

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Salah Boubnider Constantine 3

Faculté d'Architecture et d'Urbanisme

Département d'Architecture

N° Ordre :

Série :

MEMOIRE

Pour l'Obtention du Diplôme de Magistère en Architecture

Option : Architecture Climatique et Environnement

THEME

**Evaluation de la performance énergétique d'un équipement
réhabilité et isolé par l'extérieur dans un climat semi-aride**

(Cas : ex- Commamo. Constantine)

Présenté par : Mr BELILI Hocine

Sous la direction du Professeur ABDOU Saliha

Jury d'examen :

Président : Dr. Derradji Mohamed

Université de Constantine

Examineur : Pr. Rouag Djamila

Université de Constantine

Examineur : Dr. Benhassine Nacéra

Université de Constantine

Rapporteur : Pr. Abdou Saliha

Université de Constantine

Soutenu le 31/10/2017

REMERCIEMENTS

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

Les travaux qui font l'objet de ce mémoire ont été réalisés au sein du laboratoire Architecture Bioclimatique et Environnement de la faculté de l'architecture et de l'urbanisme de l'Université 03 de Constantine, sous la direction du Professeur ABDOU Saliha.

Mes vifs remerciements et toute ma gratitude s'adressent à mon encadreur, le Professeur ABDOU Saliha, 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 de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi, aux professeurs BOURBIA Fatiha, BOUCHAHM Yasmina, le Docteur TOUAM Nassira, le Docteur DERRADJI Mohamed et ROUAG Djamila pour ses précieux conseils et encouragements.

Je remercie également l'enseignant SOUTHY Walid qui m'a assisté lors de la validation des résultats in situ et qui m'a aidé apprendre la manipulation du logiciel « TRNSYS ».

Un remerciement tout particulier à mes parents, ma femme et mes enfants qui ont accepté de sacrifier les bons moments de leur vie pour mon succès.

Mes remerciements s'adressent, à tout le personnel du laboratoire ABE et à tous mes collègues de promotion « 2014 ». Sans oublier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

Résumé :

En Algérie, le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore. Sa consommation représente plus de 42% de la consommation finale. Les actions de maîtrise de l'énergie proposées pour ce secteur portent notamment sur l'introduction de l'isolation thermique des bâtiments qui permettra de réduire la consommation d'énergie liée au chauffage et la climatisation d'un logement d'environ 40%. Le confort thermique constitue une demande reconnue et justifié dans les bâtiments du fait de son impact sur la qualité des ambiances thermiques intérieures. Ce confort ne peut être assuré que par l'optimisation de l'isolation thermique, du critère de l'inertie thermique et bien sur la prise en considération des paramètres de l'architecture bioclimatique lors de sa conception.

À l'heure où les défis énergétiques deviennent une priorité, il devient décisif non seulement de repenser la façon de construire mais également de rénover un parc immobilier vétuste. La technologie d'isolation thermique par l'extérieur des murs est un précepte efficace pour l'économie d'énergie, utilisé sur une grande échelle pour répondre à l'objectif initial de la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment.

La présente recherche a été incitée par la réalité du terrain, il est constaté que certains projets ont des façades ornées par des matériaux très coûteux des (mur-rideau et l'Allico-band) ; nommés des kits, influant négativement sur le confort intérieur de l'utilisateur, ainsi sur l'augmentation dans la consommation de l'énergie électrique. Ces matériaux peuvent être remplacés par des procédés d'isolation thermique appliqués sur la paroi extérieure du bâtiment. Le choix judicieux du matériau d'isolation thermique peut avoir un grand impact sur le confort thermique intérieur, selon ses caractéristiques thermo-physiques, et permet de lutter efficacement contre les ponts thermiques responsables d'importantes pertes d'énergie.

Dans ce présent travail, l'investigation a été menée sur un modèle de bâtiment qui remonte à l'époque coloniale, (établissement Henry Machat), récemment réhabilité et réaménagé. L'étude s'est fixée dans l'objectif à apercevoir l'impact de l'isolation thermique par l'extérieur sur le confort intérieur et l'efficacité énergétique du bâtiment. Parallèlement, l'utilisation d'un logiciel de modélisation thermique dynamique « TRNSYS 16 » dans le but de valider les résultats in situ, puis de rechercher le type de l'isolant, l'épaisseur, et l'emplacement, qui offre la solution du confort et de l'efficacité énergétique optimale.

Les résultats de la présente recherche ont illustré que l'isolation thermique dans les bâtiments ne peut pas être considérée comme l'unique solution. Les études de simulation ont autorisé la découverte de la meilleure combinaison qui doit être appliquée pour améliorer la performance thermique et énergétique d'un bâtiment.

Mots clés & concept :

Efficacité énergétique, Confort thermique, Isolation thermique extérieure, Ventilation nocturne, Super-isolant, Pont thermique. Performance thermique.

Sommaire

Table des matières	I
Liste des figures	VIII
Liste des photos	XVI
Liste des tableaux	XVI
Nomenclature.....	XVII

Introduction & problématique

Introduction	1
1. Problématique.....	4
2. Hypothèse	7
3. Objectifs	8
4. Méthodologie et outils de recherche	9
5. Structure de la thèse	9

Chapitre I

le rôle de l'isolation thermique

Introduction.....	11
I.1. Les raisons de l'isolation thermique des bâtiments :(Pourquoi isoler) ?.....	11
I.1.1. Isoler pour garantir le confort thermique été comme hiver.....	11
I.1.2. Rôle de l'isolation thermique	12
I.1.3. Aperçu historique sur les réglementations de l'isolation thermique en Europe.....	13
I.1.4. La réglementation thermique de 2012 (RT 2012)	14
I.1.5. Le contexte réglementaire de l'isolation thermique en Algérie	14
I.2. Types et qualités des produits d'isolation thermique.....	16
I.2.1. Isolations conventionnelles	18
I.2.1.1. La laine minérale	18
I.2.1.2. Le polystyrène expansé (EPS)	19
I.2.1.3. Le polystyrène extrudé (XPS)	19

I.2.1.4. Cellulose	20
I.2.1.5. Liège	20
I.2.1.6. Polyuréthane (PUR).....	20
I.2.2. Isolations naturelles et écologiques « vertes »	22
I.2.2.1. Les isolants naturels.....	22
I.2.2.2. Les isolants écologiques	23
I.2.3. Isolations à Hautes performance thermique (super-isolation).....	24
I.2.3.1. Panneaux isolants sous vide (VIP)	24
I.2.3.2. Panneaux remplis de gaz (GFP)	26
I.2.3.4. Matériaux à changement de phase (PCM).....	28
I.2.4. Future possibilité de l'isolation thermique du bâtiment.....	31
I.2.4.1. La nanotechnologie appliquée à l'isolation thermique.....	31
I.2.4.2. Matériaux d'isolation sous vide (VIM).....	32
I.2.4.3. Matériaux d'isolation gazeuse (GIM)	33
I.2.4.4. Matériaux d'isolation Nano (NIM)	33
I.2.4.5. Matériaux d'isolation dynamique (DIM)	34
I.2.5. Autres matériaux et solutions futures ?	34
I.2.5.1. Béton et applications de nano-isolants	35
I.2.5.2. Nano Conc	35
I.3. Méthodes et techniques d'évaluation d'un meilleur choix d'isolants thermiques.....	37
I.3.1. Indices de choix d'un isolant	37
I.3.1.1. Propriétés thermiques	37
I.3.1.2. Propriétés techniques	37
I.3.1.3. Propriétés environnementales	37
I.3.1.4. Propriétés économiques	38
I.3.2. Objectifs	38
I.3.2.1. Niveau minimum	38
I.3.2.2. Niveau conseillé	39
I.3.2.3. Niveau optimum	39
I.4. Les procédés d'isolation	40
I.4.1. L'isolation des murs	40
I.4.2. L'isolation par l'intérieur	40
I.4.3. L'isolation par l'extérieur.....	40
I.4.3.1. Les bardages rapportés	41

I.4.3.2. Les enduits minces ou épais sur isolant (ETICS)	41
I.4.3.3. Les vêtements	41
I.4.4. L'isolation entre ossatures.....	41
I.4.5. L'isolation répartie	41
I.5.Réhabilitation et rénovation thermique.....	43
I.5.1. Limites de l'isolation thermique comme approches unique.....	43
I.5.2. De la performance thermique à la performance énergétique d'un bâtiment	44
I.5.3. Perspectives	45
Conclusion.....	46

Chapitre II

Isolation thermique et performance énergétique du bâtiment

Introduction.....	47
II.1. Facteurs généraux affectant la performance thermique des isolants.....	47
II.1.1. L'inertie thermique	47
II.1.2. Constante du temps	48
II.1.3. Effet de l'emplacement de l'isolant thermique sur le déphasage et l'amortissement	50
II.1.4. Relation entre isolation et inertie	52
II.2. Epaisseur optimale et position meilleure de l'isolation thermique.....	54
II.2.1. Épaisseur des isolants	54
II.2.2. Positionnement de l'isolant.....	56
II.2.3. L'Emplacement de l'isolant dans différentes configurations murale	59
II.2.4. L'effet de la ventilation nocturne sur l'isolation thermique	60
II.3. Multiples configurations sur l'isolation ventilée	60
II.3.1. Couplage isolation thermique avec ventilation nocturne.....	60
II.3.2. Effet de l'isolant ventilé sur le confort intérieur	61
II.3.2. L'impact de l'épaisseur de l'air sur la résistance thermique.....	64
II.3.3. Système d'isolation dynamique passive-active	65
II.4. Impact des isolants à haute performance thermique sur le confort thermique et la consommation d'énergie.....	66
II.4.1. Isolation mince en aérogel	66
II.4.2. Panneaux d'isolation sous vide (VIP).....	67

II.4.3. L'isolation mince et réfléchissante (CMR).....	68
II.4.4. L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en stockage d'énergie en bâtiment	69
II.5- Les paramètres qui influent sur l'isolation.....	70
II.5.1. Effet de l'ombrage externe sur l'épaisseur optimale de l'isolant	70
II.5.2. L'effet des ponts thermiques.....	71
II.5.3. Phénomène de condensation dans une paroi avec isolation et sans isolation	72
II.6- Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la consommation énergétique	74
II.6.1. Effet de l'isolation thermique sur l'efficacité énergétique.....	75
II.6.2. L'impact de l'isolation du toit sur la climatisation	75
II.6.3. Effet de l'orientation des parois sur l'épaisseur de l'isolation et la climatisation.....	77
II.6.4. Estimation des performances énergétiques du bâtiment dans le.....	78
contexte méditerranéen.....	78
Conclusion.....	82

Chapitre III Investigation : cas d'étude et méthodologie de travail

Introduction.....	83
III-1- Présentation du cas d'étude	84
III.1.1. Aperçu sur le climat de la ville de Constantine	84
III-2- Description du cas d'étude.....	90
III-3- Localisation du projet.....	91
III-4- Critères choix du bâtiment.....	91
III-5- Descriptif du bâtiment diagnostiqué	93
III-6- Programme et objectifs.....	95
III-7- Les appareils de mesures utilisés	99
III-7-1- Description des outils de mesures	100
III-7-1-1- La station météo Scientifique Oregon	100
III-7-1-2- Détecteur thermique infrarouge	101
III-7-1-2- Mesure de la température (thermocouple).....	102
III-7-1-3- Enregistreur de données de température et d'humidité	102

III-7-1-4- Caméra infrarouge vision nocturne	103
III-7-1-5- vision nocturne du local investigué	104
III-8- Techniques de déroulement de mesures	106
III-8-1-Période estivale 1er scénario sans ventilation : fenêtres et châssis fermés (03 jours consécutifs), 18-19-20/08/2016	106
III-8-1-1-Cas du R.D.C (foyer) : Période estivale	106
III-8-1-2-Cas de l'étage (mess) : Période estivale	106
III-8-1-3-Cas du dernier étage (magasin) : Période estivale	106
III-8- 2-Période estivale 2ème scénario (avec ventilation nocturne), entre 21-22-23 /08/2016	106
III-8- 3-Mesures en période hivernale	107
III-8- 3-1-Cas des 03 échantillons (foyer, mess, magasin) : 16/01/2016.....	107
III-9- Evaluation.....	107
Conclusion.....	108

Chapitre IV

Interprétation des résultats de l'investigation

Introduction.....	109
IV.1- Evaluation de l'isolation extérieure sur le confort thermique.....	109
IV.1.1. Interprétation des résultats de la période estivale du (foyer, mess, magasin). Scénario (01) sans ventilation naturelle nocturne (18-19-20 Aout 2016)	109
IV.1-1-1-Etude comparative de la température moyenne (intérieure et extérieure)	109
IV.1-1-2-Etude comparative des températures surfaciques (intérieure et extérieure) ...	111
IV.1-1-2-1- Les températures surfaciques intérieures.....	111
IV.1-1-2-2- Les températures surfaciques extérieures	113
IV.1-1-2-3- Etude de l'humidité moyenne intérieure et extérieure.....	114
IV.1-1-2-4-Comparaison des écarts entre température intérieure et extérieure ($\Delta T = t_i - t_e$).....	114
IV.1-1-2-5-Evaluation du confort thermique	116
IV.2. Interprétation des résultats de la période estivale du (foyer, mess, magasin) ; scénario (02) avec ventilation naturelle nocturne (21-22-23 aout 2016).....	116
IV.2.1. Etude comparative entre scénario (01) et scénario (02) des températures (intérieure et extérieure)	118
IV.2.1.1. Etude comparative entre scénario (01) et scénario (02) des températures surfaciques (intérieure et extérieure).....	119

IV.2.1.1.1. Etude comparative des températures surfaciques intérieures	119
IV.2.1.1.2. Etude comparative des températures surfaciques extérieures	120
IV.2.1.2. Evaluation du confort thermique	122
IV. 3. Interprétation des résultats de la période hivernale du (foyer, mess, magasin) ..	123
IV.3.1. Etude comparative de la température moyenne intérieure et extérieure	123
IV.3.1.1. Etude comparative des températures surfaciques (intérieure et extérieure) ...	125
IV.3.1.1.1. Les températures surfaciques intérieures	125
IV.3.1.1.2. Les températures surfaciques extérieures	126
IV.3.2. Etude de l'humidité moyenne intérieure et extérieure	128
IV.3.3. Etude des températures moyennes maximales, minimales	129
IV.3.4. Comparaison des écarts entre température intérieure et extérieure ($\Delta T = t_i - t_e$) ..	129
IV.3.5. Evaluation du confort thermique	130
Conclusion.....	132
<i>Chapitre V</i>	<i>Simulation</i>
Introduction	134
V.1. Descriptif et critères du choix du programme TRNSYS	134
V.2. Etapes de la simulation	135
V.2.1. Confrontation avec les résultats de l'expérimentation.....	135
V.2.1.1. Validation des résultats in situ par le modèle TRNSYS	135
V.2.1.1.1. Validation de la température de l'air intérieur en période hivernale 16-17-18 janvier 2015.....	135
V.2.1.2. Validation de la température de l'air intérieur période estivale.....	138
V.2.1.3. Validation de la température surfacique	144
V.2.1.3.1. Période hivernale	144
V.2.1.3.2. Période estivale.....	148
V.3. Amélioration du confort thermique dans les locaux	156
V.3.1. Emplacement de la couche isolante	156
V.3.2. Effet de la ventilation naturelle nocturne.....	158
V.3.3. Effet de la structure des murs sur la consommation énergétique	159

V.3.4. Effet de la structure des murs sur la température ambiante.....	161
V.3.5. Effet de l'isolant sur la température de l'air	162
Conclusion	164
Conclusion générale et recommandations	165
Recommandations sur l'optimisation de l'isolation thermique dans un climat semi-aride	171
Axes et voie de recherche	172
Bibliographie	174
Annexes	180
Résumés	202

Listes des figures

FIG 1: la structure du mémoire.....	10
<hr/>	
FIG.I.1 : Evolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année.	11
FIG.I.2 : Evolution de la réglementation thermique besoin en chauffage.	13
FIG.I.3 : Interface de l'application qui permet le calcul des déperditions thermiques en hiver et des apports en été conformément aux DTR C3.2 et C 3.4..	15
FIG.I.4 : Organigramme schématique regroupant les grandes familles de l'isolant thermique,	17
FIG.I.5 : De gauche à droite, laine de verre, laine de roche, et cellulose	19
FIG.I.6 : Image de microscopie électronique à balayage de matrices de polystyrène sphérique (PS) (gauche), de petites particules de silice (médianes) revêtues autour d'un gabarit de PS sphérique et de nanosphères creuses de silice (à droite) après élimination de PS ,	20
FIG.I.7 : De gauche à droite, polystyrène EPS, polystyrène XPS, liège, et polyuréthane.	21
FIG.I.8 : Performance thermique des isolants thermiques : conductivité thermique et épaisseur nécessaire pour une résistance thermique $R_{th} = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ RT 2012.	22
FIG.I.9 : Comparaison de l'épaisseur d'isolation typique fonctionnant à des températures moyennes de l'air ambiant de 20°C , 30°C et 40°C , épaisseur arrondie au plus proche de 5 mm	22
FIG.I.10 De gauche à droite, laine de mouton, liège et fibre de coco, ouate de cellulose, et chanvre.	24
FIG.I.11 : (Gauche) structure VIP typique montrant les principaux composants et (à droite) une comparaison de l'épaisseur de résistance thermique équivalente de l'isolation thermique traditionnelle et VIP.	25
FIG.I.12 : Coupe transversale de matériaux d'enveloppe typiques pour VIP: (a) film métallique, (b) film métallisé monocouche et (c et d) films métallisés à trois couches. Les quatre types de feuille sont communément appelés (a) AF, (b) MF1, (c) MF2 et (d) MF3. . .	25

FIG.I.13 :Conductivité thermique du centre du panneau pour VIPs avec un noyau de silice fumée en fonction du temps écoulé temps. Pour deux tailles différentes de panneau 50cm × 50cm × 1 Cm et 100 cm × 100 cm × 2 cm, et pour trois Les types AF, MF1 et MF2.....	25
FIG.I.14 :Vue sur la feuille de protection et la structure de déflecteur à l'intérieur d'un panneau isolant remplide gaz. Source : LBNL, 2015.....	26
FIG.I.15 :Gauche. Aérogels en combinaison avec des perles de verre opaques nano gel. Granulé nano gel translucide. Des tas d'aérogel. Et à droite Échantillons transparents d'aérogel réalisés par séchage supercritique à haute température (haut) et séchage supercrit séchage supercritique à basse température (bas)	27
FIG.I.16 :Schématisation de la structure interne d'un aérogel.	28
FIG.I.17 :Matériaux PCM améliorés utilisés comme partie intégrante de l'enveloppe thermique du bâtiment. La photo de droite montre la construction d'une double paroi expérimentale avec une couche extérieure de cavités contenant de l'isolant PCM-cellulose. .	29
FIG.I.18 Différentes options de configuration de la fenestration solaire PCM semi-transparente : une paroi de Trombe semi-transparente contenant un dissipateur de chaleur PCM. B) Paroi de Trombe translucide avec dissipateur de chaleur PCM et isolation translucide C) Système de fenestration solaire utilisant un dissipateur de chaleur PCM et un verre prismatique sélectif,	30
FIG.I.19 :Micrographies de matériaux de changement de phase nano-encapsulés sélectionnés (PCM). (S	31
FIG.I.20 :Nanotechnologie et son application sur les matériaux d'isolation thermique à hautes performances.	32
FIG.I.21 :Gauche Le développement du VIP au VIM et à droite Création envisagée d'un matériau d'isolation sous vide en tant que matériau à l'état solide se gonflant de l'intérieur pendant la formation et l'expansion ultérieure d'une structure de pore interne.	32
FIG.I.22 :Le développement du panneau isolant de vide au matériel d'isolation de gaz.	33
FIG.I.23 :a) Modèle conceptuel d'un NIM à base de nanosphères creuses (à gauche), image TEM des nanosphères de silice creuses réelles (à droite). b) Le développement des VIP à NIM.	34

FIG.I.24 :NIM en tant qu'isolation thermique pour béton, c'est-à-dire NIM en tant que montage ultérieur extérieur et / ou intérieur de béton, NIM (intermédiaire) appliqué au milieu de béton et NIM (fond) mélangé avec du béton. (Source : Jelle et al., 2014a,b).	36
FIG.I.25 :Modèle de décision hiérarchique (HDM) (Source : R. Koosawangsi et al 2014)..	38
FIG.I.26 :Isolants traditionnels : laine de roche, laine de verre, verre cellulaire, perlite expansée	38
FIG.I.27 :Isolants végétaux : cellulose, laine de chanvre en rouleau, panneau de liège expansé, laine d'herbe.	39
FIG.I.28 :Terre-paille en cours de chantier (à gauche) et de bois cordé (à droite).	39
FIG.I.30 :Comportement thermique d'une enveloppe selon sa composition .	42
FIG.I.31 :Les procédés d'isolation interne, externe, interne, et répartie.	42
FIG.I.32 :Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment.	44

FIG.II.1 :Comparaison des variations de la température intérieure obtenue numériquement et par le modèle de la capacité effective	48
FIG.II.2 : Parois multicouches avec la couche isolante située respectivement (a) du côté du côté	49
FIG.II.3 :La capacité thermique effective (trait continu) et la constante de temps thermique (pointillés) en fonction de la résistance thermique	50
FIG.II.4 :Configurations murales composées de briques, d'isolation et de plâtre (isolant extérieur (Mur -1), isolant intérieur (Mur-2) et isolant intermédiaire (Mur-3)).	52
FIG.II.5 :Variation du facteur de décalage temporel et décrétement annuel moyen par rapport à l'épaisseur d'isolation pour trois structures de paroi différentes.	52
FIG.II.6 :Optimisation de l'épaisseur de l'isolant.	55
FIG.II.7 :Configuration des parois étudiées	57
FIG.II.8 : Les configurations des murs montrent un agencement de couches avec une épaisseur d'isolation optimale (dimensions en mm).	58

FIG.II.9 :Variation de la température intérieure simulée avec différentes configurations murales (à gauche) et lame d'air et un isolant au milieu (au milieu) et le positionnement de l'isolant à trois côtés différents (à droite).	59
FIG.II.10 :Profile des températures avec ventilation de 1.7 v/h (Source : Al- Mofeez, 1993).	60
FIG.II.11 :Profils thermiques journaliers des cellules de forte inertie pendant une séquence d'été avec et sans ventilation nocturne (d'après B. GIVONI dans Passive and low energy cooling of buildings).	61
FIG.II.12 :Monitoring estival et comparaison entre W2 et W3 dans l'état réel,.....	63
FIG.II.13 :Monitoring hivernal et comparaison entre W2 et W3 dans l'état réel	63
FIG.II.14 :Résistance thermique en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air, cas d'un bloc de ciment.	64
FIG.II.15 : Détail de fonctionnement d'un système d'isolation dynamique passive-active pour tous les climats durant l'été et l'hiver.	65
FIG.II.16 : Effet de l'isolation de l'aérogel sur la perte de chaleur à travers la paroi externe de la maison de test	67
FIG.II.17 : Augmentation des valeurs de déphasage thermique du modèle Nano par rapport au modèle de référence (à gauche). U-valeurs ultra-basses du modèle Nano moins que le modèle de base (à droite)	68
FIG.II.18 : Isolants mince réfléchissants (a) multicouche, (b) à bulles(c) - Principe de fonctionnement d'un CMR.....	69
FIG.II.19 : Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau (D'après Hill et al., 2004).....	70
FIG.II.20 : (a) Perte de chaleur à travers un pont thermique. (b) Les ponts thermiques des pignons et du mur de refend,.....	72
FIG.II.21 : Profil de température pour une paroi simple sans isolation	73
FIG.II.22 :Profil de température pour une paroi simple avec isolation.	74
FIG.II.23 :Effet de l'isolation avec lame d'air et d'autres matériaux analysés sur les charges de refroidissement mensuels.	76

FIG.II.24 :Effet de la température intérieure sur les charges de refroidissement et sur l'épaisseur optimale de l'isolant (Comparaison des deux méthodes).	76
FIG.II.25 :a) Variation horaire du rayonnement solaire incident pour juillet, b) Charge annuelle de transmission de refroidissement des murs non isolés et 3 cm isolés pour toutes les orientations murale.....	77
FIG.II 26 :Composition de la toiture dans (Prototype bioclimatique).	79
FIG.II.27 :Conception du mur chaque cas	79
FIG.II.28 :Profil de la température extérieure (T_{ext}), interne prototype PB($T_{int}(B)$)et interne prototype PM($T_{int}(M)$)	80
FIG.II.29 :(À gauche) Influence de l'isolation sur les besoins mensuels de chauffage et à droite Influence de l'isolation sur les besoins mensuels de rafraîchissement (Oran)	80
FIG.II.30 Evolution de la température de l'ambiance intérieure avant et après la réhabilitation pour le 1er Janvier et le 1er juillet. (Source N. Kadri 2011).	81

FIG.III. 1 :plan de situation du projet d'investigation sur image satellite Google (ville de Constantine)..	86
FIG.III. 2 : plan de situation du projet d'investigation,	86
FIG.III. 3 :Présentation de la course solaire horizontal en été.	87
FIG.III. 4 :Présentation de la course solaire horizontal les zones ensoleillées et ombrées en été.	87
FIG.III. 5 : Présentation de la course solaire horizontal en hiver.	88
FIG.III. 6 :Présentation de la course solaire horizontal les zones ensoleillées et ombrées en hiver	88
FIG.III. 7 : Orientation de l'immeuble par rapport à la trajectoire solaire	89
FIG.III. 8 :Degré de flexibilité d'une orientation.	89
FIG.III. 9 : Plan de masse indiquant l'endroit du bloc diagnostiqué..	92
FIG.III. 10 : Schéma représente les points de prise de mesures surfaciques sur façade du mur intérieure et extérieure T_{si} et T_{se}	99

FIG. IV.1 .Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été... ..	111
FIG. IV.2 .Variation de la température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Aout 2016).	112

FIG. IV 3. Variation de la température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin.....	113
FIG. IV.4. Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure avec température intérieure du foyer, mess,	114
FIG. IV.5. Ecart de températures moyennes horaires intérieures et extérieures période été, du foyer, mess, et magasin. Période d'été. (18-19-20 Mois d'Aout 2016).	115
FIG. IV.6. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort. Période d'été.....	116
FIG. IV.7. Variation de la température moyenne de l'air période d'été du foyer, mess et magasin.....	118
FIG. IV.8. Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été (21-22-23, Aout 2016).	121
FIG. IV.9. Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été (18-19-20, Aout 2016).	121
FIG. IV.10. Variation de température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV.11. Variation de température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV.12. Variation de température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV.13. Variation de température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV.14. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort. Période d'été.....	123
FIG. IV.15. Variation de la température moyenne de l'air période d'hiver du foyer, mess et magasin.....	124
FIG. IV. 16. Variation de la température moyenne surfacique intérieure période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).....	125

FIG.IV. 17. Variation de la température moyenne surfacique extérieure période d’hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).....	126
FIG. IV. 18. Gradient thermique de la paroi extérieure du mess	127
FIG. IV. 19. Gradient thermique de la paroi extérieure du foyer.....	127
FIG. IV. 20. Variation de l’humidité relative intérieure et extérieure avec température intérieure du foyer, mess, et magasin. (16-17-18 Mois de janvier 2016).....	128
FIG. IV. 21. Variation des températures moyennes maximales, minimales intérieures et extérieures des jours d’investigation période d’hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).	129
FIG. IV. 22. Ecart de températures moyennes horaires intérieures et extérieures période été, du foyer, mess, et magasin période d’hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).	130
FIG. IV. 23. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort, du foyer, mess, et magasin période d’hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).	131
<hr/>	
FIG.V. 1 : Interface du logiciel TRNSYS 16. Source : image du logiciel.	134
FIG.V. 2 : Variation de la température de l’air du foyer pour les trois jours d’hiver.....	136
FIG.V. 3 : Variation de la température de l’air du mess pour les trois jours d’hiver	137
FIG.V. 4 : Variation de la température de l’air du magasin pour les trois jours d’hiver.....	138
FIG.V. 5 : Variation de la température de l’air du foyer pour les trois jours d’été(Journée 18-20 Aout).....	139
FIG.V. 6 : Variation de la température de l’air du foyer pour les trois jours d’été (Journée 21-22-23 Aout).	140
FIG.V. 7 : Variation de la température de l’air du mess pour les trois jours d’été(Journée 18-20 Aout).....	141
FIG.V. 8 : Variation de la température de l’air du mess pour les trois jours d’été (Journée 21-23 Aout).....	142
FIG.V. 9 : Variation de la température de l’air du magasin pour les trois jours d’été(Journée 18-20 Aout).	143

FIG.V. 10 : Variation de la température de l'air du magasin pour les trois jours d'été(Journée 21-23 Aout).	144
FIG.V. 11 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'hiver (Journée 16-18 Janvier).	145
FIG.V. 12 : Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'hiver(Journée 16-18 Janvier).	146
FIG.V. 13 : Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'hiver (journée 16-18 Janvier).	147
FIG.V. 14 : Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'hiver (journée 16-18 Janvier).	148
FIG.V. 15 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'été(Journée 18-20 Aout).	149
FIG.V. 16 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'été(Journée 21-23 Aout).	150
FIG.V. 17 :Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'été(Journée 18-20 Aout).	151
FIG.V. 18 :Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'été(Journée 21-23 Aout).	152
FIG.V. 19 : Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'été (journée 18-20 Aout).	153
FIG.V. 20 :Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'été (journée 21-23 Aout).	154
FIG.V. 21 :Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'été (journée 18-20 Aout).	155
FIG.V. 22 : Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'été (journée 21-230 Aout)	156
FIG.V. 23 :a. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'hiver (16-18 Janvier).	157

