isolants pour une toiture chaude

- **Les Panneaux isolants rigides** en polystyrène extrudé, polyuréthane ou en polystyrène expansé sont très résistants à la compression et à l'humidité, ce qui signifie qu'ils peuvent supporter de lourdes charges. Ils sont donc souvent utilisés pour l'isolation de toitures plates, de toits-terrasses et de sols.



Figure II.12 : Techniques d'isolation : (a) Toiture chaude, (b) Toiture froide [45]

II.2.3 Planchers

Si l'isolation de la toiture et des murs se présentent souvent comme les priorités en termes d'isolation thermique, l'isolation du plancher bas présente elle aussi un réel intérêt en termes d'économie d'énergie. Surtout dans le cas où les autres parois ont déjà été isolées, auquel cas les déperditions viennent alors se concentrer sur le plancher. Le gain énergétique est d'autant plus intéressant que l'isolation des planchers peut présenter un coût plus faible que l'isolation des autres parois.

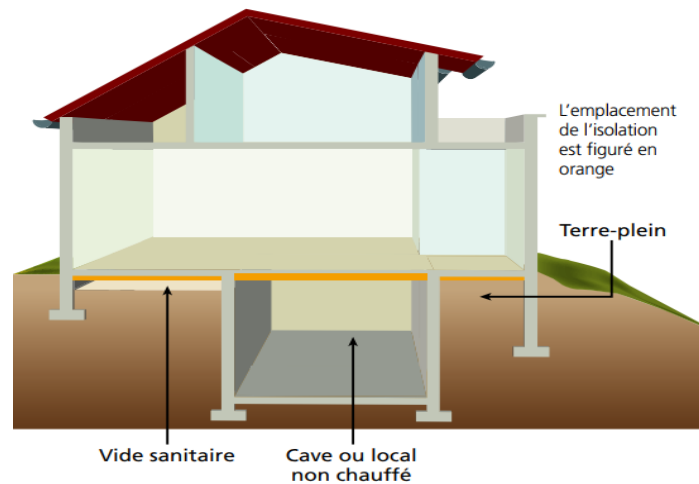


Figure II.13 : isolation des planchers [46]

II.2.3.1 Techniques d'isolation thermique des planchers

a. Plancher sur sous-sol ou isolation sur vide-sanitaire

Dans le cas de l'isolation d'un plancher sur sous-sol, le principe de base est de venir isoler en sous-face, ce qui revient à isoler le plafond du sous-sol. Deux cas se présentent :

- Le plancher maçonné (plancher hourdis-entrevous ou dalle béton) : il est souvent isolé par la pose de panneaux isolants denses collés et chevillés.
- Le plancher bois : il impose l'utilisation de matériaux fibreux perspirants (ouvert à la diffusion de la vapeur d'eau) pour ne pas créer de problématiques d'humidité dans le plancher bois. Selon les cas, un traitement de l'étanchéité à l'air peut être à prévoir [47].

c. Plancher sur terre-plein

Le terre-plein est préparé pour recevoir un béton maigre de propreté. Une première couche d'isolant est posée à même ce béton de propreté. La dalle en béton est ensuite coulée puis recouverte d'une seconde couche d'isolant servant de support à la dalle flottante [16].

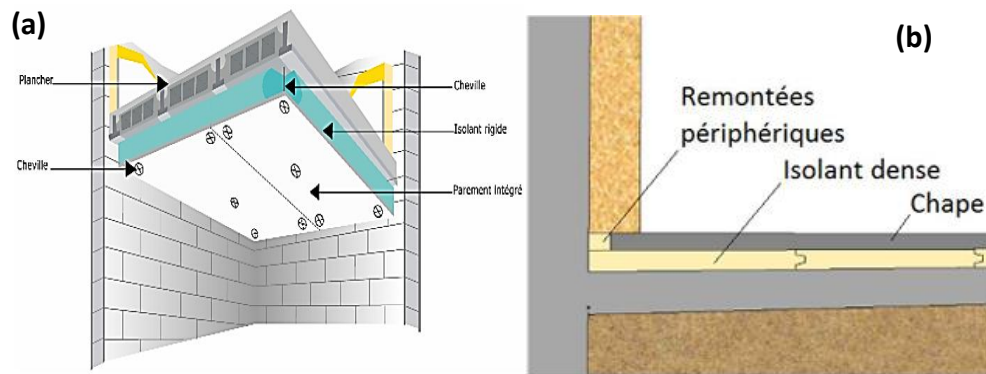


Figure II.14 : Isolation de plancher : (a) sur vide-sanitaire, (b) Plancher sur terre-plein [47]

II.2.4 Parois vitrées

Une baie vitrée (fenêtre, porte, véranda...) est typiquement composée d'une partie transparente : le vitrage, simple, double ou triple et d'une partie opaque : le cadre : acier, aluminium, bois ou PVC, ainsi que de certains accessoires. Les performances thermiques d'une paroi vitrée sont essentiellement garanties par la qualité de ses composants : vitrage, joints, profilé, pré-cadre... une paroi transparente est caractérisée par les phénomènes de transmission et de réflexion de la lumière.

Parmi les critères de performance énergétique d'une paroi vitrée on trouve le coefficient de transmission thermique U_g qui représente sa capacité d'isolation thermique ainsi que sa capacité à conserver l'énergie à l'intérieur du bâtiment et plus U_g est petit, plus la fenêtre est isolante. Le facteur solaire F_s qui traduit le taux de transmission de la lumière par la fenêtre. Ce facteur représente la part du rayonnement solaire qui est transmise à l'intérieur du bâtiment. La valeur du facteur solaire est comprise entre 0 et 1 et plus sa valeur est élevée, plus les apports de chaleur sont importants. Cette caractéristique est prise en compte pour évaluer les apports solaires pénétrant dans le bâtiment. Le Tableau 1 présente quelques valeurs du coefficient U_g et de F_s pour les types de vitrage les plus fréquemment utilisés [48].

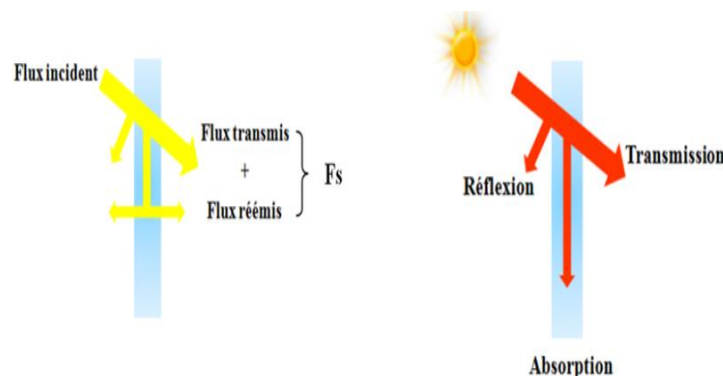


Figure II.15 : Réflexion et transmission à travers une paroi vitrée [48]

Tableau II.1 : Comparaison des performances thermiques du vitrage

Type de vitrage	Caractéristique	U_g (W/m ² k)	F_s
Simple vitrage	Les pertes de chaleur très importantes	5.7	0.85
Double vitrage standard	Les pertes de chaleur sont réduites de 40 % par rapport au simple vitrage.	2.8	0.75
Double vitrage peu émissif a lame d'argon (Double vitrage à isolation renforcée)	Il piège les infra-rouges à l'intérieur de la pièce ce qui réduit les pertes de chaleur de 50 % à 80% par rapport à un simple vitrage.	1.2	0.41
Triple vitrage	La performance de ce vitrage est supérieure de 35 à 40 % à celle du double vitrage.	0.7	0.52

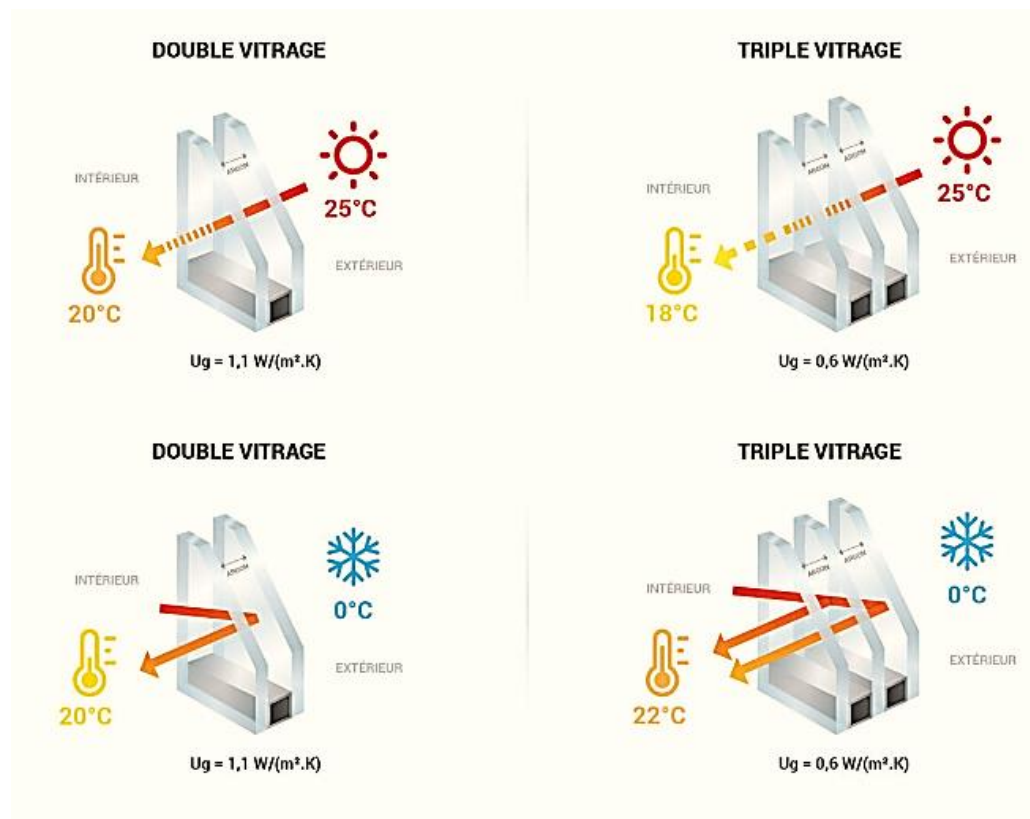


Figure II.16 : Performance thermique de double et triple vitrage

II.2.4.1 Techniques d'isolation d'une paroi vitrée

a. Le survitrage

C'est une solution peu onéreuse, mais d'une efficacité relative. Elle consiste à poser sur la fenêtre existante une vitre rapportée à l'aide de profilés spécifiques. Il convient alors de renforcer l'étanchéité de la fenêtre à l'aide de joints appropriés.

b. Le double vitrage de rénovation

Il consiste à remplacer sur la fenêtre existante le simple vitrage par un **double vitrage dit de «rénovation»**. Il s'agit de doubles vitrages équipés en atelier de minces profilés permettant de les fixer dans les feuillures existantes.

II.3 Normes et réglementation thermique appliquée au bâtiment

Depuis la première crise pétrolière de 1973 provoquée par l'Organisation des pays exportateurs de pétrole, qui a décidé de réduire considérablement la production en raison de la politique occidentale à l'égard des pays arabes, de nombreuses mesures volontaristes et réglementaires ont été prises par les pays victimes visant à réduire la facture énergétique liée au secteur du bâtiment.

Ce dernier est encadré par une réglementation thermique permettant de spécifier les caractéristiques thermiques des bâtiments neufs et fixer leurs quantités maximales d'énergie à consommer pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'éclairage et la production de l'eau chaude sanitaire. De plus, les priorités environnementales comme les émissions de GES ainsi que les énergies grises qui sont devenues tout aussi importantes.

II.3.1 Norme ASHRAE (USA)

En Amérique et plus précisément aux États-Unis, la première réglementation sur la consommation énergétique pour les bâtiments a été mise en place en 1975 par l'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) sous l'appellation ASHRAE 90 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Elle comprend des exigences prescriptives réparties sur 10 sections afin de fixer des valeurs seuil correspondant à la performance énergétique des bâtiments, à l'enveloppe du bâtiment par la fixation des valeurs minimales pour la résistance des parois, à l'efficacité des équipements, à la puissance de chauffage et de ventilation, etc. La norme ASHRAE 90 est devenue ASHRAE Standard 90.1 en 2001, date à laquelle, elle a été mise à jours en 2004, 2007, 2010, 2013 et 2016 en matière de maintenance continue, basée sur l'évolution rapide des technologies énergétiques récentes et plus efficaces.

L'ASHRAE a également développé plusieurs standards pour les bâtiments du secteur résidentiel à savoir :

- Standard 34 – *Designation and Safety Classification of Refrigerants*,
- Standard 55 – *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*,
- Standard 62.1 et 61.2 – *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings*,
- Standard 90.1 – *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*,
- Standard 135 – *BACnet - A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks*,
- Standard 189.1 – *Standard for the Design of High Performance, Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*.

Il existe l'International Energy Conservation Code (IECC) qui est une norme de construction plus pratique et plus adaptée par les états et les administrations municipales aux États-Unis pour l'établissement d'exigences minimales de conception et de construction en matière d'efficacité énergétique. Elle est créée par l'International Code Council (ICC) en 1998 et à partir de celle-là, plusieurs versions de la norme ont été mise à jour en 2000, 2003, 2006, 2009 et 2012. Cependant, le code 2009-IECC est le plus utilisé dans les états américains au 1^{er} janvier 2013 [49].

II.3.2 Norme RT 2012 (France)

En 1974, la France a adopté une première réglementation thermique (RT) afin de réduire la facture énergétique du secteur du bâtiment. La RT 1974 s'applique à l'ensemble des bâtiments neufs d'habitation en fixant un objectif de réduction de 25% de la consommation énergétique des bâtiments en tenant compte de l'isolation des parois extérieures et du renouvellement de l'air afin de limiter les déperditions de chaleur. En matière de déperditions thermiques liées au renouvellement de l'air intérieur, la RT 1974 a instauré le coefficient G ($W/m^3 K$), comme coefficient représentant les déperditions globales d'un bâtiment. Concernant l'isolation des parois, la réglementation a introduit un coefficient de transmission thermique U qui mesure la quantité d'énergie qui s'échappe à travers les parois. Les méthodes de calcul de ces dernières ont été finalisées en 1977 et subiront par la suite plus d'une dizaine de modifications. Dans le cadre de développement de la RT, les concernés n'auront de cesse de renforcer les exigences en matière de déperdition d'énergie et de complexifier les critères retenus afin de mieux tenir compte de certains aspects laissés de côté par la RT 1974. De ce fait, plusieurs réglementations complémentaires de plus en plus restrictives et intégrant un champ d'action

de plus en plus large, ne se sont appliquées qu'aux seuls bâtiments neufs (RT 1982, RT 1988, RT 2000, RT 2005, RT 2005-Rénovation, RT 2012, RT 2020) [49].

- **La RT 2012** s'applique aux Bâtiments de Basse Consommation (BBC), elle a pour objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de 50 KWh/m² an en moyenne, tout en suscitant l'efficacité énergétique. Pour atteindre cet objectif, la RT 2012 exige pour les bâtiments nouveaux une résistance thermique $R \geq 4 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour les murs et les sols et $R \geq 8 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour les plafonds. Actuellement le RT 2012 se concentre essentiellement sur les aspects thermiques et sur l'isolation du logement et prend en compte cinq usages distinctifs : le refroidissement, le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage et les auxiliaires (ventilateurs, pompes ...) [24,14].
- **La RT 2020** correspond aux Bâtiments à Energie Positive (BEPOS), c'est à dire que l'énergie générée sera supérieure à l'énergie consommée. La consommation de chauffage ne devra pas excéder les 12kWh/m²an. rajoute la production d'énergies renouvelables (capteurs solaires, panneaux photovoltaïques, poêle ou chaudière à bois, ballons thermodynamiques...). La RT 2020 va encore plus loin, dans un souci de protection environnementale du foyer, en imposant de nouveaux usages comme les conditions de fabrication et d'utilisation des appareils ménagers, électroménagers et électroniques (ordinateurs, télévision, réfrigérateur...). En plus des critères de production d'énergie, cette nouvelle réglementation inclut également des critères basés sur le bien être des habitants. La qualité de l'air et l'isolation phonique sont autant de points qui seront étudiés et améliorés.