FIG.V. 24 :b. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'été (18-20 Aout).....	157
FIG.V. 25 :c. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'été (21-23 Aout).....	158
FIG.V. 26 : Variation de la consommation de climatisation pour le local Foyer et mess pendant l'été	159
FIG.V. 27 : Différents emplacement de l'isolant sur une paroi en brique. Source : auteur. ..	160
FIG.V. 28 : Variation de la consommation énergétique pendant l'année.	160
FIG.V. 29 :Variation de la consommation énergétique annuelle selon le cas étudié.	161
FIG.V. 30 : Variation de la température de l'air pour le local mess (journée 16 janvier).....	162
FIG.V. 31 : Variation de la température de l'air pour le local mess (journée 18 Aout).....	163

Liste des photos

Photo.III. 1 : Façade extérieure du bloc de l'investigation.	93
Photo.III. 2 :Vue intérieure de l'échantillon mesuré du Foyer	94
Photo.III. 3 :Vue intérieure de l'échantillon mesuré du Mess	94
Photo.III. 4 :Vue intérieure de l'échantillon mesuré du Magasin.	95
Photo.III. 5 ;Station météo Oregon	100
Photo.III. 6 :PTD1 détecteur thermique.....	101
Photo.III. 7 : Anémomètre Termo/hygro, luxmètre numérique LM-8000 Lutron.	102
Photo.III. 8 : TH 0160-Enregistreur de données de température et d'humidité.....	103
Photo.III. 9 :IR0002 Caméra infrarouge IR Vision nocturne.	104
Photo.III. 10 : La thermographie à infrarouge au niveau du bâtiment diagnostiqué.	105

Liste des tableaux

TAB.II.1 ; Les murs étudiés : W1, W2 et W3 dans l'état réel et avec différentes solutions de rénovation.	62
TAB.II. 2 :Évolution de la conductivité thermique de quelques isolants en fonction de leur teneur en eau.....	74
TAB.II.3 :Valeurs maximales et minimales des paramètres pour un jour d'été et d'hiver	79
TAB.IV.1 : Températures opérative recommandée pour une activité sédentaire selon le standard ISO 7730-1984.....	122
TAB. IV.2 :Températures opérative recommandée pour une activité sédentaire, 50% d'humidité relative et une vitesse de l'air de 0.15 m/s selon le standard ASHRAE 55-1992.	122

Nomenclature

q : flux de chaleur total	W / m ²
Q : flux de chaleur total	W / m ²
te : température air extérieur	°C
θe : température paroi extérieure	°C
θn : température intérieur paroi	°C
θi : température paroi intérieure	°C
ti : température air intérieur	°C
tsi : température surfacique interne	°C
tse : température surfacique externe	°C
Tr : température résultante	°C
top : température opérative	°C
tsud : température de sudation	°C
TMR : température moyenne radiante	°C
Φ : Déphasage	s
a : diffusivité thermique	m ² /s

e : épaisseur	m
Y : admittance	W/m ² °C
λ : conductivité thermique	W/ m° C
ρ : masse volumique	Kg/m ³
c : chaleur massique	Wh/Kg° C
DHC : « Diurnal Heat Capacity » la capacité de la chaleur diurne	Wh / ° C
r : résistance thermique	m ² °C/ W
R : résistance thermique totale	m ² °C/ W
c : conductance thermique	W/m ² °C
K : conductance totale ou coefficient de transmission thermique	W/m ² °C
1/hi : coefficient de la surface interne de la paroi	W/m ² °C
1/he : coefficient de la surface externe de la paroi	W/m ² °C
hi : résistance thermique de la couche d'air interne	m ² °C/ W
he : résistance thermique de la couche d'air externe	m ² °C/ W
HCT : capacité thermique total	J/m ³ °C ou kwh/m ³ °C
α : diffusivité thermique	m ² /s
t : constante de temps	h
b : effusivité thermique d'un matériau	Ws / m ² °C
bmoy : effusivité thermique moyenne	Ws / m ² °C
bi : effusivité thermique de chaque surface interne	Ws / m ² °C
si : somme des surfaces	m ²
Stot : surface totale	m ²
Fs : facteur solaire	%
- Unités utilisées par le logiciel TRNSYS :	
Temps : En heure	(h)
Longueur : En mètre	(m)

Surface : En mètre carré	(m ²)
Volume : En mètre cube	(m ³)
Masse : En Kilo joule	(Kj)
Température : En degré Celsius	(°C)
Chaleur spécifique : En Kilo joule par kilo gramme degré Celsius	(Kj/ Kg °C)
Conductivité thermique : En Kilo joule par heure mètre degré Celsius	(Kj /h m°C)

Introduction

" La conception architecturale bioclimatique s'inscrit dans la problématique contemporaine liée à l'aménagement harmonieux du territoire et à la préservation du milieu naturel. Cette démarche, partie prenante du développement durable, optimise le confort des habitations, réduit les risques pour leurs santés et minimise l'impact du bâti sur l'environnement. " [Alain Liébard et André De Herde ; 2003].

Jusqu'à la seconde moitié du 20^{ème} siècle, les préoccupations environnementales ainsi que les économies d'énergie n'apparaissent pas comme une problématique majeure. A la suite du premier choc pétrolier en 1973, l'augmentation brutale des prix des ressources fossiles a déclenché une prise de conscience globale sur les limites de ces réserves et la nécessité d'économiser l'énergie. A ces questions d'énergie au sens large se sont ajoutées la prise en compte des impacts environnementaux et la lutte contre le changement climatique.

La diminution des consommations énergétiques pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées est alors devenue une nécessité dans l'esprit international. Une partie de la solution se trouve dans le remplacement des ressources d'énergies fossiles et émettrices de GES polluants (charbon, pétrole, gaz) par des ressources d'énergie dites propres (nucléaire, énergie solaire, éolien, géothermie, biomasse). Parallèlement, la réduction de la consommation énergétique s'avère cruciale, notamment via la maîtrise des déperditions thermiques. Le domaine du bâtiment est l'un des principaux secteurs concernés par ces déperditions et représente un très grand gisement potentiel d'économies d'énergies.

Le secteur du bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie et la source de 25% des gaz à effet de serre. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments constitue donc un enjeu majeur de la maîtrise des impacts environnementaux. Une isolation thermique des constructions bien conçue et bien réalisée permet de maîtriser les besoins en énergie devant être consacrés au chauffage ou au refroidissement. Cela participe aussi largement au confort des occupants, en été comme en hiver. Elle répond également à d'autres enjeux économiques (la maîtrise de la consommation, en particulier dans les bâtiments existants, constitue un gisement important d'économies) exigé, et réglementaires, en effet la RT 2012 exhorte un renforcement important du niveau d'isolation pour permettre de répondre au niveau de performance.

La consommation énergétique d'un bâtiment est fortement subordonnée des caractéristiques de son enveloppe. La performance thermique des murs extérieurs représente un facteur clé, pour accroître l'efficacité énergétique du secteur de la construction et de réduire les émissions de GES. L'isolation thermique et sans aucun doute l'un des meilleurs moyens pour réduire la consommation d'énergie due à la fois au chauffage en hiver et à la climatisation durant l'été. Les matériaux d'isolation, jouent un rôle déterminant dans la sélection de la matière appropriée, son épaisseur et sa position, permettent d'obtenir de bonnes conditions de confort thermiques intérieur et des économies d'énergie adéquates. Les propriétés thermiques sont extrêmement importantes, mais ils ne sont pas les seuls à être pris en compte lors de la conception d'une enveloppe du bâtiment.

En Europe, depuis 1974, plusieurs règlements thermiques (RT) se sont succédés. Ils ont permis de faire passer la consommation énergétique moyenne d'un logement neuf d'environ 370 KWh/m²/an à moins de 250 KWh/m²/an, en une trentaine d'années. Depuis 2012, la (RT) exige de tous les bâtiments neufs qu'ils soient des « bâtiments basse consommation dite BBC », présentant une consommation de 50KWh/m²/an) et cette exigence doit se généraliser pour les constructions existantes d'ici 2020. Ainsi que l'un des objectifs tracés jusqu'à l'horizon 2020 concerne les bâtiments neufs qui devront fournir plus d'énergie qu'ils n'en consomment.

Le défi de la massification de la rénovation exige désormais le développement de nouveaux matériaux et composants, présentant des performances thermiques optimales par rapport à l'existant. Afin de répondre à ce défi, de nombreux projets de recherches à l'échelle internationale ont été lancés, notamment avec une volonté d'harmonisation des normes et des performances comme dans le cadre du programme EBC – Energy for Building and Communities, de l'AIE (Agence internationale de l'énergie). Ainsi, le développement de système d'isolation à haute performance énergétique, à faible épaisseur et à cout acceptable, adapté aux dispositions d'isolation par l'intérieur, apparait comme un enjeu majeur pour l'amélioration de l'efficacité énergétique, que ce soit pour le parc des bâtiments existants et neufs.

Les enjeux de la consommation excessive de l'énergie dans le bâtiment sont de trois ordres :

- Sociaux de par l'augmentation du cout de l'énergie.
- Economique de par l'épuisement des énergies fossiles et l'incapacité aux pouvoirs politiques de chaque pays à bien gérer les demandes énergétiques.
- Environnementaux compte tenu de la contribution de ce secteur dans l'émission des gaz à effet de serre.

La construction doit créer par son enveloppe (forme, matériaux, ouvertures,) un micro climat qui satisfait les exigences du confort thermique, pendant les différentes saisons. Tout cela s'avère difficile à réaliser vu la multitude de paramètres et les variations climatiques journalières et saisonnières. Pour cela, cette nouvelle optique protectrice d'environnement, essaye de faire la balance entre consommation énergétique et confort thermique, il s'agit d'exploiter le meilleur parti du climat et du contexte local et non de lutter contre l'environnement dans lequel le bâtiment est implanté. Par conséquent pour intégrer la notion de maîtrise d'énergie et celle du bien être des occupants dans le processus de conception, il faut construire durablement. Aujourd'hui, en architecture, construire durablement se traduit par une démarche globale, de l'enveloppe aux équipements techniques. Le bâtiment devient un ensemble cohérent pour lequel il est nécessaire de réduire les besoins énergétiques tout en assurant un confort optimal aux occupants.

La technologie d'isolation thermique des murs extérieurs est un précepte efficace pour l'économie d'énergie, utilisée sur une grande échelle pour répondre à l'objectif initial de la réduction de la consommation d'énergie du bâtiment. Elle présente plusieurs avantages dans la création du confort intérieur de l'édifice. Actuellement, l'isolation des murs à trois formes : isolation externe, isolation en sandwich et interne, la forme la plus répandue c'est l'isolation extérieure avec des matériaux d'isolation légers, et cela pour plusieurs raisons telles que la large gamme d'applications qui élimine l'effet du pont thermique et protège la structure de la construction. Tout cela apporte un bénéfice pour l'efficacité énergétique lors de la rénovation des bâtiments existants.

Face à une croissance démographique et économique importante, la nécessité de construire rapidement des bâtiments pour tout usage a entraîné la perte de l'équilibre qui régnait entre l'homme et son habitat. Les conséquences se traduisent par la construction de bâtiments standardisés, inadaptés, énergivores et inconfortables. À l'heure où les défis énergétiques deviennent une priorité, il devient décisif non seulement de repenser la façon de construire mais également de rénover un parc immobilier vétuste. Les solutions proposées par des démarches environnementales ou des standards de construction (par exemple : maison à basse consommation BBC, maison à énergie Zéro, maison passive, etc.) sont tout à fait intéressantes et le couplage avec des études de confort thermique pour les confortées. L'objectif de proposer des habitations confortables et énergétiquement performantes est alors tout à fait plus accessible.

1.Problématique :

L'énergie ressource naturelle de plus en plus exceptionnelle constitue un élément essentiel de la richesse humaine. Les changements climatiques, qui se révèlent sous des figures diverses menacent la stabilité de l'écosystème et imposent de déployer des politiques et des stratégies adaptées pour garantir un développement durable. Le secteur des énergies, en Algérie, a connu ces dernières années un élan considérable, le situant certainement au cœur d'un enjeu majeur, celui du développement durable. Devant cette situation économique cruciale vécue, suite à la chute des cours des hydrocarbures, l'état Algérien a accordé un intérêt particulier à la politique de l'efficacité énergétique, par l'adoption de mesures de financement concrètes et par le lancement du programme national des énergies nouvelles, renouvelables.

Les foyers algériens consomment presque dix fois plus d'électricité par rapport aux normes internationales et deux fois plus que la moyenne des pays maghrébins, selon les déclarations d'un responsable auprès de l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE). "En moyenne, un foyer algérien consomme entre 1.800 à 2.000 kilowatts-heure/an alors que la norme en Europe est de 200 à 250 kilowatts-heure/an¹. Il consomme aussi le double de la consommation d'un foyer d'autres pays du Maghreb", ces précisions sont évoquées en marge d'un séminaire sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment, tenue à Alger le 02 février 2016, les intervenants expliquent que l'origine de cette consommation excessive est le secteur du bâtiment ainsi que les équipements à consommation "énergivores".

En Algérie la politique publique en matière de logement est en pleine expansion. La croissance de la population, couplée à l'accélération de l'exode rural, a provoqué une pénurie de logements et une explosion de l'habitat insalubre à la périphérie des grandes villes. Le déficit de logements est évalué à plus d'un million d'unités. Afin d'éponger ce déficit et d'offrir des conditions de vie décentes aux citoyens, les pouvoirs publics Algériens ont lancé un gigantesque programme de construction ; 03 millions de logements sur 15 ans²; la construction de logements est devenue un axe prioritaire de la politique de développement du pays. Pour le quinquennat 2010-2014, plus de 3 700 milliards de dinars,

¹<http://www.aps.dz/economie/35976-la-consommation-%C3%A9lectrique-des-foyers-alg%C3%A9riens-est-10-fois-sup%C3%A9rieure-%C3%A0-la-norme-aprue>

² Le programme spécial de logement lancé pour la période comprise entre 1999 et 2004 aurait permis la réalisation de 810 000 logements, et pour 2005 et 2009 celle de 912 326 logements. Le plan quinquennal 2010-2014 prévoit la livraison de 1,2 million de logements entre lesdites dates et l'achèvement de 800 000 logements entre 2015 et 2017 (Ministère de l'habitat et de l'urbanisme, La Revue de l'Habitat, n° 6, janvier 2011).

soit l'équivalent de 50 milliards de dollars, ont été alloués au secteur de l'habitat, ce qui représente 17,4 % du budget national, attribué à la production du logement dans le cadre du PCSC (programme complémentaire de soutien à la croissance) et des programmes spéciaux du Sud et des Hauts Plateaux.

Les programmes de réalisation en Algérie ont connu une exécution multiple et intense de projets de bâtiments, qui ne sont malheureusement soumis à aucune exigence réglementaire sur le plan thermique et énergétique. Les paramètres de la conception sont d'ordre fonctionnel et architectural et la dimension énergétique du projet n'est pas toujours considérée comme significative, ce qui conduit à des bâtiments non confortables et énergivores.

En Algérie, le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore. Sa consommation représente plus de 42% de la consommation finale. Les actions de maîtrise de l'énergie proposées pour ce secteur portent notamment sur l'introduction de l'isolation thermique des bâtiments qui permettront de réduire la consommation d'énergie liée au chauffage et la climatisation d'un logement d'environ 40%. L'Algérie a adopté récemment un nouveau programme national d'efficacité énergétique. A horizon 2030, ce programme devrait permettre à l'Algérie d'économiser 63 millions de tonnes équivalent pétrole (Tep), représentant un gain financier de 42 milliards de dollars. Ce programme, qui sera lancé en 2017, se déploie autour des secteurs de l'industrie, du transport et de l'habitat. Dans le secteur de bâtiment, le programme prévoit l'isolation thermique de 100.000 logements annuellement, avec un engagement financier de l'état qui prendra en charge 80% des surcoûts liés à cette opération³.

Le confort thermique constitue une demande reconnue et justifié dans les bâtiments du fait de son impact sur la qualité des ambiances thermiques intérieures. Ce confort ne peut être assuré que par l'optimisation de l'isolation thermique, du critère de l'inertie thermique et bien sur la prise en considération des paramètres de l'architecture bioclimatique lors de sa conception. Effectivement dans toutes les régions de l'Algérie, le secteur du bâtiment subit de grandes périodes d'inconfort lié au climat et à la non adaptation des bâtiments aux conditions climatiques locales, ce qui provoque en plus des situations d'inconfort, une consommation énergétique exorbitante pendant toute l'année avec un impact néfaste sur l'environnement.

La plupart des concepteurs savent aujourd'hui de quoi il s'agit, panser la fuite avant de penser la suite, limiter les échanges thermiques avant de chauffer ou de refroidir, l'isolation n'est plus une fin en soi ni même un objectif à atteindre, elle devient l'un des moyens parmi d'autres pour valoriser l'inertie,

³ <http://portail.cder.dz.15-01-2017> à 5h00.

le déphasage et l'amortissement thermique. Dans le domaine de construction elle sera l'outil idéal pour répondre aux attentes d'optimisation de l'efficacité énergétique et de la réduction des émissions des gaz à effet de serre tout en préservant le confort thermique de l'occupant dans le bâtiment.

L'ampleur des économies d'énergie en raison de l'utilisation de l'isolation thermique varie en fonction du type de construction, les conditions climatiques, la situation du bâtiment, ainsi que le type de matériau isolant utilisé. L'utilisation correcte de l'isolation thermique des bâtiments ne contribue pas seulement à réduire le bilan énergétique du chauffage et de la climatisation requis, mais également à diminuer le coût de la consommation énergétique annuel. En outre, elle participe à prolonger les périodes de confort thermique sans avoir recours à l'utilisation des appareils d'appoint en particulier pendant les périodes intersaisons.

L'Algérie est également déterminée à investir dans tous les segments créateurs de valeurs et à les développer localement des filières industrielles de fabrication des isolants thermiques de l'enveloppe (murs et toitures) et le double vitrage, en utilisant les matériaux locaux (laine de roche, laine de verre...). L'objectif de ce programme est d'introduire les caractéristiques d'efficacité énergétique dans les constructions neuves et existantes.

Parmi les avantages de l'isolation thermique par l'extérieur figurent en première place les bonnes performances énergétiques assurées par ce type d'isolation. En effet, une isolation par l'extérieur permet de lutter efficacement contre les ponts thermiques responsables d'importantes pertes d'énergie en enveloppant le bâtiment de manière uniforme. Par ailleurs, cette isolation protège les murs contre les variations climatiques, puisque les parois sont ainsi moins soumises aux grands écarts de température qui détériorent la qualité des matériaux et par conséquent le bâtiment.

L'évolution inévitable vers des bâtiments neufs qui consomment peu d'énergie entrainera des innovations dans le domaine de l'enveloppe du bâtiment et particulièrement sur la performance des matériaux d'isolations, pour faire face à des situations multiples (orientations, conditions climatiques, construction neuve ou bâtiments existants, environnement proche des bâtiments, etc...); dans un champ de contrainte, une diversification importante des solutions techniques, dans un souci de synthèse qui peut évoquer deux principales lignes directrices de l'innovation :

- Une ligne dans la continuité de la logique actuelle, l'isolation thermique, mais avec une performance demandée si importante qu'elle imposera des évolutions fortes, notamment en termes de matériaux et de méthodes d'évaluation de leur efficacité.

-Une ligne plus en rupture, celle des parois actives, où la logique technique consistera à mieux profiter de l'environnement plutôt que de s'en isoler.

Aujourd'hui, la réalisation des bâtiments transparents à travers l'utilisation excessive des matériaux inadaptés à l'instar des (mur-rideau et l'Allico-band) ; dits des kits. Ces styles de revêtements muraux extérieurs ont un mauvais impact sur l'environnement intérieur et la consommation énergétique des édifices.

La présente recherche a été incitée par la réalité du terrain, il est constaté que certains projets ont des façades ornées par des matériaux très coûteux influant négativement sur le confort intérieur de l'utilisateur, ainsi sur l'augmentation dans la consommation de l'énergie électrique, ce qui laisse apparaître la mauvaise performance énergétique du bâtiment. Ces matériaux peuvent être remplacés par des procédés d'isolation thermique appliqués sur la paroi extérieure du bâtiment. Cette technique contribue d'une part à l'amélioration du confort intérieur des occupants et d'autre part à l'optimisation de la performance énergétique des constructions.

Vu ce qui précède plusieurs questions se posent :

- Quel est le rôle de l'isolation thermique par l'extérieur sur le confort thermique et l'économie d'énergie.

- Est-ce que la réhabilitation des bâtiments nécessite une isolation thermique de l'enveloppe par l'extérieur pour optimiser l'efficacité énergétique.

Ces questionnements permettent d'établir les hypothèses suivantes :

2. Hypothèse

Le respect d'une conception architecturale s'inscrit dans l'amélioration des procédés architecturaux qui maîtrise les déperditions et les gains thermiques traversant l'enveloppe du bâtiment et réduit la consommation énergétique de ce dernier. L'architecture bioclimatique à travers ces techniques passives, peut constituer une bonne solution à la problématique énergétique, capable de participer à l'amélioration du confort thermique intérieur du bâtiment sous un climat semi-aride. Cela grâce aux multiples avantages que présentent ces dernières ;

- Les paramètres climatiques les plus critiques, devraient être pris en considération par les concepteurs, dès la première ébauche, jusqu'à la maturation des plans d'exécution. D'abord en

prévoyant en hiver un choix judicieux de l'implantation, de l'orientation, de la forme du bâti et de ses prolongements vers l'extérieur, des matériaux et de la végétation plantée à proximité, ensuite, en été les surchauffes peuvent être chassés et limitées par une ventilation naturelle nocturne, et des protections solaires extérieures, qui neutralisent les rayons solaires indésirables afin d'éviter le réchauffement de l'environnement intérieur. En bref La concrétisation des principes d'architecture bioclimatique peut réduire énormément à la source les besoins pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage.

Vraisemblablement, le choix judicieux du matériau d'isolation thermique peut avoir un grand impact sur le confort thermique intérieur, selon ses caractéristiques thermo-physiques (conductivité thermique, résistance, chaleur spécifique, densité...etc.).

Ce qui nous suggère les hypothèses suivantes :

- 1- L'utilisation de l'isolation thermique par l'extérieur de l'enveloppe des édifices, offre les meilleures performances et constitue une stratégie à apprécier dans l'optimisation de la performance énergétique des bâtiments.
- 2- La réhabilitation énergétique des bâtiments existants contribue à augmenter leur performance énergétique et à réduire la consommation d'énergie en garantissant le confort de l'occupant.

3. Objectifs :

Afin de situer les problèmes de la surconsommation énergétique des bâtiments dits (énergivores), le cas d'étude choisi concerne une usine de production transformée à un service de logistique. Les travaux de réhabilitation réalisés, ont pour but de rendre la bâtisse fonctionnelle et durable.

L'objectif visé dans le cadre de ce travail est de vérifier et évaluer les résultats apportés suite au renforcement de la structure réhabilitée par un procédé d'isolation thermique plaqué à l'extérieur de la paroi du bâtiment, en étudiant son influence sur son besoin réel en matière d'énergie. Dans ce contexte notre travail exigera les objectifs suivants :

- Illustrer l'importance de l'utilisation des isolants thermiques soutenant les enveloppes des structures existantes ou nouvelles contre les différentes variations climatiques durant la période estivale et hivernale.
- Déterminer les meilleures solutions techniques ayant un apport tangible sur l'optimisation de la consommation énergétique.

4. Méthodologie et outils de recherche :

Sur le plan méthodologique, il faut déterminer les besoins énergétiques du bâtiment et évaluer l'effet de l'isolation thermique extérieure du bâtiment sur la réduction de la consommation de l'énergie.

C'est dans cette optique que vient s'inscrire le travail, mettant en relief l'étude de futur siège SRFE (Ex Comamo), le mémoire est structuré essentiellement en deux parties :

- Une première partie théorique qui consiste en une recherche bibliographique documentaire, dont l'objectif : pris connaissance de l'évolution de la politique énergétique dans le monde et en Algérie, et mis en évidence l'importance de l'isolation thermique dans la diminution de la consommation de l'énergie et l'amélioration du confort thermique.

-La deuxième partie, examine en un premier temps l'investigation in situ, qui expose les résultats d'une campagne de mesures en deux périodes, estivale et hivernale, pendant neuf jours. (les Paramètres mesurés sont les températures surfaciques des murs extérieurs, intérieurs, et toiture, température ambiante intérieure et humidité relative des espaces diagnostiqués).

- Et en deuxième temps, l'utilisation d'un logiciel de modélisation thermique dynamique « TRNSYS 16 » dans le but de valider les résultats in situ, puis de rechercher le type de l'isolant, l'épaisseur, et l'emplacement, qui offre la solution optimale de l'efficacité énergétique du bâtiment

5. Structure de la thèse :

Selon la méthodologie exposée, la recherche se composera de la problématique, du support théorique, de la partie analyse et de la conclusion. Le premier chapitre sur la performance thermique de l'isolation. Le deuxième chapitre du support théorique, exposera l'état de l'art autour de l'isolation par l'extérieur et son importance dans l'amélioration des conditions de confort intérieur du bâtiment. La partie pratique est constituée de trois chapitres. Chapitre III sur l'investigation avec la présentation du cas d'étude et la méthodologie de travail sur terrain. Le chapitre IV concernera l'interprétation des résultats de l'investigation. Le chapitre V fera l'objet de la simulation. Enfin la conclusion et des recommandations.

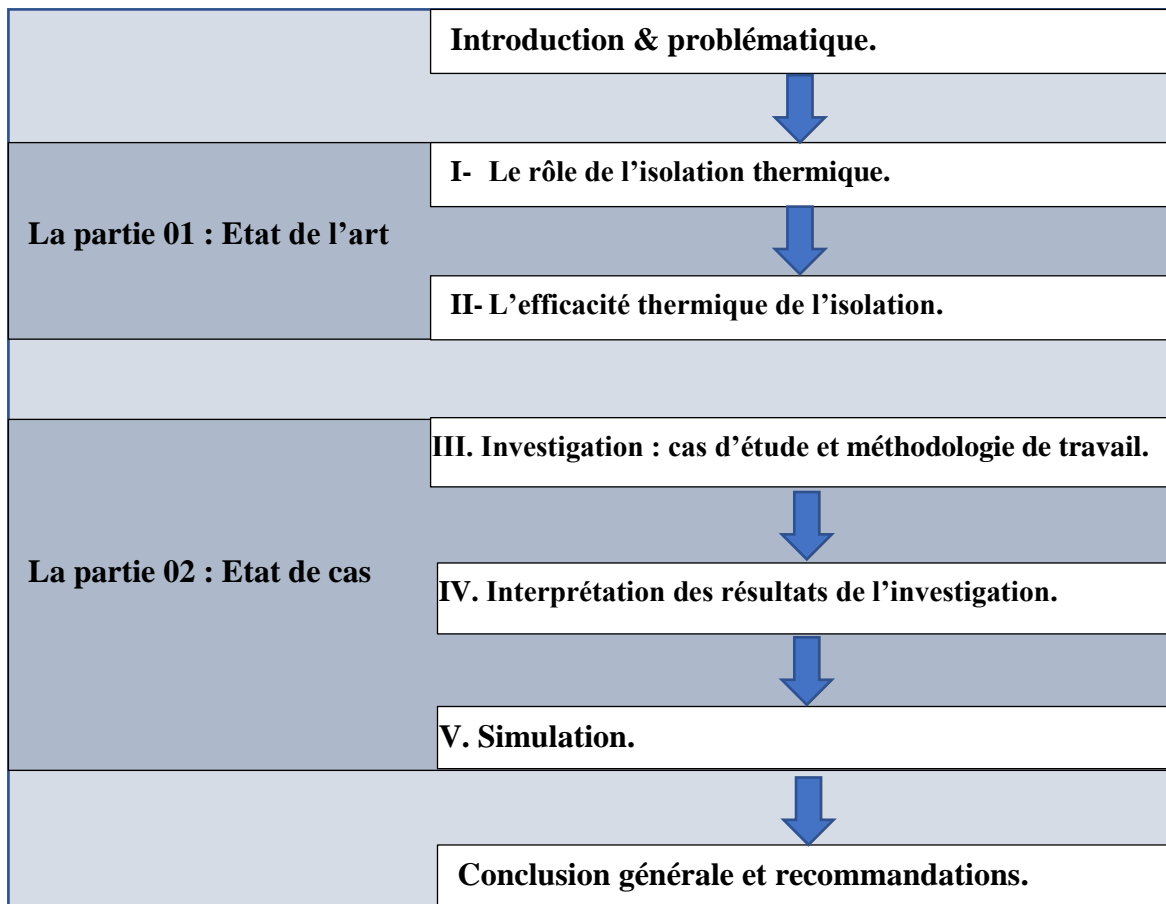


Figure.1- la structure du mémoire.

Introduction

L'intérêt principal est de fournir un aperçu sur les matériaux d'isolation conçus pour le secteur du bâtiment en prenant en compte les principaux produits commercialisés qui couvrent trois domaines : classique, alternative, et avancées. Chaque matériau est décrit en tenant compte de plusieurs caractéristiques, afin de donner une vision globale sur les différents produits.

I.1. Les raisons de l'isolation thermique des bâtiments : (Pourquoi isoler) ?