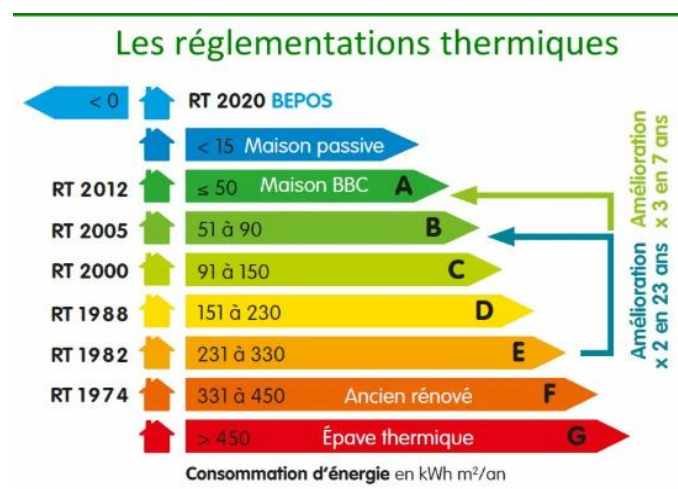


Figure II.17 : Règlements thermiques [49]

II.3.3 Réglementation thermique algérienne

II.3.3.1 Documents techniques réglementaires (DTR)

Depuis plusieurs années, les autorités algériennes spécialisées dans le domaine de l'énergie mènent une stratégie sous la tutelle du gouvernement afin d'améliorer la gestion des ressources énergétiques. Cette démarche est mise en évidence à travers la loi n°99-09 du 28 Juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie dans les secteurs les plus sensibles. Parmi les textes d'application soulignés par cette loi, nous trouvons le décret exécutif n°2000- 90 du 24 avril 2000 portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs. Comme début, la mise en pratique de cette réglementation thermique a été focalisée sur l'amélioration de l'isolation thermique des enveloppes de bâtiments neufs en mettant en place des techniques concernant la disposition de l'isolant au sein de la paroi et des moyens comme les matériaux de construction à basse conductivité thermique. L'objectif était d'atteindre une réduction de l'ordre de 30% de la consommation énergétique liée au chauffage et à la climatisation. La réglementation thermique algérienne est basée sur trois documents techniques réglementaires qui traitent respectivement les règles de calcul des déperditions calorifiques, les règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments et les règles de ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation (D.T.R. C3-2 ; C3-4 et C 3.31) [49,50].

- D.T.R. C3-2 – (Chauffage-Règles de calcul des déperditions calorifiques) indique que, pendant la période d'hiver, les déperditions calorifiques par transmission à travers les parois doivent être inférieures à une valeur de référence $DT \leq 1,05$;
- D.T.R. C3-4 – (Climatisation-Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments) mentionne que, pendant la période d'été, les apports de chaleurs à travers les parois opaques A_{PO} et vitrées A_V calculés à 15h du mois de juillet (considéré comme le mois le plus chaud de l'année) doivent être inférieurs à une limite appelée « Apport de Référence » $A_{réf}$ [50] :

$$A_{PO}(15h) + A_V(15h) \leq 1.05 A_{réf} \quad (II.2)$$

- DTR C3-31– (Ventilation naturelle-Locaux à usage d'habitation) définit les principes généraux qui réglementent la conception des installations de ventilation naturelle et fournit les méthodes de calcul nécessaires pour les dimensionner. Il s'applique aux constructions neuves à usage d'habitation, parties des constructions neuves destinées au logement, parties de bâtiments à l'origine non destinés à l'habitation et transformés en constructions à usage d'habitation.

Récemment, l'équipe bioclimatique du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) a développé une application 'RETA' qui permet de décrire les différents composants d'un bâtiment et d'effectuer les calculs thermiques nécessaires afin de vérifier la conformité d'un projet de construction vis-à-vis de la réglementation thermique algérienne. Cette application offre aussi la possibilité de dimensionner un système de chauffage et de climatisation conformément aux exigences de confort thermique intérieur. Comme tout logiciel, l'application RETA sert à éviter à l'utilisateur un calcul fastidieux pouvant engendrer à la fois des erreurs de calcul et une perte de temps [50].

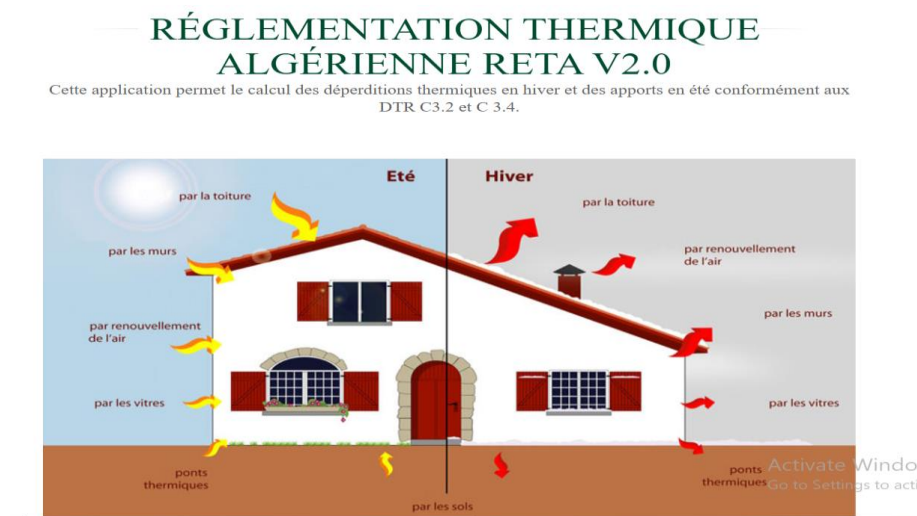


Figure II.18 : Page d'accueil de RETA [50]

II.4 Comparaison des matériaux : conventionnels et biosourcés

Pour assurer l'isolation thermique et/ou acoustique des bâtiments on utilise communément les matériaux conventionnels notamment en polystyrène et en polyuréthane ainsi que des fibres minérales sous forme de panneaux prêts à poser en laine de roche ou en laine de verre. Le polystyrène extrudé est un produit synthétisé à partir des ressources pétrolières avec des procédés chimiques néfastes pour l'environnement et émettant des gaz toxiques à très hautes températures. Les fibres minérales, quant à elles, sont irritantes pour la peau lors du toucher et toxiques en cas d'inhalation des poussières fibreuses, ce qui exige des précautions rendant la pose ou la manipulation de ces matériaux compliquée voire dangereuse, que ce soit lors de l'application finale ou même pendant la mise en œuvre industrielle.

Pour ces multiples raisons, les directives associées à la sécurité du consommateur et de l'environnement émettent des restrictions de plus en plus sévères sur l'utilisation des fibres minérales ce qui restreint significativement les marchés et incite les industriels à chercher des solutions alternatives plus écologiques et économiquement viables.

Parmi les solutions permettant de contourner ce problème, certains acteurs économiques proposent les fibres naturelles et leurs dérivées biosourcés disponibles et renouvelables pour substituer les produits d'origine synthétique et minérale en raison de leurs caractéristiques attrayantes, notamment leur biodégradabilité, leur faible coût, les risques minimes pour la santé des travailleurs pendant la fabrication et le transport des produits finaux vers les sites, les besoins énergétiques réduits ainsi que les performances techniques compétitives en termes de légèreté, de porosité élevée et d'efficacité thermique et acoustique. Les fibres biosourcés se présentent ainsi comme une alternative pouvant répondre aux exigences environnementales et techniques imposées par la filière de construction, permettant de s'intégrer dans une démarche d'économie circulaire et de réduire l'énergie grise associée aux bâtiments [51].

II.4.1 Tableau comparative

Tableau II.2 : Comparaison : isolants conventionnels vs isolants biosourcés

Critères	Isolants conventionnels	Isolants biosourcés
Origine	Pétrochimie (plastiques) ou minéraux (roche, verre)	Ressources naturelles renouvelables (végétales ou animales)
Conductivité thermique (λ)	Très faible (0,020 – 0,040W/m.K) Bonne performance en faible épaisseur	Moyenne (0,038 – 0,050 W/m.K), nécessite plus d'épaisseur
Déphasage thermique	Faible, limite le confort d'été	Élevé, très bon confort d'été grâce à l'inertie thermique
Impact environnemental	Forte énergie grise, ressources non renouvelables, difficilement recyclables	Faible énergie grise, ressources renouvelables, recyclables
Durabilité	Très bonne résistance mécanique, imputrescibles, insensibles aux insectes	Dépend du traitement (anti-humidité, anti-insectes), sensibles sans protection
Santé et qualité d'air	Risques d'émission de COV, irritants (ex. laine de verre)	Généralement sains, peu d'émissions nocives, meilleur confort acoustique
Coût	Moins cher, largement disponible	Plus cher (variable selon la filière), filières locales en développement

II.5 Conclusion

L'isolation thermique est un moyen efficace pour diminuer la facture de chauffage et accroître le confort de bâtiment, elle est complexe et très diversifiée. Chaque zone du bâtiment engendre une déperdition de chaleur plus ou moins importante, selon sa configuration et les matériaux utilisés et les pièces à isoler, il existe des produits d'isolation adaptés à chaque situation : pour les murs, les planchers ou les plafonds, pour les fenêtres, pour l'intérieur ou l'extérieur, chacun avec ses caractéristiques et son utilisation.

L'isolation thermique crée un environnement où l'on peut vivre, travailler et se divertir dans le confort, tout en réduisant sa consommation d'énergie.

Chapitre III
Etude Bibliographique

Des travaux ont été effectués sur le bâtiment pour le rendre moins énergivore, en proposant des solutions pour une enveloppe plus performante et des équipements plus efficaces. Différentes méthodes ont été utilisées pour l'estimation des consommations énergétiques dans le chauffage, eau chaude et conditionnement d'air dans le bâtiment.

DERRADJI et al. [52] ont procédé à l'étude expérimentale et numérique d'une maison rurale à faible consommation d'énergie, réalisée par le Centre National d'Etude et de Recherche Intégré du Bâtiment(CNERIB) dans le cadre du projet MED-ENEC. Cette maison prototype passive certaines caractéristique d'une maison solaire passive, savoir une surface vitrée importante orientée vers le sud, une isolation renforcée des parois et une grande masse thermique. Dans ce travail, ils ont effectués des simulations avec le logiciel TRNSYS pour comparer les performances énergétique de la maison prototype en période d'été (consommation énergétique et confort thermique) avec celles d'une maison classique en Algérie.

Cette étude de **DERRADJI et al. [53]** est menée dans le cadre du projet Med-Enec (Efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment pour les pays méditerranéens). Elle porte sur une analyse expérimentale du comportement thermique d'une maison type de 80 m² à faible consommation d'énergie construite à Alger. Des mesures de température de l'air intérieur et extérieur ont été effectuées à l'aide de thermocouples de type K et des mesures de l'humidité relative avec des thermo-hygromètres. Les variations temporelles de température ont été déterminées sur les faces internes et externes des parois constituant l'enveloppe de cette maison type.

Dans ce papier de **BEKKOUCHE et al. [54]**, ils sont présentés l'influence et l'impact de l'inertie thermique de la pierre sur l'efficacité de l'isolation thermique intérieure et extérieure. Ces travaux et activités de recherche permettent de tirer quelques normes et critères qui sont très intéressantes pour agir et acquérir une isolation parfaite et admirable. En résumé, ils arrivent donc à la conclusion selon laquelle :

- L'isolant joue le rôle d'une barrière thermique.
- Durant une période froide, les pertes thermiques sont freinées par l'isolation. Elle valorise efficacement les apports du confort thermique.
- En hiver, malgré la présence du soleil, les températures des surfaces intérieures des murs exposés restent les plus froides. Ceci implique sans aucun doute, le précieux rôle de l'inertie thermique de la pierre. Nous savons que la durée de la nuit durant l'hiver est d'environ 13 heures, elle est plus importante par rapport à la durée d'insolation. Ces conditions sont favorables pour absorber le froid la nuit.

En terme pratique, l'isolation thermique retienne ses engagements si elle est effectuée avant l'entrée de la période chaude ou froide. Cela consiste à dire que pour accéder et achever une isolation thermique adéquate et conforme, il faut l'effectuer avant l'entrée de l'été ou de l'hiver.

Une importante inertie associe trois caractères :

- une forte capacité thermique (murs et planchers lourds en contact avec l'air intérieur).
- une conductivité thermique élevée (murs en matériau absorbant).
- une grande surface d'échange

D'après ces résultats, on peut procéder aussi à des décisions très importantes au niveau de Ghardaïa. On cite à titre d'exemple :

- Il faut respecter soigneusement les normes et les principes de la conception bioclimatique dans la construction des bâtiments au niveau du site.
- Il ne faut pas surtout bâtir des logements avec la pierre à Ghardaïa. La forte raison c'est que les murs en pierres possèdent une grande capacité d'absorption, d'emmagasiner ou de stockage calorifique. On propose par exemple la brique creuse.

Dans un contexte de raréfaction des ressources énergétiques et d'objectifs de diminution par 4 des émissions de gaz à effet de serre[55], le problème posé aux acteurs de l'industrie du bâtiment est d'élaborer des concepts de bâtiments à forte efficacité énergétique et de disposer des outils d'ingénierie capables de les évaluer. De nombreuses études et retours d'expériences sur des bâtiments atteignant des besoins annuels de chauffage inférieurs à 50 KWh.m⁻² (incluant chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage et ventilation) montrent que la diminution des consommations énergétiques passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports d'énergie passifs, une sur isolation de l'enveloppe, la mise en place de free-cooling et d'une ventilation double flux avec récupération de chaleur. Les performances de cette dernière technologie sont directement affectées par le renouvellement d'air naturel à travers les défauts d'étanchéité de l'enveloppe. Il paraît donc primordial de procéder à une évaluation plus fine de ces phénomènes. Un modèle de simulation aéraulique multizone est développé. Il permet d'évaluer les débits d'air dans le bâtiment et s'insère dans un outil d'aide à la conception thermique. COMFIE, ce modèle est basé sur les hypothèses du mélange parfait et de la conservation de la masse pour chaque zone du bâtiment. Les débits d'air entre deux zones s'expriment en fonction de la différence de pression (causée par le vent et le tirage thermique) entre ces zones. Plusieurs sortes de connexions aérauliques sont implémentées dont les fissures, les entrées d'air et les grandes ouvertures. Le modèle aéraulique utilise les températures du modèle thermique pour qui les débits d'air sont aussi une donnée d'entrée. Les deux modèles sont donc couplés, via une

méthode synchrone, jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit atteint. Deux études de cas permettent de présenter les fonctionnalités du modèles : une opération de logement et un "concept building" de bâtiment urbain performant [55].

Le « bâtiment à énergie positive » est un concept de bâtiment très performant [56]. Il peut constituer l'une des réponses possibles aux défis énergétiques et environnementaux d'aujourd'hui. Pourtant il est encore peu connu et peu mis en œuvre. À la lumière de quelques réalisations, ce concept a été défini et caractérisé, puis différents outils et méthodes ont été identifiés pour permettre l'analyse des performances d'un bâtiment. Compte tenu des spécificités techniques des bâtiments à énergie positive, deux solutions technologiques ont été plus particulièrement étudiées : un système de ventilation intégrant un échangeur air-sol a été modélisé puis validé à partir de données de mesure un système de chauffage aéraulique à micro-cogénération a été modélisé à partir de données issues d'un banc d'essai dédié. Les modèles de ces deux systèmes ont été intégrés à un outil de simulation thermique du bâtiment. L'analyse énergétique et environnementale a été appliquée à trois bâtiments réels très performants équipés de différents systèmes de chauffage, à partir de l'outil amélioré et des méthodes les plus adaptées. Le choix du système de chauffage mais aussi les critères d'évaluation retenus influencent fortement les résultats obtenus. Le bâtiment à énergie positive (bilan en énergie primaire) représente la meilleure solution pour la majorité des impacts environnementaux étudiés. L'analyse des impacts sur le cycle de vie et le calcul de la demande cumulative d'énergie permettent de caractériser finement ses performances environnementales.

Cette recherche de **BELKADI** [57] consiste à développer une méthodologie et des outils qui visent à améliorer la qualité du processus de conception en s'appuyant sur les travaux du CSTB sur le commissionnement. Ce processus qualité doit permettre d'évaluer régulièrement les différents choix réalisés par les différents acteurs en considérant le bâtiment comme un système complexe composé de sous-systèmes (enveloppe, chauffage, ventilation, etc.), de gérer les imprévus, de minimiser les pertes d'information et de rappeler les objectifs tout au long du cycle de vie du bâtiment.

Le bilan énergétique national de l'année 2005, montre que la consommation finale évaluée à 24,437 millions de TEP, fait ressortir une prédominance de la consommation énergétique du secteur des ménages (soit 52,3 % de la consommation finale) par rapport aux secteurs de l'industrie (23,8 %) et celui des transports (23,9 %). Dans cet article, est présentée une analyse de l'utilisation des différents vecteurs énergétiques dans une habitation individuelle en milieu urbain. A l'aide d'un programme de simulation des paramètres thermiques du bâtiment, C.

HAMOUDA et al. [58] ont identifiés les sources de déperditions énergétiques, ainsi que les possibilités d'économie d'énergie pour ce bâtiment. Les résultats obtenus sont comparés aux standards publiés, particulièrement pour les maisons à faibles consommations d'énergie.

KHARCHI et al. [59] ont montrés que les apports de chaleur par les parois vitrées et opaques influent sur la consommation énergétique de l'habitat que ça soit pour le chauffage ou le rafraîchissement, pour cela il faudrait optimiser la surface vitrée et bien isoler le toit, de telle sorte que la demande énergétique soit minimisée. La demande en froid est très importante surtout au sud et dépasse 3000 KWh/mois, pour cela il faut penser aux protections solaires pour diminuer les apports solaires par les parois vitrées. Par contre pour Alger et Sétif, la demande énergétique atteint les 1500 KWh/mois au maximum, ce qui est acceptable. Le plus intéressant est que la demande en froid varie avec l'ensoleillement, de ce fait utiliser cette source d'énergie pour le conditionnement d'air, et les systèmes de rafraîchissement de l'habitat serait très judicieux.

Un système solaire combiné est une installation solaire qui fournit à la fois de l'eau chaude sanitaire et le chauffage, on l'appelle aussi « combi Système ». Dans cette étude, **KHARCHI et al. [60]** ont évalué les besoins énergétiques d'un tel système dans le cas d'une famille de cinq personnes sur un site de Bouzaréah, Alger, la surface chauffée par le plancher solaire direct est de 100 m² avec un niveau d'isolation moyen. La demande de chauffage varie linéairement avec la température extérieure, proportionnelle au coefficient de pertes de chaleur (UA en W/°C). La demande de chauffage mensuelle atteint ≈ 1700 kWh en hivers, en prenant comme température désirée $T_c = 21^\circ\text{C}$ pour une température extérieure de $\approx 10^\circ\text{C}$. La demande en eau chaude sanitaire d'une famille de cinq personnes peut atteindre les 400 kWh/mois mais peut varier de $\pm 20\%$. L'énergie solaire couvre totalement les besoins en été, en mi- saison plus de 50% et en hiver $\approx 20\%$, pour cela l'appoint est primordial.

Le bâtiment à haute efficacité énergétique est la seule solution afin de diminuer les dépenses énergétiques et les émissions des gaz à effet de serre. Ce travail de **KHARCHI [61]** consiste à étudier le comportement thermique et énergétique d'une maison construite avec des matériaux locaux et selon les normes algériennes de construction. Une bonne isolation de l'enveloppe ainsi que le double vitrage sont appliqués sur l'habitat étudié. La méthode des degrés jours est utilisée pour l'analyse de la demande énergétique en chauffage et en rafraîchissement. La demande en eau chaude sanitaire est évaluée selon la méthode analytique. Une simulation thermique sous TRNSYS 16 conforte les résultats obtenus par la méthode des degrés jours. Les apports solaires et internes sont très influents sur la consommation énergétique.

Le but de cet article de **GUECHCHATI et al. [62]**, est l'étude thermique et énergétique du centre psychopédagogique 'SAFAA' qui se situe dans la ville d'Oujda (Maroc). A ce propos, des simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel de simulation du comportement thermique en régime dynamique 'TRNSYS 16' avec le modèle numérique type 56. Ce projet vise l'introduction des matériaux isolants dans un bâtiment afin d'améliorer le confort thermique et de réduire l'énergie consommée. Diverses solutions ou variantes ont été proposées, qui permettent de faire un choix pertinent assurant un meilleur confort thermique de cette institution tout en étant très peu gourmand en énergie.

MOHSEN et al. 2001 [63] ont effectués une recherche sur l'économie d'énergie par l'isolation des bâtiments avec différents matériaux comme le polystyrène, la laine de roche, et par une lame d'air. Ils ont constaté que l'économie d'énergie peut atteindre 77 % en utilisant le polystyrène dans l'isolation des murs et du toit.

AKTACIR et al. 2010 [64] ont étudiés l'effet de l'isolation sur un simple bâtiment situé à Adana en Turquie (climat méditerranéen). Ils ont montré que l'augmentation des épaisseurs de polystyrène extrudé entraîne une réduction des besoins en énergie de rafraîchissement.

OZEL et al. 2007 [65] ont utilisés la méthode des différences finies pour déterminer la position et la distribution optimales des isolants sur les murs. Ils ont conclu que l'isolation extérieure des murs constitue la meilleure solution.

AL-SANEA et al. 2005 [66] ont montrés que l'orientation des murs a un effet significatif sur les caractéristiques du transfert de chaleur, alors que cet effet est relativement plus faible sur le coût total et l'épaisseur optimale d'un isolant donné. Dans la même étude, ils ont évoqué le coût total et l'épaisseur optimale d'isolation, ainsi que leurs sensibilités aux changements dans les paramètres économiques.

FEZZIOUI et al. 2008 [67] ont utilisés le logiciel TRNSYS pour étudier l'influence de l'enveloppe du bâtiment sur sa demande énergétique en période de surchauffe. Ils ont introduit des éléments d'amélioration de l'habitat étudié, tels que l'augmentation de l'inertie thermique, l'isolation des murs extérieurs et de la toiture.

MEDJELEKH et al. [68] ont évalués l'impact de l'inertie thermique sur la consommation énergétique des bâtiments en réalisant une comparaison entre une maison de l'époque coloniale et une villa contemporaine. Leurs résultats ont montré que l'utilisation d'un matériau local adapté au climat de la région permet d'obtenir un confort hygrothermique et réduire ainsi la consommation d'énergie.

NECIB1 et al. [69] ont étudiés le bilan thermique de la salle des enseignants de l'université de Kasdi Merbah-Ouargla pour détecter puis remédier les points thermiquement faibles de cette salle. L'outil de calcul TRNSYS a été validé par une comparaison entre les résultats numériques et celles mesurées, de la température ambiante de la salle. L'étude a montré que la toiture, est responsable de 70.62% des gains thermiques globaux, par contre 27.11% de gain est reçu par les quatre murs et 2.27% par les fenêtres. L'isolation thermique de la toiture par le Liège ou le gravier ainsi que l'isolation des murs par le polystyrène pour plusieurs épaisseurs ont été étudiés. L'isolation de la toiture par 5cm de Liège va, par exemple, réduire les gains thermiques globales de 46.29% et la même épaisseur de polystyrène (5cm) utilisée pour l'isolation des murs réduit 12.76% du gain thermique globale, c.à.d. qu'une isolation combinée de toiture et de murs avec liège et polystyrène de 5cm d'épaisseur, peut réduire jusqu'à 59.09% du gain thermique globale et atteint une réduction jusqu'à 69.96% pour une épaisseur de 10cm. Cette réduction influe directement sur la consommation de l'énergie électrique consommée par la climatisation, et la même portion de cette énergie est réduite durant les cinq mois étudiés.

Chapitre IV
Simulation et Analyse avec TRNSYS

IV.1 Introduction

L'étude thermique des bâtiments a longtemps reposé sur une modélisation statique des phénomènes. Dans un contexte énergétique mondial tendu, la réalisation de bâtiments énergétiquement performants est un enjeu majeur des prochaines décennies, pour réussir à relâcher la pression qui pèse sur l'énergie et le climat. Où, le comportement thermique du bâtiment met en jeu de nombreux phénomènes physiques dynamiques dont certains effets, négligeables dans un bâtiment traditionnel, deviennent déterminants dans un bâtiment très isolé. C'est pourquoi, la simulation thermique dynamique est aujourd'hui un outil incontournable pour la recherche, le développement et la conception de bâtiments peu consommateurs d'énergie. TRNSYS figure parmi les outils de recherche les plus puissants permettant l'étude du comportement thermique du bâtiment.

IV.2 Présentation du logiciel TRNSYS

Abréviations pour TRNSYS Transient System est l'un des programmes de système de simulation les plus populaires. Il s'agit d'un environnement de simulation complet et extensible qui traite principalement des problèmes liés aux systèmes à comportement transitoire tels que les applications d'énergie solaire, l'analyse thermique des bâtiments, systèmes électriques, CVC (chauffage, ventilation et climatisation), etc.

IV.2.1 Historique et développement du logiciel TRNSYS

Le logiciel de Simulation TRNSYS trouve son origine dans un projet commun mené par le Solar Energy Laboratory de l'Université du Wisconsin – Madison et l'Université du Colorado – Boulder, dans le cadre duquel un bâtiment solaire passif a été construit à Boulder et simulé à Madison. Vers la fin du projet, l'ajout d'un conduit de dérivation de fournaise a nécessité une demi-journée de travail pour modifier le système de chauffage et deux mois de reprogrammation de la simulation. Il est devenu évident (comme ce fut le cas pour d'autres groupes développant des moteurs de simulation similaires à la même époque) qu'un outil plus flexible était nécessaire. Le principe fondamental de TRNSYS est de modéliser chaque élément d'un système énergétique comme un composant individuel de type boîte noire. La simulation d'un système implique de connecter les entrées et les sorties de ces boîtes noires entre elles et, si certains modèles sont manquants, de les développer et de les ajouter rapidement au package [70].

Disponible commercialement depuis 1975, TRNSYS a été initialement développé pour la simulation de processus solaires thermiques. Au cours de son existence, cet outil a évolué pour

devenir un logiciel complet de modélisation énergétique des bâtiments. Il a été utilisé dans des projets d'étude de systèmes de climatisation automobile, de systèmes de cogénération, et de la circulation routière, entre autre [70].

Les années entre 1980–1990, le logiciel a rapidement été adopté pour d'autres applications énergétiques au-delà du solaire, comme les systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation) et l'approche par composants (types), où chaque élément (panneau solaire, réservoir, bâtiment, pompe, etc.) est représenté par un sous-programme, a permis une grande flexibilité.

Durant cette période, TRNSYS est devenu un outil académique de référence pour la recherche en simulation thermique.

TRNSYS s'est diffusé en Europe, Asie et Amérique latine, utilisé par des laboratoires de recherche, universités et bureaux d'études. De nouveaux modules sont intégrés : modélisation du bâtiment, de la climatisation, des systèmes hybrides (solaire + réseau), et des énergies renouvelables. Les versions 14 et 15 marquent l'intégration d'interfaces plus conviviales (1990 - 2000).

Depuis 2000 jusqu'à aujourd'hui on a des versions modernes :

- **TRNSYS 16 (2004)** : amélioration graphique, meilleure gestion des systèmes complexes.
- **TRNSYS 17 (2010)** : intégration d'un moteur de simulation 3D du bâtiment via *TRNBuild*, et couplage avec d'autres outils (SketchUp, EnergyPlus, MATLAB, etc.).
- **TRNSYS 18 (2017–2018)** : dernière version majeure, avec une interface modernisée, des performances accrues, et des bibliothèques élargies.

IV.3 Domaines d'applications de TRNSYS

➤ Bâtiment et confort thermique

- Simulation du comportement thermique des bâtiments (chauffage, refroidissement, ventilation).
- Analyse de l'impact de l'isolation, des fenêtres, de l'orientation, et de la masse thermique.
- Évaluation du confort thermique des occupants (température, humidité, qualité de l'air).

➤ Systèmes solaires et énergies renouvelables

- Étude de systèmes solaires thermiques (chauffe-eau solaires, chauffage d'appoint).
- Simulation de systèmes photovoltaïques (PV) et hybrides PV/T.
- Intégration des pompes à chaleur géothermiques ou aérothermiques.
- Évaluation de systèmes hybrides : solaire + réseau + stockage.

➤ Climatisation et CVC

- Conception et optimisation de systèmes de chauffage, ventilation et climatisation.
- Étude de solutions de ventilation naturelle ou mécanique.
- Simulation de systèmes multi-énergies (biomasse, gaz, solaire, électricité).

➤ Stockage d'énergie

- Modélisation des systèmes de stockage thermique (eau chaude, glace, sels fondus).
- Étude de l'intégration de batteries et de systèmes hybrides de stockage.

➤ Systèmes industriels et micro-réseaux

- Optimisation de l'efficacité énergétique dans des procédés industriels.
- Étude de micro-réseaux associant production renouvelable, stockage et distribution locale.

➤ Recherche et enseignement

- Utilisé dans de nombreuses thèses et publications scientifiques pour valider des modèles.
- Support pédagogique dans les universités et écoles d'ingénieurs pour la formation en énergétique et en simulation.

IV.4 Simulation des bâtiments avec TRNSYS

La simulation thermique dynamique permet de faire « vivre virtuellement » en direct au sein d'un bâtiment pour une longue durée dans le but d'étudier son comportement et obtenir des résultats qui sont proches de la réalité. Pour valider les solutions retenues, TRNSYS a été choisi pour la simulation en raison de ses nombreux avantages

IV.4.1 Principaux caractéristiques de TRNSYS

TRNSYS come tout autre logiciel se caractérise par fonctions qui peuvent se regrouper en trois domaines [71] :

➤ Entrées

Concernant toutes les informations à introduire et à stocker dans des bibliothèques que le concepteur peut les utiliser. Ces entrées concernent (l'environnement physique «climat, site », le bâtiment «l'enveloppe», les apports internes (occupants, éclairage, ..)Les équipements «ventilation, chauffage, climatisation.. »).

➤ Traitement des données

Le travail du logiciel consiste à structurer les données en fonction d'un « modèle de représentation du bâtiment » et de « modèles physico-mathématiques » des phénomènes physiques retenus.

➤ Sorties

Sont les ensembles des résultats qui peuvent être fournis par le logiciel à l'issue d'une exécution. Les phénomènes que le model de simulation thermique doit prendre en compte :

- Le transfert de chaleur par conduction à travers l'enveloppe et les effets de stockages calorifiques dans la masse de bâtiment.
- Les gains dus aux occupants, aux appareils, à la lumière électrique.
- L'ombrage des parois opaques et transparentes.
- Les effets des radiations solaires de courte longueur d'onde et les radiations reçues par les surfaces exposées et internes.
- Les radiations de longueur d'ondes échangées entre les surfaces externes, la voûte céleste et l'environnement.
- Les effets de l'humidité.

IV.4.2 Environnement TRNSYS

IV.4.2.1 TRNSYS Simulation Studio

« TRNSYS Simulation Studio » est l'interface d'accueil de TRNSYS permettant de développer des applications de simulation. Un projet de simulation consiste à choisir un ensemble de modules et à décrire ensuite les interactions entre ceux-ci. Chaque module représente un sous-programme. On introduit pour chaque sous-programme les différents paramètres les variables d'entrée et de sortie.

Le TRNSYS simulateur est basé sur le principe de la simulation dynamique, et son environnement se compose d'un espace de travail, les barres d'outils, et une bibliothèque de modèles dans la forme des icônes stockées dans des fichiers dans l'onglet Bibliothèque. Les modèles sont insérés dans l'espace de travail en les faisant glisser avec le curseur.

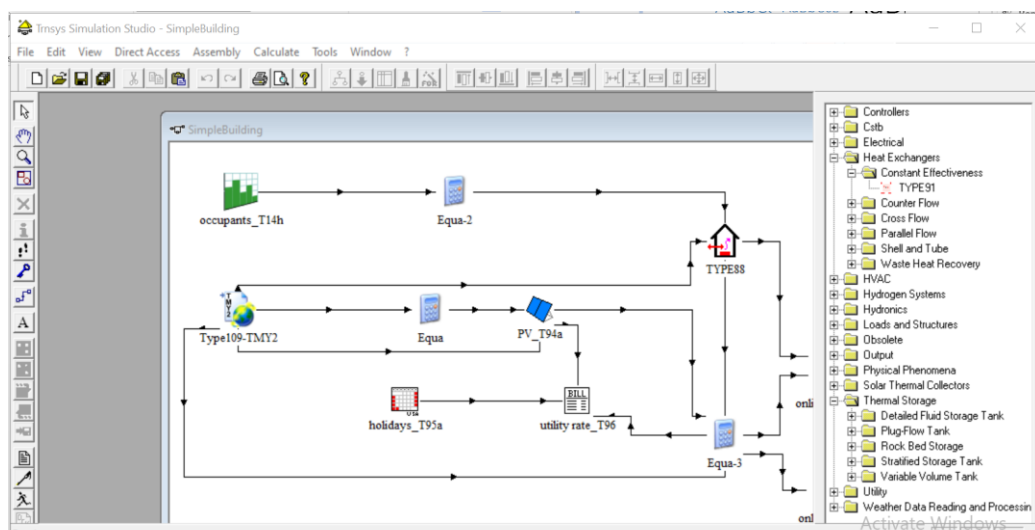


Figure IV.1 : Interface du logiciel TRNYS

IV.4.2.2 TRNBUILD

TRNBuild est un outil permettant d'introduire les caractéristiques d'un bâtiment multizone nécessaire à la simulation thermique de celui-ci. Ses propriétés sont introduites dans « TRNSYS Simulation Studio ». Cette interface permet de décrire tous les composants d'un bâtiment multizones utilisant le Type 56. En fait, nous spécifions la composition des murs, leurs orientations respectives, les surfaces vitrées et les types de vitrages utilisés. Il est nécessaire aussi de définir les conditions initiales de la zone étudiée (la température intérieure et l'humidité relative). Les caractéristiques des murs, fenêtres, portes, planchers et plafonds (dimensions, matériaux, orientation, etc.) dans chaque zone ont été obtenues à partir des dessins d'architecture. Le modèle de bâtiments multizones par le logiciel TRNSYS permet à l'utilisateur de construire des types de murs à partir de couches, les propriétés thermo physiques de chaque couche (conductivité thermique, densité, chaleur spécifique, épaisseur, etc.) sont entrées par l'utilisateur ou choisies à partir d'une bibliothèque existante [60].