I.1.1. Isoler pour garantir le confort thermique été comme hiver

Le bien-être thermique dépend avant tout du confort thermique ressenti, c'est-à-dire l'absence de sensations physiques désagréables de chaud, de froid ou d'humidité. Les conditions climatiques d'une construction sont déterminées par la température, le taux d'humidité, les mouvements de l'air ambiant et la température des parois. Dans un bâtiment bien isolé, les variations de température extérieure ne sont pas perceptibles. Les matériaux utilisés, leur couleur, l'éclairage, l'environnement extérieur, ont également une place importante dans la sensation de bien-être thermique. Les paramètres du confort ne sont pas les mêmes que ce soit en été ou en hiver. Alors qu'en hiver, le moindre mouvement d'air, une humidité de l'air trop importante est source d'inconfort, en été au contraire, ces paramètres apportent du confort. (cf. figure.I.1)

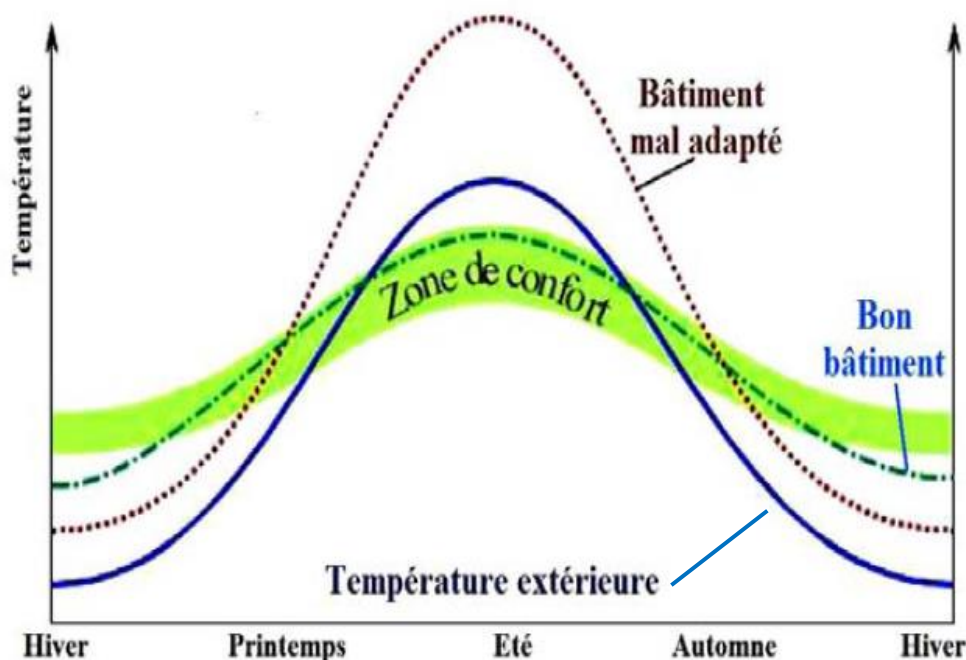


FIG.I. 1 : Evolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année
 . (Source : N. Morel et E. Gnansounou, 2008).

I.1.2. Rôle de l'isolation thermique

La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment est l'origine d'une partie substantielle des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, à cet égard, il y a une demande impérieuse concernant l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions. Par conséquent, des concepts tels que les maisons passives et les bâtiments à zéro émission sont mises en place afin de répondre aux exigences de l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Le bâtiment est soumis à des conditions climatiques extérieures variables dans le temps. Pour cette raison, l'ambiance intérieure doit être préservée à une certaine température pour assurer le confort des occupants. La normalisation de la température intérieure sollicite souvent l'introduction dans le volume habitable d'une certaine quantité d'énergie (chauffage en périodes hivernale et refroidissement en périodes estivale). Cette énergie aura prédisposition à s'enfuir par les murs et les jonctions par l'influence du gradient de température entre l'environnement intérieur et l'environnement extérieur ou celle des locaux non chauffés adjacents. Pour minimiser ces pertes et donc l'énergie dépensée, les parois doivent être isolées thermiquement.

L'isolation thermique des bâtiments joue un rôle prépondérant dans la politique de la réduction de la consommation énergétique. Pour améliorer la résistance thermique de l'isolant, de nouveaux matériaux et solutions avec de faibles valeurs de conductivité de chaleur sont mis au point, en plus actuellement l'utilisation des matériaux isolants traditionnels avec des épaisseurs croissantes dans les enveloppes de bâtiment, ne sont pas désirables pour plusieurs raisons, tel que le problème d'espace, la surface de plancher, les volumes de transport, les restrictions d'architecture et d'autres limitations.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de matériau d'isolation ou de solution unique capable de remplir toutes les exigences en ce qui concerne les propriétés les plus cruciales, autrement dit, pour les bâtiments d'aujourd'hui et de l'avenir proche, plusieurs matériaux et solutions d'isolation seront utilisés selon les normes recommandées qui définissent leurs spécifications techniques.

Pour qu'elle soit efficace, l'isolation thermique doit être la plus homogène possible autour du volume chauffé (ou refroidi), bien conçue et bien réalisée, elle permet de bien maîtriser les besoins en énergie devant être consacrés au chauffage ou au refroidissement, et par voie de conséquence, la facture qui en découle. Elle contribue efficacement à la lutte contre les changements climatiques par la limitation des émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, une

bonne isolation en période froide « réchauffe » les surfaces intérieures du bâtiment et participe à l'amélioration du confort des occupants par la réduction et l'élimination de l'effet de paroi froide.

I.1.3. Aperçu historique sur les réglementations de l'isolation thermique en Europe

Depuis le premier choc pétrolier en 1973, la réglementation thermique (souvent appelée « RT ») a pour objectif d'inciter les concepteurs à construire des bâtiments « économes » en énergie. En 1973, seule l'intention était là. À partir de 2012, les constructions économes commencent réellement à prendre part dans le secteur du bâtiment. Chaque étape d'évolution de cette réglementation, aussi critiquable soit-elle, a permis de faire un progrès significatif dans la consommation des bâtiments. La future réglementation se fixe a priori comme objectif de définir comme minimum indispensable une performance de type « bâtiment basse consommation » (BBC)¹. Il est important de comprendre que ce niveau BBC est un minimum à respecter et non un objectif à atteindre. Dit autrement, un niveau de consommation BBC sera dès 2010 ou 2012 le bas de gamme de la construction et les bons concepteurs d'aujourd'hui le considèrent déjà ainsi, (cf. figure.I.2)

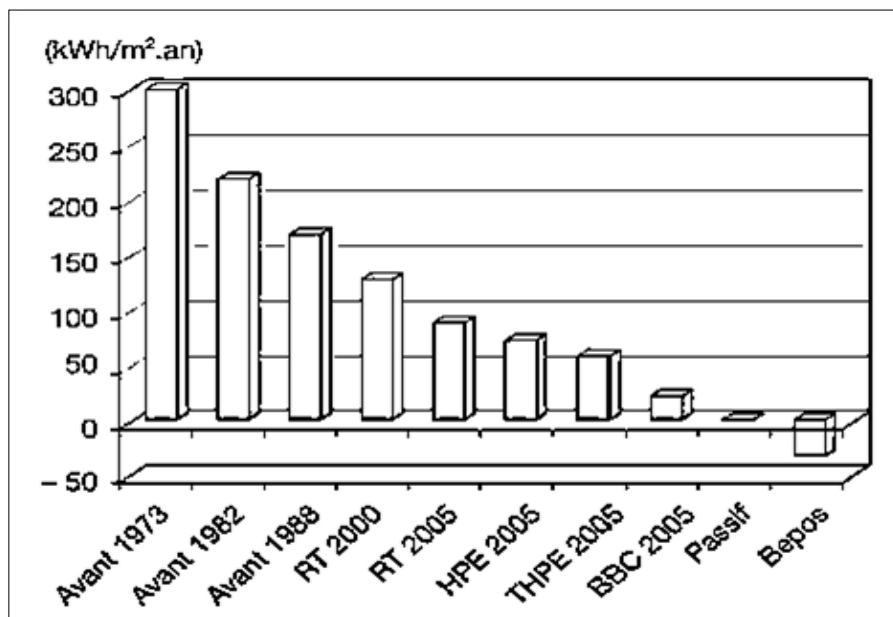


Fig-I-2. : Evolution de la réglementation thermique besoin en chauffage.
(Source : Armand Dutreix 2010).

¹Dutreix, A., *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*. 2010.

I.1.4. La réglementation thermique de 2012 (RT 2012)

La RT 2012 a pour objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de $50 \text{ kWh EP/m}^2\text{an}$ 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. La résistance thermique est la capacité d'un matériau pour s'opposer au flux de chaleur en présence d'un écart de température.

I.1.5. Le contexte réglementaire de l'isolation thermique en Algérie

L'Algérie, pays producteur d'énergie et disposant de réserves importantes en hydrocarbures n'a ressenti le besoin de réglementer l'utilisation de l'énergie que récemment. En août 1999, une loi relative à la maîtrise de l'énergie conduit l'intégralité des mesures et actions à mettre en œuvre en vue de l'utilisation rationnelle de l'énergie, et instaure le concept « *d'efficacité énergétique* ». Un décret exécutif portant sur la réglementation thermique des bâtiments neufs (Décret, 2000) accompagne cette loi. La loi relative à la maîtrise de l'énergie peut être considérée comme une plateforme juridique à la réglementation thermique en vigueur pour les bâtiments.

La réglementation thermique algérienne se présente sous forme de deux documents techniques règlementaires (DTR), le premier concerne les déperditions calorifiques en hiver, le second concerne les apports calorifiques d'été. Les bureaux d'études se trouvent confronté à la difficulté d'appliquer ces DTR. A cet effet un logiciel (RETA)² (cf. figure.I.3), est développé par l'équipe du CDER pour faciliter l'application de cette réglementation, L'objectif est de développer un code de calcul qui permet d'intégrer les exigences de la réglementation thermique algérienne (DTR C3-2 et C3-4) qui permet de vérifier la conformité d'un bâtiment aux exigences de la réglementation thermique algérienne, aussi l'élaboration d'un bilan thermique d'un bâtiment, qui permet d'avoir les déperditions thermiques d'hiver, les apports de chaleur d'été et de les comparer aux valeurs de référence.

Le document technique réglementaire (DTR) apporte une première réponse aux problèmes liés à la thermique du bâtiment, l'exigence réglementaire sur laquelle s'appuie ce DTR consiste à limiter les déperditions calorifiques des logements en fixant un seuil à ne pas dépasser (appelé

² (<http://reta.cder.dz>),., consulter le 16-01-2017. à 23h00.

dépense de référence). Le respect de ce seuil devrait permettre une économie de 20 à 30 %³ sur la consommation de chauffage des logements, mais pas au détriment du confort des utilisateurs. Dans la perspective de l'élaboration d'une future réglementation qui viserait une économie de l'ordre de 40 %⁴, de nouvelles valeurs de référence devront être fixées.

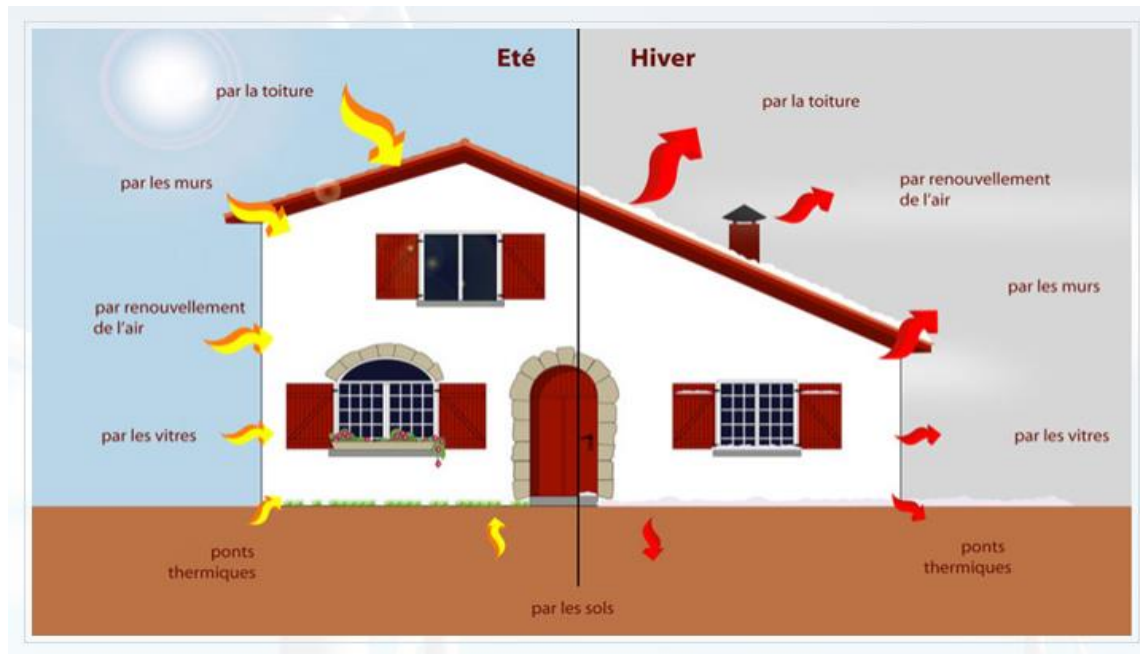


FIG-I-3. Interface de l'application qui permet le calcul des déperditions thermiques en hiver et des apports en été conformément aux DTR C3.2 et C 3.4. (Source cder,2015).

L'Algérie a adopté récemment un nouveau programme national d'efficacité énergétique. A horizon 2030, ce programme devrait permettre à l'Algérie d'économiser 63 millions de tonnes équivalent pétrole (Tep), représentant un gain financier de 42 milliards de dollars⁵. Ce programme, qui sera lancé en 2016, se déploie autour des secteurs de l'industrie, du transport et de l'habitat. Dans le secteur de bâtiment, le programme prévoit l'isolation thermique de 100.000 logements annuellement, avec un engagement financier de l'état qui prendra en charge 80% des surcoûts liés à cette opération.

Depuis plusieurs années, l'Algérie conduit une perspective d'évolution de la gestion des ressources énergétiques. Cette politique se décline à travers la loi n°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie et de ses textes d'application en l'occurrence le décret exécutif n°2000- 90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs. La

³ Document Technique Réglementaire (D.T.R. C 3-2).

⁴ **Sidi Mohamed Karim El Hassar et al**, Réglementation thermique algérienne des bâtiments Contribution à la définition de nouveaux coefficients réglementaires.

⁵ <http://portail.cder.dz.15-01-2017> à 5h00.

concrétisation de cette réglementation thermique devait aboutir inéluctablement à l'isolation thermique des bâtiments neufs. Néanmoins, à l'instant présent cette réglementation n'est toujours pas entrée en vigueur, par l'influence en revanche de l'inexistence d'organisme devant vérifier son application, cependant également en raison de l'absence d'outils opérationnels permettant aux bureaux d'études en architecture d'intégrer les exigences de cette réglementation dans la conception des bâtiments.

La mise en place d'une réglementation thermique et énergétique des bâtiments neufs et anciens, ainsi que les mécanismes de contrôle devient conséquemment une obligation étant donné les perspectives énergétiques futures du pays et les enjeux qui sont en premier lieu économiques, et ce pour réduire la consommation énergétique, diminuer les émissions de gaz à effet de serre et garantir le confort intérieur des occupants des bâtiments.

I.2. Types et qualités des produits d'isolation thermique

Un bon isolant, pour être performant, doit avoir les caractéristiques suivantes : une forte densité (mini 40 kg/m³), une faible conductivité thermique, un bon comportement au feu, une forte imputrescibilité, et une perméabilité à la vapeur d'eau. La qualité d'un isolant se mesure également à ses performances écologiques, c'est-à-dire son impact sur l'environnement et la santé. Tous les isolants participent théoriquement à la préservation de l'environnement puisqu'ils permettent des économies d'énergie, ce qui réduit le recours aux énergies non renouvelables. Mais d'autres caractéristiques sont à prendre en compte. Donc l'intérêt s'impose à la pérennité de la ressource (renouvelable ou non), à la quantité nécessaire d'énergie pour la fabrication du matériau (énergie grise), aux pollutions induites (émissions de gaz à effet de serre ou toxiques lors de la fabrication et du transport), à la recyclabilité du matériau et à sa toxicité (lors de la mise en œuvre et pour les occupants).

Les produits isolants sont destinés à réduire le passage de la chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. Le principe est le même pour quasiment tous les produits : réduire les transferts par conduction, par convection et par rayonnement. Pour ce faire il faut utiliser des matériaux de faible conductivité thermique d'une manière à créer de multiples petites cavités ou bulles d'air ou de gaz qui limitent les échanges par convection. Il faut également intégrer à certains produits des couches ou des revêtements qui limitent les échanges thermiques par rayonnement dans les cavités d'air ou de gaz. Il en résulte des produits isolants ayant une conductivité thermique comprise entre 0,023 et 0,05 W/(m.K).

Les produits isolants courants peuvent être regroupés en cinq grandes familles :

- les isolants d'origine minérale comme la laine de verre ou de roche, la perlite expansée ou le verre cellulaire ;
- les isolants d'origine organique comme le polystyrène (expansé ou extrudé), le polyuréthane et la mousse phénolique ;
- les isolants d'origine végétale ou animale comme l'ouate de cellulose, la fibre et la laine de bois, la laine de chanvre, la paille, la laine de mouton et les plumes de canard ;
- les produits réfléchissants qui comportent des couches à basse émissivité leur permettant de réduire les échanges thermiques par rayonnement dans les lames d'air adjacentes comme les produits multicouches et les produits à bulles ;(cf. figure.I.4)
- les isolants porteurs qui permettent de réaliser des parois porteuses et isolantes avec le même matériau comme par exemple le béton cellulaire, les briques de terre cuite multi alvéolaires de forte épaisseur et la pierre ponce. Le marché des produits isolants est essentiellement partagé par les deux premières grandes familles (laines minérales et plastiques alvéolaires). Les autres produits représentent à peu près 2 % ⁶du volume total.

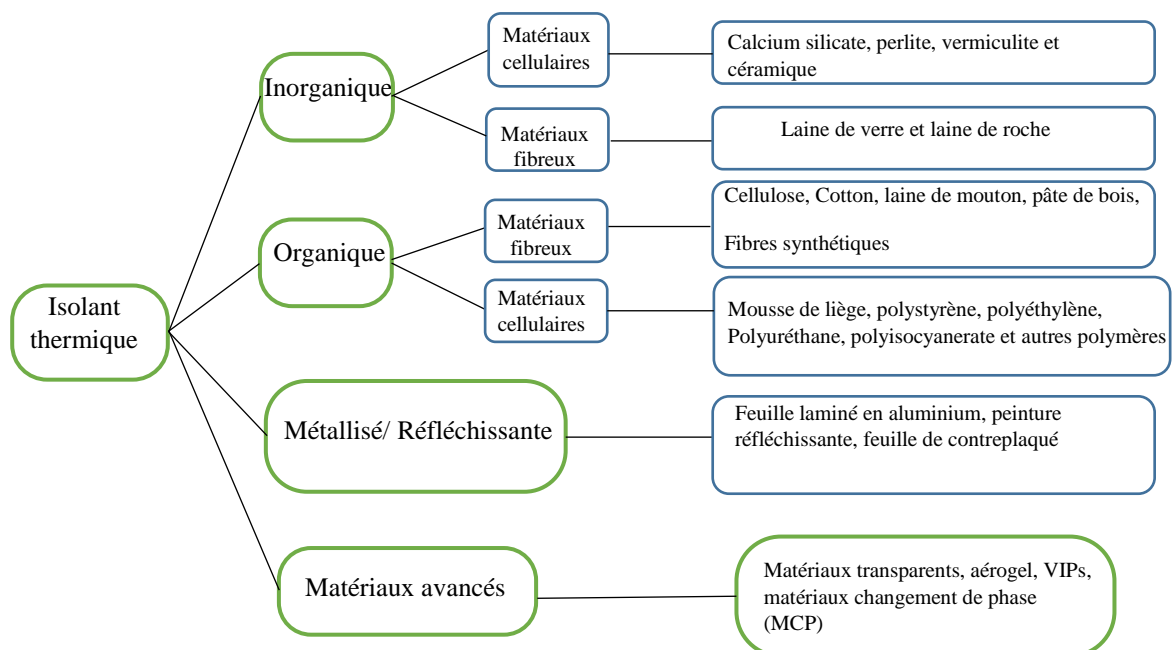


Fig-I.-4. : Organigramme schématisant les grandes familles de l'isolant thermique,
(Source : CSTB, 2013) réadapté par auteur.

⁶ Delaire, Aurélie, Bouchié, Rémi, Cormier, Benoit Performance énergétique : les matériaux et procédés d'isolation : Choix et mise en œuvre des matériaux et des procédés - Performances et références réglementaires

I.2.1. Isolations conventionnelles

Les matériaux d'isolation traditionnels les plus courants d'aujourd'hui sont décrits brièvement ci-dessous. Ces matériaux ont une conductivité thermique relativement faible. Des conductivités thermiques des matériaux d'isolation traditionnels peuvent être envisagées également par l'application de technologies nano-basées ; Par exemple en fabriquant des matériaux poreux dont les pores ou les vides sont dans la gamme des nanomètres. À ce jour, la majeure partie du volume de pores ou de vide dans les matériaux d'isolation traditionnels est constituée de pores ou de vides du millimètre à la gamme nano.

I.2.1.1. La laine minérale

La laine minérale couvre la laine de verre (fibre de verre) et la laine de roche, qui est normalement produite sous forme de nattes et de planches, mais parfois aussi comme matériau de remplissage. Les produits légers et doux de laine minérale sont appliqués dans des maisons de charpente et d'autres structures avec des cavités. On utilise des panneaux de laine minérale plus lourds et plus durs avec des densités de masse élevées lorsque l'isolation thermique est destinée à supporter des charges, comme sur les planchers ou les toits.

La laine minérale peut également être utilisée comme matériau de remplissage pour remplir diverses cavités et espaces. La laine de verre est fabriquée à partir de verre borosilicaté à une température d'environ 1400 ° C, La masse est tirée à travers des buses tournantes, créant ainsi des fibres.

La laine de roche est produite à partir de la fonte (diabase, dolérite) à environ 1500 ° C, où la masse chauffée est lancée à partir d'une roue ou un disque, créant ainsi des fibres. Dans la laine de verre et la laine de roche, l'huile de réduction de la poussière et la résine phénolique sont ajoutées pour lier les fibres ensemble et améliorer les propriétés du produit. Les valeurs de conductivité thermique typiques pour la laine minérale sont comprises entre 30 et 40 mW / (mK). La conductivité thermique de la laine minérale varie avec la température, la teneur en humidité et la densité de masse. A titre d'exemple, la conductivité thermique de la laine minérale peut augmenter de 37 à 55 mW / (mK) avec une teneur en humidité croissante de 0 à 10% en volume, respectivement. Les produits de laine minérale peuvent être perforés, ainsi que coupés et ajustés sur le chantier, sans perte de résistance thermique. (cf. figure.I.5).



Fig.I-5. : De gauche à droite, laine de verre, laine de roche, et cellulose
(Source : Benjeddou, O et al 2016).

I.2.1.2. Le polystyrène expansé (EPS)

Le polystyrène expansé (EPS) est fabriqué à partir de petites sphères de polystyrène (de pétrole brut) contenant un agent d'expansion, le pentane C₆H₁₂, qui se dilatent par chauffage avec de la vapeur d'eau. Les sphères en expansion sont liées ensemble au niveau de leurs zones de contact. Le matériau isolant est coulé en planches ou en continu sur une ligne de production. EPS a une structure de pore partiellement ouverte. Les valeurs de conductivité thermique typiques sont de 30 à 40 mW/(mK), elle varie avec la température, la teneur en humidité et masse volumique, qui peut être augmenté de 36 mW/(mK) à 54 mW/(mK) avec l'augmentation de la teneur en humidité de 0 % en volume à 10 %, respectivement, et peut être perforés, également coupé et ajusté sur le site de construction, sans aucune perte de résistance thermique.

I.2.1.3. Le polystyrène extrudé (XPS)

Polystyrène extrudé (XPS) est fabriqué à partir de polystyrène fondu (du pétrole brut) en ajoutant un gaz d'expansion, le HFC, du CO₂ ou C₆H₁₂, en conséquence la masse volumique est extrudée à travers une buse de détente de pression provoquant son développement. Le matériau d'isolation est produit en longueurs continues qui sont coupées après refroidissement. XPS a une structure à pores fermés, ces valeurs de conductivité thermique typiques sont comprises entre 30 et 40 mW/(mK), et varie avec la température, la teneur en humidité et masse volumique qui peut être amplifié de 34 MW/(mK) à 44 MW/(mK) avec l'augmentation de la teneur en humidité de 0 % en volume à 10 % en volume, respectivement, et peut être perforés, couper et ajusté également sur le site, sans aucune perte de résistance thermique. .(cf. figure.I.7)

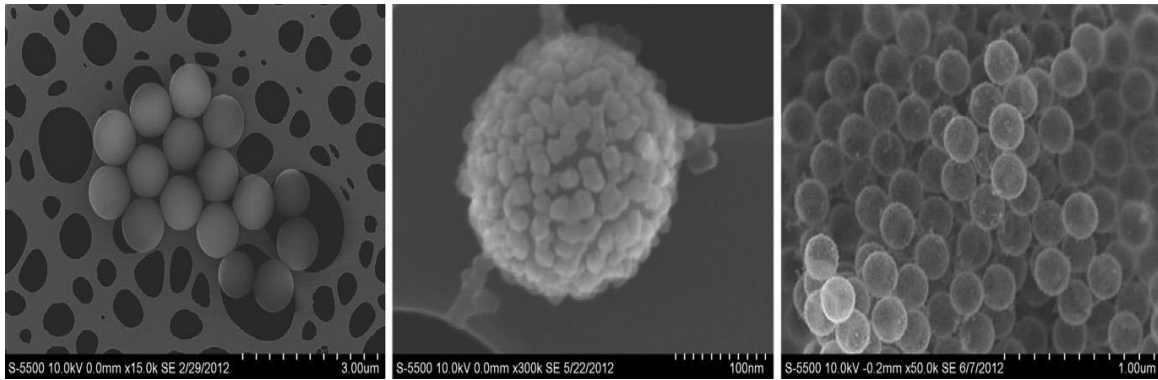


Fig-I-7. Image de microscopie électronique à balayage de matrices de polystyrène sphérique (PS) (gauche), de petites particules de silice (médianes) revêtues autour d'un gabarit de PS sphérique et de nanosphères creuses de silice (à droite) après élimination de PS. (Source :Jelle et al., 2014a, b).

I.2.1.4. Cellulose

Cellulose (polysaccharide $[C_6H_{10}O_5]_n$) comprend une isolation thermique fabriquée à partir de papier recyclé ou de fibres de bois. Le procédé de fabrication fournit au matériau d'isolation une consistance pratiquement similaire à celui de la laine. Acide borique (H_3BO_3) et borax (borate de sodium, $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ou $Na_2 [B_4O_5 [OH]_4] \cdot 8H_2O$) sont ajoutés pour améliorer les propriétés du produit. L'isolant cellulosique est utilisé en tant que matériau de remplissage pour couvrir les cavités et les espaces différents, par les isolants en panneaux de cellulose et les nattes. Les valeurs de conductivité thermique typiques pour l'isolation de cellulose sont comprises entre 40 à 50 mW/(mK), elle varie avec la température, la teneur en humidité et masse volumique, qui peut être aussi augmenter de 40 mW/(mK) à 66 MW/(mK) avec l'augmentation respective de la teneur en humidité de 0 % à 5 %, en volume. Ces types de produits d'isolation peuvent être perforés, coupés et ajustés sur site, sans aucune influence sur la résistance thermique.

I.2.1.5. Liège

L'isolation thermique en liège est d'abord fabriquée à partir du chêne-liège, produite à la fois de matériau de remplissage ou de planches. Les valeurs de conductivité thermique typique de liège sont comprises entre 40 et 50 mW / (mK). Les produits d'isolation en liège peuvent être perforés, coupés et ajustée sur le site, sans aucune perte sur la résistance thermique.

I.2.1.6. 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 CO_2 ou C_6H_{12} . 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/(mK), considérablement plus faible que la laine, le polystyrène et la cellulose, et les produits minéraux.

La conductivité thermique du PUR varie avec la température, la teneur en humidité et la masse volumique peut être augmenté de 25 mW/(mK) à 46 MW/(mK) avec l'augmentation respective de la teneur en humidité de 0 % en volume à 10 % en volume, et peut être perforés, coupé et ajusté sur site, sans aucune perte sur la résistance thermique. Il convient de noter que, même si PUR est considérée en sécurité dans son utilisation, les préoccupations et les risques graves pour la santé en cas d'incendie lors de la combustion du cyanure qui dégagent d'hydrogène (HCN) et les isocyanates, sont très asphyxiant. La toxicité de HCN résulte de l'anion cyanure, entrave la respiration cellulaire, ces cyanures d'hydrogène peuvent être trouvés dans la fumée de l'azote (N) contenant des matières plastiques. (cf. figure.I.8).



Fig-I-8 : De gauche à droite, polystyrène EPS, polystyrène XPS, liège, et polyuréthane.
(Source : Thiery Gallauzuax 2015).

Le polyuréthane est l'un des isolants thermiques performants, qui offre des capacités thermiques exceptionnelles. Son coefficient de conductivité thermique se situe en effet entre 0,022 à 0,030 W/m.K. Concrètement, 12 cm de de cet isolant est équivalent à 25 cm de liège, 20 cm, de polystyrène expansé et 17 cm de laine minérale. Tandis que l'isolant en panneau sous vide (VIP) nouvelle génération, est le plus performants qui a pour une épaisseur de 2cm et conductivité entre 0,0042 et 0,0050 W/m.K. équivalence de 12cm en polyuréthane. Donc Les performances des isolants thermiques sont indiquées par la conductivité, λ (lambda). Plus le lambda est petit, plus le matériau est mince et isolant. Il y a une relation de corrélation directe entre la conductivité de l'isolation et son épaisseur. (cf.fig.I.9 et fig.I.10).

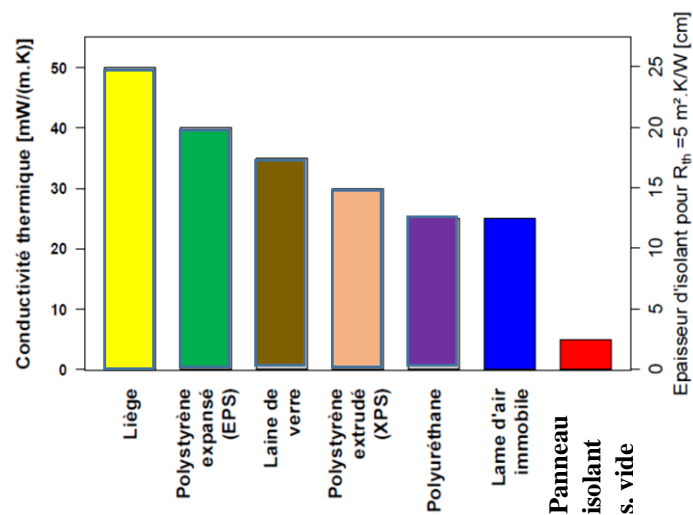


Fig-I-9 : Performance thermique des isolants thermiques : conductivité thermique et épaisseur nécessaire pour une résistance thermique $R_{th} = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ **RT 2012**

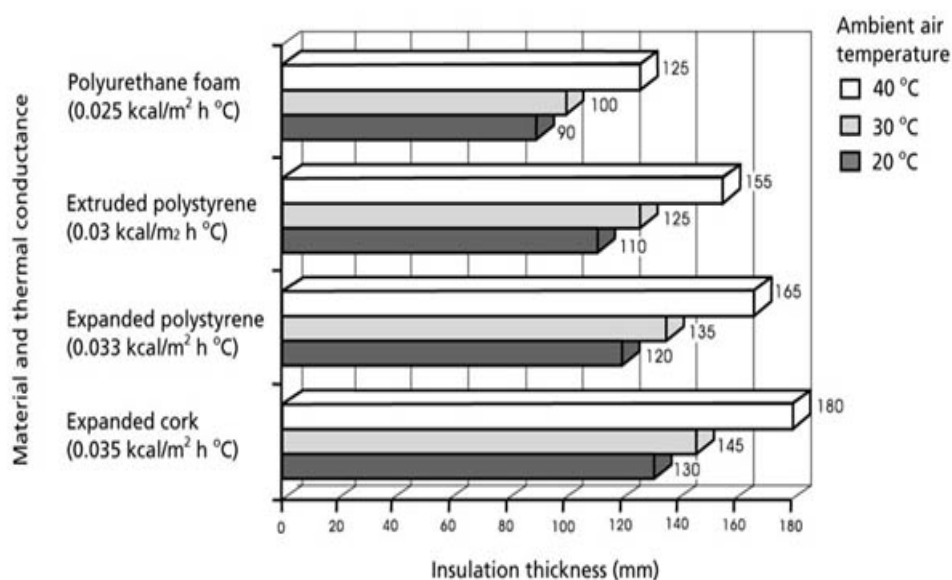


Fig-I-10: Comparaison de l'épaisseur d'isolation typique fonctionnant à des températures moyennes de l'air ambiant de 20 °C, 30 °C et 40 °C, épaisseur arrondie au plus proche de 5 mm .
(Source Michael Shawyer 2014).

I.2.2. Isolations naturelles et écologiques « vertes »

I.2.2.1. Les isolants naturels

Les isolants naturels ont souvent un impact moindre sur l'environnement et la santé. Ils demandent aussi moins d'énergie pour leur fabrication, dits « naturels » par la raison que ces produits sont d'origine végétale ou animale tels que le chanvre, la laine de mouton, les fibres de bois, les plumes d'oie, le lin, coco, le liège, la laine de coton. Leur présentation est classique en vrac, en panneaux semi-rigides et en rouleaux. Leur mise en œuvre est aussi aisée que les laines minérales. Ils sont très appréciés des poseurs, car ils ne provoquent pas les irritations

connues avec d'autres matériaux. En termes de performances thermiques, ils s'inscrivent dans la moyenne basse des laines minérales. Leur nature fibreuse doit amener à des résultats comparables aux laines minérales.

- Panneaux de bois feutré : 0,040 à 0,070. W/m.K ;
- Liège, laines minérales et laines naturelles : 0,035 à 0,040. W/m.K ;
- Polystyrène expansé : 0,030 à 0,038. W/m.K ;
- Mousse de polyuréthane : 0,025 à 0,035. W/m.K.

Le PSE (Polystyrène expansé) n'est pas un isolant naturel, mais issu d'une revalorisation d'un dérivé du pétrole non utilisable comme combustible. L'air immobile est un excellent isolant thermique.

I.2.2.2. Les isolants écologiques

Les isolants écologiques sont nombreux mais beaucoup moins utilisés que leurs homologues conventionnels. Malgré l'embellie actuelle pour les produits naturels et écologiques, ils souffrent encore d'un manque de reconnaissance institutionnelle. Parmi les isolants écologiques, il y a la grande famille des isolants végétaux.

Ces matériaux sont appelés écologiques, vu que leur confection nécessite peu d'énergie, les matières premières sont aisément renouvelables et ils peuvent être recyclés ou resservis. Parmi ce type d'isolant on trouve la perlite (ou vermiculite ou pierre ponce), la fibre de coco, le chanvre, le liège, la ouate de cellulose, la fibre de bois et le coton, roseaux, sans oublier les isolants végétaux non commercialisés comme les copeaux et autres sous-produits des industries du bois, ainsi que les pailles diverses et autres résidus de récoltes. Aussi, dans la catégorie modeste des isolants d'origine animale, la laine de mouton qui suscite un intérêt grandissant. (cf.figure.I.11).

Cette catégorie d'isolation est assez performante thermiquement, plus performante du point de vue de la respirabilité, les critiques portées sur les matériaux écologiques se réalisent surtout



Fig.I.11: De gauche à droite, laine de mouton, liège et fibre de coco, ouate de cellulose, et chanvre. (Source : Thierry Gallauzuax 2015).

I.2.3. Isolations à Hautes performance thermique (super-isolation)

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 pore⁷, 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 $25 \text{ mW}\cdot\text{m}^1\cdot\text{K}^{-1}$ ⁸ à pression atmosphérique

I.2.3.1. Panneaux isolants sous vide (VIP)

Les panneaux isolants au vide (VIP) sont constitués d'un noyau poreux ouvert de silice fumée enveloppé de plusieurs couches stratifiées de polymères métallisées (voir figures 12 et 13). Les VIP représentent l'isolation thermique à l'état actuel de la technique avec des conductivités thermiques de centre-panneau allant de 2 à 4 mW / (mK) dans un état vierge non vieilli à typiquement 8 mW / (mK) après 25 Vieillissement dû à la vapeur d'eau et à la diffusion d'air à travers l'enveloppe VIP et dans le coeur du matériau VIP, qui a une structure de pores ouverts. Selon le type d'enveloppe VIP, la conductivité thermique âgée après 50 et 100 ans sera quelque peu ou sensiblement plus élevée que cette valeur (voir par exemple la figure 14). Cette augmentation inévitable de la conductivité thermique représente un inconvénient majeur pour tous les VIP. La perforation de l'enveloppe VIP, qui pourrait être causée par des clous et similaire, provoque une augmentation de la conductivité thermique du centre du panneau à environ 20 mW / (mK)⁹. En conséquence, les VIP ne peuvent pas être coupés pour être ajustés sur le chantier ou perforés sans perdre une grande partie de leurs performances d'isolation thermique. Cela représente un autre inconvénient majeur des VIP. (cf.figure.I.12-12-14).

⁷ Kalnæs, S.E. and B.P. Jelle, *Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways*. Applied Energy, 2014. **116**: p. 355-375.

⁸ Règlementation thermique, 2005.

⁹ Li, H., Chen, H., Li, X., Duan, W., 2015. Degradation of VIP barrier envelopes exposed to alkaline solution at different temperatures. Energy and Buildings 93, 208e216.

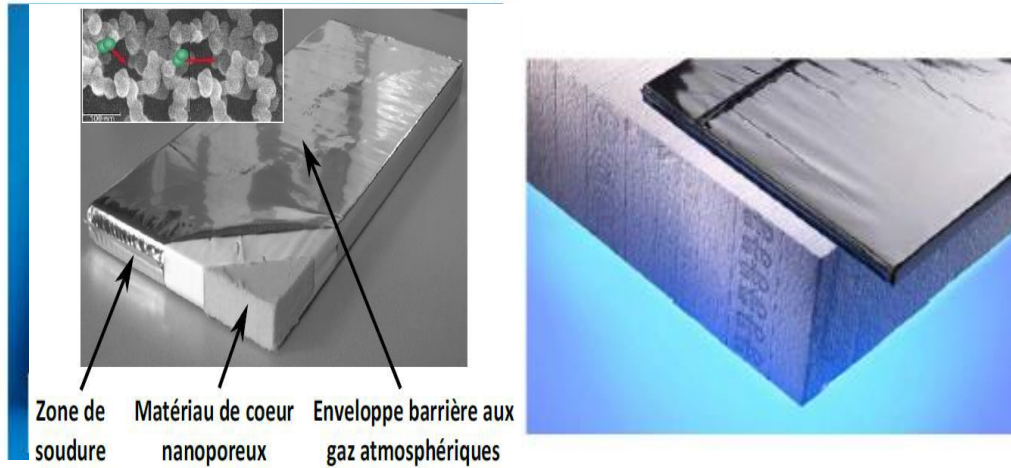


Fig.I.12 : (Gauche) structure VIP typique montrant les principaux composants et (à droite) une comparaison de l'épaisseur de résistance thermique équivalente de l'isolation thermique traditionnelle et VIP. (Source : réadapter par auteur).

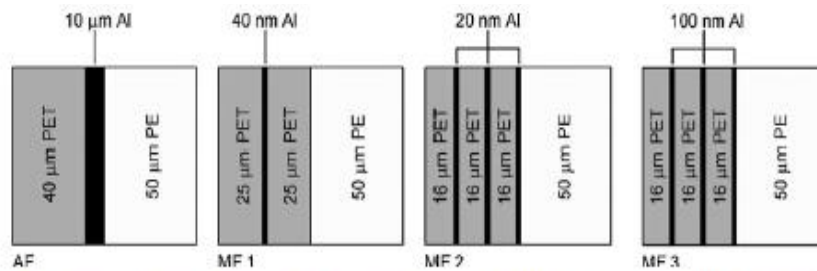


Fig.I.13 : Coupe transversale de matériaux d'enveloppe typiques pour VIP: (a) film métallique, (b) film métallisé monocouche et (c et d) films métallisés à trois couches. Les quatre types de feuille sont communément appelés (a) AF, (b) MF1, (c) MF2 et (d) MF3. (Source : Wegger et al. 2011).

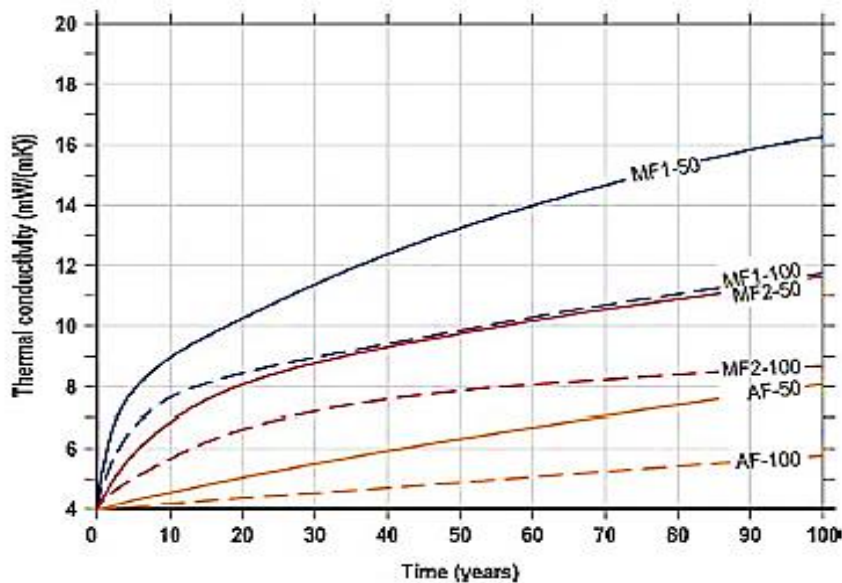


Fig.I.14 : Conductivité thermique du centre du panneau pour VIPs avec un noyau de silice fumée en fonction du temps écoulé temps. Pour deux tailles différentes de panneau 50cm x 50cm x 1 Cm et 100 cm x 100 cm x 2 cm, et pour trois Les types AF, MF1 et MF2.(Source :Baetenset al., 2010a).

Plusieurs auteurs ont étudié divers aspects des VIP, allant des modèles analytiques, des ponts thermiques et de la conductivité, de la pénétration de l'air et de l'humidité, du vieillissement et de la durée de vie, du contrôle de qualité et de l'intégration des VIP dans la construction de bâtiments (voir, par exemple, Alam et al. (2011), Alotaibi and Riffat (2014), Beck, Brunner et al. (2014), Li et al. (2015), Mandilaras et al. (2014), Miesbauer et al. OÙ, entre autres, des études exhaustives sur les VIP pour les applications de construction ont été réalisées par Ten Pierik (2009), Baetens et al. (2010a) et Kalnæs et Jelle (2014).

I.2.3.2. Panneaux remplis de gaz (GFP)

Les panneaux remplis de gaz (GFP) sont constitués d'un gaz entre les couches réfléchissantes scellées dans une enveloppe de barrière à faible émissivité. Les couches réfléchissantes à l'intérieur d'une GFP est appelée déflecteur. La figure 15 ; montre la section transversale d'une GFP normale. Le gaz à l'intérieur de l'âme peut être de l'air ou d'autres gaz plus lourds qui réduisent encore la conductivité thermique. Des valeurs théoriques de $0,020 \text{ W} / (\text{mK})$ et de $0,012 \text{ W} / (\text{mK})$ pour les panneaux remplis d'argon et de krypton. Cependant, les prototypes de GFP ont donné une conductivité thermique de $0,040 \text{ W} / (\text{mK})$ ¹⁰ pour les panneaux remplis d'argon dans l'utilisation pratique dans une construction de bâtiment. Comme une technologie avec la même fragilité et le manque de flexibilité que VIPs, mais toujours montrant une plus grande conductivité thermique, l'avenir des GFPs est discutable. (cf.figure.I.15).

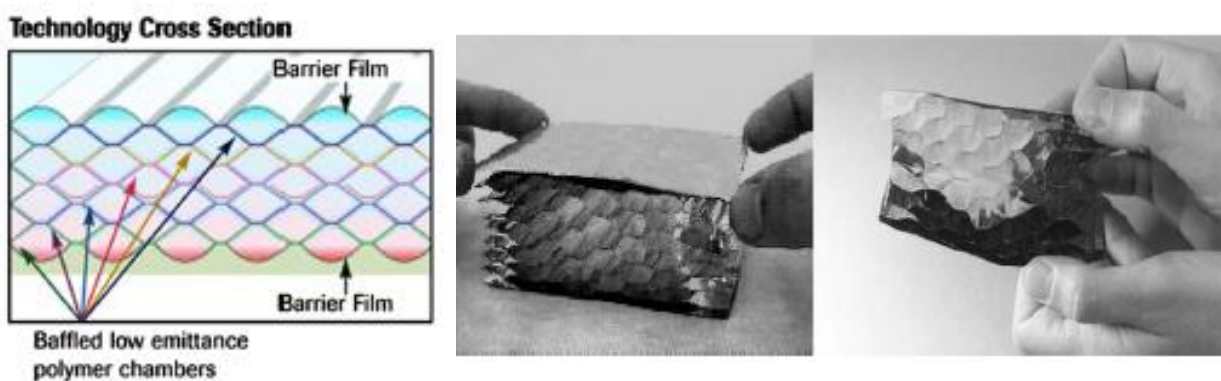


Fig.15 : Vue sur la feuille de protection et la structure de déflecteur à l'intérieur d'un panneau isolant rempli de gaz. Source : LBNL, 2015.

¹⁰ LBNL, 2015. Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://eetd.lbl.gov/newsletter/nl20/eetd-nl20-tt.html> (consulté le 15.11.2016).

I.2.3.3. Aérogels

Promettant avec le plus grand potentiel de tous en ce moment. Études des aérogels ont été conduites par Aegerter et al. (2011), Baetens et al. (2011), Cuce et al. (2014), Dowson et al. (2012), Gao et al. (2014c, d), Hostler et al. (2008), Ihara et al. (2015a, b, c), Jelle et al. (2015d), Koebel et al. (2012), Lee et al. (1995a, b), Levy et Zayat (2015), Schultz et al. (2005), Schultz et Jensen (2008), Smith et al. (1998), Stahl et al. (2012), Wong et al. (2014) et Zhao et al. (2012), entre autres. En utilisant du noir de carbone pour supprimer le transfert radiatif, des conductivités thermiques aussi faibles que $4 \text{ mW} / (\text{mK})$ peuvent être atteintes à une pression de 50 mbar ¹¹. Cependant, on a signalé que les aérogels à la fine pointe du commerce ont des conductivités thermiques comprises entre 13 et $14 \text{ mW} / (\text{mK})$ à la pression ambiante (Aspen Aerogels, 2008a, b). Les coûts de production des aérogels sont encore très élevés. Les aérogels ont une résistance à la compression relativement élevée, mais sont très fragiles du fait de leur très faible résistance à la traction voir la composition des pores et des agrégats sur la figure 17. La résistance à la traction peut être augmentée par incorporation d'une matrice de fibres de carbone. Un aspect très intéressant avec les aérogels est qu'ils peuvent être produits sous la forme de matériaux opaques, translucides ou transparents, permettant ainsi une large gamme d'applications de construction possibles. Des aérogels transparents sont représentés sur la (cf. figure. I.16). Pour que les aérogels deviennent un matériau isolant thermique répandu pour les applications opaques, les coûts doivent être considérablement réduits¹².

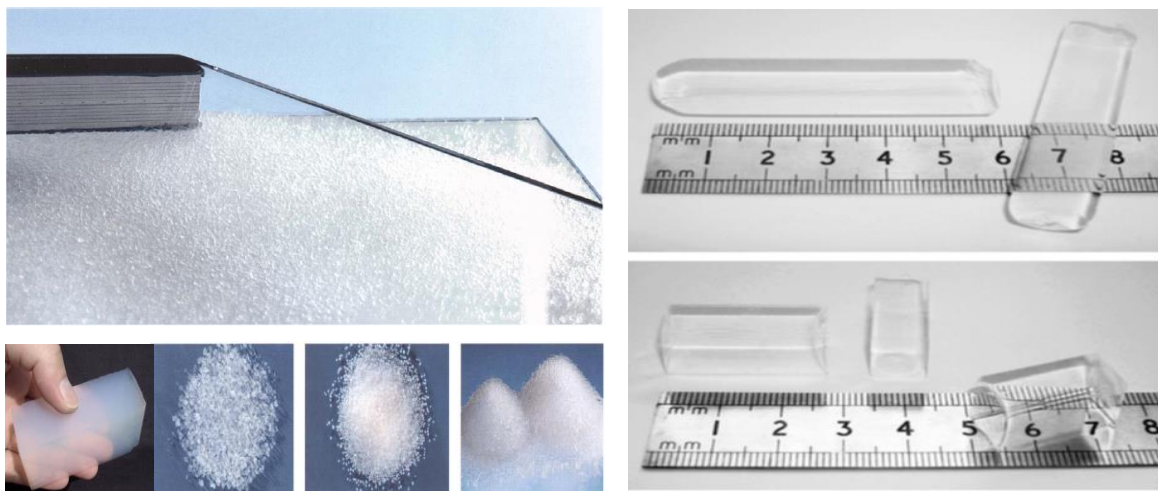


Fig.16 : Gauche. Aérogels en combinaison avec des perles de verre opaques nano gel. Granulé nano gel translucide. Des tas d'aérogel. Et à droite Échantillons transparents d'aérogel réalisés par séchage supercritique à haute température (haut) et séchage supercritique à basse température (bas)
(Source :Dowson et al., 2012).

¹¹ Dowson, M., Grogan, M., Birks, T., Harrison, D., Craig, S., 2012. Streamlined life cycle assessment (LCA) of transparent silica aerogel made by supercritical drying. *Applied Energy* 97, 396e404

¹² Fernando Pacheco et al. *The Smart Eco-Efficient Built Environment*, 2016 Elsevier Ltd, p 139.

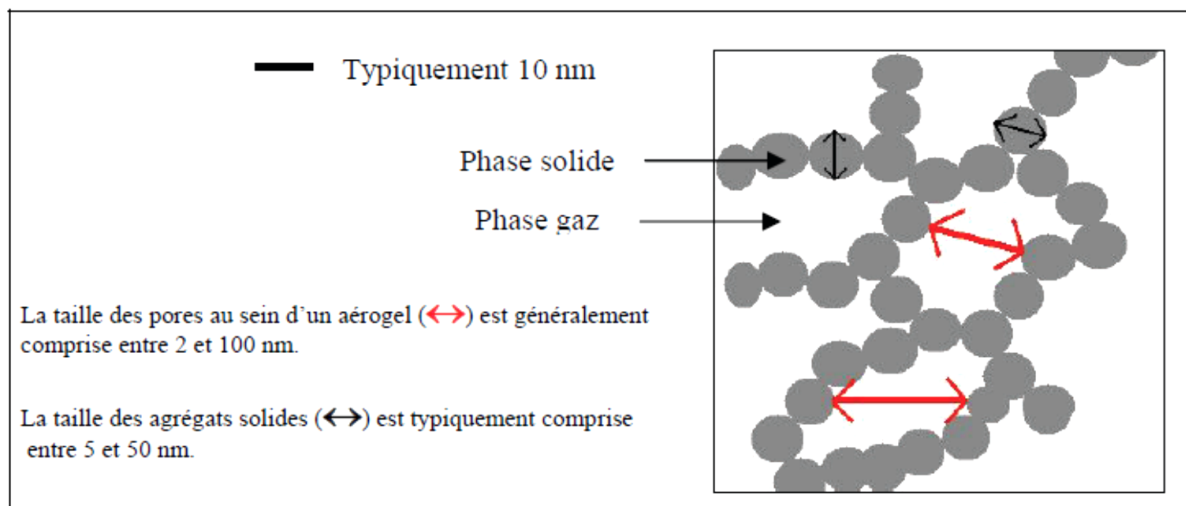


Fig.I.17 : Schématisation de la structure interne d'un aérogel. (Source : Dounia Ben Dahou 2016).

I.2.3.4. Matériaux à changement de phase (PCM)

Un bon exemple qui illustre la capacité thermique élevée des accumulateurs de chaleur latente est un glaçon qui commence à changer à son état liquide à 0°C . L'état liquide commence également à 0°C mais l'énergie requise pour ce changement d'état est équivalente à celle requise pour chauffer l'eau liquide de 0°C à 80°C ¹³. Ce tampon thermique "caché", ou le stockage thermique latent, est en conséquence important et ce principe peut être utilisé pour l'isolation de bâtiments utilisant PCM. Le mot « latent » peut être considéré comme signifiant « caché » - il existe mais n'est pas évident.

Les matériaux à changement de phase (PCM) ne sont pas vraiment des matériaux isolants thermiques, mais comme ils font partie de l'enveloppe du bâtiment thermique et sont donc intéressants pour les applications de construction thermique, ils sont mentionnés dans ce contexte. Les PCMs changent de phase d'état solide en liquide lorsqu'ils sont chauffés, absorbant ainsi l'énergie dans le processus endothermique. Lorsque la température ambiante chute de nouveau, les PCMs liquides se transforment à nouveau en matériaux à l'état solide, tout en dégageant la chaleur absorbée antérieurement dans la paroi exothermique (LBNL, 2015).

L'isolation thermique à base de nanomatériaux pour les bâtiments économes en énergie, un tel cycle de changement de phase stabilise la température intérieure du bâtiment et diminue les charges de chauffage et de refroidissement. Différentes paraffines sont typiquement des

¹³ Kalnæs, S.E., Jelle, B.P., 2015. Phase change materials and products for building applications : a state-of-the-art review and future research opportunities. Energy and Buildings 94, 150e176.

exemples de PCM, mais avec une faible conductivité thermique (Farid et al., 2004) et un grand changement de volume pendant la transition de phase (Hasnain, 1998) limitent leur application de construction. Un aperçu des principaux PCM a été donné par Demirbas (2006), alors que d'autres examens sur PCM peuvent être trouvés dans les travaux de Baetens et al. (2010b), Farid et al. (2004), Hasnain (1998), Kalnæs et Jelle (2015) et Khudhair et Farid (2004). Une plage de température de changement de phase appropriée, en fonction des conditions climatiques et des températures de confort souhaitées, ainsi qu'une capacité à absorber et à libérer de grandes quantités de chaleur, sont des propriétés importantes pour le choix d'un PCM spécifique pour des applications de construction. Les enthalpies de fusion correspondantes et les températures de fusion sont représentées pour différents groupes de PCM dans l'ouvrage de Dieckmann (2006). Voir (Fig-I-18).

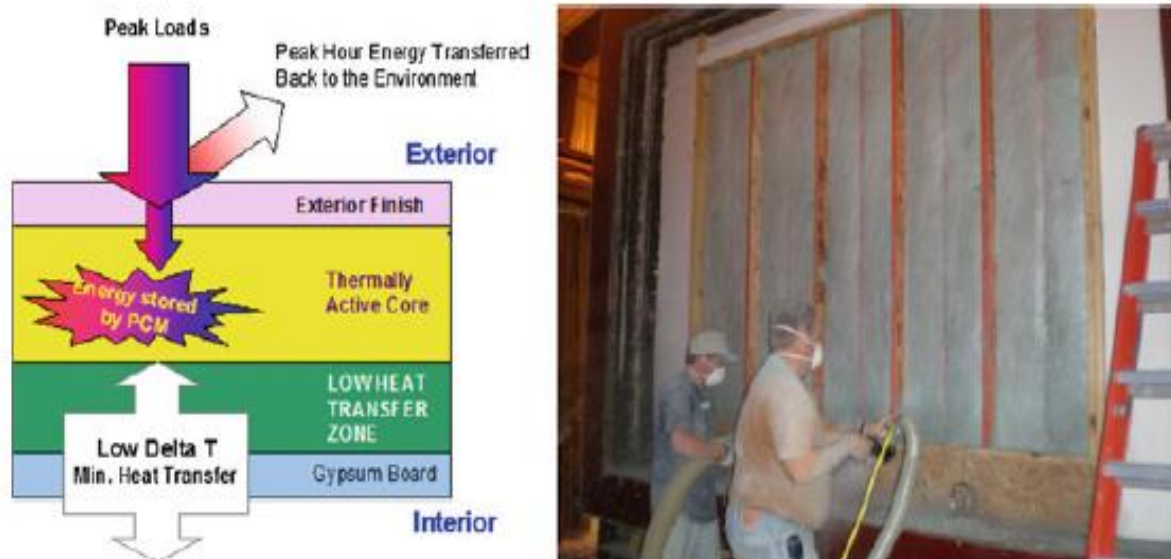


Fig.I.18 : Matériaux PCM améliorés utilisés comme partie intégrante de l'enveloppe thermique du bâtiment. La photo de droite montre la construction d'une double paroi expérimentale avec une couche extérieure de cavités contenant de l'isolant PCM-cellulose.

Dans les applications classiques, la performance thermique de la fenestration est le plus souvent améliorée par l'utilisation de gaz absorbants remplissant l'espace entre les feuilles de verre ou par l'application de vitres isolées thermiquement. Lorsque la translucidité est seulement nécessaire, les autres possibilités d'amélioration thermique peuvent incorporer de nouveaux matériaux de remplissage dans des vitres, comme l'aérogel de silice ou un PCM semi-transparent. Ces deux options requièrent une considération sérieuse des propriétés optiques et des

fonctionnalités de fenêtre. L'objectif de l'utilisation de PCM dans le vitrage ou les volets est d'utiliser leur chaleur de fusion latente élevée pour réduire les charges thermiques générées par les fenêtres en absorbant le gain de chaleur avant qu'il n'atteigne l'espace intérieur. Le cycle de changement de phase peut stabiliser la température intérieure du bâtiment et réduire les charges de chauffage et de refroidissement. Du point de vue thermique, les fenêtres PCM fonctionnent comme les murs Trombe optiquement transparents ou translucides¹⁴. Ils sont généralement constitués d'un panneau de vitrage simple ou multicouches en verre conventionnel, intégré à une couche d'un produit PCM transparent ou translucide. Fig 19 et 20.