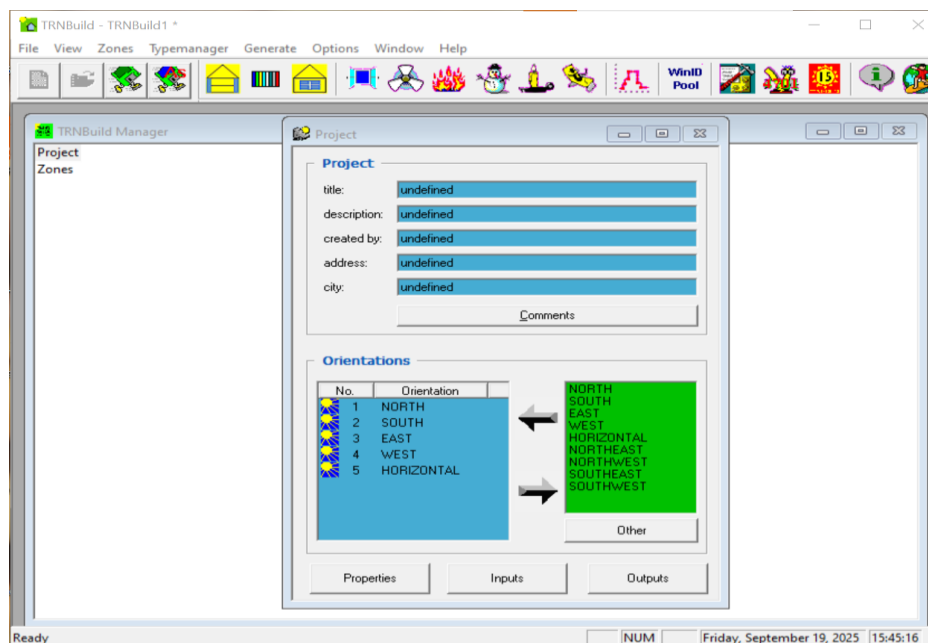


Figure IV.2 : Interface du logiciel TRNBuild

IV.4.3 Utilisation du logiciel TRNSYS

Au moins trois composants sont nécessaires pour simuler le comportement thermique d'un bâtiment. Le premier concerne les données météorologiques, le second le calcul de l'ensoleillement du mur et le troisième les échanges thermiques à l'intérieur du bâtiment.

Ces trois composants nécessaires au lancement de la simulation sont identifiés dans TRNSYS par TRNWIN fichier météo, le fichier DECK (programme propre à la simulation) et le fichier BUI (description du bâtiment) par BUI figure

Les composants sont identifiés par leur type et le numéro d'unité.

➤ **Type**

(TYPE) définit le modèle utilisé, exemple le type 56 est le modèle du bâtiment Multi zones.

➤ **Unité**

(UNIT) désigne le numéro du composant. Chaque composant est défini par des paramètres, des données et des sorties [66].

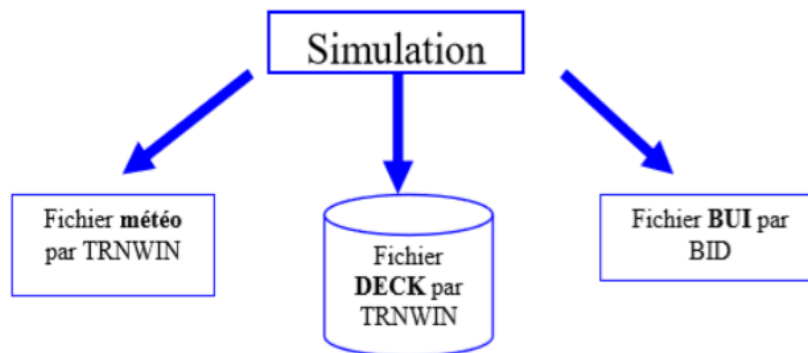


Figure IV.3 : Fichiers nécessaires au lancement de la simulation

Ce logiciel multi zones permet de valider plusieurs options architecturales. Les types (modèle utiliser) les plus utilisés pour la simulation dans le bâtiment sont [71] :

- **Type9** : Lecture de données.
- **Type54** : Générateur des données météo.
- **Type33** : Diagramme psychométrique.
- **Type16** : Processeur d'ensoleillement.
- **Type56** : Bâtiment multi zone.
- **Type25** : Impression des données.
- **Type65** : Affichage des résultats.

IV.4.4 Outils de TRNSYS

De nombreux logiciels ont été perfectionnés de telle sorte à ce qu'ils puissent être couplés à TRNSYS et ainsi disposer de fonctionnalités ou de données complémentaires.

➤ **Météonorm**

Un logiciel permet de disposer pour TRNSYS, des données climatiques fiables chaque heure et durant une année. Si on ne dispose pas d'une station météorologique, METENORM peut calculer par interpolation entre différentes station les conditions climatique d'un lieu [71].

➤ **SIMCAD**

Un logiciel de CAO permettant la saisie de structure de bâtiment et de matériaux utilisés pour la construction, il permet de créer des objets en apportant ses attributs propres (épaisseur,

matériaux utilisés,...). Le projet terminé, il peut être exporté sous forme de fichier de description de bâtiment qui peut être lu par TRNSYS [71].

➤ EES

(Engineering Equation Solver) est un logiciel permettant de résoudre des équations à l'aide de différents modules. Il peut être utilisé en complément de TRNSYS, Il est utilisé Principalement dans les disciplines suivantes : thermodynamique, mécanique des fluides, transfert de chaleur et chimie [71].

IV.5 Avantage de logiciel TRNSYS

TRNSYS ne se contente pas d'étudier le comportement thermique du bâtiment, il permet également de résoudre de nombreux systèmes d'équations, réalise des simulations dynamiques et permet la possibilité de créer de nouveaux modèles et de les intégrer à la bibliothèque existante. Nombreux avantages y sont associés [71] :

- Résolution multizone, couplage de systèmes.
- Utilisant l'utilitaire TRNBuild la définition du bâtiment est devenue de plus en plus facile et permet de faire changer les différents paramètres très facilement.
- TRNSYS se trouve à être un logiciel modulaire auquel on peut y ajouter des modules écrits soit en Fortran ou sous MATLAB ou EES ce qui laisse la possibilité d'amélioration du modèle [72].
- TRNSYS est plus rapide dans les simulations. Dans notre cas on a besoin de trouver les charges thermiques d'un aréna ce que TRNSYS peut à première vue déterminer.
- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.
- Cette modélisation outil permet de le dimensionnement et l'analyse des CVC systèmes, la simulation de multizones courants d'air, la simulation d'électricité l'énergie, solaire conception, et l'analyse de thermique efficacité des bâtiments et de contrôle des systèmes.

IV.6 Limites de logiciel TRNSYS

- TRNSYS ne dispose pas de valeurs ou de systèmes par défaut, l'utilisateur doit posséder et introduire l'ensemble exhaustif de ses données définissant le bâtiment et le système [72].
- Modèle initial de bâtiment proposé dans le logiciel TRNSYS, le TYPE 56 'Multizone Building'. BAHRI. S en 1994 a mis en évidence que cette méthode pose des problèmes pour des bâtiments à forte inertie. Gilles FRAISSE en 1997 ajoute que ce modèle (Type 56) ne fonctionne pas avec un pas de temps quelconque [68].

- TRNSYS ne calcule pas de champ de vitesse d'air entre les différentes zones thermiques ce qui nous oblige à spécifier les débits d'air échangé entre les zones.
- TRNSYS considère les surfaces internes comme étant des surfaces noires et ne nous permet pas de changer l'émissivité des surfaces internes de l'enveloppe du bâtiment [72].

➤ **Comparaison de logiciel TRNSYS avec d'autres outils de simulation**

Tableau IV.1 : comparaison entre TRNSYS et d'autres outils

Outils	Points forts	Limites
TRNSYS	Flexible, modulaire, couplage avec autres logiciels, énergies renouvelables	Interface complexe, licence payante
Energy Plus	Gratuit, très détaillé pour bâtiments, validé par ASHRAE	Moins flexible pour systèmes non conventionnels
MATLAB/Simulink	Très puissant pour contrôle/optimisation, couplage possible	Pas spécialisé bâtiment/énergie (il faut tout programmer)
DesignBuilder	Interface graphique conviviale, basé sur EnergyPlus	Moins flexible que TRNSYS, coûteux
ESP-r	Open source, précis (bâtiment, CFD, électricité)	Plus difficile à utiliser, communauté plus restreinte

IV.7 Conclusion

La simulation est importante pour le développement et l'adaptation des bâtiments face aux enjeux énergétiques et aux changements climatiques. L'intégration d'outils de modélisation énergétique dans le processus de conception présente plusieurs avantages, mais elle présente également des inconvénients et des défis importants, tels que l'absence de valeur par défaut et la variation de précision.

TRNSYS n'a jamais cessé d'améliorer, et il est maintenant largement considéré comme un fiable outil d'analyse pour systèmes énergétiques complexes.

Chapitre V
Modélisation, Résultats et Discussion

V.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à évaluer l'impact de l'isolation thermique et le système de chauffage et de climatisation sur le comportement thermique et énergétique d'un local résidentiel. À l'aide de l'outil de simulation dynamique **TRNSYS (TRNBuild)**, nous analysons dans un premier temps les variations de la température intérieure en mode passif (Cas 0 : Sans isolation, et Cas 1 : Avec isolants POLY et PFPD). Dans un second temps, nous étudions l'impact direct de l'isolation sur la réduction de la consommation énergétique annuelle en activant les systèmes de chauffage et de climatisation (Cas 2 : Étude comparative de la consommation avec isolation Polystyrène et sans isolation).

V.2 Contexte Géographique et Données Climatiques

V.2.1 Coordonnées géographiques et zone climatique

Le cadre bâti résidentiel choisi pour cette étude est implanté dans la commune de Dar El Beida (Wilaya d'Alger). Cette région se situe dans la frange côtière nord-centrale de l'Algérie, définie par une latitude de 36.72° Nord, une longitude de 3.25° Est et une altitude de 25m de la mer méditerranée.

Le climat de Dar El Beida est de type méditerranéen caractérisé par : une saison estivale chaude et sèche en termes de précipitations, mais due à la proximité de la mer l'humidité relative augmente, ce qui accentue fortement l'inconfort thermique intérieur. Une saison hivernale douce et humide, avec des températures minimales qui descendent rarement en dessous de seuils critiques négatifs.

V.2.2 Base de données météorologiques

Pour exécuter la simulation nous avons intégré le fichier météo au format (DZ-Darel-Beida-603900.TM2 File) issu de la base de données Meteonorm pour la station d'Alger. Ce fichier fournit au logiciel les données horaires de rayonnement solaire (direct et diffus), de température extérieure, d'humidité relative et de vitesse du vent sur une année complète (8760 heures).

Le tableau ci-dessous montre comment calculer le temps dans TRNSYS :

Tableau V.1 : Temps de janvier à Décembre avec TRNSYS

Mois	Jour	heure	heure
JAN	1	0	774
FEB	32	774	1416
MAR	60	1416	2160
APR	91	2160	2880
MAY	121	2880	3624
JUN	152	3624	4344

JUL	182	4344	5088
AUG	213	5088	5832
SEP	244	5832	6552
OCT	274	6553	7296
NOV	305	7296	8016
DEC	335	8016	876

V.3 Modélisation Géométrique et Physique du Local

V.3.1 Description de la zone thermique

L'étude porte sur une pièce de type chambre résidentielle standard, modélisée comme une zone thermique unique dans TRNBuild (Type 56). Les caractéristiques géométriques sont les suivantes :

- **Surface habitable** : 20 m²
- **Hauteur sous plafond** : 3 m
- **Volume total** : 60 m³
- **Orientation de la façade principale** : Plein nord
- **Vitrage** : Une fenêtre de dimensions (1m*2m) équipée d'un vitrage de type Double vitrage.

V.3.2 Caractérisation thermophysique des parois (Cas 0 : Référence)

À l'état initial (Cas de référence), l'enveloppe est modélisée selon les techniques de construction locales conventionnelles basées sur des parois multicouches non isolées. Le tableau ci-dessous synthétise les propriétés des matériaux constitutifs :

Tableau V.2 : Propriétés thermophysiques des parois de l'état initial (Cas 0).

Parois	Couches	Épaisseur e (m)	Conductivité λ (W/m.K)	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Chaleur spécifique C (kJ/kg.K)
Mur Extérieur	1. Enduit Plâtre	0.015	1.389	2000	1
	2. Brique	0.24	0.889	1800	1
Toiture	1. Enduit Plâtre	0.015	1.389	2000	1
	2. Dalle béton	0.24	2.1	2400	0.8

V.4 Intégration des matériaux d'isolation thermique

Pour améliorer l'efficacité énergétique du cadre bâti, deux matériaux d'isolation par l'extérieur (ITE) sont étudiés et comparés dans le tableau suivant :

Tableau V.3 : Propriétés thermophysiques des matériaux étudiés.

Matériaux	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C (kJ/kg.K)	e (m)
Polystyrène (POLY)	0.035	30	1.2	0.05
Polymère +Fibre de palmier dattier (PFPD)	0.276	401.42	1.6	0.05

V.5 Environnement de Simulation et Phases de Travail

Le projet de simulation suit les étapes logiques suivantes :

a- Lancement du programme et création d'un projet



Figure V.1 : Fenêtre principale d'où il y'a le menu principal et les commandes principaux du présent logiciel.

La simulation de bâtiments multizone sous TRNSYS commence par le choix de « Building Project » pour créer un nouveau projet. Il est présenté dans la figure V.2

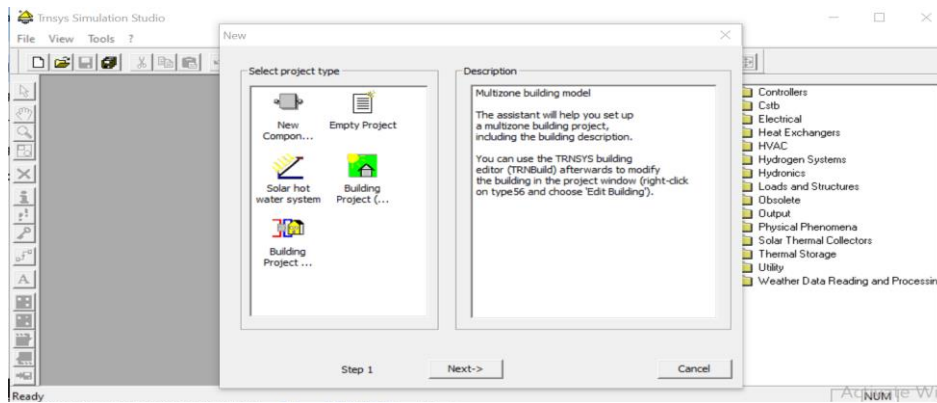


Figure V.2 : Fenêtre pour la création d'un nouveau projet

✓ Nous Sélectionnons de la zone à étudier

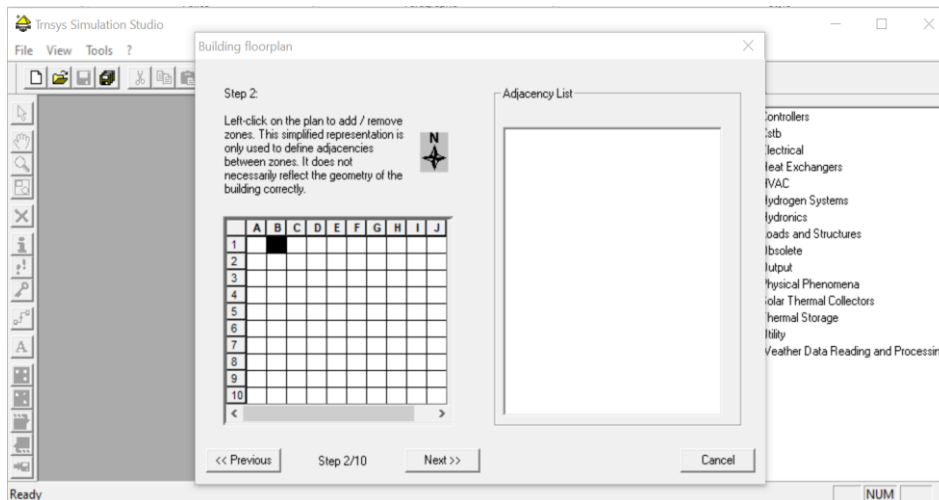


Figure V.3 : Représentation de zone étudiée

✓ Dimensionnement de la zone

Cette fenêtre est pour défini les dimensions des zones tout en sélection la zone à dimensionner, nous entrons (hauteur, largeur et profondeur) de la chambre et le volume sa sera calculé automatiquement.

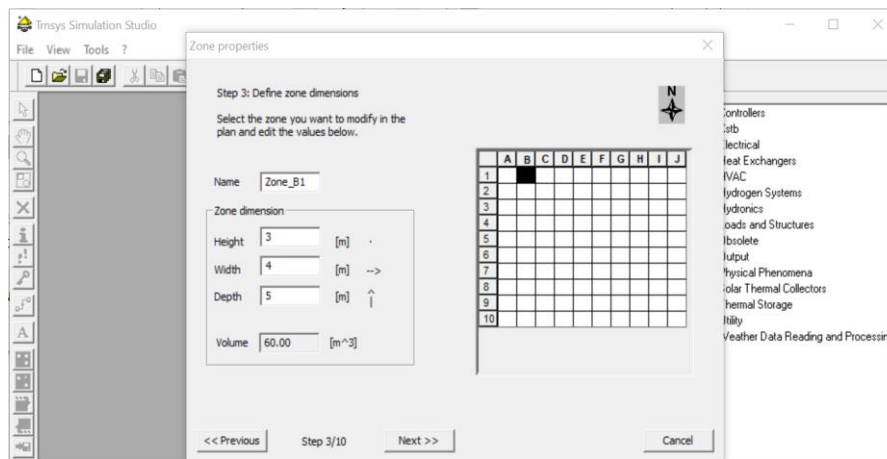


Figure V.4 : Dimensionnement des zones (suite).