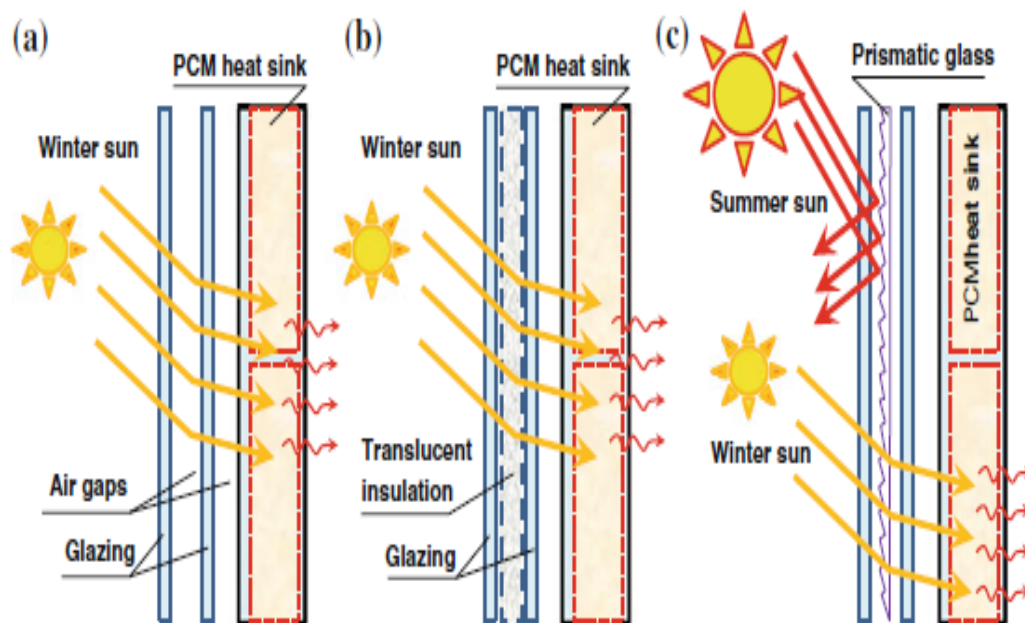


Fig.I.19 : Différentes options de configuration de la fenestration solaire PCM semi-transparente : une paroi de Trombe semi-transparente contenant un dissipateur de chaleur PCM. B) Paroi de Trombe translucide avec dissipateur de chaleur PCM et isolation translucide. C) Système de fenestration solaire utilisant un dissipateur de chaleur PCM et un verre prismatique sélectif, (Source : Dounia Ben Dahou 2016).

¹⁴ Asphaug, S.K., Jelle, B.P., Gullbrekken, L., Uvsløkk, S., September 2e5, 2014. Accelerated ageing and durability of double-glazed sealed insulating window panes. In: Proceedings of 13th International Conference on Durability of Building Materials and Components, pp. 594e601. São Paulo, Brazil.

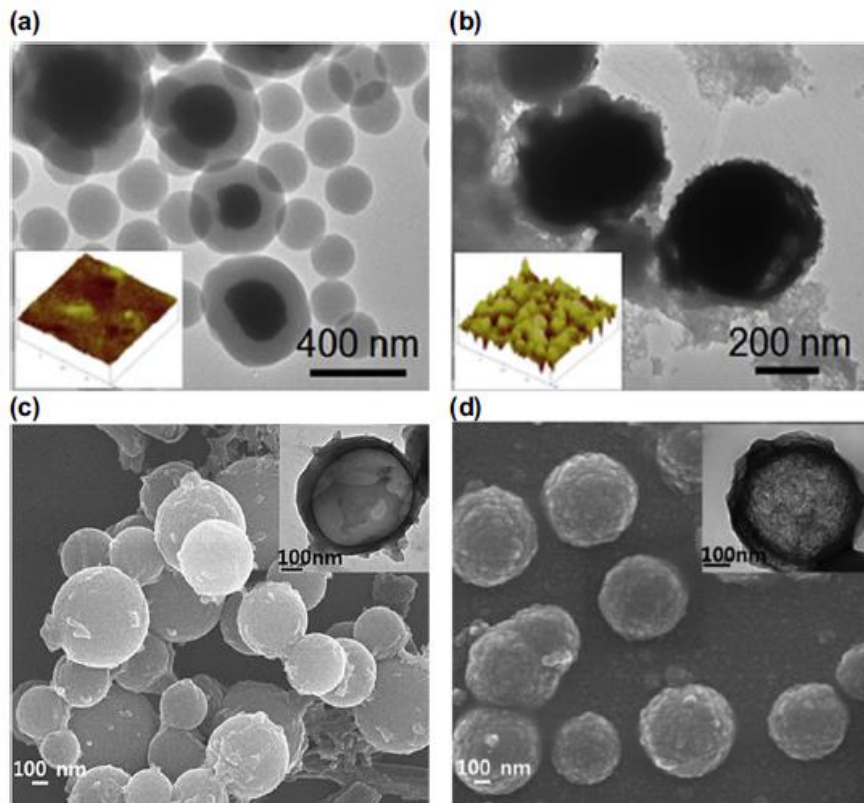


Fig.20 : Micrographies de matériaux de changement de phase nano-encapsulés sélectionnés (PCM). (Source : Cheong, I.W., et al., 2014).

I.2.4. Future possibilité de l'isolation thermique du bâtiment

Les futurs axes de recherche possibles des matériaux de construction et des solutions d'isolation thermique, peuvent devenir des matériaux d'isolation à hautes performances thermiques de demain, et de l'avenir.

I.2.4.1. La nanotechnologie appliquée à l'isolation thermique

Dans un avenir rapproché la nanotechnologie peut être appliqué comme un outil scientifique pour fabriquer des matériaux d'isolation thermique à haute performance. La mise au point normale en nanotechnologie est de contrôler la matière typique des particules, les dimensions sont comprises entre 0,1 nm et 100 nm, à l'échelle atomique et moléculaire. Voir (fig.I.21).

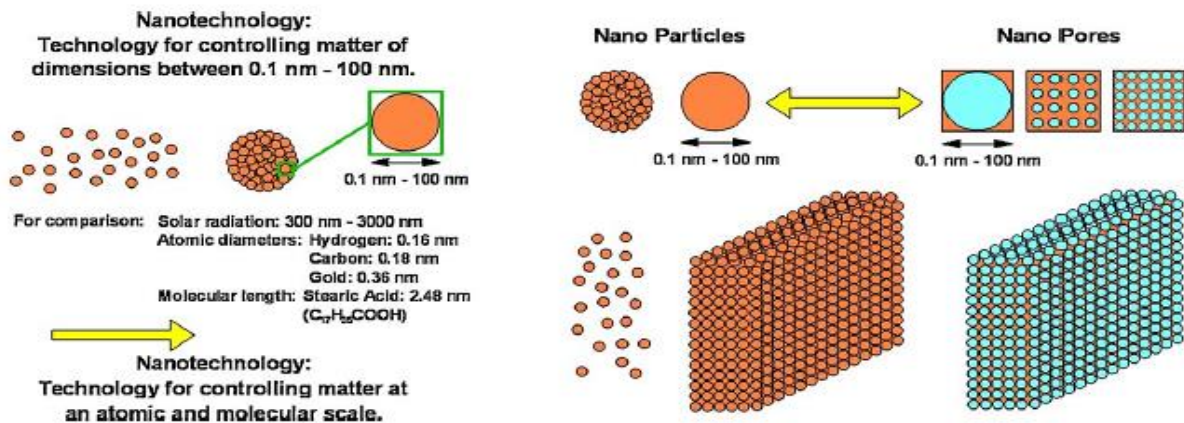


Fig.I.21 : Nanotechnologie et son application sur les matériaux d'isolation thermique à hautes performances.
Source : (Jelle, 2011a).

I.2.4.2. Matériaux d'isolation sous vide (VIM)

Un matériau d'isolation sous vide (VIM) est fondamentalement un matériau homogène avec une structure de pores étroite fermée remplie de vide avec une conductivité thermique globale inférieure à 4 mW / (mK) dans un état impeccable (Figure 22 gauche). Le VIM peut être coupé et adapté sur le chantier sans perte de conductibilité thermique. Perforer le VIM avec un clou ou similaire ne donnerait lieu qu'à un pont thermique local, c'est-à-dire à une perte de conductivité thermique faible. Une manière possible de produire un VIM peut être d'envisager un matériau à l'état solide se gonflant à l'intérieur pendant la formation et la dilatation ultérieure d'une structure de pore interne. Voir (figure.I.22 droite)¹⁵.

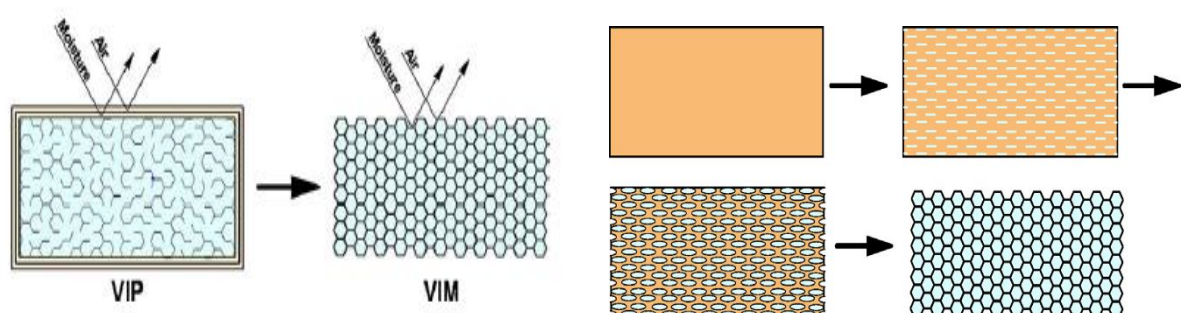


Fig.I.22 : Gauche Le développement du VIP au VIM et à droite Création envisagée d'un matériau d'isolation sous vide en tant que matériau à l'état solide se gonflant de l'intérieur pendant la formation et l'expansion ultérieure d'une structure de pore interne. Source : (Jelle, 2011a).

¹⁵Jelle, B.P., A. Gustavsen, and R. Baetens, *Innovative High Performance Thermal Building Insulation Materials- Today's State-of-the-Art and Beyond Tomorrow*. Atlanta, 2012. 2: p. 4.

I.2.4.3. Matériaux d'isolation gazeuse (GIM)

Un matériau d'isolation de gaz (GIM) est fondamentalement un matériau homogène avec une structure fermée de petits pores remplie d'un gaz à faible conductance comme L'argon (Ar), le krypton (Kr) ou le xénon (Xe), avec une conductivité thermique globale inférieure à $4 \text{ mW} / (\text{mK})$ ¹⁶ à l'état vierge (figure.I.23). Autrement dit, un GIM est fondamentalement le même qu'un VIM, sauf que le vide à l'intérieur de la structure de pores fermés est substitué par un gaz à faible conductance.

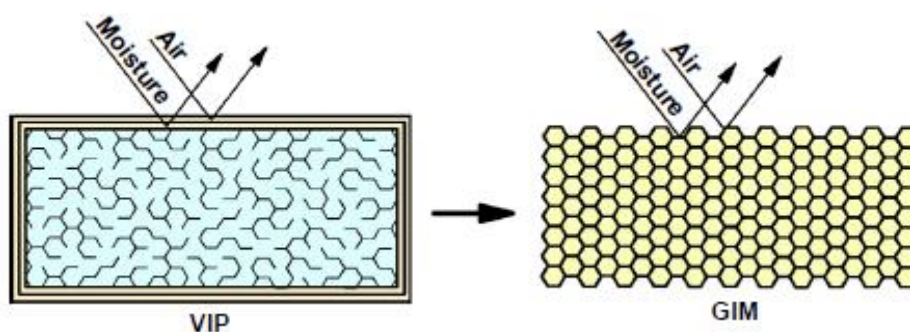


Fig.I.23 : Le développement du panneau isolant de vide au matériel d'isolation de gaz. (Source :Jelle, 2011a).

I.2.4.4. Matériaux d'isolation Nano (NIM)

Le développement de VIP à nano matériaux d'isolation (NIM) est représenté sur la figure 24. Dans le NIM la taille des pores au sein du matériau est réduite en dessous d'un certain niveau, à savoir 40 nm ou au-dessous pour l'air, afin de parvenir à une conductivité thermique globale inférieure à $4 \text{ mW} / (\text{mK})$ à l'état vierge¹⁷. Autrement dit, le NIM est fondamentalement un matériau homogène d'une petite structure nano pores fermé ou ouverte avec une conductivité thermique globale inférieure à $4 \text{ mW} / (\text{mK})$. La structure de la grille dans les NIMs n'est pas contrairement aux VIMs et GIMs, pour empêcher la pénétration de l'air et de l'humidité dans la structure des pores au cours de leur durée de vie d'au moins 100 ans. Le NIM réalise une faible

¹⁶Jelle, B., et al. *Vacuum and nanotechnologies for the thermal insulation materials of beyond tomorrow—From concept to experimental investigations*. in *Proceedings of the 10th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS-X)*. 2011.

¹⁷Jelle, B.P., *Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings*. Start-Up Creation: The Smart Eco-efficient Built Environment, 2016: p. 129.

conductivité thermique sans l'application d'un vide dans les pores en utilisant l'effet de **Knudsen**. La conductivité thermique du gaz en tenant compte de l'effet Knudsen peut être écrite d'une manière simplifiée comme suit, (Baetens et al., 2010a, Boucherel et al., Jelle, 2011a, Jelle et al. Al., 2010a, Kaganer, 1969):

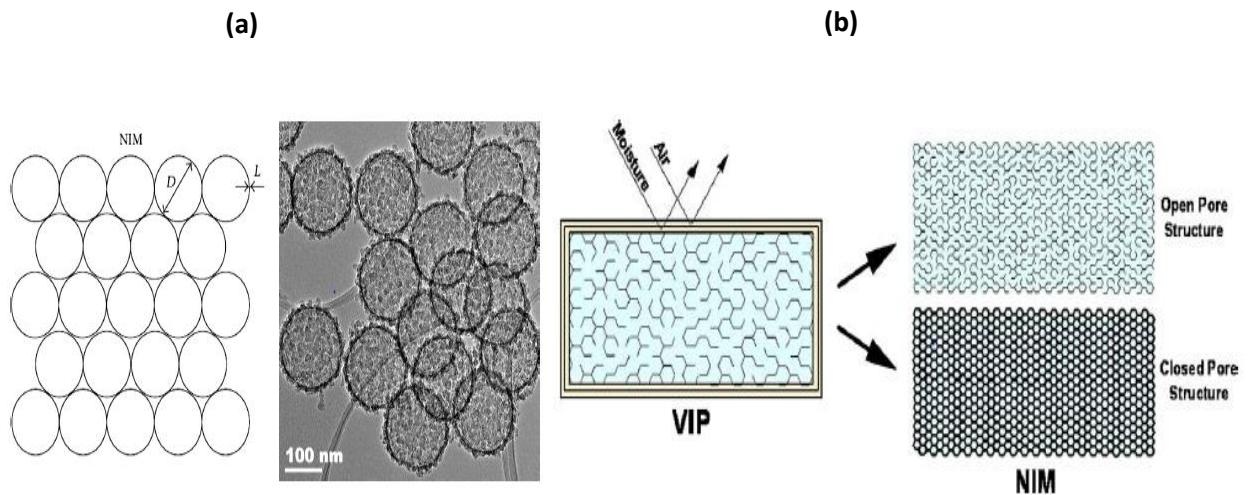


Fig.I.24. a) Modèle conceptuel d'un NIM à base de nanosphères creuses (à gauche), image TEM des nanosphères de silice creuses réelles (à droite). **b)** Le développement des VIP à NIM.
(Source : Jelle et al., 2016a,b)

I.2.4.5. Matériaux d'isolation dynamique (DIM)

Un matériau d'isolation dynamique (DIM) est un matériau où la conductivité thermique peut être contrôlée dans une plage souhaitable. Le contrôle peut être réalisé en étant capable de changer de manière contrôlée :

- Le contenu intérieur des pores de la concentration de gaz ou comprenant le libre parcours moyen des molécules du gaz et de l'interaction gaz-surface.
- L'émissivité des surfaces intérieures des pores.
- La solide conductivité thermique de l'état du réseau.

I.2.5. Autres matériaux et solutions futures ?

Les futurs axes de recherche possibles des matériaux de construction et des solutions d'isolation thermique, peuvent devenir des matériaux d'isolation à hautes performances thermiques de demain, et de l'avenir.

I.2.5.1. Béton et applications de nano-isolants

La solution thermique ultime sera toujours soumise à changer selon l'évolution du temps. Autrement dit, la solution thermique recherchée pourrait très bien, aussi pour le futur proche, se trouver régie par des techniques jusqu'ici inconnues et qui n'ont pas encore été découvert. Différemment, la solution thermique de demain pourrait être trouvée dans les matériaux et les solutions non encore pensées, ce qui exige de réfléchir le futur de ces isolants dans l'invention de la nanotechnologie des matériaux qui ne sont pas encore pensés ¹⁸.

I.2.5.2. Nano Conc

Avec la diminution de la conductivité thermique des matériaux d'isolation, de nouvelles solutions doivent également être recherchées pour les éléments de l'enveloppe du bâtiment porteurs. Lorsqu'on utilise du béton, il faudrait envisager de le mélanger avec du NIMs, pour diminuer la conductivité thermique du béton qui constitue un volume substantiel dans la structure des constructions, tout en maintenant la major partie des capacités de résistance mécaniques du béton. Comme le béton a une conductivité thermique élevée (1700-2500 mW / (mK), avec et sans armatures), une enveloppe de bâtiment en béton à toujours utiliser différents matériaux d'isolation thermique afin de parvenir à un faible coefficient de transmission thermique (U-valeur). Autrement dit, l'enveloppe épaisse du bâtiment devient souvent inutile, surtout lorsqu'il y a une tentation d'obtenir la norme de la maison passive ou de construction à énergie zéro.

En fait, l'industrie du ciment produit 5% ¹⁹des émissions mondiales de CO₂ d'origine humaine dont diverses applications de NIMs. L'isolation thermique pour le béton sont donnés à la Fig.I. 25, à savoir NIM positionné à l'extérieur, l'intérieur, appliqué au milieu ou bien mélangé conjointement avec du béton. Comme indiqué ci-dessus, lors du mélange (NIM) avec le béton, il faut préserver les capacités mécaniques et physiques du béton pour maintenir la structure de la construction stable. En outre, il est à noter que la très grande résistance à la traction de nanotubes de carbone (mesurée et 63,000MPa limite théorique 300,000MPa) dépasse celle des barres d'armature en acier (500 MPa) de plus de deux ordres. A titre de comparaison béton lui-même

¹⁸ McArdle, P., Lindstrom, P., December 2009. Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2008. U.S. Energy Information Administration, DOE/EIA-0573(2008).

¹⁹ P. McArdle and P. Lindstrom, Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2008, U.S. Energy Information Administration, DOE/EIA-0573(2008), December 2009.

sans armatures présente une résistance à la traction de 3 MPa et une résistance à la compression de 30 MPa. Ainsi, le potentiel impact de NanoCon est extrêmement énorme.

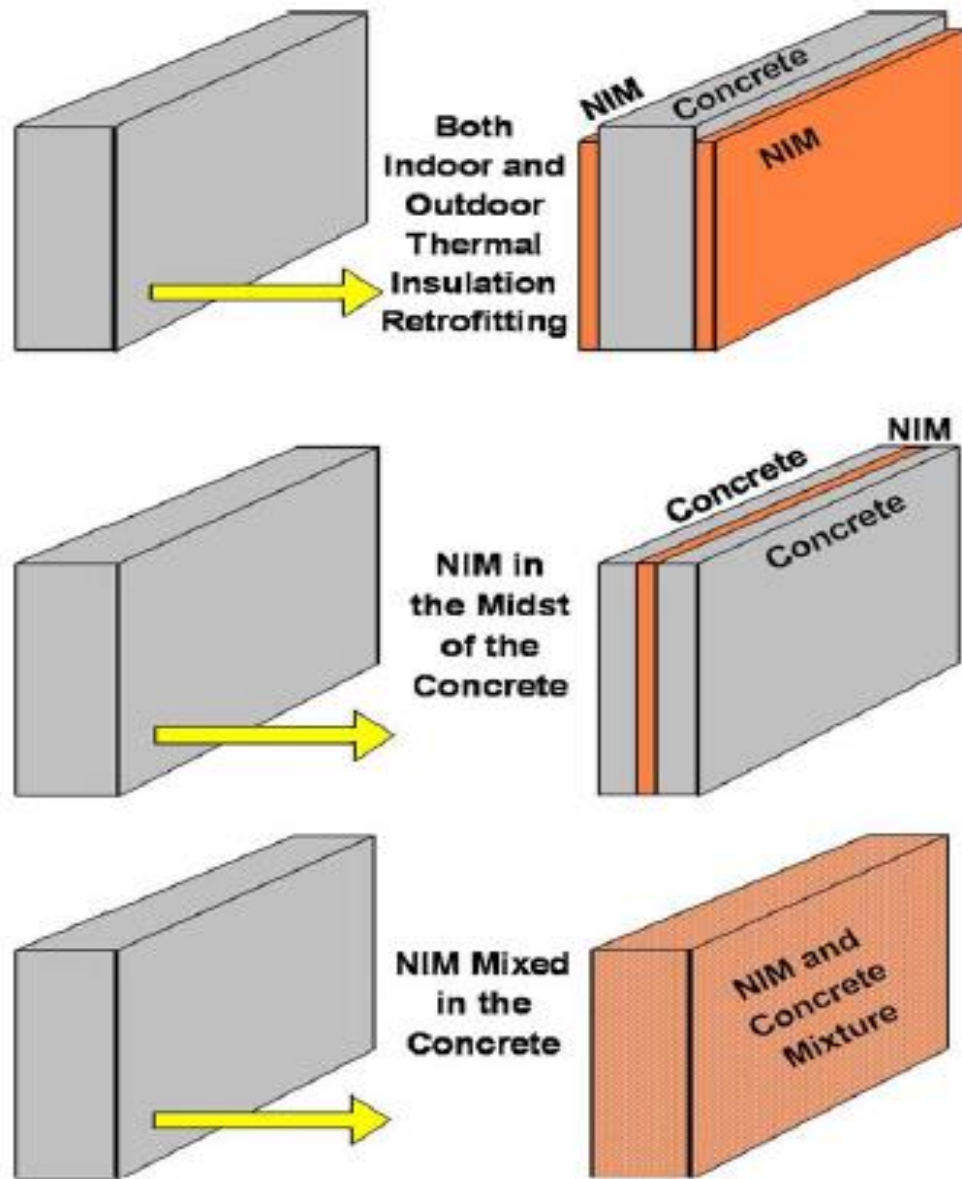


Fig.I.25: NIM en tant qu'isolation thermique pour béton, c'est-à-dire NIM en tant que montage ultérieur extérieur et / ou intérieur de béton, NIM (intermédiaire) appliqué au milieu de béton et NIM (fond) mélangé avec du béton. (Source : Jelle et al., 2014a,b).

I.3. Méthodes et techniques d'évaluation d'un meilleur choix d'isolants thermiques

I.3.1. Indices de choix d'un isolant

L'isolation thermique est utilisée pour garder les bâtiments plus frais en été et plus chaud en hiver. Le choix des produits d'isolation s'effectue par rapport aux buts d'utilisation, l'épaisseur d'isolant nécessaire dépendra de la température, de l'emplacement, de la latitude, de l'altitude et le type de climat ou il se trouve la construction. Le choix d'un isolant devrait se faire sur la base des critères suivants :

I.3.1.1. Propriétés thermiques

Elles sont généralement décrites par des notions telles que la conductibilité thermique (W/m^2K). Également de l'effusivité thermique (la racine carrée du produit de la masse volumique, de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du matériau). Elle représente la vitesse à laquelle la température de surface d'un matériau varie, et donc sa capacité à accumuler et restituer de la chaleur. Cette grandeur est intéressante pour le cas des isolants massifs.

I.3.1.2. Propriétés techniques

Elles représentent le comportement au feu, la perméabilité à la vapeur d'eau, le comportement à l'humidité, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps, l'isolation acoustique.

I.3.1.3. Propriétés environnementales

L'impact énergétique de la production, du transport, risques pour la santé, maintenance, traitement en fin de vie (recyclage). Ces propriétés sont identifiables par des données centralisées telles que les écobilans qui sont les résultats d'analyse de différents impacts environnementaux relatifs aux produits de construction (les déchets, la toxicité pour l'eau et les êtres humains, les émissions de gaz, etc.).

I.3.1.4. Propriétés économiques

Elles représentent le coût du matériau, de sa mise en œuvre et, selon le cas, de sa maintenance, en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre. Voir Fig.I.26

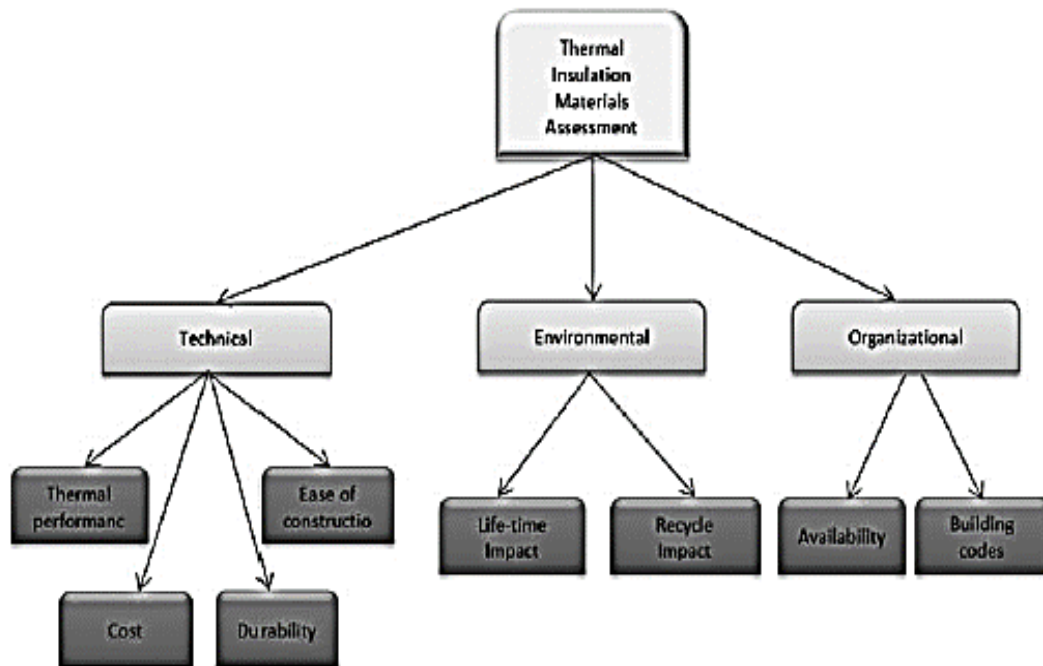


Fig.I.26 : Modèle de décision hiérarchique (HDM) (Source : R. Koosawangstri et al 2014).

I.3.2. Objectifs

Les interventions allant dans le sens de l'écoconstruction en différents niveaux pourront être classer comme suit :

I.3.2.1. Niveau minimum

Choisir, parmi les matériaux d'isolation courants, ceux qui ont à performance égale le meilleur écobilan. Concrètement, il faut éviter les mousses de polyuréthane, dans certains cas le verre cellulaire et le polystyrène extrudé. On leur préférera des laines minérales ou du verre cellulaire en respectant les consignes de sécurité lors de leur mise en œuvre. (Figure. I. 27).

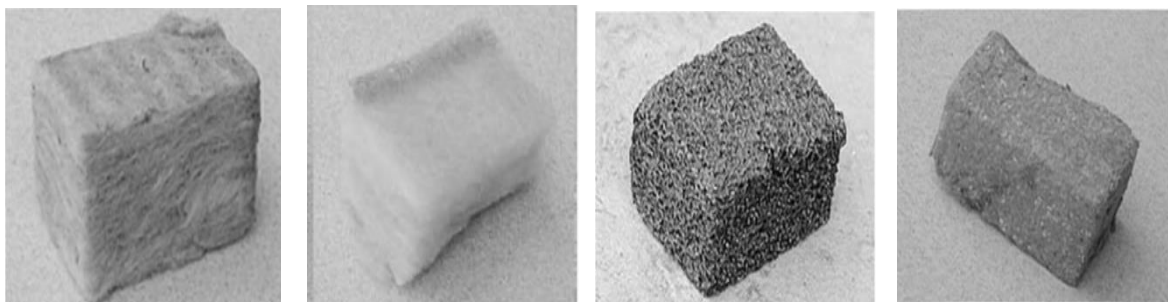


Fig.I.27 : Isolants traditionnels : laine de roche, laine de verre, verre cellulaire, perlite expansée

I.3.2.2. Niveau conseillé

Choisir, pour les modes de construction traditionnels (isolation extérieure, isolation entre chevrons, etc.), des matériaux naturels renouvelables et à faible processus de transformation plutôt que des laines minérales, des laines animales ou végétales à base de cellulose, de fibres de bois, de liège, de lin, de chanvre ou d'herbe. Leurs performances thermiques sont de mieux en mieux documentées et leur écobilan plaide en leur faveur. (figure. I. 28).

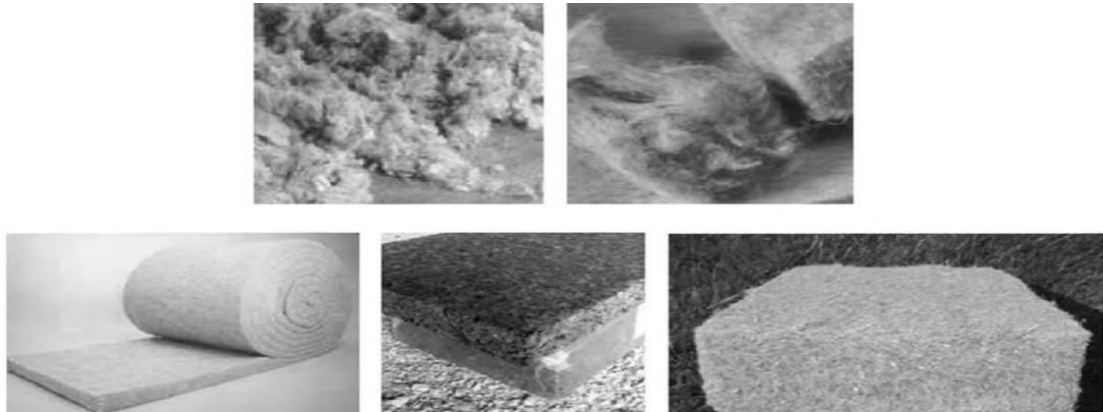


Fig.I.28 : Isolants végétaux : cellulose, laine de chanvre en rouleau, panneau de liège expansé, laine d'herbe.