✓ Introduction des données climatiques

Nous choisissons location et les données climatiques de la ville « Dar Baïda », la figure IV.5 montre une interface graphique de la modélisation réalisée sous TRNSYS 16.

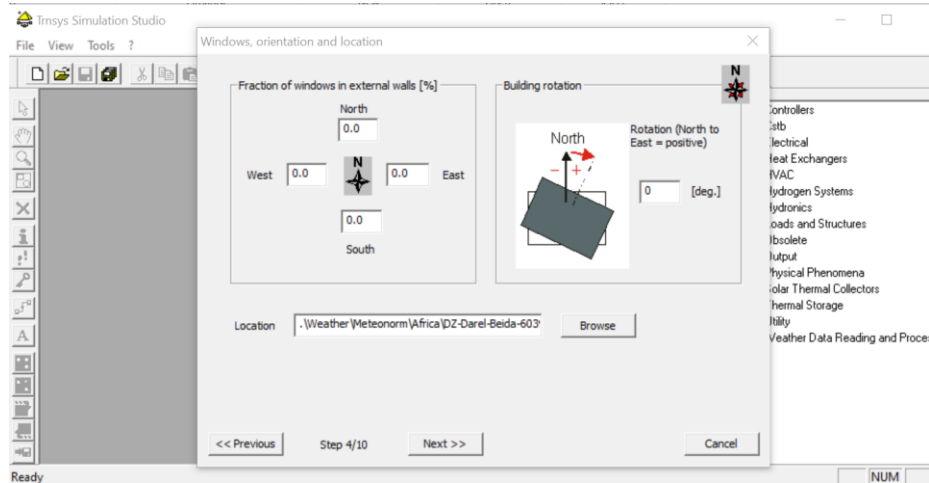


Figure V.5 : Orientation et localisation des zones.

✓ Chauffage et Climatisation

On spécifie le taux de renouvellement d'air puis on clique sur «next »

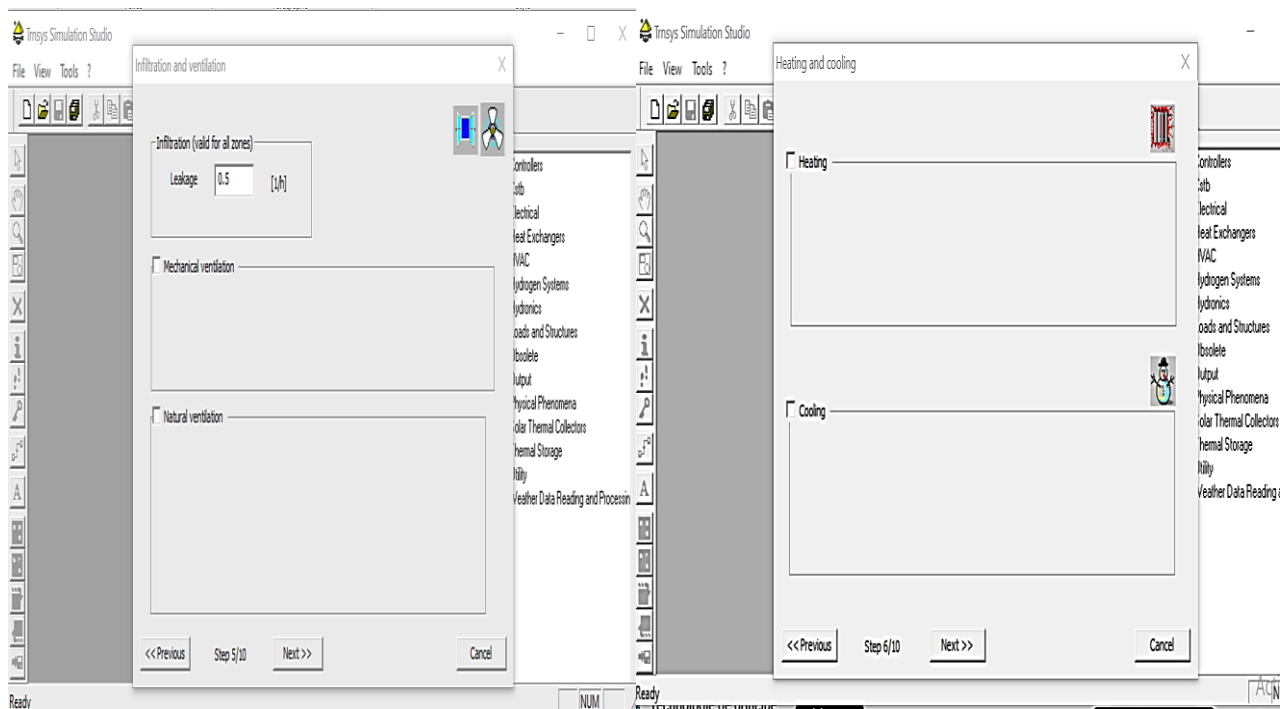


Figure V.6 : Fenêtres pour l'infiltration et ventilation, climatisation et chauffage.

✓ Gains et Eclairage

On spécifie les différents apports intérieurs et on clique sur «next »

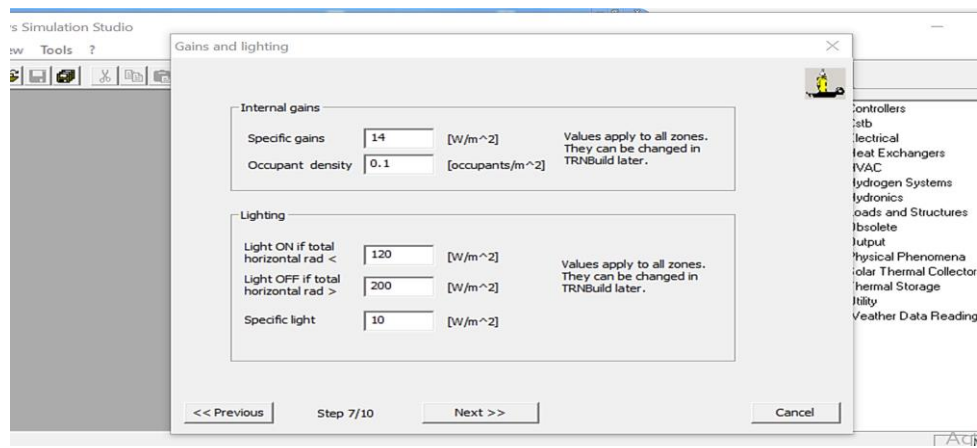


Figure V.7 : Fenêtre de Gains et Eclairage.

✓ Génération du projet

On clique sur « Create project ». A ce niveau du logiciel, le projet est généré

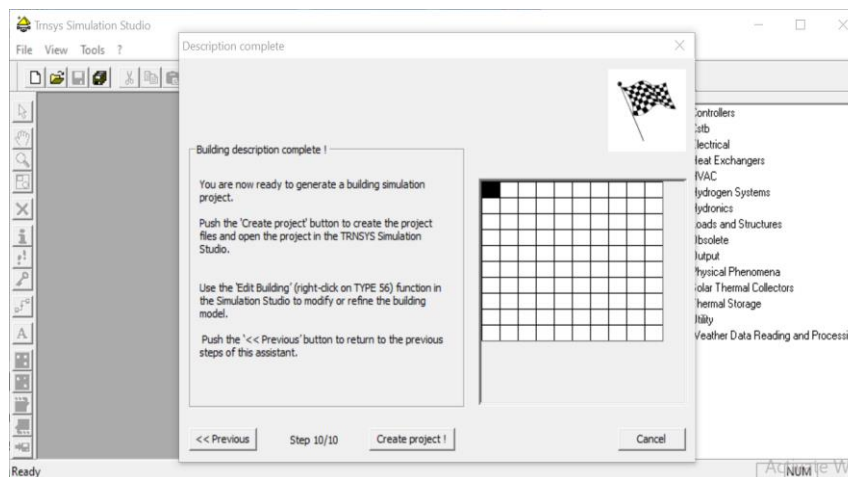


Figure V.8 : Fenêtre de l'achèvement de création du projet.

b- TRNbuild

La représentation de notre projet s'affiche sous forme d'icônes reliés entre eux par des liens, les icônes représentent le bâtiment et les autres facteurs intervenants et qu'on effectue sur notre système construit.

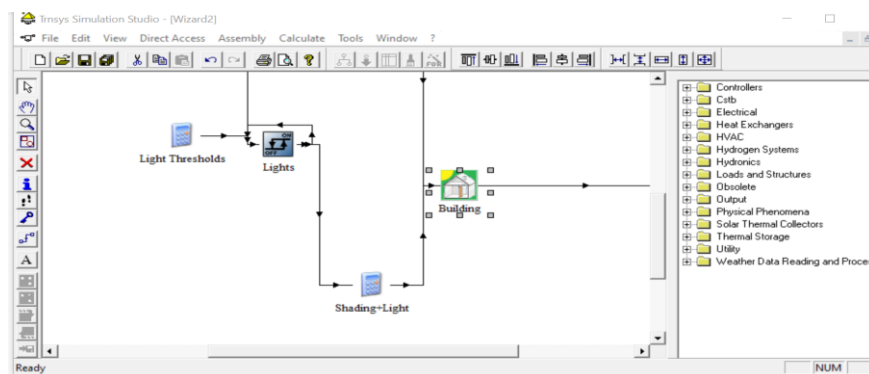


Figure V.9 : Représentation visuelle du projet.

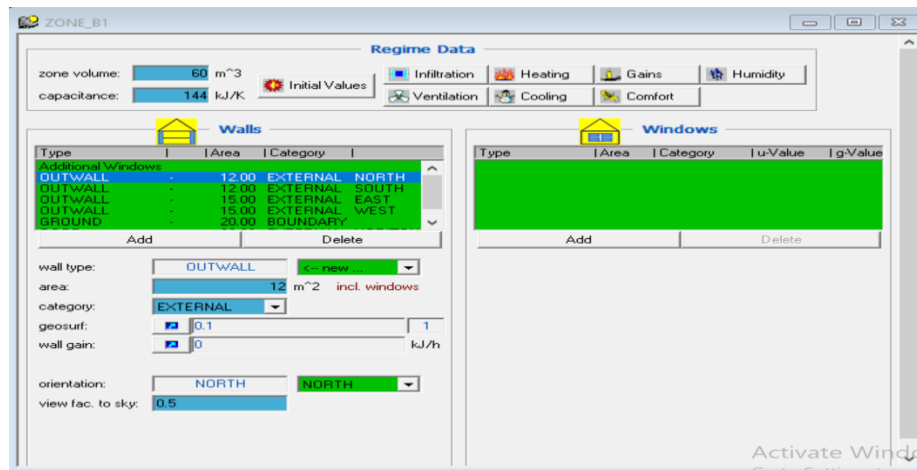


Figure V.10: Fenêtre pour TRNbuild

✓ Activer le chauffage et la climatisation

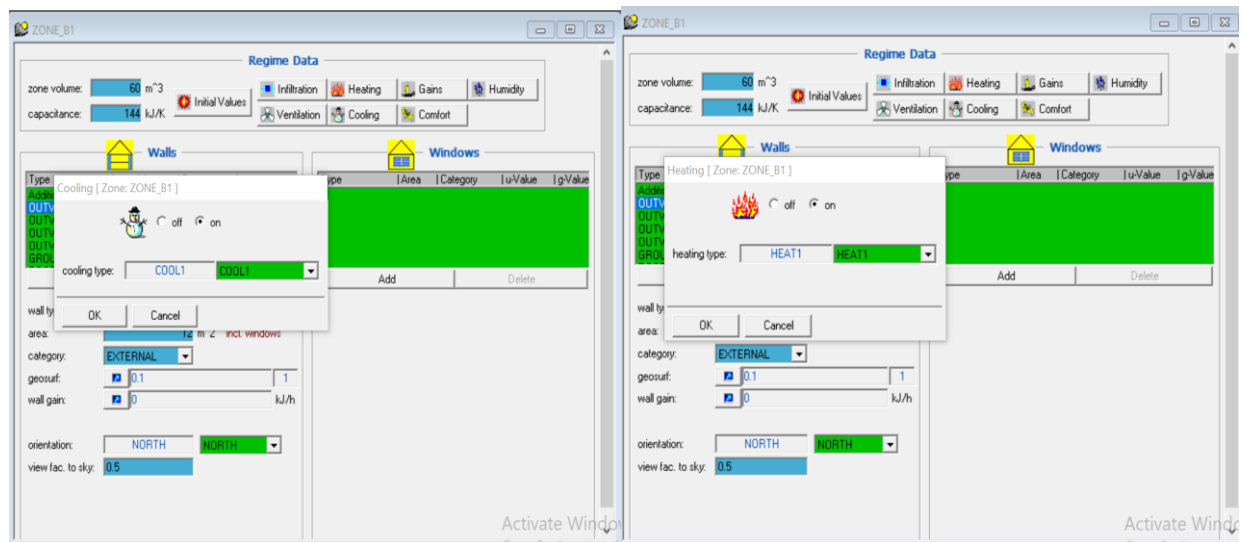


Figure V.11 : Fenêtres pour TRNbuild (Activer le chauffage et la climatisation).

✓ Ajouter un isolant

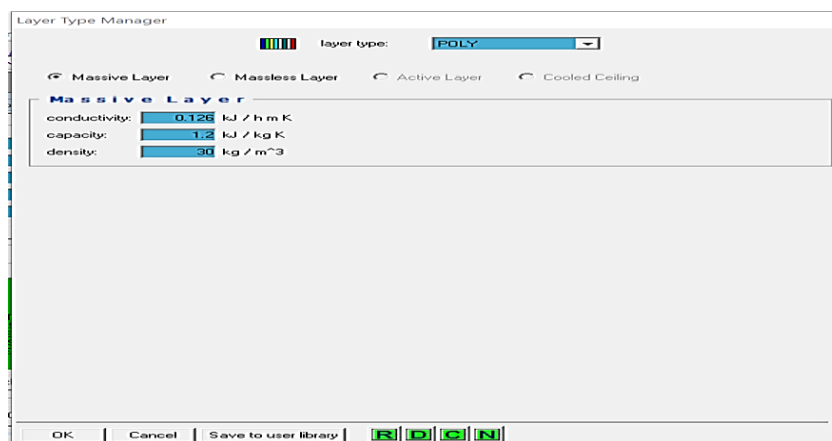


Figure V.12 : Fenêtre pour nouveau type de calque

✓ Isolation extérieur

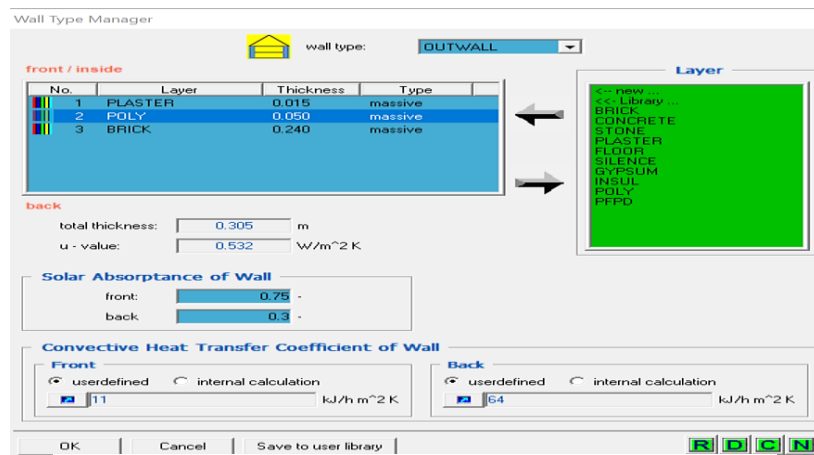


Figure V.13 : Fenêtre gestionnaire de type de mur.

V.6 Définition des Scénarios d'Étude

Afin de structurer l'analyse des performances de zone d'étude, les simulations ont été réparties selon les scénarios suivants :

- **Cas 0 : Scénario de Référence (Sans Isolation - Mode Passif)**

La zone thermique est simulée sans aucune isolation thermique et sans aucun système de chauffage ou de climatisation, établissant la base de comparaison.

- **Cas 1 : Scénario d'Isolation Thermique (POLY vs PFPD - Mode Passif)**

La zone thermique est dotée alternativement d'une isolation en Polystyrène (POLY) puis en PFPD, fonctionnant en mode passif. Ce cas permet d'évaluer l'inertie propre et la capacité de régulation thermique naturelle de chaque matériau.

- **Cas 2 : Scénario d'Efficacité Énergétique (Consommation Énergétique - Mode Actif)**

Ce scénario intègre l'activation des systèmes mécaniques de régulation avec des consignes de température strictes. Il est dédié à l'étude comparative de l'impact de l'isolation par le Polystyrène (POLY) par rapport au cas non isolé (Sans isolation) sur la consommation d'énergie (kWh) requise pour le chauffage en hiver et la climatisation en été.

V.7 Résultats et Discussion

Les données horaires de température intérieure issues de TRNSYS ont été exportées et traitées graphiquement sous le logiciel Origin afin de mener une analyse comparative rigoureuse.

V.7.1 Analyse Comparative : Impact de l'isolation sur le comportement thermique (Cas 0 vs Cas 1)

V.7.1.1 Comportement thermique annuel global

Afin de quantifier l'apport de l'isolation, nous avons regroupé sur un même graphique l'évolution thermique du Cas 0 (état initial) et du Cas 1 (isolation thermique). Cette superposition permet de visualiser directement l'impact de l'enveloppe sur la régulation de la température intérieure.

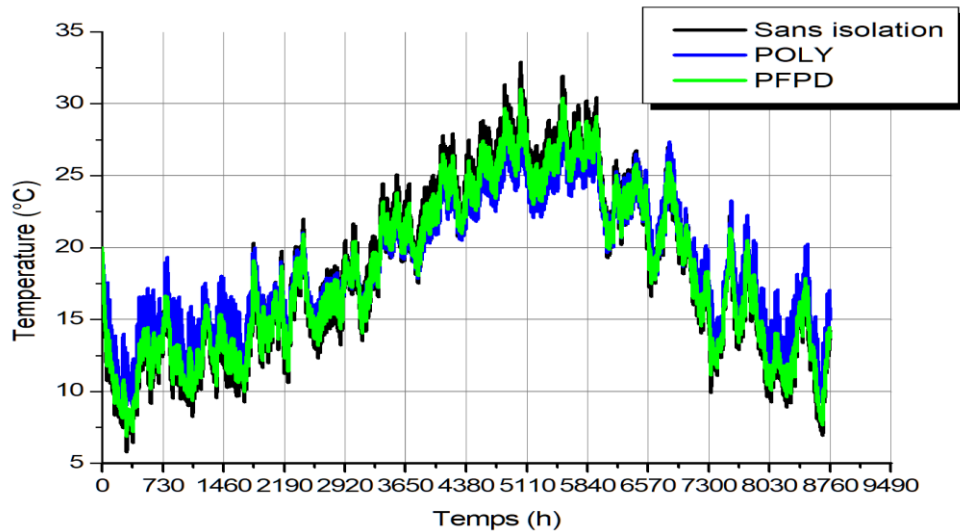


Figure V.14 : *Évolution annuelle de la température intérieure de la zone d'étude*

Le graphique superposant le Cas 0 (sans isolation) et le Cas 1 (variantes POLY et PFPD) met en évidence l'efficacité de l'enveloppe isolée. On observe un amortissement thermique remarquable ; alors que la courbe du bâtiment non isolé (en noir) subit des fluctuations brutales suivant fidèlement le cycle nyctéméral (jour/nuit), les courbes des variantes isolées présentent des amplitudes beaucoup plus restreintes. Ce phénomène traduit une augmentation de l'inertie thermique globale de la zone thermique.

V.7.1.2 Comportement thermique détaillé en période hivernale (Mois de Janvier / Février / Mars)

L'analyse de la figure ci-dessus permet d'observer de manière détaillée le comportement thermique du local durant les mois les plus froids de l'année :

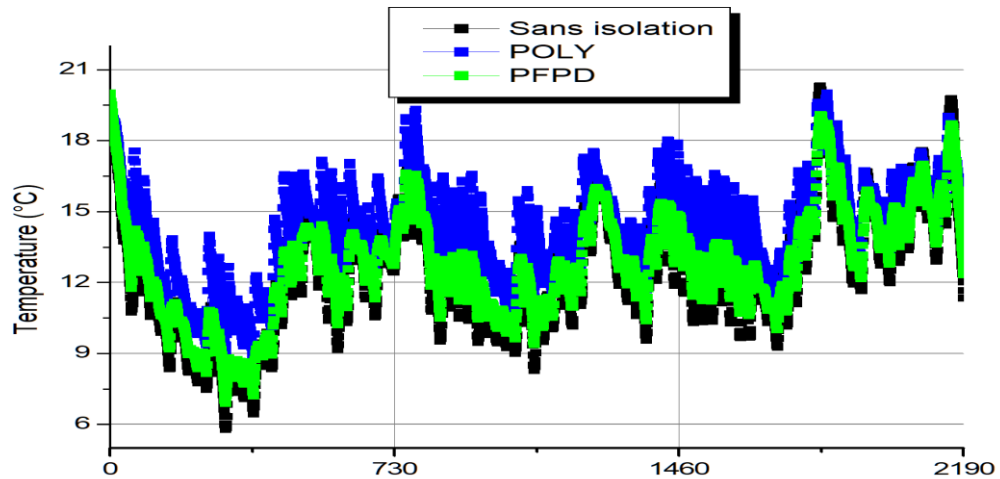


Figure V.15 : Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période froide

- **Le cas sans isolation (Ligne noire) :** En l'absence d'isolation, la température intérieure subit de fortes fluctuations et chute à des valeurs minimales critiques d'environ 5.7°C au cœur de l'hiver, ce qui implique un inconfort thermique sévère.
- **Comparaison des performances (POLY vs PFPD) :** Graphiquement, le Polystyrène (POLY - Ligne bleue) se détache nettement au-dessus des autres courbes. Il s'avère être le plus efficace pour retenir la chaleur à l'intérieur du cadre bâti durant l'hiver sans apports supplémentaire de chauffage donc la température intérieure reste confortable. Le matériau PFPD (Ligne verte) apporte également une amélioration bénéfique par rapport au cas initial, mais reste thermiquement moins performant que le polystyrène pendant cette période froide.

On a analysé à courte échelle temporelle hivernale (Semaine type du mois de Janvier) pour mieux interpréter l'évolution des températures dans le cas 0 et 1.

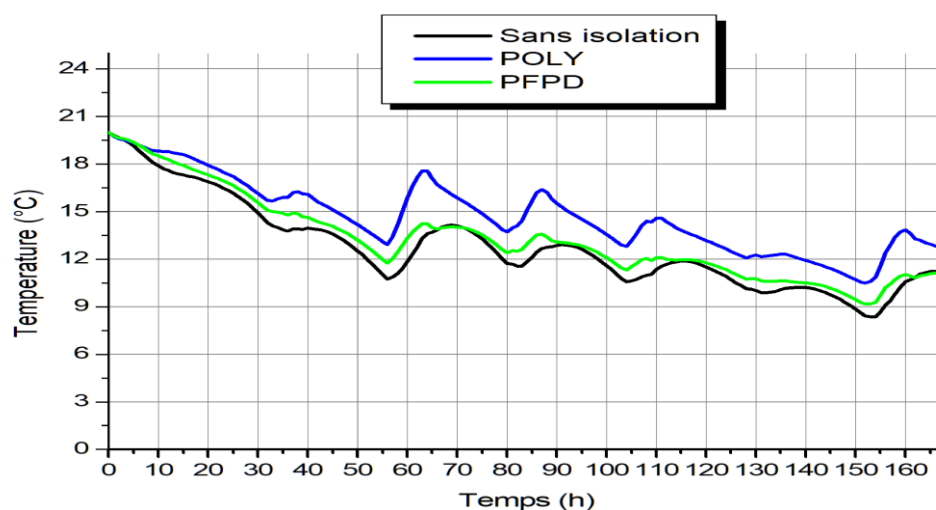


Figure V.16 : Évolution horaire de la température intérieure sur une semaine type du mois de janvier

Le cas sans isolation (Ligne noire) affiche une sensibilité immédiate aux chutes de température nocturnes, plongeant à des valeurs minimales de 8.3°C à la 155^{ème} heure.

Le Polystyrène (POLY - Ligne bleue) démontre une excellente capacité de rétention thermique, en maintenant un écart positif constant allant jusqu'à 4°C par rapport au cas de référence non isolé lors des chutes de température lors des pics de froid (notamment aux voisinages de la 65^{ème} et la 90^{ème} heure). À cette échelle courte, le matériau PFPD (Ligne verte) montre des limites évidentes, sa courbe suivant de très près celle du cas non isolé n'offrant qu'un relèvement thermique marginal (compris entre 0.5 et 1°C).

V.7.1.3 Comportement thermique détaillé en période estivale critique (Mois de Juillet / Août)

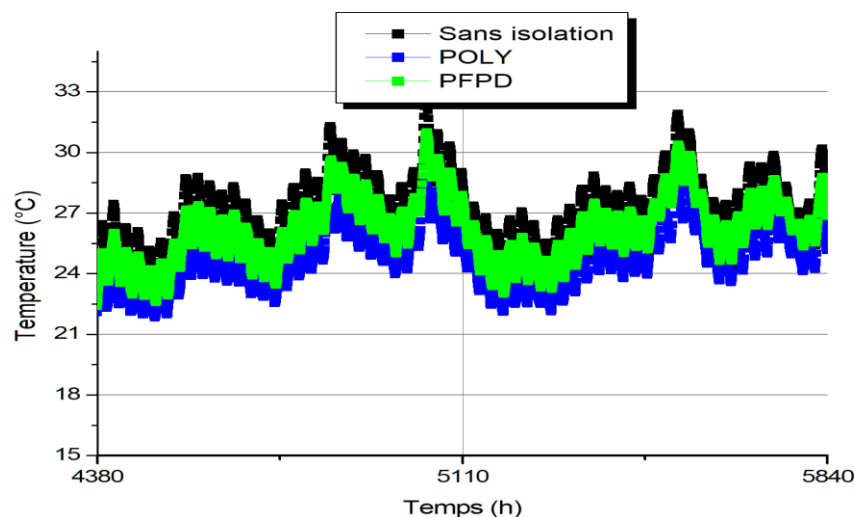


Figure V.17 : Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période chaude

Durant la période de pic de chaleur (juillet/août), l'écart entre le Cas 0 et le Cas 1 atteint son maximum. Sans isolation (Ligne noire), la température intérieure franchit la barre des 32.5°C aux alentours de la 5000^{ème} heure. En raison de la forte humidité relative caractérisant le littoral algérois, ces valeurs créent une situation d'inconfort thermique majeur.

L'introduction du polystyrène (POLY) permet de maintenir cette température dans des limites acceptables de confort (oscillations principalement entre 22°C et 28°C), réduisant ainsi la charge de climatisation et assurant un environnement intérieur sain. Le matériau PFPD (Ligne verte) offre également une amélioration par rapport au cas de référence, cependant, ses performances restent en retrait vis-à-vis du polystyrène, avec un écart thermique supérieur de 2°C à 3°C lors des pics de chaleur.

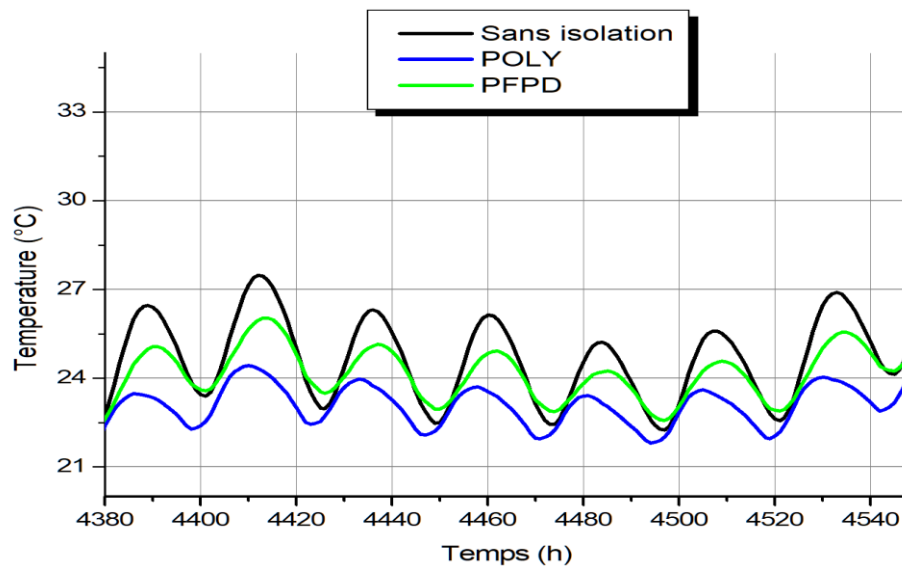


Figure V.18 : Évolution horaire de la température intérieure sur une semaine type du mois de juin

Le cas Sans isolation (Ligne noire) affiche une sensibilité immédiate avec des pointes de température atteignant 27.5°C à la 4412^{ème} heure, traduisant une pénétration rapide du flux thermique extérieur.

L'apport du Polystyrène (POLY - Ligne bleue) est remarquable ; il écrête radicalement ces pointes de chaleur en stabilisant la température intérieure autour d'une moyenne de 23.5°C, offrant un gain thermique direct de 3°C au moment le plus chaud de la journée. Quant au matériau PFPD (Ligne verte), il affiche un comportement intermédiaire mais moins performant, sa courbe de température se situant environ 2°C au-dessus de celle du polystyrène lors des phases d'échauffement maximal, confirmant la supériorité du POLY en termes d'inertie passive estivale.

En plus de la réduction des températures maximales, l'isolation génère un déphasage thermique bénéfique. En retardant la pénétration du flux de chaleur à travers les parois, le pic de température intérieure est décalé vers des heures plus fraîches de la soirée, ce qui optimise la gestion énergétique naturelle du bâtiment à Dar El Beida.

V.7.1.4 Comportement thermique détaillé en période de transition (Mois d'Octobre / Novembre / Décembre)

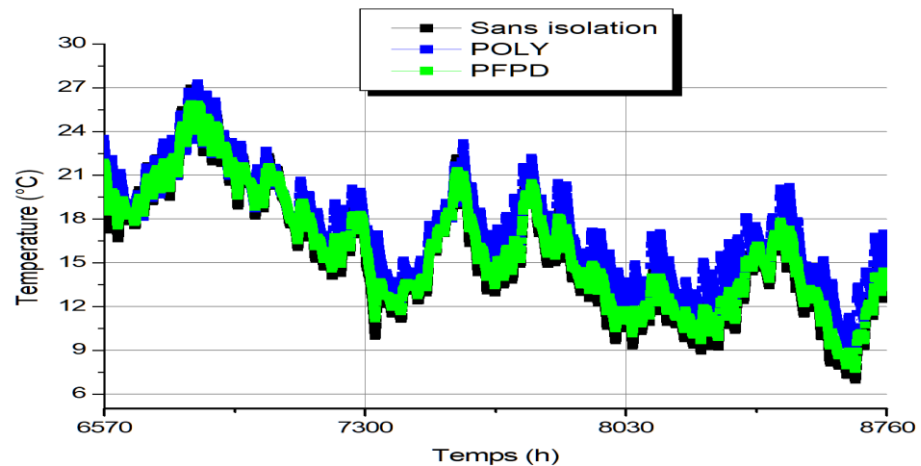


Figure V.19 : Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant les derniers mois de l'année

L'analyse de la figure ci-dessus permet d'envisager l'évolution thermique du local durant la période de transition automne-hiver :

- **Refroidissement intense (Fin de courbe) :** À l'approche du mois de décembre, la cellule non isolée (**Ligne noire**) perd rapidement son énergie, et la température intérieure chute de manière abrupte pour atteindre son minimum aux alentours de 6.8°C.
- **Évaluation de la rétention :** Le Polystyrène (POLY - Ligne bleue) maintient la courbe de température au niveau le plus élevé tout au long de ce fléchissement climatique. Le matériau PFPD (Ligne verte) affiche un comportement intermédiaire, se situant légèrement en dessous de la courbe bleue lors du refroidissement final.

Synthèse de la supériorité : Bien que l'isolant (PFPD) améliore les performances par rapport au cas non isolé, le Polystyrène (POLY) présente un meilleur compromis entre l'efficacité d'isolation et l'inertie thermique. Les courbes obtenues sous TRNSYS montrent que le POLY offre une régulation plus fluide de la température intérieure, évitant les surchauffes estivales et les chutes de température hivernales. Cette stabilité thermique, combinée à sa disponibilité locale et son coût abordable en Algérie, fait de lui la solution de référence pour cette étude.

V.7.2 Analyse Comparative : Impact de l'isolation sur le comportement thermique (Mode Actif : Cas 2

V.7.2.1 Comportement global et régulation

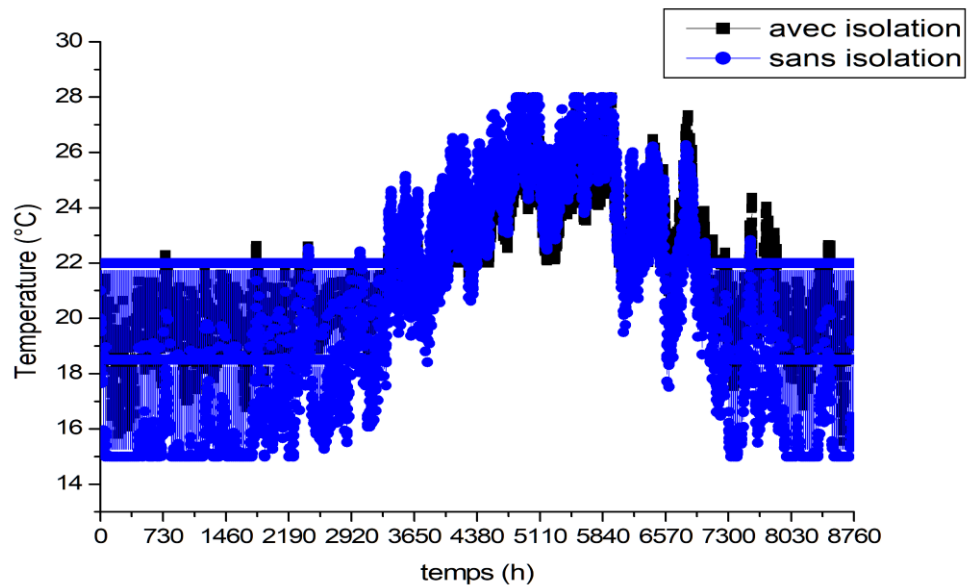


Figure V.20 : Évolution annuelle de la température intérieure en Mode Actif

L'introduction des systèmes de chauffage et de climatisation (CVC) vise à maintenir la température intérieure proche des points de consigne fixés pour le confort des occupants (environ 22°C en hiver et 26°C en été). Le graphique comparatif met en évidence une nette divergence dans le comportement dynamique de la régulation entre le cas de référence (sans isolation) et le cas optimisé (avec isolation).