I.3.2.3. Niveau optimum

Remettre en question le mode constructif de l'ensemble de la paroi, pour se diriger vers des solutions telles que les murs en terre-paille, en béton chaux-chanvre, en bois cordé. De très nombreux modes constructifs de ce type sont redécouverts aujourd'hui sous l'intitulé « isolants massifs » et donnent lieu à une réinterprétation contemporaine. (figure.I.29)

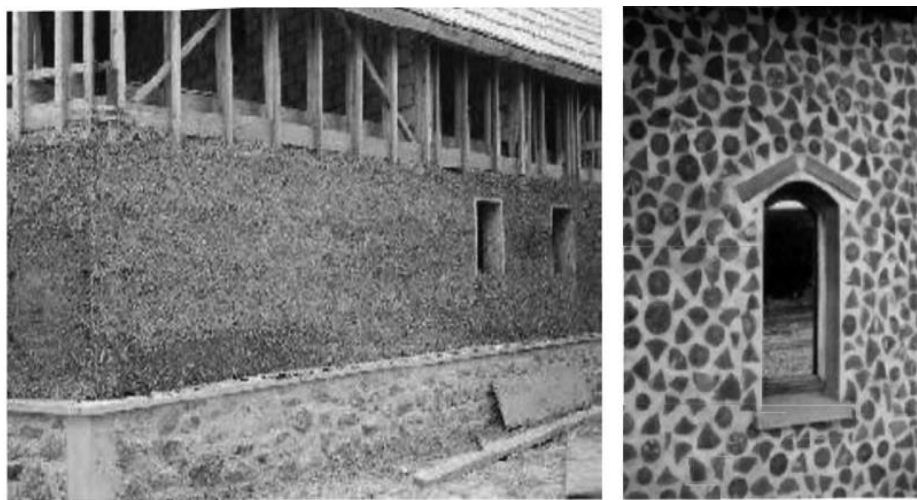


Fig.I.29 : Terre-paille en cours de chantier (à gauche) et de bois cordé (à droite).

I.4. Les procédés d'isolation

L'isolation des parois opaques peut être réalisée soit en rapportant une couche isolante à l'ossature porteuse du bâtiment (isolation rapportée), soit en utilisant un produit à la fois porteur et isolant (isolation répartie). L'isolation rapportée est plus courante que l'isolation répartie. Elle permet de dissocier sur le chantier les deux fonctions : structurelle et d'isolation thermique. L'isolation répartie est mieux adaptée aux maisons individuelles et aux logements collectifs de quelques étages seulement.

I.4.1. L'isolation des murs

L'isolation peut être rapportée côté intérieur comme côté extérieur des murs. Elle peut être placée dans l'épaisseur du mur entre ossatures en cas de murs à ossature bois ou métallique. Elle peut être assurée par un matériau porteur comme la terre cuite ou le béton cellulaire par exemple. En dehors des systèmes courants, il existe également d'autres systèmes d'isolation spécifiques comme le coffrage isolant qui permet de réaliser, une fois le béton coulé, une isolation intérieure et extérieure à la fois. Voir (fig.I.30 et fig.I.31).

I.4.2. L'isolation par l'intérieur

Elle présente l'avantage d'une mise en œuvre aisée. L'isolant est soit collé au mur soit fixé mécaniquement. Cette technique d'isolation positionne le gros œuvre côté extérieur réduisant ainsi l'inertie thermique du bâtiment. Elle crée par ailleurs une interruption de l'isolation au niveau des liaisons notamment avec les parois intérieures (planchers, refends). Cette interruption génère des ponts thermiques, lieux privilégiés de déperdition de chaleur et sources de désordres liées aux variations dimensionnelles et à la condensation superficielle. Dans les bâtiments neufs, le traitement des ponts thermiques entre le mur et les planchers intermédiaires ou les refends, peut être réalisé à l'aide de rupteurs thermiques intégrés aux liaisons avant coulage du béton.

I.4.3. L'isolation par l'extérieur

C'est une technique plus coûteuse que l'isolation par l'intérieur et sa mise en œuvre fait appel à des entreprises spécialisées. L'isolation est rapportée sur la face extérieure des murs. Elle est collée ou fixée mécaniquement ou les deux à la fois. Elle est munie d'un parement ou d'un enduit extérieur pour la mettre à l'abri des sollicitations climatiques extérieures. Cette technique place le gros œuvre dans le volume chauffé procurant au bâtiment une meilleure inertie thermique. Il existe trois grandes familles d'isolation par l'extérieur.

I.4.3.1. Les bardages rapportés

L'isolant est fixé au gros œuvre par des attaches ponctuelles. Une ossature secondaire fixée au gros œuvre sert de support direct ou indirect pour fixer le parement extérieur. Ce parement peut être constitué selon le cas de petits éléments ou écailles, de clins ou de lames, de plaques de grandes dimensions.

I.4.3.2. Les enduits minces ou épais sur isolant (ETICS)

L'isolant est collé ou fixé mécaniquement au gros œuvre par des chevilles ou profilés (métalliques ou plastiques). Il est recouvert ensuite d'un enduit mince (organique) ou épais (hydraulique) armé d'un treillis. Le tout est ensuite recouvert d'un revêtement de finition.

I.4.3.3. Les vêtements

Le parement extérieur est préalablement assemblé à l'isolant en usine. Le complexe est ensuite transporté et fixé au gros œuvre par fixation mécanique. Le parement peut être en métal, en plastique, ou à base de mortier renforcé.

I.4.4. L'isolation entre ossatures

L'isolant est posé entre les ossatures légères (bois ou métal) de la paroi. Une isolation complémentaire peut être rapportée côté intérieur ou extérieur. Cette dernière solution permet de corriger les ponts thermiques générés par les ossatures.

I.4.5. L'isolation répartie

Les murs sont constitués de blocs isolants et porteurs à la fois. Un montage à joints minces procure une meilleure performance thermique. Ces blocs sont en béton cellulaire, en béton à granulats légers, en terre cuite multi alvéolaire, etc. Le traitement des ponts thermiques est facilité par la forte épaisseur des blocs variant entre 20 et 45 cm. L'isolation répartie associe isolation et inertie thermique.

Les procédés d'isolation




-  Matériaux isolants
-  Matériaux constructifs
-  Matériaux constructifs isolants



Fig.I.30. Les procédés d'isolation interne, externe, interne, et répartie.
(Source : fudello, T.G.e.D.2012).

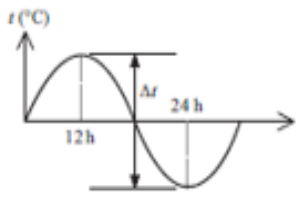

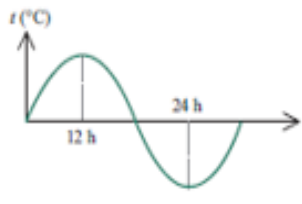
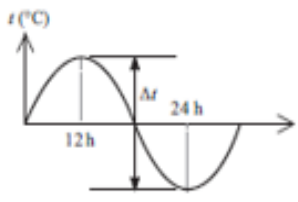
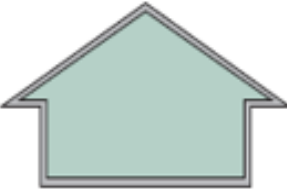
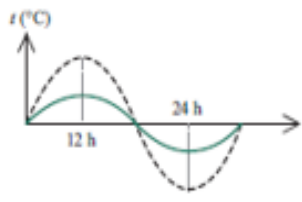
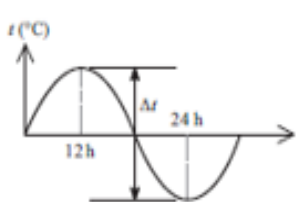

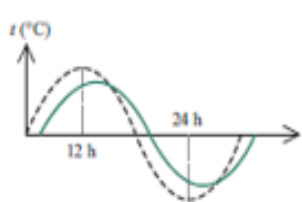
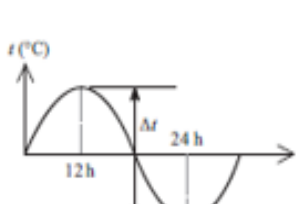

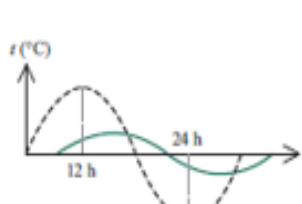
Variation de la température extérieure	Type d'enveloppe	Variation de la température intérieure
	 Enveloppe légère non isolée	
	 Enveloppe légère isolée	
	 Enveloppe lourde non isolée	
	 Enveloppe lourde isolée	

Fig.I.31 :- Comportement thermique d'une enveloppe selon sa composition .
(Source : fudello, T.G.e.D.2012).

I.5.Réhabilitation et rénovation thermique

D'après Vitruve, toute construction doit être confortable et saine. C'est en fait sa raison d'être. Elle doit protéger les occupants de l'environnement extérieur, de même assurer un équilibre et une qualité agréable à l'intérieur qui dépend guère des conditions extérieures, un bâtiment bien conçu fournit un confort nettement supérieur.

Le secteur de la construction offre une aptitude pertinente pour développer l'efficacité énergétique en exploitant des systèmes énergétiques efficaces et une isolation de haute performance. Pour les édifices existants, leur rénovation est devenue une éminente prérogative pour certains pays, puisqu'ils représentent une proportion élevée de l'énergie consommée et seront présents, en termes de construction, pour le prochain siècle. Des études (Verbeeck 2005, Enkvist 2007, EEW 2013) ont montré que la solution la plus efficace pour contrôler la consommation énergétique du secteur de la construction (anciens et nouveaux bâtiments) est de réduire la perte énergétique en améliorant l'isolation extérieur.

L'amélioration de la performance thermique courante de l'enveloppe des bâtiments est essentielle pour réduire la demande en énergie requise pour les constructions. Pour la réhabilitation et même pour les nouveaux bâtiments, l'épaisseur des couches de l'isolation externe et interne est devenue un problème. Aujourd'hui, il y a un intérêt majeur pour l'utilisation des matériaux dits super- isolants, qui ont une haute performance énergétique comme le cas des aérogels. Ce dernier présente des propriétés uniques qui s'avèrent très intéressantes et qui doivent être prise en compte dans les nouvelles règles des constructions. En effet, avec leur transparence optique et leur très faible conductivité thermique, les aérogels peuvent être utilisés dans l'isolation des façades opaques et transparentes.

I.5.1. Limites de l'isolation thermique comme approches unique

Isoler des anciens bâtiments, dont l'enveloppe était responsable de la majorité des pertes thermiques, a permis de réduire considérablement leur consommation énergétique. Cette amélioration a mené à la conception de bâtiments dont les consommations de chauffage ont baissé de moitié par rapport aux bâtiments non isolés. Néanmoins l'isolation thermique traditionnelle est un processus qui devient de moins en moins efficace au regard des objectifs ambitieux affichés dans les prochaines années. Il semble donc qu'il soit de plus en plus nécessaire

de se tourner vers des voies complémentaires de recherche ou d'autres mécanisme de performance tant qu'au niveau méthodologique que technologique.

Les bâtiments anciens occupent une place particulière au regard de la question de la réhabilitation thermique. D'une part, leur composition et la forme urbaine dans laquelle ils s'insèrent leur confère des propriétés particulières en termes de comportement thermique. D'autre part, le débat est encore largement dominé par une approche contradictoire entre patrimoine et développement durable.

I.5.2. De la performance thermique à la performance énergétique d'un bâtiment

Généralement exprimée en kilowatt heures d'énergie primaire consommés pour 1 m² et sur une année (KWh-ep/m².an), la performance énergétique d'un bâtiment désigne sa capacité à limiter les consommations d'énergie à l'intérieur d'un logement, compte tenu de la qualité de ses équipements de chauffage, mais peut-être avant tout, de son comportement thermique. Ce dernier désigne l'évolution des températures à l'intérieur du bâtiment. Il est la somme d'un ensemble de facteurs à la fois urbanistiques, architecturaux et sociotechniques (figure .I.32).

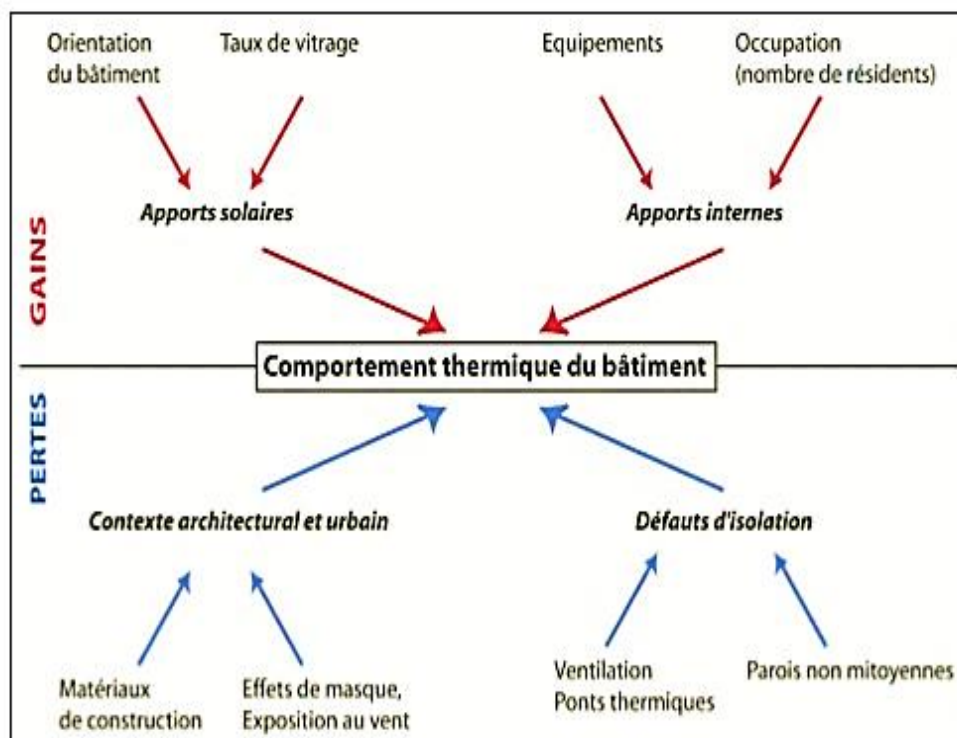


Fig.I. 32 : Approche systémique du comportement thermique d'un bâtiment.
(Source :Termin assian.2011).

Certains facteurs sont propices au chauffage "naturel" d'un bâtiment, en particulier les apports solaires induits par l'orientation du bâtiment par rapport au soleil ou encore la chaleur induite par l'occupation du logement ou la présence d'équipements dégageant une certaine quantité d'énergie. À l'inverse, d'autres facteurs tendent à limiter ces gains, par exemple la forme urbaine dans laquelle est insérée le bâtiment et les matériaux ou les systèmes constructifs employés. Un bâtiment sera considéré comme "performant" lorsque, compte tenu de sa volumétrie, de sa composition et des matériaux mobilisés pour assurer son isolation thermique, ses besoins énergétiques en termes de chauffage sont peu importants.

I.5.3. Perspectives

De nombreuses voies de recherche autour de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments sont en cours d'exploration. Elles se divisent en deux grandes thématiques : une thématique de recherche concernant les équipements énergétiques des bâtiments, et une thématique plus concentrée sur les problématiques d'enveloppe. La recherche sur les équipements se préoccupe principalement d'améliorer les rendements des systèmes d'appoints comme le chauffage et la climatisation, afin de diminuer leur facture énergétique primaire. En ce qui concerne l'enveloppe, de nombreuses recherches concernent le développement de solutions d'isolation classique à l'isolation alternatives. Il s'agit notamment de mettre au point des matériaux et solutions d'enveloppe ayant une efficace capacité d'isolation pour une légère épaisseur. Parmi ces solutions les super-isolants, les isolants sous vide (VIP) et les aérogels, qui permettent d'atteindre des conductivités thermiques de l'ordre de $0.005 \text{ W}/(\text{mC}^\circ)$. Ce type d'isolation est notamment envisagée en réhabilitation des bâtiments d'où la contrainte d'espace intérieur est souvent soulevée. Toutefois, la question de la durabilité et la performance de ce type de matériaux délimitent actuellement l'horizon de leur utilisation.

L'amélioration de la performance thermique de l'enveloppe d'un bâtiment réhabilité. Repose sur le compromis de deux éléments divergents et conflictuelles, celui de l'amélioration du confort thermique d'une part et la préoccupation d'économie d'énergie d'autre part, afin de sensibiliser les concepteurs sur la méthode de rendre meilleur thermiquement le bâti existant. Il convient en outre réunir sur la question de l'enveloppe architecturale et son appartenance des conditions climatiques, et son incidence sur le confort thermique, et mesurer l'impact de cette réhabilitation sur la température intérieure et les besoins énergétiques.

Conclusion

Les avantages et les inconvénients des matériaux de construction employés dans la construction des bâtiments et les techniques d'isolation thermique sont souvent étudiés et vérifiés par des laboratoires spécialisés en la matière avant leurs exploitations sur chantier. Plusieurs exemples faire allusion, la laine minérale, polystyrène expansé, polystyrène extrudé, polyuréthane, panneaux d'isolation sous vide, panneaux d'isolation de gaz, aérogels, ces deux derniers seront les possibilités futures et la perspective des matériaux d'isolation à haute performance thermique, nano et matériaux d'isolation dynamique, ces types d'isolation ont des propriétés diverses dont ces performances ont été comparées et étudiées. Parmi ceux-ci, la conductivité thermique, résistance mécanique, protection contre l'incendie, émission de fumée lors d'un incendie, la résistance aux impacts environnementaux.

Les travaux ont confirmé aussi que la performance du bâtiment en relation avec son isolation thermique dépend de multiples indices. Le type et l'épaisseur de l'isolation thermique, l'orientation et la forme du bâtiment, la couleur de l'enveloppe, les surfaces vitrées et leur occultation, les matériaux de construction composent des éléments qui exercent une influence sur la performance thermique de la construction. Les paris engagés dans un avenir proche sont évidemment lucratifs et ils réclament une coopération plus palpable de la communauté de la recherche scientifique, l'industrie et les autorités législatives.

Les matériaux isolants traditionnellement utilisés dans le bâtiment tels que la laine minérale, le polystyrène, le polyuréthane voire le liège ..., sont bon marché mais peu performants ($0,030$ à $0,050 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Ils ne sont plus adaptés aux nouveaux enjeux car ils imposent d'utiliser de trop grandes épaisseurs de matériau. La perte patrimoniale induite par ces fortes épaisseurs d'isolants peut en effet être importante lors d'opération de rénovation pour respecter les normes de résistance thermique, ce qui apparait comme un frein conséquent à la politique d'efficacité énergétique. Des matériaux et composants super-isolants thermiques, tels les panneaux d'isolation sous vide (PIV ou VIP en anglais) ou sous gaz peu conducteur (GFP), ou encore les aérogels de silice, ont fait leur apparition sur le marché ces dernières années. Ces nouveaux composants et matériaux présentent un coût encore élevé par rapport aux solutions traditionnelles. Cependant, si on rapporte le coût global de la rénovation (prix du matériau, du système d'isolation, de la pose, ...) à la valeur foncière, on peut aisément établir le seuil à partir duquel ces super-isolants peuvent devenir avantageux économiquement

Table des matières

Introduction	11
I.1. Les raisons de l'isolation thermique des bâtiments :(Pourquoi isoler) ?	11
I.1.1. Isoler pour garantir le confort thermique été comme hiver.....	11
I.1.2. Rôle de l'isolation thermique	12
I.1.3. Aperçu historique sur les réglementations de l'isolation thermique en Europe.....	13
I.1.4. La réglementation thermique de 2012 (RT 2012).....	14
I.1.5. Le contexte réglementaire de l'isolation thermique en Algérie	14
I.2. Types et qualités des produits d'isolation thermique	16
I.2.1. Isolations conventionnelles	18
I.2.1.1. La laine minérale.....	18
I.2.1.2. Le polystyrène expansé (EPS)	19
I.2.1.3. Le polystyrène extrudé (XPS).....	19
I.2.1.4. Cellulose.....	20
I.2.1.5. Liège.....	20
I.2.1.6. Polyuréthane (PUR)	20
I.2.2. Isolations naturelles et écologiques « vertes »	22
I.2.2.1. Les isolants naturels	22
I.2.2.2. Les isolants écologiques.....	23
I.2.3. Isolations à Hautes performance thermique (super-isolation).....	24
I.2.3.1. Panneaux isolants sous vide (VIP).....	24
I.2.3.2. Panneaux remplis de gaz (GFP).....	26
I.2.3.4. Matériaux à changement de phase (PCM)	28
I.2.4. Future possibilité de l'isolation thermique du bâtiment.....	31
I.2.4.1. La nanotechnologie appliquée à l'isolation thermique.....	31
I.2.4.2. Matériaux d'isolation sous vide (VIM)	32
I.2.4.3. Matériaux d'isolation gazeuse (GIM).....	33
I.2.4.4. Matériaux d'isolation Nano (NIM).....	33
I.2.4.5. Matériaux d'isolation dynamique (DIM).....	34
I.2.5. Autres matériaux et solutions futures ?	34
I.2.5.1. Béton et applications de nano-isolants	35
I.2.5.2. Nano Conc.....	35
I.3. Méthodes et techniques d'évaluation d'un meilleur choix d'isolants thermiques	37
I.3.1. Indices de choix d'un isolant	37
I.3.1.1. Propriétés thermiques.....	37
I.3.1.2. Propriétés techniques	37
I.3.1.3. Propriétés environnementales	37

I.3.1.4. Propriétés économiques	38
I.3.2. Objectifs	38
I.3.2.1. Niveau minimum.....	38
I.3.2.2. Niveau conseillé.....	39
I.3.2.3. Niveau optimum.....	39
I.4. Les procédés d'isolation	40
I.4.1. L'isolation des murs.....	40
I.4.2. L'isolation par l'intérieur	40
I.4.3. L'isolation par l'extérieur	40
I.4.3.1. Les bardages rapportés.....	41
I.4.3.2. Les enduits minces ou épais sur isolant (ETICS).....	41
I.4.3.3. Les vêtements	41
I.4.4. L'isolation entre ossatures.....	41
I.4.5. L'isolation répartie.....	41
I.5. Réhabilitation et rénovation thermique.....	43
I.5.1. Limites de l'isolation thermique comme approches unique.....	43
I.5.2. De la performance thermique à la performance énergétique d'un bâtiment	44
I.5.3. Perspectives.....	45
Conclusion.....	46

Introduction

Le deuxième chapitre de la mémoire présente l'état de l'art sur l'efficacité thermique de l'isolation. Un isolant thermique peut être vu comme une couverture, il protège son contenu contre la variation des conditions climatiques. Son enveloppe agit comme un échangeur, qui permet l'absorption ou la libération d'énergie avec l'environnement extérieur, son effet sur la performance thermique du bâtiment se manifeste dans l'amélioration du confort des occupants avec une consommation d'énergie optimisée, sous climats froids et climats chauds. De nombreux facteurs affectent la performance thermique du bâtiment. Parmi ceux-ci, on peut citer : l'isolation thermique, associée à une ventilation naturelle, l'inertie et les gains solaires. Un mur bien isolé de l'extérieur réduit les pertes de chaleur vers l'extérieur durant la saison froide et réduit la chaleur transmise à l'intérieur durant la saison chaude. L'isolation extérieure empêche également les ponts thermiques et la condensation de vapeur dans la paroi.

II.1. Facteurs généraux affectant la performance thermique des isolants

Dans une construction isolée, l'isolation peut se placer de diverses manières dans un mur : à l'extérieur, en sandwich ou à l'intérieur. Pour ces trois cas, la valeur des transmittances des parois reste la même et par conséquent les déperditions à travers l'enveloppe également. Cependant, la position de l'isolant modifie l'inertie de la paroi : seule la masse située à l'intérieur de l'isolation contribue à une inertie utile pour le volume intérieur.

II.1.1. L'inertie thermique

L'inertie thermique a un effet positif sur les conditions intérieures d'un bâtiment pendant l'été et pendant l'hiver. La chaleur stockée est progressivement relâchée dans l'ambiance intérieure du bâtiment avec pour conséquence une variation de la température intérieure qui reste dans la gamme de confort. Cela peut donc réduire de manière sensible l'énergie consommée pendant l'été et l'hiver.

Le rôle de l'inertie thermique dans le bâtiment est un sujet largement étudié dans la littérature. par exemple a mis en exergue le rôle de l'inertie thermique sur la charge de climatisation d'un bâtiment.(Ulgen, 2002) a quant à lui entrepris une étude théorique et expérimentale sur l'effet des propriétés thermo physiques des parois sur le déphasage et

l'amortissement de la réponse du bâtiment. Il a suggéré d'utiliser des parois multicouches avec isolation pour les bâtiments occupés toute la journée et des parois monocouches pour les bâtiments occupés pendant des intervalles de temps spécifiques. Pour caractériser la dynamique du bâtiment, (Antonopoulos & Koronaki, 1998) ont défini une capacitance apparente et une capacitance effective. La capacitance apparente est déterminée en additionnant les capacités calorifiques des différents éléments du bâtiment. Les mêmes auteurs dans une autre étude (Antonopoulos & Koronaki, 2001) proposent des corrélations permettant d'obtenir cette capacité effective ainsi que la constante de temps thermique et le déphasage. Voir (figure II.1).

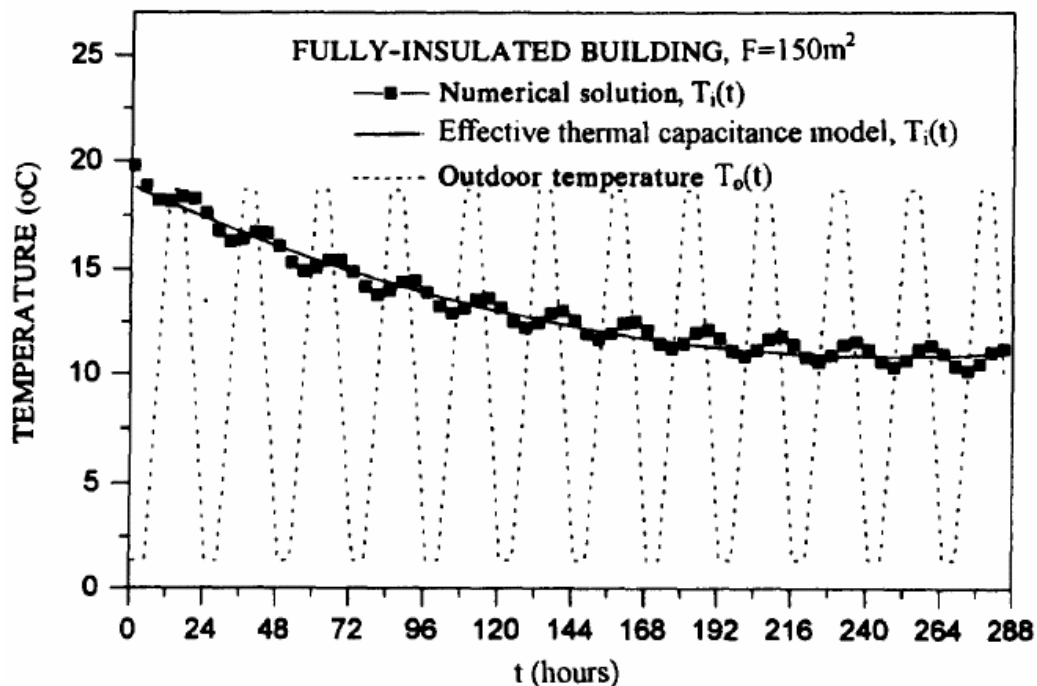


Fig. II-1 : Comparaison des variations de la température intérieure obtenue numériquement et par le modèle de la capacité effective (Source : (Antonopoulos & Koronaki, 2001)).

II.1.2. Constante du temps

Entre autres caractéristiques dynamiques des parois, La constante de temps, τ , est le rapport de la Capacité Thermique à son coefficient de déperditions thermiques. Aussi (Tsilingiris, 2006) a fait l'étude de cette constante de temps thermique des parois. Il en a déduit que la constante de temps thermique est une grandeur spécifique à une face de paroi. Ainsi, pour une paroi donnée, deux constantes de temps ont été définies : la constante de temps relative à la surface intérieure de la paroi et celle liée à la surface extérieure. Il a mis en évidence l'influence de la position de la couche isolante dans une paroi de résistance thermique fixée sur les deux constantes de temps. Une des conclusions importantes de cette étude est qu'il est préférable d'utiliser des parois ayant une faible constante de temps relative

à la surface intérieure pour des espaces chauffés ou climatisés par intermittence et peu occupés. Le même auteur (Tsilingiris, 2006) a fait une analyse des déperditions à travers une paroi isolée soumise d'un côté à la variation des conditions météorologiques et de l'autre à un chauffage intermittent.

Les effets de paramètres tels que la capacité apparente de la paroi, de la constante de temps thermique et de la position de la couche isolante sur les déperditions et sur les fluctuations de la température intérieure ont été mis en exergue. L'isolation intérieure des parois est meilleure d'un point de vue énergétique pour les espaces chauffés par intermittence. De même, il a montré que les déperditions journalières étaient proportionnelles à la capacité apparente des parois ayant la même constante de temps thermique relative au côté intérieur fixées. Tsilingiris dans un autre papier la même année a fait une étude paramétrique pour voir l'influence de la distribution de la masse thermique et de la résistance thermique sur le comportement dynamique de l'enveloppe du bâtiment. Pour cela, il a étudié trois groupes de parois ayant une même capacité thermique apparente représentées sur la figure II-2. La différence entre ces groupes de parois réside dans la position de la couche isolante.

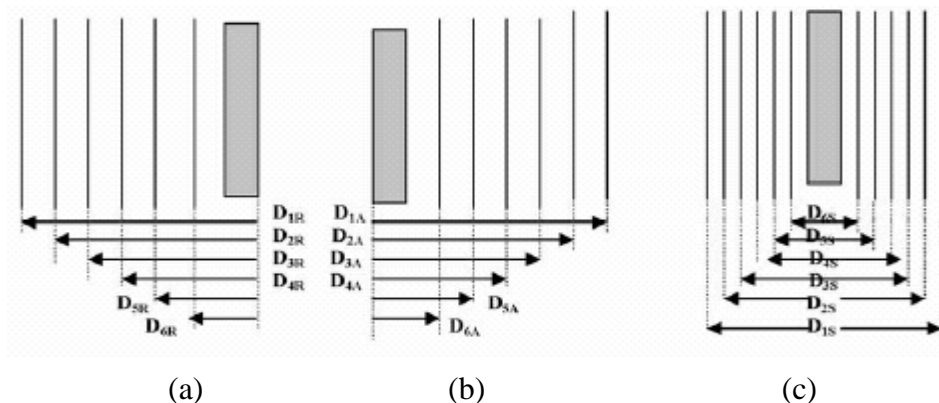


Fig. II-2 : Parois multicouches avec la couche isolante située respectivement (a) du côté intérieur, (b) du côté extérieur et (c) au milieu de la paroi, (Source : (Tsilingiris, 2006)).

Les résultats de variation de la capacité thermique effective et de la constante de temps thermique en fonction de la résistance thermique sont indiqués dans la figure II-3. Les courbes montrent que la capacité thermique effective dépend de la position de la couche isolante. Lorsque cette dernière est placée du côté intérieur, la capacité effective prend une valeur très faible qui est pratiquement indépendante de la résistance thermique. Pour des valeurs faibles de la résistance thermique, la position extérieure de la couche isolante donne des capacités thermiques effectives plus élevées que celles données par la position centrale de l'isolant. Cette différence diminue lorsque la résistance thermique augmente pour

disparaître quand cette dernière devient élevée. Ces graphes montrent aussi que la capacité thermique diminue lorsque la résistance augmente pour le cas où la couche isolante est placée à l'extérieur ou au milieu de la paroi. Les conclusions concernant la constante de temps thermique sont les mêmes que celles relatives à la capacité thermique effective.

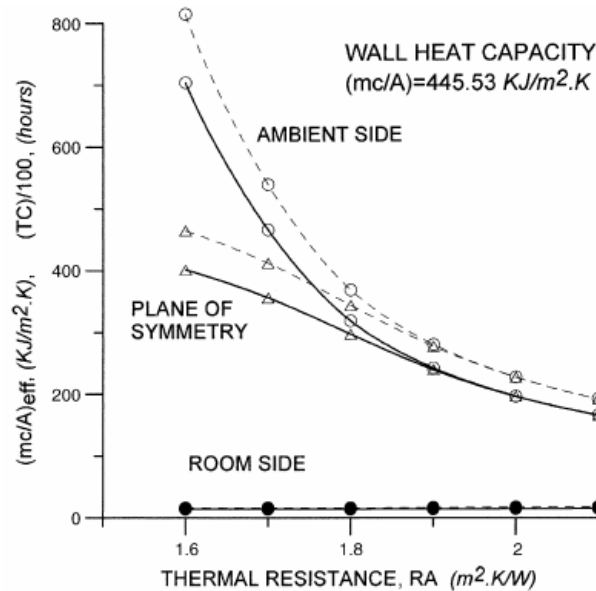


Fig. II-3 : La capacité thermique effective (trait continu) et la constante de temps thermique (pointillés) en fonction de la résistance thermique (Source : (Tsilingiris, 2006)).

II.1.3. Effet de l'emplacement de l'isolant thermique sur le déphasage et l'amortissement

Le déphasage thermique représente le décalage de temps entre le pic de température extérieure et le pic de chaleur intérieure. Donc est un atout de l'isolant pour le confort en été, car il retarde le transfert de chaleur. Un déphasage élevé ne suffit pourtant pas à assurer seul le confort thermique, l'inconfort arrivera seulement un peu plus tard. Pour une épaisseur donnée, ce qui détermine le déphasage n'est pas seulement la densité(ρ), ni le pouvoir isolant(λ), ni même la capacité thermique (C). C'est la diffusivité, qui est un mélange de tout ça ($\lambda / \rho C$, en m^2/s). Elle exprime la vitesse à laquelle la chaleur pénètre dans un matériau par diffusion au sein du matériau.

L'amortissement (affaiblissement, atténuation, noté η) est la relation entre la fluctuation maximale de la température extérieure et intérieure. Plus l'affaiblissement est élevé, meilleur est le confort thermique car les variations de la température extérieure se ressentent moins à l'intérieur. Parfois, le ratio présenté est inférieur à 1. Dans ce cas, c'est le rapport intérieur/extérieur qui est calculé.

Si à l'évidence l'inertie thermique du bâtiment a un rôle dans le confort d'été, on peut se demander si l'isolant associé à la paroi contribue également au déphasage grâce à sa densité et dans quelles proportions. C'est précisément l'objet de l'étude sur le confort d'été, réalisée en 2008 par le laboratoire Technologie du bâtiment de l'Empa et effectuée par calcul à l'aide du programme de simulation dynamique HELIOS. Le phénomène de déphasage a été comparé pour 5 isolants dont 3 à base de bois (panneaux de fibres de bois et cellulose) qui disposent d'une plus forte densité que la laine de verre et la laine de roche. Les isolants choisis ont tous la même résistance thermique et qu'elle n'influe donc pas sur le résultat.

Les résultats de la simulation illustrent que l'isolant limite les variations de température à l'intérieur du logement par rapport au pic de température extérieure. Mais les températures de l'air intérieur sont très proches les unes des autres quel que soit le type d'isolant : la différence de température selon le type d'isolant se situe entre 0 – 1 ° C. La conclusion tirée de cette étude signifie que la densité de l'isolant a un impact marginal sur le confort d'été.

Meral Ozel¹, a examiné l'effet de l'emplacement de l'isolation sur les caractéristiques de transfert de chaleur dans les murs du bâtiment et sur l'épaisseur optimale de l'isolant. L'enquête est menée sur un mur exposé au sud dans les conditions climatiques d'Elazığ, en Turquie. L'isolant thermique est placé sur les trois murs en brique dans des endroits distincts, à l'extérieur, au milieu et à l'intérieur. A priori, déterminés pour chaque emplacement d'isolation, le temps de déphasage, le facteur d'amortissement, ainsi que les charges de refroidissement et de chauffage. Les fluctuations de température maximale et la charge de pointe se produisent dans le cas où l'isolation est placée au milieu du mur et diminuent lorsque l'isolation est positionnée à l'extérieur. Les résultats montrent que la meilleure performance thermique est obtenue quand l'isolation thermique est placée à l'extérieur du mur, et indiquent que la position de l'isolation a un effet significatif sur le déphasage, et sur l'amortissement des murs. Tandis que, l'emplacement de l'isolation n'a pas d'influence sur les charges de transmission annuelles ainsi que sur l'épaisseur optimale de l'isolation. (Cf.II-4 & 5).

¹**M. Ozel**, « *Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness* », Energy and Buildings, Volume 72, April 2014, Pages 288-295,

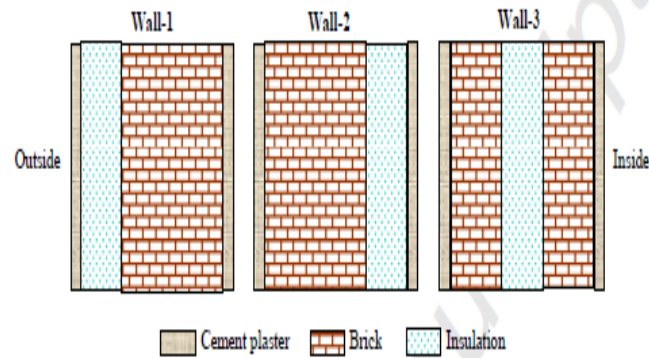


FIG.II.4. Configurations murales composées de briques, d'isolation et de plâtre (isolant extérieur (Mur -1), isolant intérieur (Mur-2) et isolant intermédiaire (Mur-3)). (Source : Meral Ozel.2014).

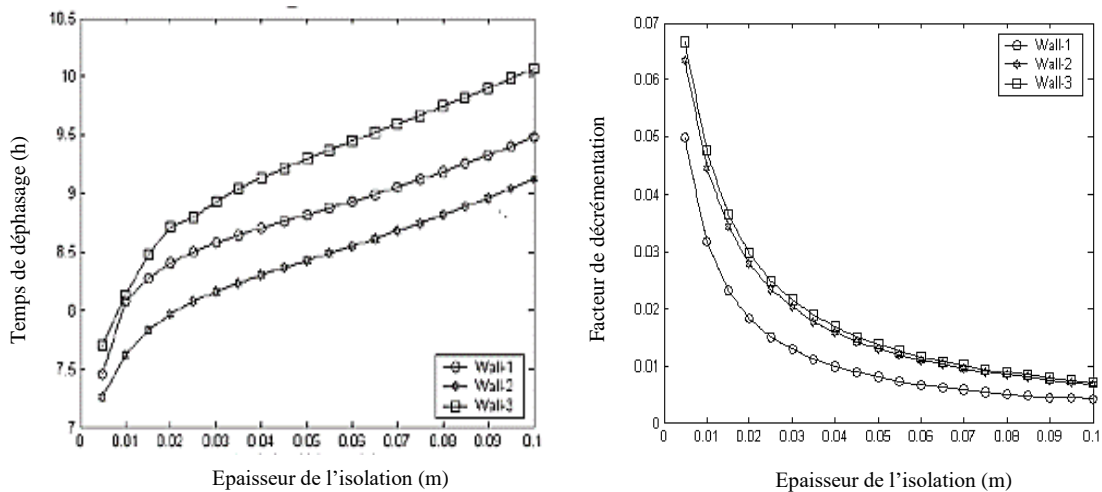


FIG.II.5. : Variation du facteur de décalage temporel et décrémentation annuel moyen par rapport à l'épaisseur d'isolation pour trois structures de paroi différentes. (Source : Meral Ozel.2014).

II.1.4. Relation entre isolation et inertie

Avant l'apparition des matériaux isolants, la construction traditionnelle avait privilégié deux types de systèmes constructifs : la construction massive en pierre ou en brique (à forte inertie) et la construction légère en bois (à faible inertie). Avec l'apparition des isolants, l'ambiance intérieure est à présent plus ou moins découplée des conditions climatiques extérieures. La présence d'isolant dans l'enveloppe contribue à réduire considérablement la transmittance des parois. Par ailleurs, les enduits de finitions dans le bâtiment peuvent aussi agir comme des isolants. Par conséquent, les masses inertielles recouvertes par un revêtement ou une couche d'isolant à l'intérieur du bâtiment ne doivent pas être prise en compte dans son inertie.

La relation entre l'isolation et l'inertie a ouvert un large éventail pour le progrès scientifique dans le domaine du bâtiment plus particulièrement en matière du confort thermique et de l'efficacité énergétique, pour optimiser l'emplacement et l'épaisseur de

l'isolant sans déstabiliser la performance de l'inertie thermique et préserver la qualité du confort intérieur.

Les résultats de Bekkouche et al.² montrent l'impact de l'inertie thermique de la pierre sur l'efficacité de l'isolation thermique intérieure et extérieure d'un bâtiment à Ghardaia en Algérie. L'isolation thermique intérieure du mur par une lame d'air de 2 cm, une couche de 6 cm du polystyrène et une autre couche (4 cm) de plâtre, cette étude démontre que l'isolant joue le rôle d'une barrière thermique, en freinant les pertes durant la période froide, et que l'utilisation d'autres matériaux que la pierre tel que la brique creuse serait plus efficace en période hivernale.

L'étude de Ozel et al³, présentent la méthode des différences finies pour déterminer la position et la distribution optimales des isolants sur les murs, les résultats de cette étude fait ressortir que l'isolation extérieure des murs constitue la meilleure solution. Dans une autre étude théorique dont l'objectif était d'optimiser des parois ou des éléments de parois de bâtiments par rapport à l'isolation thermique et à l'inertie thermique, Bien que l'inertie thermique et l'isolation soient deux notions opposées, les parois en blocs alvéolés ont la propriété d'être isolantes tout en ayant une inertie thermique importante.

Dans ses travaux, Sambou⁴ a étudié le comportement d'une cavité partitionnée en régime variable. Il en optimise la forme géométrique par les algorithmes génétiques en faisant varier le nombre de cloisons, leurs épaisseurs ainsi que les épaisseurs des cloisons extérieures d'un élément alvéolé. Il montre que pour cet élément alvéolé dont les dimensions sont constantes, au-delà d'un certain nombre de cloisons, la capacité calorifique de l'élément reste la même. Cela dit, les parois en blocs alvéolés offrent un bon compromis isolation/inertie d'autant plus que les échanges convectifs entre le matériau et l'air sont optimisés grâce à une plus grande surface d'échange. A montré aussi que l'optimisation d'une paroi multicouche a permis de donner la disposition optimale des couches, ils ont montré qu'en allant de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur.

² Bekkouche S.M.A. et al . « Influence de l'isolation thermique intérieure et extérieure d'un bâtiment en pierre situé à Ghardaia » SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

³ Ozel, M. and K. Pihtili, *Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations*. building and environment, 2007. **42**(8): p. 3051-3059.

⁴ Sambou, V., *Transferts thermiques instationnaires: vers une optimisation de parois de bâtiments*. 2008, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

Les études de recherches montrent le rôle fondamental de l'isolation thermique et de l'inertie thermique des parois sur le comportement dynamique et la consommation énergétique du bâtiment. Le résultat tiré est d'optimiser l'isolation d'une paroi de bâtiment, caractérisée par la résistance thermique, et l'inertie de cette même paroi, caractérisée par la capacité thermique.

II.2. Epaisseur optimale et position meilleure de l'isolation thermique

II.2.1. Épaisseur des isolants

Des études visant à optimiser l'isolation thermique des parois de bâtiments existent dans la littérature. (Mahlia, Taufiq, & Masjuki, 2007) ont établi une corrélation entre la conductivité thermique de l'isolant et son épaisseur optimale sous la forme d'un polynôme de second ordre. (Çomaklı & Yüksel, 2003) ont déterminé l'épaisseur optimale de l'isolation d'un mur extérieur en se basant sur le cycle de vie des bâtiments dans les villes les plus froides de la Turquie. (Al-Khawaja, 2004) a déterminé pour chaque type d'isolant l'épaisseur optimale avec comme critère d'optimisation le coût total de l'énergie consommée et de l'isolant dans les pays chauds. (Al-Sanea, Zedan, & Al-Ajlan, 2005) ont déterminé par un modèle dynamique des transferts thermiques l'effet du tarif de l'électricité sur l'épaisseur optimale de l'isolation de l'enveloppe d'un bâtiment en Arabie Saoudite. (Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, & Zinzi, 2006) ont entrepris une étude afin de déterminer le meilleur niveau d'isolation des bâtiments neufs d'un point de vue énergétique, économique et environnemental. Toutes les études citées plus haut se sont focalisées uniquement sur l'optimisation de l'épaisseur des isolants.

En Chine, Yu et al.⁵ ont étudié pour un mur typique en résidentiel, l'optimum isolants de cinq épaisseurs de matériaux (polystyrène expansé, polystyrène extrudé, mousse de polyuréthane, perlite, mousse et de polychlorure de vinyle), ils ont été calculés sur la base des disques durs et des cooling degree-day (CDD). Dans cette étude, l'orientation des murs et leurs couleurs de surface sont pris en considération. Il a été conclu que le polystyrène expansé est le matériau isolant le plus économique, vu qu'il avait la plus haute durée du cycle de vie, les plus basses périodes de récupération et l'épaisseur de l'isolation optimale est variable.

⁵ Kaynakli, O., *Parametric investigation of optimum thermal insulation thickness for external walls*. Energies, 2011. 4(6): p. 913-927.

Ucar et al.⁶ ont déterminé l'épaisseur de l'isolation optimale de la paroi extérieure et les économies d'énergie sur une durée de vie de 10 ans pour quatre différents types de murs à Elazig en Turquie. Les économies d'énergie varient entre 25 et 28 \$ / m² selon le type de mur. La plus haute valeur des économies d'énergie est atteinte pour le mur, qui a une structure composite (mur sandwich). La valeur la plus basse des économies d'énergie est obtenue pour le mur avec isolation extérieure. L'épaisseur de l'isolation optimale varie entre 9.5 et 10.8 cm pour les différents types de mur. Les résultats indiquent que l'isolation optimale des épaisseurs est fonction de la variation des configurations murales et les conditions climatiques.

Nezzar et Gourdache,⁷ prouvent à travers des résultats de simulation dans une région aride d'Algérie (Hassi Messaoud), que la température intérieure reste peu sensible à partir d'une épaisseur d'isolation de 5 cm (cf. Fig. II.6).

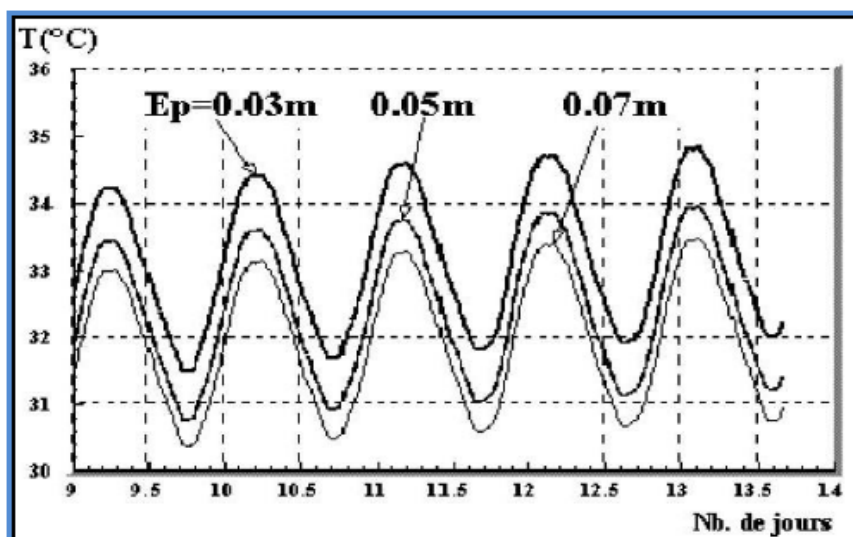


Fig. II. 6 : Optimisation de l'épaisseur de l'isolant. (Source : Nezzar et Gourdache, 2004).

II.2.2. Positionnement de l'isolant

Une enveloppe bien isolée peut entraîner des surchauffes durant les jours chauds d'été où le rayonnement solaire absorbé pendant la journée (entrée par les fenêtres) peut être piégé à l'intérieur. La position de l'isolant joue un rôle important sur le comportement thermique des murs extérieurs. Différents types de construction existent : isolation par l'extérieur, isolation par l'intérieur, isolation au milieu de la paroi. Pendant la saison d'hiver, l'excès de

⁶ Ucar, A. and F. Balo, *Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls*. Renewable Energy, 2010. **35**(1): p. 88-94.

⁷ Nezzar, S. and M. Gourdache, *Etude des performances énergétiques d'une conception bioclimatique en région aride*. World Energy Council, 1999-2004.

la chaleur dû au rayonnement solaire est absorbé et stocké pendant la journée puis libéré pendant la nuit quand il fait froid à l'extérieur (phénomène d'inertie thermique). Pendant les nuits d'été, lorsque la température à l'extérieur est inférieure à celle à l'intérieur du bâtiment, il est possible d'appliquer la ventilation naturelle.

D'autres auteurs ont montré le rôle de la position de la couche isolante dans la paroi sur le comportement dynamique des bâtiments. On peut citer les études d'(Asan, 1998) et (Asan, 2000) et celle de (Bojić & Loveday, 1997). Ces derniers ont analysé l'influence de la distribution isolant/maçonnerie d'un mur à trois couches sur la consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation. Ces auteurs ont tiré les conclusions suivantes d'un point de vue énergétique :

- Lorsque le bâtiment est chauffé de manière intermittente, l'isolation par l'intérieur et l'extérieur sont préférables à celle en sandwich ;
- Lorsque le bâtiment est climatisé de manière intermittente, c'est l'isolation par l'extérieur et l'isolation en sandwich qui sont préférables ;
- (Kossecka & Kosny, 2002) ont analysé l'influence de la configuration d'un mur isolé sur la charge totale de chauffage et de climatisation d'un bâtiment continuellement occupé.

Les six parois considérées dans cette étude ont la même résistance thermique et sont présentées sur la figure II-7. Et pour le cas d'une climatisation continue, la position de l'isolation est indifférente.

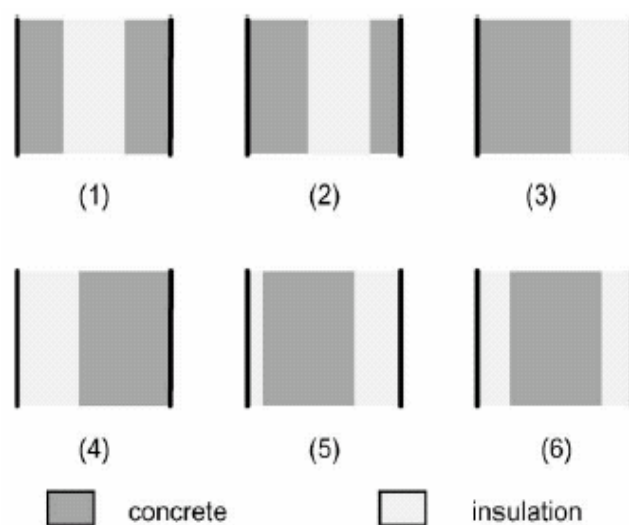


Fig. II.7 : Configuration des parois étudiées (Source : (Kossecka & Kosny, 2002)).

Sami A. Al-Sanea ,⁸ a étudié numériquement les caractéristiques thermiques dynamiques des murs de bâtiments isolés qui ont la même masse thermique, avec une épaisseur d'isolation optimisée pour une seule couche de 7,8 cm, en utilisant les données climatiques de Riyadh dans des conditions périodiques stables a permis de mettre en évidence l'influence de la configuration sur la stabilité thermique du bâtiment. Un bâtiment est dit stable thermiquement lorsque l'amplitude de variation de la température intérieure est faible. L'isolation s'effectue par l'utilisation d'une, deux et trois couches d'isolant dont les emplacements sont variés afin d'obtenir la meilleure performance. En comparant les charges de transmission, le déphasage et l'amortissement.

Les résultats obtenus par le mur W3 sont proches de ceux du mur W2c et W3a trois couches d'isolation (chaque épaisseur optimale de 2.6 cm) est placée à l'extérieur, au milieu et à l'intérieur ; Tandis que le mur W2c à deux couches d'isolant (chacune d'une épaisseur optimale de 3,9 cm) est placée à l'extérieur et au milieu. Le mur (W1a) avec une couche isolante placée à l'intérieur d'une épaisseur optimale de 7,8 cm est le moins efficace. En ce qui concerne la performance de la paroi (W3) comparativement à celle du (W1a), les améliorations obtenues sont les suivantes : Une augmentation de 100% du déphasage horaire de 6 h à 12 h ; une diminution de 10 fois de l'amortissement de 1,3% à 0,13%, et une réduction de 20% des charges de refroidissement et de chauffage annuelles qui varie respectivement entre 1,6% et de 3,2%. Sachant que tous les murs ont la même valeur R et la même masse thermique. Sur la base des résultats de l'étude, et dans les conditions périodiques régulières, il est recommandé que les murs du bâtiment soient conçus comme les murs (W3) ou (W2c), pour obtenir avec une épaisseur optimale d'isolation les meilleures performances thermiques, et pour affecter le coût minimum total qui comprend le coût initial et le coût de fonctionnement pendant la durée de vie du bâtiment. (cf. Fig. II.8).

⁸Al-Sanea, S.A. and M. Zedan, *Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass*. Applied Energy, 2011. **88**(9): p. 3113-3124.

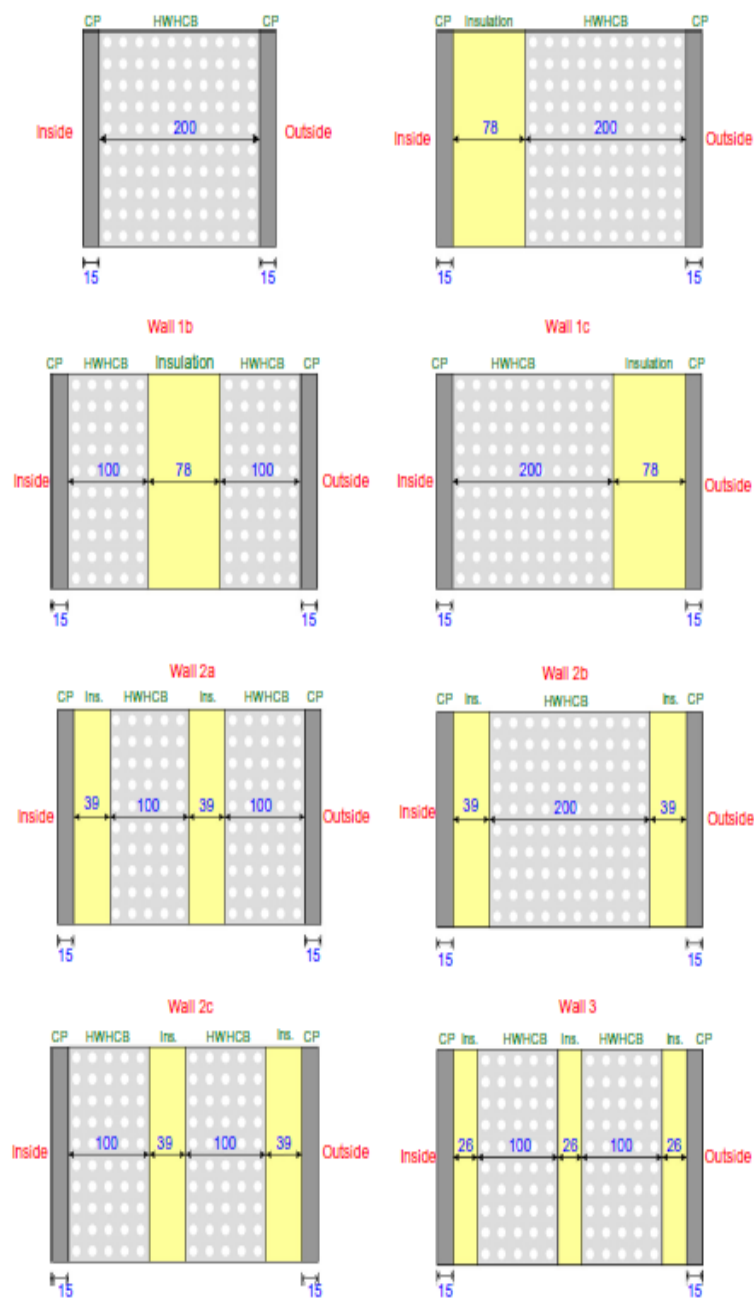


FIG .II.8-Les configurations des murs montrent un agencement de couches avec une épaisseur d'isolation optimale (dimensions en mm). (Source : Sami A. Al-Sanea 2011).

L'objet de l'étude de R. Guechati et al⁹. Sur comportement 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

⁹Guechati, R., et al., *Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda*. Revue des Energies Renouvelables, 2010. **13**(2): p. 223-232.

thermique et de réduire l'énergie consommée. Ils ont trouvé que l'économie en énergie maximale a été obtenue en utilisant l'isolation complète du centre et ils ont opté pour l'isolation de la toiture couplée à l'isolation externe des murs avec 6 cm de polystyrène expansé.

II.2.3.L'Emplacement de l'isolant dans différentes configurations murale

Medjelekh D. et Abdou S¹⁰, ont trouvé qu'il est important de prendre en considération l'aspect inertie thermique de la construction dans le choix et l'emplacement de l'isolant pour la qualité du confort thermique intérieur. Une modélisation avec le logiciel TRNSYS a été établie dans le but de rechercher l'emplacement et l'épaisseur type de l'isolant (cf. Fig. II.9) sans affecter la performance de l'inertie thermique. Ils ont montré que l'introduction d'un isolant permet un abaissement important de la température intérieure qu'avec la lame d'air tandis que l'emplacement idéal de l'isolant dans la paroi est celui du côté externe de la masse thermique. Ils ont également démontré que l'épaisseur recommandée de l'isolation, pour des raisons économiques, est de 5cm puisque la température intérieure reste peu sensible à partir de cette valeur.