V.7.2.2 Période Hivernale

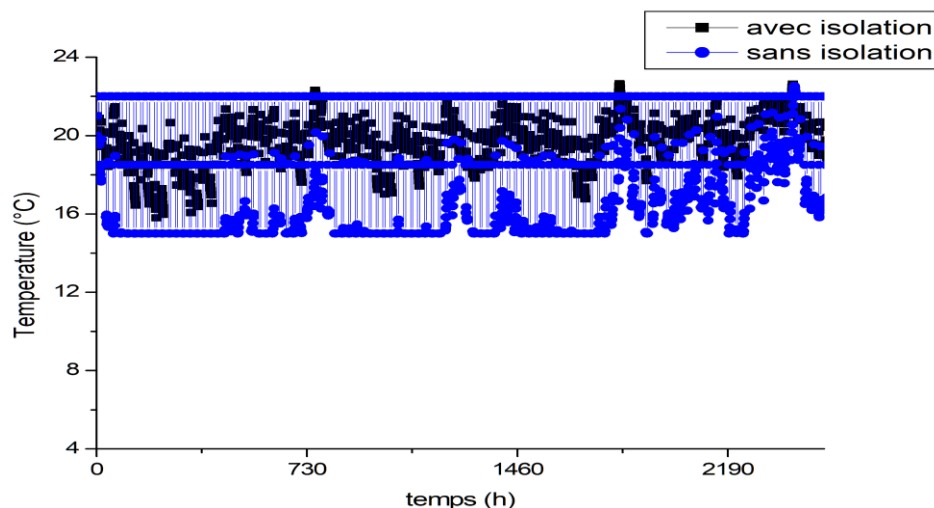


Figure V.21 : Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période froide (Cas2)

Dans le cas non isolé (sans isolation - courbe bleue), l'enveloppe du bâtiment présente une forte vulnérabilité thermique. Dès que le système de chauffage s'arrête, la température intérieure subit une chute libre instantanée vers des valeurs critiques allant jusqu'à 15°C. Ces oscillations

répétées forment une bande dense à basse température, traduisant l'effet de 'paroi froide' et une incapacité structurelle à retenir les calories infiltrées.

À l'inverse, l'introduction de l'isolation thermique (avec isolation - courbe noire) modifie positivement l'inertie de la pièce. Les points de mesure se concentrent majoritairement dans une plage de confort beaucoup plus restreinte et stable, oscillant doucement entre 18°C et 21°C. L'isolant réduit drastiquement le coefficient de transmission thermique globale (U_{globale}) des parois, agissant comme un réservoir qui stocke la chaleur et ralentit son échappement vers l'extérieur.

V.7.2.3 Période Estivale

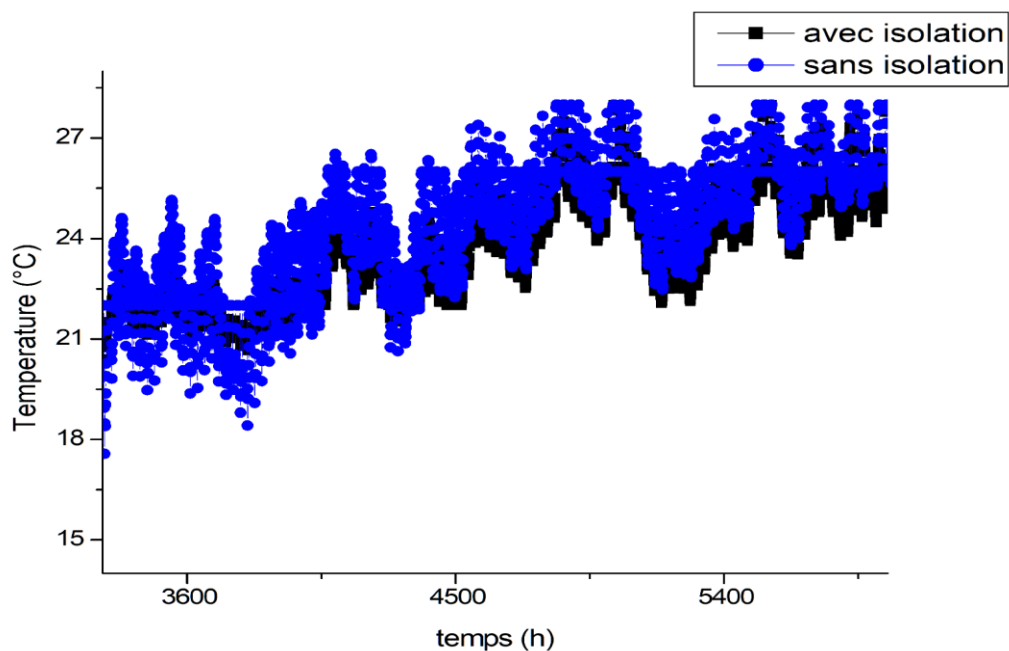


Figure V.22 : Évolution de la température intérieure de la zone thermique durant la période chaude (Cas2)

Dans la configuration initiale (sans isolation - courbe bleue), on observe une forte dispersion des points de température vers le haut, franchissant régulièrement le seuil critique des 27°C à 28°C. Ce phénomène s'explique par l'importance des apports solaires passifs et du flux thermique traversant les parois non isolées. Le système de climatisation, bien qu'opérationnel, se trouve en situation de surcharge thermique et s'avère incapable de maintenir l'ambiance intérieure dans la zone de confort optimale.

À l'opposé, l'intégration de l'isolation thermique (avec isolation - courbe noire) redéfinit l'équilibre thermodynamique de la pièce. La courbe noire se situe systématiquement en dessous de la courbe bleue, montrant un étalement beaucoup plus stable et confiné. En réduisant drastiquement le coefficient de transfert thermique global, l'isolant fait office de bouclier

radiatif et conductif, limitant l'intrusion de la chaleur extérieure et permettant au climatiseur de stabiliser la température ambiante de manière efficace.

V.7.2.4 Impact Direct sur la Consommation Énergétique

Cette amélioration de la stabilité thermique se traduit directement sur le plan énergétique. La réduction des pertes en hiver et des gains en été grâce à l'isolation engendre une diminution drastique de la consommation énergétique globale (kJ/h). Le système CVC fonctionne de manière plus fluide et efficace, ce qui valide l'efficacité du bouclier thermique mis en place pour le climat de Dar El Beida.

V.7.3 Analyse Quantitative de la Consommation Énergétique (Mode Actif : Cas 2)

L'évaluation de l'efficacité énergétique globale de la zone thermique se matérialise dans ce scénario actif (Cas 2). Nous quantifions et comparons les besoins mensuels de climatisation (période estivale) et de chauffage (période hivernale) nécessaires pour maintenir le local dans la zone de confort, en opposant la configuration Avec isolation (Polystyrène - POLY) et la configuration de référence Sans isolation.

V.7.3.1 Besoins en climatisation (Saison chaude)

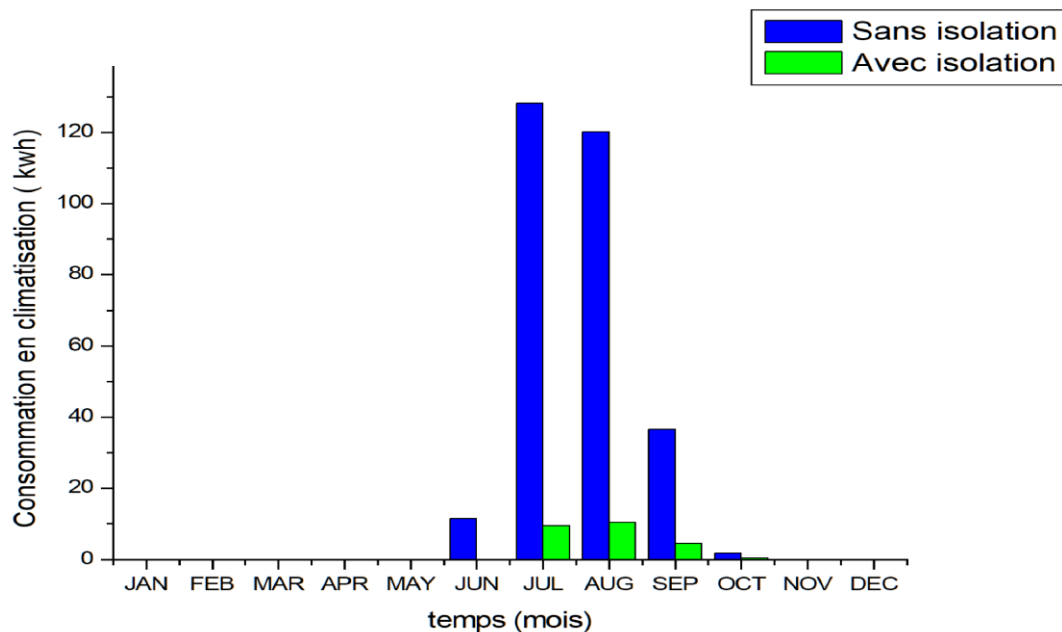


Figure V.23 : Consommation mensuelle d'énergie pour la climatisation (kWh) avec et sans isolation.

En mode non isolé (Sans isolation), les charges thermiques et le rayonnement solaire intense des mois de juillet et août provoquent une demande énergétique de pointe, atteignant respectivement environ 128 kWh et 120 kWh.

L'introduction de la couche isolante réduit de manière drastique les gains de chaleur externes. On observe un effondrement quasi-total de la consommation de climatisation (Avec isolation), qui chute en dessous de 10 kWh pour les mois les plus chauds (juillet et août). Cela représente une économie d'énergie supérieure à 90% en été, prouvant que l'enveloppe isolée bloque efficacement les flux de chaleur externes.

V.7.3.2 Besoins en chauffage (Saison froide)

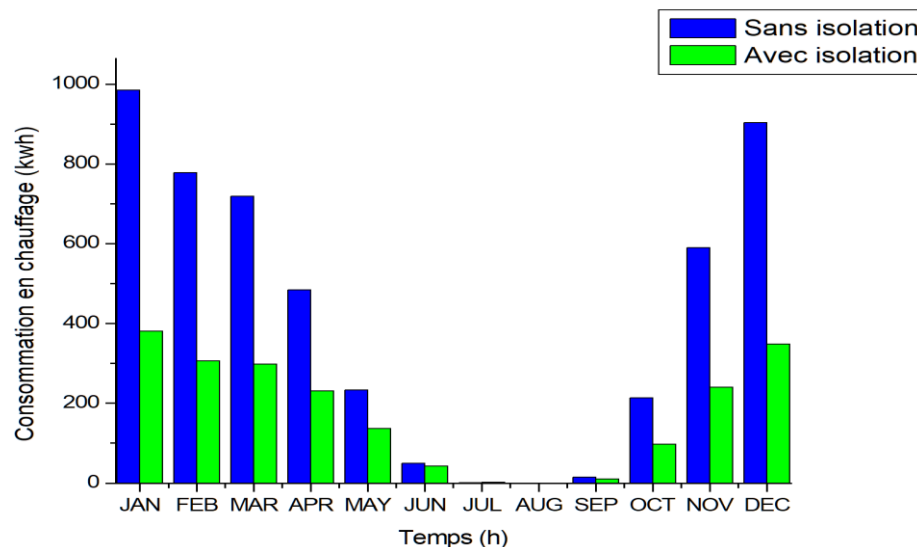


Figure V.24 : Consommation mensuelle d'énergie pour le chauffage (kWh) avec et sans isolation.

Durant la saison froide, le local non isolé souffre de déperditions massives à travers ses parois non protégées. Cela se traduit par une consommation énergétique hivernale extrêmement lourde, culminant à près de 980 kWh en janvier et 900 kWh en décembre.

L'action du polystyrène permet de confiner efficacement l'apport de chaleur injecté par les terminaux de chauffage. Pour le mois de janvier, la demande énergétique est ramenée à environ 380 kWh, ce qui correspond à une réduction immédiate de plus de 60% des charges de chauffage. Cette tendance à l'optimisation énergétique se maintient de manière homogène durant l'ensemble des mois froids (février, mars, novembre).

Le tableau ci-dessous représente la différence entre les valeurs de consommation d'énergie dans le cas d'isolation thermique et dans le cas de l'absence de l'isolation thermique.

Tableau V.4 : Différence de consommation énergétique (Cas 2 : Mode Actif)

	Consommation énergétique sans isolation (kWh)	Consommation énergétique avec isolation (kWh)	Différence de consommation énergétique (kWh)
JAN	984.90	380.50	604.40
FEB	777.50	305.60	471.90
MAR	718.10	298.20	419.90
MAY	232.90	137.10	95.80
JUN	60.29	42.29	18.00
JUL	128.46	10.82	117.64
AUG	120.10	10.36	109.74
NOV	589.90	240.30	349.60
DEC	903.20	348.30	554.90

L'énergie consommée dans le cas « avec l'isolation » est inférieure à l'énergie consommée pour le cas « sans isolation ». Par conséquent, le choix du matériau d'isolation réduit la consommation d'énergie pour le chauffage et augmente le confort car il réduit le besoin de chauffage autrement dit permet d'économiser de l'énergie.

- En été, l'isolation agit comme une barrière au chauffage extérieur et au rayonnement solaire.
- Une bonne isolation élimine "l'effet mur froid" en hiver

V.8 Conclusion

Les simulations thermiques menées dans ce chapitre ont permis de quantifier précisément le rôle de l'enveloppe architecturale dans l'établissement du confort passif et la réduction des charges énergétiques actives (Cas 2). En zone côtière algérienne, caractérisée par un été chaud et très humide ainsi qu'un hiver doux, l'isolation s'avère indispensable pour réguler l'ambiance intérieure. La confrontation des courbes en mode passif démontre la supériorité du **Polystyrène (POLY)**. De plus, l'analyse active menée dans le cadre du **Cas 2** confirme que l'isolation par le polystyrène permet d'atteindre des taux d'économie d'énergie exceptionnels par rapport à un local non isolé, dépassant **60% pour le chauffage** et **90% pour la climatisation**. Ces conclusions valident scientifiquement l'intérêt technico-économique de l'isolation thermique dans le bâtiment en Algérie.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons mis en évidence l'importance de l'isolation thermique dans l'amélioration du confort des bâtiments et dans la réduction de leur consommation énergétique. L'étude a montré que l'isolation constitue un rôle important dans la conception de bâtiments performants, car elle agit directement sur les transferts thermiques à travers l'enveloppe et contribue à stabiliser les conditions intérieures.

Nous avons rappelé les principes fondamentaux de l'isolation thermique, les différents matériaux et techniques disponibles, ainsi que les critères de confort thermique tels que définis par les normes internationales. Ces notions permettent de mieux comprendre la relation entre performance énergétique et bien-être des occupants.

Par ailleurs, la présentation du logiciel TRNSYS a permis de mettre en lumière son rôle central dans la modélisation et l'évaluation énergétique des bâtiments, et montré qu'il s'agit d'un instrument puissant et largement utilisé dans le domaine de la recherche et de l'ingénierie pour analyser différents scénarios énergétiques.

En somme, ce travail a permis de relier la théorie de l'isolation thermique aux outils numériques de simulation, offrant ainsi une meilleure compréhension des enjeux liés à l'efficacité énergétique et au confort dans le bâtiment.

La recherche modeste que nous avons développée a été d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et pour atteindre cette bonne efficacité, nous devons prendre en compte la conception efficace des bâtiments et la conception de la maison se limite à la sélection de plusieurs façons d'atteindre confort thermique, y compris l'isolation thermique.

Les résultats obtenus en étudiant la variation de la température de l'air dans une zone située dans la commune de Dar El Beida (Wilaya d'Alger), ont montré qu'en l'absence de chauffage ou de climatisation la température est élevée en été et basse en hiver au cours de l'année. Lors de l'utilisation du chauffage et climatisation, il y a un changement de température dû à présence d'équipements qui contrôlent la température et/ou mesurent l'humidité afin de répondre au confort thermique.

Lors de l'ajout d'isolant, le changement de température est observé car l'isolation thermique protège le bâtiment du changement climatique et des fluctuations météorologiques car elle réduit la différence de température résultant de la température élevée due au soleil pendant la journée et de la baisse de température de la nuit. Ainsi que, l'isolation thermique des bâtiments est un facteur très important qui prend en compte les nouvelles constructions et les nouvelles rénovations du bâtiment. Les matériaux d'isolation d'enveloppe, qui comptent parmi les solutions les plus performantes permettant une réduction significative des besoins énergétiques.

Le rôle des matériaux de construction dans l'enveloppe du bâtiment est essentiel, les propriétés thermiques des matériaux de construction vont augmenter ou diminuer les performances énergétiques.

Une bonne isolation thermique réduit la consommation d'énergie pour le chauffage et/ou la climatisation et augmente notre confort. Mais ce n'est pas tout : l'isolation est aussi bonne pour l'environnement car, en réduisant la consommation, elle préserve les ressources énergétiques et réduit les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes de protection de l'environnement, de confort et d'économies financières. Par conséquent, l'énergie consommée avec isolation est inférieure à l'énergie consommée sans isolation.

L'efficacité énergétique est importante dans les nouveaux bâtiments. Le nouveau projet de construction est une occasion idéale de se concentrer sur l'efficacité énergétique dès le départ. Elle joue un rôle à tous les niveaux du bâtiment, du site au choix des matériaux. Toutes ces solutions visent à avoir un bâtiment aussi cohérent que possible d'un point de vue énergétique, permettant une consommation d'énergie moindre sans affecter le confort de l'utilisateur.

- **Perspectives**

Ce mémoire, ouvre la voie à plusieurs pistes de recherche et d'application

- ✓ Etude comparative entre matériaux isolants conventionnels et biosourcés, afin de promouvoir des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement.
- ✓ Intégration des énergies renouvelables (solaire, géothermie, etc.) dans les simulations, en combinaison avec l'isolation, pour concevoir des bâtiments à consommation énergétique quasi nulle.
- ✓ Approfondissement de l'aspect confort global (acoustique, visuel, qualité de l'air intérieur) afin d'élargir la réflexion au-delà du seul confort thermique.

Ces perspectives permettent d'envisager des travaux futurs plus appliqués, visant à concevoir des bâtiments non seulement économes en énergie, mais également agréables à vivre et durables face aux défis environnementaux actuels

Références

- [1] Khledj, Samir, "Evaluation et amélioration du confort thermique et visuel dans le patrimoine colonial, Cas d'un établissement d'enseignement colonial à Miliana", Thèse de doctorat, Université Blida1-Saad Dahlab, 2021, p29.
- [2] Allab, Yacine, "Evaluation expérimentale des performances des systèmes de ventilation dans le bâtiment : efficacité de ventilation et confort thermique", Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2017, p95.
- [3] Esteban Emilio Montenegro Iturra, "Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique", Thèse de doctorat Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Canada, 2011, p23.
- [4] Van Hoof, Joost, Mitja Mazej, et Jan LM Hensen, "Thermal comfort: research and practice," *Frontiers in Bioscience*, 2010, p765.
- [5] Mazari, Mohammed, "Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou)", Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [6] Grira, Abdelhakim, "Les caractéristiques morphologiques du milieu urbain en relation avec le microclimat et le confort thermique des usagers en espaces extérieurs en référence aux régions arides et semi arides", Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [7] Boucheriba, Fouzia et Bourbia, PR Fatiha, "Impact de la géométrie des canyons urbains sur le confort thermique extérieur dans un climat semi-aride cas du Coudiat de Constantine", *The Egyptian Journal of Environmental Change*, vol. 3, p. 62-67.
- [8] Bellatrache, Djamel, "Contribution à l'optimisation et l'amélioration de l'isolation d'une habitation utilisant une source renouvelable dans les zones arides", Thèse de doctorat, Université d'Adrar-Ahmed Draya, 2018.
- [9] CLER, Solibri, "Le Confort Thermique", [en ligne] https://www.precarite-energie.org/IMG/pdf/3.fiche_sante_confort_thermique.pdf
- [10] Frédéric Lavoye, Françoise Thellier, "Le confort thermique dans les bâtiments", L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF), 2008.
- [11] Xiangmin Han, Barbara Fabian, Bruce Kline, Chase Boudreaux, Nigel Ravenscroft, "Polymeric Foams" ,*CRC Press eBooks*, pp. 169–90, 2022.
- [12] Almusaed, Amjad, "Improvement of Thermal Insulation (Passive Buildings) ", Springer, London, pp. 277–89, 2011.
- [13] Jukić, Miha, et al, "Novel Thermal Insulation with Gas-Filled Cavities – Assessment of Thermal Performance of Different Designs Based on Numerical Simulations of Heat

- Transfer", *The International Journal Of Computational Methods And Experimental Measurements*, vol. 7, no. 2, Mar. 2019, pp. 181–92.
- [14] Kévin Nocentini, "Comportement thermo-hygrique de blankets aérogels de silice et applications à l'isolation des bâtiments", Thèse de doctorat. Université Paris sciences et lettres, 2018.
- [15] L'isolation thermique du bâtiment, [en ligne] www.enersens.fr , 2016.
- [16] ISOVER, *Guide de la thermique du bâtiment*, [en ligne], 2020
- [17] Fedullo. D, Gallauziaux. T, "L'isolation thermique", Eyrolles, 2011.
- [18] Espace INFO ENERGIE, "Guide des matériaux isolants pour une isolation efficace et durable", 2020. [en ligne] Espace Info Énergie - Expert en rénovation énergétique | Pompe à chaleur, Isolation, Panneaux solaires
- [19] Claude-Alain Roulet, "Eco-confort : *Pour une maison saine, confortable et à basse consommation d'énergie*," PPUR, Lausanne, 2012.
- [20] Papadopoulos AM, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments", *Energy Build* 37 77–86, 2005.
- [21] Hocine Belili, "Contribution des enveloppes nanotechnologiques dans l'amélioration de la performance énergétique", Thèse de doctorat, Université de Constantine3, 2021.
- [22] www.sfic.com
- [23] Laure Wirbel – Ducoulombier, "Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2014.
- [24] Hocine Belili, "Evaluation de la performance énergétique d'un équipement réhabilité et isolé par l'extérieur dans un climat semi-aride (Cas : ex- Commamo. Constantine)" , Mémoire de Magister, Université Salah Boubnider Constantine 3, 2017.
- [25] Anel Pierre Nelson, "Etude de Matériaux Biosourcés pour l'Isolation Thermique des Bâtiments en Climat Tropical Humide, Thèse de doctorat, Université des Antilles, 2020.
- [26] David Mercier, Yvan Dutil, Daniel Rousse, Francis Pronovost, Dominique Boudreau, Normand Hudon, Mathieu Castonguay, "Les isolants thermiques naturels : construction verte et efficacité énergétique," *X^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes*, 20-22 juin 2011, Saguenay.
- [27] Manon Girerd, "L'isolation thermique des murs en pisé par l'extérieur avec des matériaux bio et/ou géosourcés : état des lieux de la pratique professionnelle actuelle et analyse des solutions techniques", Ecole nationale supérieur d'architecture de Grenoble, 2023.
- [28] Espace INFO ENERGIE, "Guide des matériaux isolants", 2009. [en ligne] Espace Info Énergie - Expert en rénovation énergétique | Pompe à chaleur, Isolation, Panneaux solaires, Consulté en Mai 2025.

- [29] Oushabi A, Sair S, Abboud Y, Tanane O and EL Bouari A, "Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: characterization of local date palm fibers (LDPF)", *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(12),pp. 3395–3402, 2015.
- [30] B. AGOUDJIL, A.BENCHABANE, A. BOUDENNE, L.IBOS, M. FOIS, "Caractérisation thermophysique du bois de palmier dattier en vue de son utilisation en isolation thermique dans l'habitat", *Congrès Français de Thermique*, pp. 171-176, 2011.
- [31] Mathias Bouquerel, "Influence des transferts hygro-aérauliques sur les transferts thermiques dans les super-isolants nanostructurés sous vide", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2012.
- [32] Antoine Batard, "Modélisation du comportement thermique à long terme des Panneaux Isolants sous Vide (PIV)", Thèse de doctorat, Université Savoie Mont Blanc, 2017.
- [33] Vincent Félix, "Caractérisation thermique de matériaux isolants légers. Application à des aérogels de faible poids moléculaire", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2011.
- [34] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, "Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review", *Energy and Buildings* vol.43, pp.761–769, 2011.
- [35] Nassima Sotehi, "Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation", Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [36] Mathieu Bendouma, "Systèmes d'isolation thermique par l'extérieur : études expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité", Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2018
- [37] Conseil en Energie Partage, "Isolation des planchers bas", 2018 [en ligne] [04-Isoler-les-planchers-bas.pdf](#)
- [38] Cherier MK, "Etude Théorique et Expérimentale de l'Isolation Thermique Intérieure d'une Pièce d'un Habitat dans la région de Ghardaïa", Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2010.
- [39] Xu. C, Li. S, Zou. K, "Study of heat and moisture transfer in internal and external wall insulation configurations". *Journal of Building Engineering*. 1 juill 2019 ; 24 :100724.
- [40] Branders. A, Ennard. A, "Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques plaines", direction d'André De Herde, *Guide d'aide à la conception*, p. 46-47, [en ligne], 2010.
- [41] [Ponts thermiques : les traiter pour mieux isoler votre maison](#)
- [42] Ministère de l'équipement, Des transports du logement, du tourisme et de la mer, "Memento technique du bâtiment : les façades", 2013
- [43] Langlais.C, Klarsfeld.S, "Isolation thermique à température ambiante". Applications. s.l: *Techniques de l'Ingénieur*, 2004. BE 9 861

- [44] <https://energieplus-lesite.be/>
- [45] <https://www.isolationtoiture-expert.be/>
- [46] ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), "Améliorez le confort de votre maison, **l'isolation thermique** ", 2008.
- [47] Fiche Isolation Plancher Bas, [en ligne] [Fiche pratique isolation plancher bas](#)
- [48] My El Hadi Drissi Lamrhari, " Comportement thermique et économie d'énergie dans un appartement avec différentes mesures d'efficacité énergétique dans les six zones climatiques du Maroc", Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad Marrakech (Maroc), 2018.
- [49] Lekhal Mohammed Cherif, "Modélisation du comportement thermique d'un bâtiment équipé de système combiné, capteur solaire et puits canadien," Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbés.
- [50] Imessad. K, Kharchi. R, S. Bouchaib, Chenak. A, Hakem. S, Hamidat. A, Larbi-youcef. S, Sami. S et Sahnoune. F, "Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment", *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 20, pp. 591–597, 2017.
- [51] Melek Ayadi, "Élaboration et caractérisation d'isolants thermiques et acoustiques à base de fibres biosourcées. Biomatériaux", Thèse de doctorat, Université de Lorraine ; Université de Monastir (Tunisie), 2023.
- [52] L. Derradji, K. Imessad, F. Boudali Errebai, M. Amara, Y. Maoudj, F. Mokhtari , "Étude de l'efficacité énergétique d'une maison Économique en Algérie", *2^{ème} Congrès de l'Association Marocaine de Thermique*, Casablanca(Maroc) 18-19 Avril 2012.
- [53] L. Derradji, F. Boudali Errebai, M. Amara, Y. Maoudj, B. Djebri, S. Chikh, "Etude expérimentale du comportement thermique d'une maison rurale à faible consommation d'énergie", *15^{èmes} Journées Internationales de Thermique (JITH)*, Université de Tlemcen, 2011.
- [54] S.M.A Bekkouche, T. Benouaz et A. Cheknane, "Influence de l'isolation thermique intérieure et extérieure d'un bâtiment pierre située à Ghardaia ", *SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran (Algeria), 2009.
- [55] M. Trocmé, "Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie", Thèse de Doctorat en énergétique, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris, 2009.
- [56] S. Thiers, "Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive ", Thèse de Doctorat en énergétique, ECOLE Nationale Supérieure Des Mines De Paris, 2008.
- [57] N. K. Hannachi-Belkadi, " Développement d'une méthodologie d'assistance au commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie", Thèse de doctorat en Génie Civil, Université Paris Est, 2008.

- [58] C. Hamouda et 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, pp.211 – 228, 2006.
- [59] R. Kharchi et B. Benyoucef, "Analyse des besoins énergétiques en chauffage et en rafraîchissement : Cas de trois sites d'Algérie", *15^{èmes} journées Internationales de Thermiques*, Tlemcen, Algérie, 2011.
- [60] R. Kharchi, B. Benyoucef et M. Belhamel, "Système solaire combiné", *Conférence Internationale sur les Energies Renouvelables (ICRE '07)*, Novembre 2007 à Béjaïa (Algérie).
- [61] R.KHARCHI, "Etude Energétique De Chauffage, Rafraichissement Et Eau Chaude Sanitaire D'une Maison Type En Algérie ", thèse de doctorat En Physique Énergétique et Matériaux, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables, Université de Tlemcen, 2013.
- [62] R. Guechhati, M.A. Moussaoui¹, Ahm. Mezrhab et Abd. Mezrhab, "Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda,"*Revue des Energies Renouvelables*, vol. 13, n°2, pp. 223 – 232, 2010.
- [63] M.S. Mohsen and B.A. Akash, "Some Prospect of Energy Saving in Building", *Energy Conversion Management*, Vol. 42, N°11, pp. 1307 - 1315, 2001.
- [64] M.A. Aktacir, O. Büyükalaca and T. Yılmaz, "A Case Study for Influence of Building Thermal Insulation on Cooling Load and Air-Conditioning System in the Hot and Humid Regions ", *Applied Energy*, Vol. 87, N°2, pp. 599 - 607, 2010.
- [65] M. Ozel and K. Pihtili, "Optimum Location and Distribution of Insulation Layers on Building Walls with Various Orientations", *Building and Environment*, Vol. 42, N°8, pp. 3051–3059, 2007.
- [66] S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan and S.A. Al-Ajlan, "Effect of Electricity Tariff on the Optimum Insulation-Thickness in Building Walls as Determined by a Dynamic Heat Transfer Model", *Applied Energy*, Vol. 82, N°4, pp. 313 - 330, 2005.
- [67] N. Fezzioui, B. Draoui, M. Benyamine et S. Larbi, "Influence des Caractéristiques Dynamiques de l'Enveloppe d'un Bâtiment sur le Confort Thermique au Sud Algérien", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°1, pp. 25 - 34, 2008.
- [68] D. Medjelakh et S. Abdou, "Impact de l'Inertie Thermique sur le Confort Hygrothermique et la Consommation Énergétique du bâtiment", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°3, pp. 329 - 341, 2008.
- [69] H. Necib, R. Belakroum, K. Belakroum, "Amélioration De L'isolation Thermique Des Habitats Dans Les Régions Chaudes Et Arides", *3rd International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution*, 2016.

- [70] D. Bradley, M. Kummert, "New evolutions in TRNSYS: a selection of version 16 features", 2005.
- [71] Laterchi. R, Latrag. F, "Optimisation des performances énergétiques des bâtiments", Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2021.
- [72] Djadane.F, Benmimoun .O, "Modélisation et conception du chauffe-eau solaire à circulation forcée", Mémoire de Master, Université Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib, 2023.

Résumé

L'isolation thermique constitue l'un des moyens les plus efficaces pour réduire les déperditions de chaleur, optimiser la consommation énergétique et améliorer le confort intérieur dans les bâtiments.

Ce travail a montré que l'isolation joue un rôle principale dans la conception de bâtiments performants, car elle agit directement sur les transferts thermiques à travers l'enveloppe et contribue à stabiliser les conditions intérieures. D'autre part, ce travail a permis de relier la théorie de l'isolation thermique aux outils numériques de simulation thermique tels que le logiciel TRNSYS, que joue un rôle central dans la modélisation et l'évaluation énergétique des bâtiments grâce à ses divers avantages.

Mot clés : isolation thermique, confort thermique, simulation thermique, TRNSYS, efficacité énergétique.

Abstract

Thermal insulation is one of the most effective ways to reduce heat loss, optimize energy consumption and improve indoor comfort in buildings.

This work has shown that insulation is a key element in the design of efficient buildings, because it acts directly on heat transfers through the envelope and contributes to stabilizing indoor conditions. On the other hand, this work has allowed linking the theory of thermal insulation to numerical tools of thermal simulation such as TRNSYS software, which plays a central role in the modeling and energy evaluation of buildings thanks to its various advantages.

Keywords: Thermal insulation, thermal comfort, Thermal simulation, TRNSYS, energy efficiency:

ملخص

يعد العزل الحراري من أكثر الطرق فعالية لتقليل فقدان الحرارة، تحسين استهلاك الطاقة وتحسين الراحة الداخلية في المباني. وقد أظهر هذا العمل أن العزل عنصر أساسي في تصميم المباني الفعالة، لأنه يعمل بشكل مباشر على نقل الحرارة عبر الغلاف ويساهم في استقرار الظروف الداخلية. ومن ناحية أخرى، سمح هذا العمل بربط نظرية العزل الحراري بالأدوات العددية للمحاكاة الحرارية مثل برنامج TRNSYS ، الذي يلعب دوراً مركزياً في نمذجة وتقييم الطاقة للمباني بفضل مزاياه المختلفة .

الكلمات المفتاحية: العزل الحراري، الراحة الحرارية، محاكاة حرارية، TRNSYS، كفاءة طاقة.