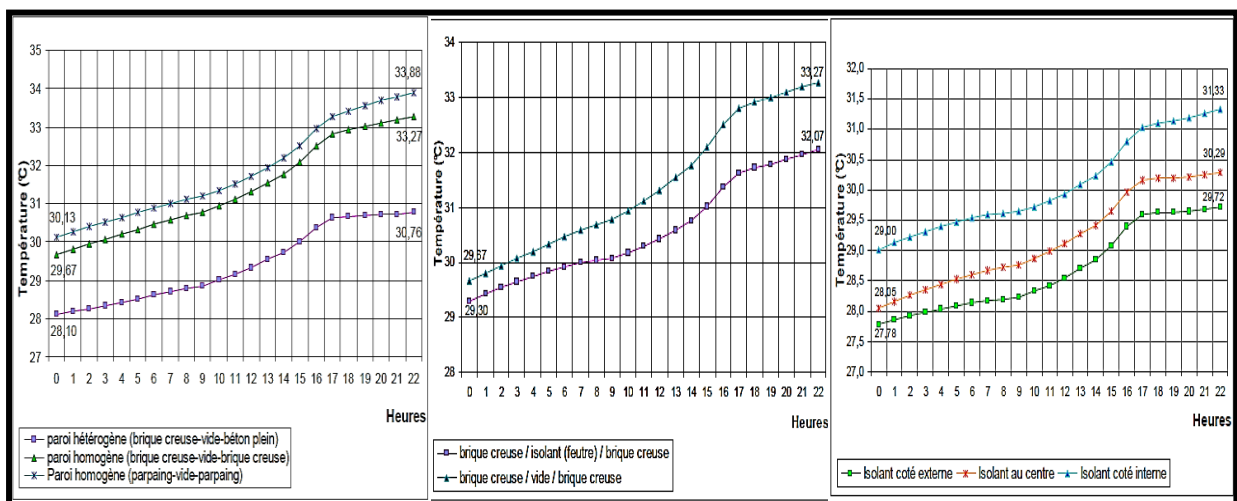


Fig. II. 9 : Variation de la température intérieure simulée avec différentes configurations murales (à gauche) et lame d'air et un isolant au milieu (au milieu) et le positionnement de l'isolant à trois côtés différents (à droite). (Source : Medjelekh et al.2007).

¹⁰ Medjelekh, D., *Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure*. Revue des Energies Renouvelables, 2010. 13(2): p. 265-273.

II.2.4. L'effet de la ventilation nocturne sur l'isolation thermique

I.A Al Mofeez¹¹, explique que l'isolation extérieure de l'enveloppe permet l'augmentation du temps de déphasage. Son étude comparative est effectuée sur trois chambres à Elhasa en Arabie Saoudite, en changeant l'emplacement de l'isolation (une sans isolation, une deuxième avec isolation du côté externe du mur et de la toiture et une dernière avec isolation appliquée du côté interne du mur et de la toiture). Lorsque la ventilation est assurée de 22h à 7h du matin la fluctuation de la moyenne journalière de la température radiante (MRT) est minimisée et le confort thermique est éprouvé. Son analyse statique montre que l'application de l'isolation thermique du côté externe avec l'assurance de la ventilation nocturne, permet une faible et très stable température moyenne radiante (MRT). Voir Fig-II-10-.

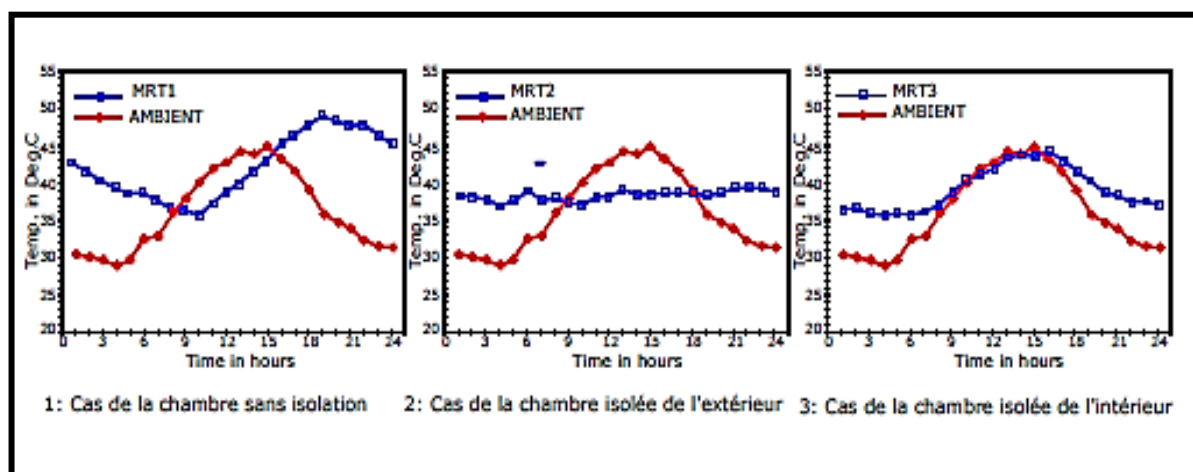


Fig-II-10- Profile des températures avec ventilation de 1.7 v/h (Source : Al- Mofeez, 1993).

II.3. Multiples configurations sur l'isolation ventilée

II.3.1. Couplage isolation thermique avec ventilation nocturne

Il y a moyen d'améliorer les performances de l'isolation thermique en y ajoutant les effets d'une ventilation nocturne. Deux cellules ont des parois verticales de béton de 20cm et de 15cm en toiture avec une isolation thermique extérieure, alors que la façade Sud sert à tester des systèmes passifs divers. Une cellule est restée fermée en permanence jour et nuit pendant que l'autre était ventilée la nuit par ouverture de la fenêtre. La figure 11 montre que

¹¹Al-Mofeez, L. *Field Test Results of Interior vs. Exterior Insulation of Thermal Mass in Extremely Hot-Arid Climates.* in *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL PASSIVE SOLAR CONFERENCE.* 1992. AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY INC.

grâce à la ventilation nocturne, la température intérieure de la cellule ventilée la nuit évolue 2 à 3°C en dessous de celle de la cellule témoin.

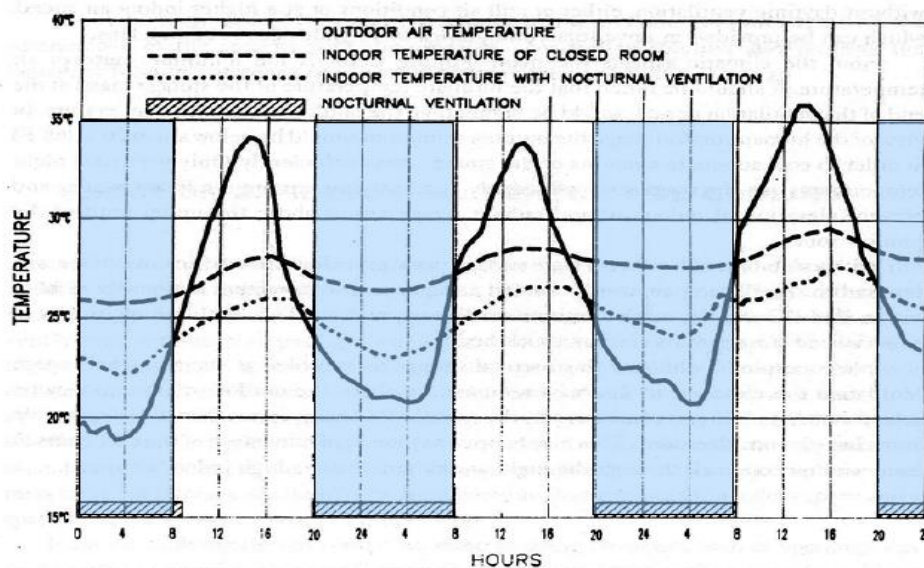


Fig.II.11 - Profils thermiques journaliers des cellules de forte inertie pendant une séquence d'été avec et sans ventilation nocturne (d'après B. GIVONI dans *Passive and low energy cooling of buildings*).

D'une manière générale, l'isolation thermique est déterminante dans les climats marqués par de fortes amplitudes jour/nuit, par de forts ensoleillements d'hiver, par des risques de journées d'été à température élevée qui ne sont compensables que par la ventilation nocturne ou par utilisation d'autres systèmes passifs de refroidissement. C'est exactement le cas du climat des régions méditerranéennes.

II.3.2. Effet de l'isolant ventilé sur le confort intérieur


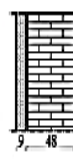
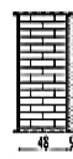
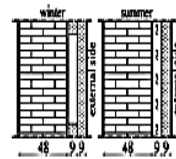
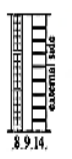
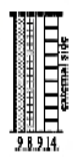

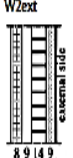
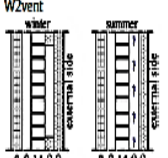
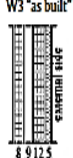
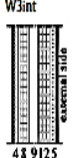
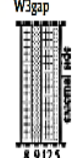
Une comparaison expérimentale a été menée par Francesca Stazi¹² entre trois bâtiments existants qui ont été construits entre les années 1940 et 1980. Leur composition murale est différente pour faire face aux conditions climatiques extérieures : capacité (masse thermique élevée), stratification (différentes couches et cavité) et résistance (utilisation d'une couche isolante). Des analyses paramétriques dynamiques (Energy Plus, CFD Fluent) ont été effectuées afin de vérifier l'impact de différentes solutions à préconiser pour la rénovation des bâtiments. Les résultats montrent que la différence dans le comportement thermique des 3 enveloppes selon les changements climatiques et l'utilisation de l'isolation thermique

¹²Stazi, F., et al., *Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies*. Energy and buildings, 2013. **60**: p. 429-441.

dense a provoqué des problèmes de surchauffe lorsqu'elle est couplée à une masse thermique importante, alors qu'il s'agit d'une amélioration des enveloppes stratifiées. Ce problème d'inconfort durant l'été peut être résolu en adoptant la stratégie d'isolation mixte et en utilisant une couche d'isolation externe ventilée. Cette solution s'avère être optimale, tant en termes de confort que de consommation d'énergie, en été et en hiver et permettant aux enveloppes existantes de maintenir leur comportement dynamique. (Cf.II.12&13)

Tab : II-1- Les murs étudiés : W1, W2 et W3 dans l'état réel et avec différentes solutions de rénovation.

(Source : Stazi, F., et al)

	W1 "as built"	W1int	W1ext	W1vent	W2 "as built"	W2int
						
Description	Solid brick masonry	With added internal insulation	With added external insulation	With added ventilated coating (air channel closed in winter and ventilated in summer)	Unfilled brick-block cavity wall	With added internal insulation
Wall thickness [cm]	50	60.5	60.5	69.5	34	44.5
Insulation	-	Expanded polystyrene	Expanded polystyrene	Expanded polystyrene	-	Expanded polystyrene
Type	-	9	9	9	-	9
Thickness [cm]	-	Internal	External	External with a ventilated cavity	-	Internal
Position	-	0.28	0.28	0.26	1.14	0.28
Thermal transmittance [W/(m²K)]	1.34	0.006	0.003	0.003	0.500	0.045
Periodic thermal transmittance [W/(m²K)]	0.076					
						
Description	With polyurethane foam in the existing cavity	With added external insulation	With added ventilated coating (air channel closed in winter and ventilated in summer)	Unfilled brick cavity wall with existing external insulation (retrofit 1990)	With an additional layer of insulation on the inner side	With polyurethane foam in the existing cavity
Wall thickness [cm]	34	44.5	53.5	40	45.5	40
Insulation	Polyurethane foam	Expanded polystyrene	Expanded polystyrene	Expanded polystyrene	Expanded polystyrene	Expanded polystyrene+polyurethane foam
Type	9	9	9	5	5+4	5+9
Thickness [cm]	In the gap	External	External with a ventilated cavity	External	External+internal	External+in the gap
Position	0.28	0.28	0.26	0.44	0.28	0.28
Thermal transmittance [W/(m²K)]	0.084	0.032	0.030	0.055	0.010	0.018
Periodic thermal transmittance [W/(m²K)]						

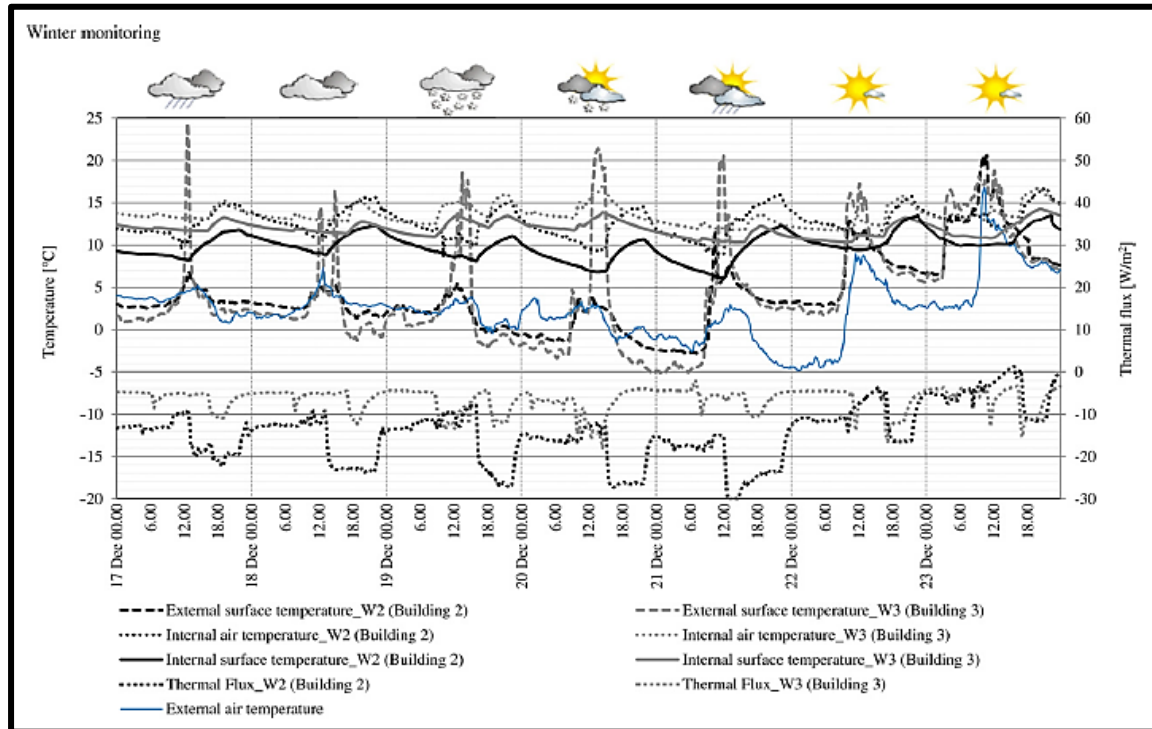


Fig.II. 12. Monitoring estival et comparaison entre W2 et W3 dans l'état réel, (Source : Stazi, F., et al).

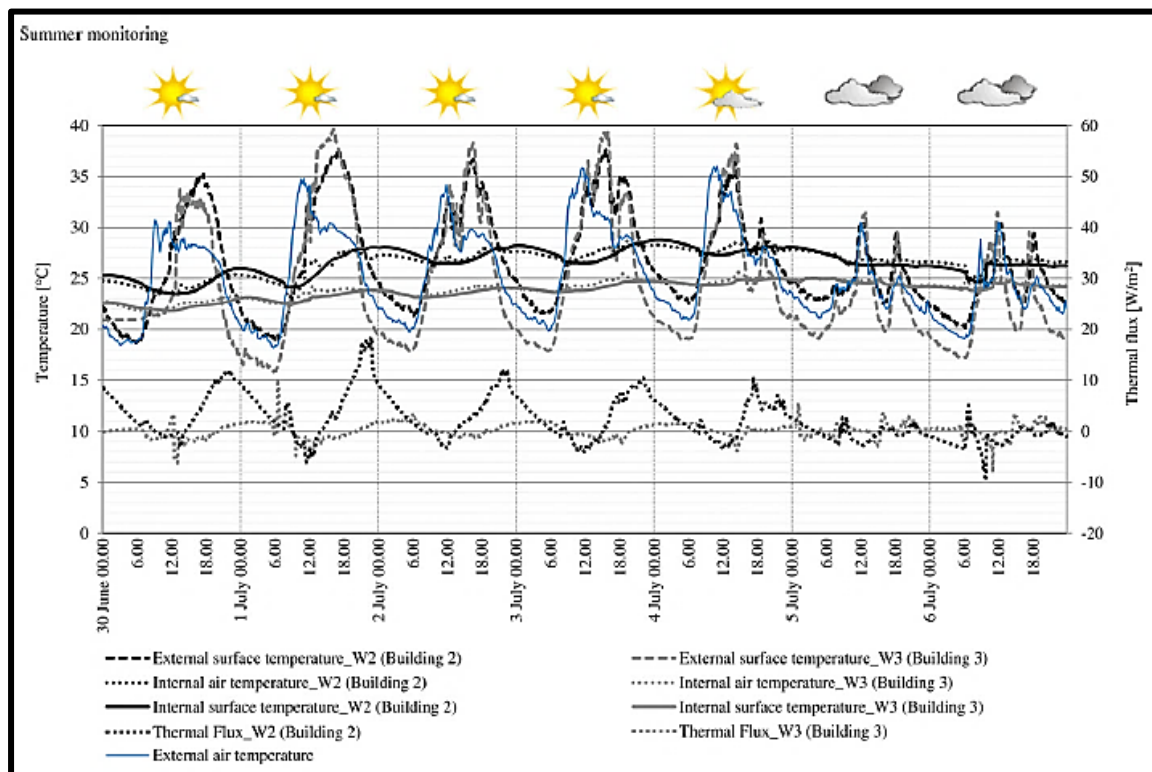


Fig.II- 13- Monitoring hivernal et comparaison entre W2 et W3 dans l'état réel. (Source : Stazi, F., et al).

II.3.2. L'impact de l'épaisseur de l'air sur la résistance thermique

Les murs de cavité (avec lame d'air) font partie des types de structures de paroi utilisées en Algérie. Sans isolation, toute la cavité devient un espace aérien d'épaisseur finie à travers lequel la chaleur est transférée par conduction, convection et rayonnement.

La résistance d'une cavité d'air fermée Selon **S. M. A. Bekkouche et al**¹³ peut être équivalente à une couche d'isolation thermique classique, dont l'épaisseur dépend des matériaux de construction utilisés. L'augmentation de l'épaisseur de la cavité d'air au-delà de ces limites n'augmentera pas la résistance thermique de la cavité due au développement de la convection naturelle. La résistance thermique du bloc de béton et du brique creuse dépend principalement de l'émissivité thermique, de l'épaisseur de la cavité d'air et de la différence de température entre la surface et l'air de cette cavité. L'atténuation des résistances thermiques, est provoquée par l'augmentation de l'épaisseur de l'air, à partir de l'épaisseur optimale $e = 1,4$ cm si l'émissivité est de l'ordre de 0,9. Cependant, si la paroi de la cavité présente une faible émissivité ou bien couvert par un film réfléchissant " $\varepsilon = 0,05$ ", l'épaisseur optimale augmente pour avoir une valeur équivalente à 8,2 cm. Dans le second cas (Figure 14 droite : cavité d'air dans la brique creuse " $\varepsilon = 0,9$ "), la résistance thermique maximale est atteinte pour une épaisseur optimale de 0,68 cm. Cependant, lorsque la cavité d'air fermée est limitée par un matériau réfléchissant sur une face " $\varepsilon = 0,05$ ", la résistance thermique optimale correspond à l'épaisseur de 2,36 cm.

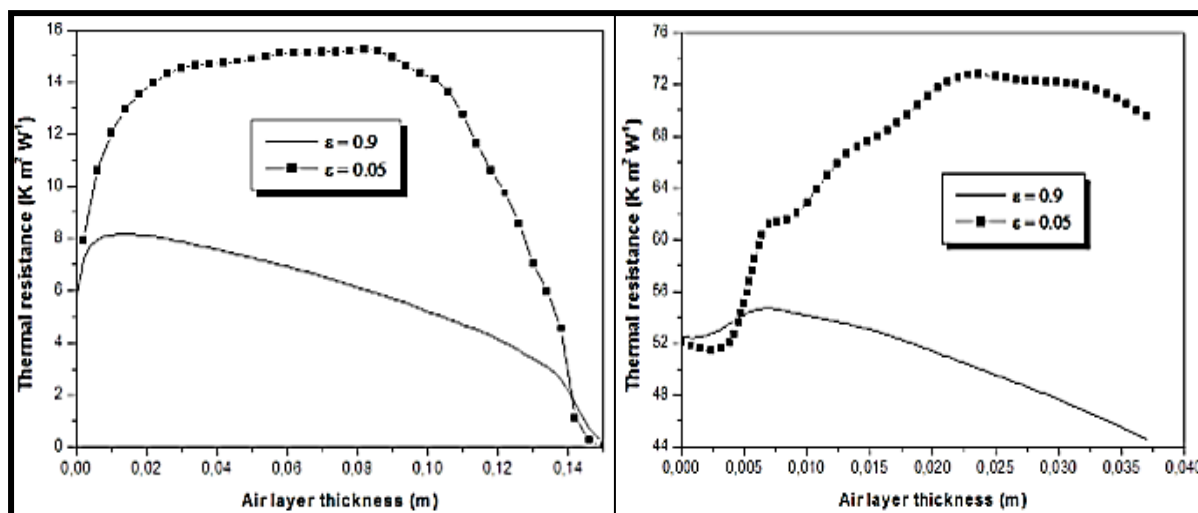


Fig.II.14- Résistance thermique en fonction de l'épaisseur de la cavité d'air, cas d'un bloc de ciment.

(Source : S. M. A. Bekkouche).

¹³ Bekkouche, S., et al., *Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance*. Journal homepage: [www. IJEE. IEEFoundation. org](http://www.IJEE.IEEFoundation.org), 2013. 4(3): p. 459-466.

II.3.3. Système d'isolation dynamique passive-active

Mohammed Salah-Eldin Imbabi,¹⁴ a présenté dans son étude, le concept de base concernant une nouvelle technologie d'isolant dynamique de vide (VSDI). Le VSDI, a été conçu dans l'esprit de la Passive House Standard, il est considéré comme une solution idéale pour les nouvelles constructions et les applications de rénovation. Les résultats de cette étude indiquent que la valeur lors du fonctionnement de la paroi VSDI durant l'été est de $0,14 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ représente une réduction de 65% par rapport à la valeur U statique de $0,40 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$. pendant l'hiver, la valeur dynamique moyenne " U " exposée est de l'ordre de $0,30 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$, représente une réduction de 25% par rapport à la valeur U statique de $0,40 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$. Étant donné que l'utilisation des matériaux d'isolation à hautes performances thermiques, telles que les aérogels de silice et les panneaux sous vide, pourraient contribuer à réduire l'épaisseur, est prometteur comme future alternative. (Cf.II.15).

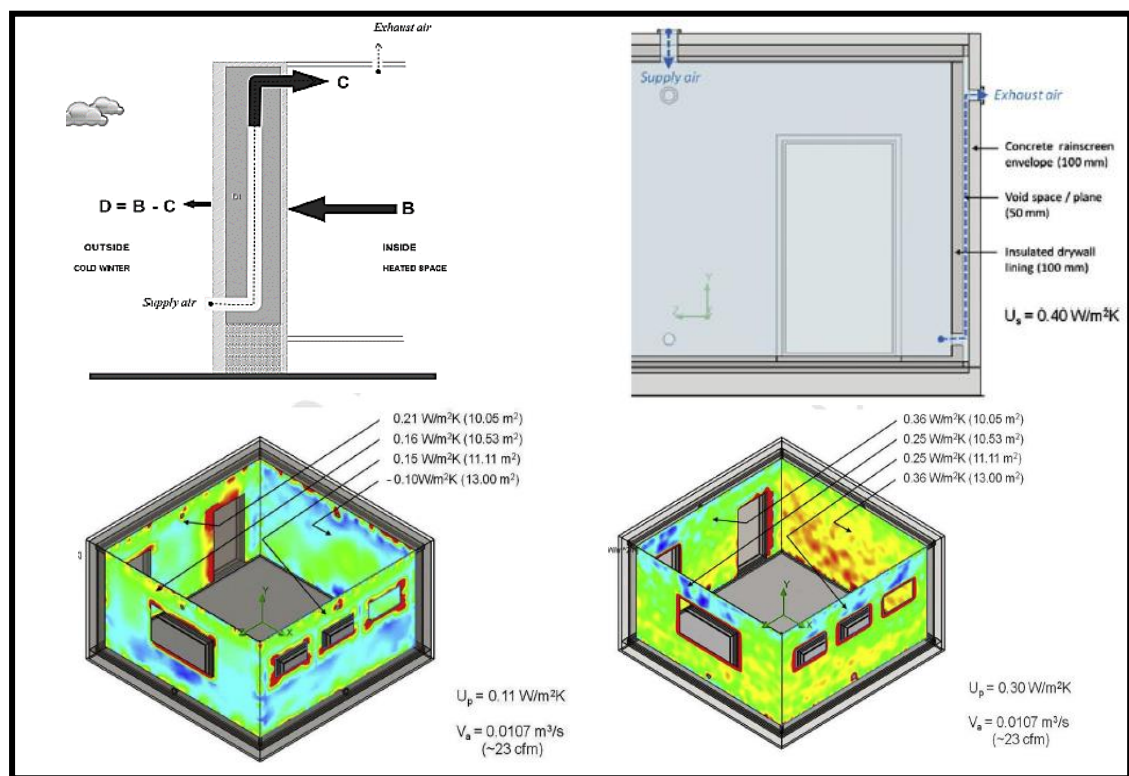


Fig.II.15- Détail de fonctionnement d'un système d'isolation dynamique passive-active pour tous les climats durant l'été et l'hiver. (Source : Mohammed Salah-Eldin Imbabi. 2013).

¹⁴Imbabi, M.S.-E., *A passive-active dynamic insulation system for all climates*. International journal of sustainable built environment, 2012. 1(2): p. 247-258.

II.4. Impact des isolants à haute performance thermique sur le confort thermique et la consommation d'énergie

Des efforts de recherche importants sont consacrés au développement de nouveaux matériaux isolants, (matériaux avec conductivité thermique inférieure à $0.1 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et superisolant (matériaux avec conductivité thermique en dessous de la conductivité de l'air libre à $0.025 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), tant en France (CEA Le Ripault, Ecole des mines, CSTB...), qu'en Europe, aux Etats-Unis (Université de Berkely et la NASA), au Japon et en Chine. Les recherches sont motivées par des enjeux scientifiques et économiques considérables. Il existe une forte concurrence entre les différents acteurs tant au niveau industriel qu'académique.

II.4.1. Isolation mince en aérogel

La réduction des pertes de chaleur est assurée en améliorant l'isolation de l'enveloppe du bâtiment (toit, sol, murs et fenêtres). Pour les bâtiments anciens et les nouveaux, l'épaisseur des couches d'isolation interne ou externe devient un enjeu majeur. Par conséquent, il y a un intérêt croissant pour les matériaux dits super-isolants, tels que les aérogels qui permettent de réduire l'épaisseur d'isolant à mettre en œuvre pour une même valeur de résistance thermique.

Projet CALEBRE (2013)¹⁵ est une maison de test qui a été construite au Campus de l'Université Park pour des objectifs de la recherche, l'une de ces chambres d'essai a été isolée à l'intérieur avec couverture d'aération 20 mm. Elle a été soumise à un montage d'essai de chauffage, dont les caractéristiques thermiques expérimentales ont été déterminées et les déperditions thermiques ont été également analysées à l'aide de l'imagerie thermique avant et après l'adaptation. Les murs intérieurs sont isolés avec 20 mm de couche en aérogel. La valeur « U » de la paroi externe après sa rénovation a été déterminée à $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$, la réduction des pertes de chaleur est aux alentours de 46 %. Ce résultat démontre que l'isolant mince en Aérogel a contribué à la préservation du confort thermique intérieur, notamment dans le domaine de la réhabilitation thermique des constructions offrant des caractéristiques thermiques supérieures et garantissant également la réduction de l'impact des ponts thermiques dans les bâtiments. Voir (Fig-II-16).

¹⁵Cuce, E., et al., *Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **34**: p. 273-299.

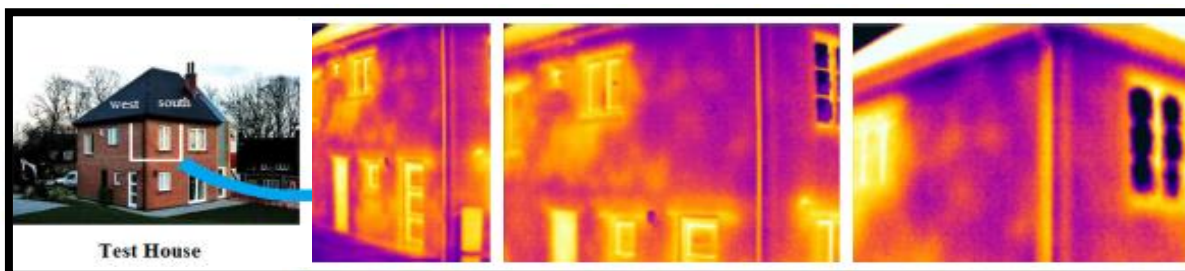


Fig.II-16- Effet de l'isolation de l'aérogel sur la perte de chaleur à travers la paroi externe de la maison de test (source :E. Cuce et al. (2014). Réadapté par Auteur.

II.4.2. Panneaux d'isolation sous vide (VIP)

Les matériaux super-isolants thermiques peuvent être classés en deux catégories : les panneaux d'isolation sous vide (VIP), et les matériaux super-isolants à pression ambiante. Pour ces derniers, les propriétés d'isolation exceptionnelles proviennent de leur capacité à réduire de façon drastique la contribution de la conduction gazeuse au transfert thermique. Cette réduction est le résultat du confinement de l'air à l'intérieur de petits pores, selon un mécanisme physique connu sous le nom d'effet **Knudsen**.

B. P. Jelle et al¹⁶ ont ainsi montré qu'en gagnant 20 cm d'épaisseur par rapport à un isolant thermique conventionnel pour atteindre une résistance thermique conforme aux réglementations thermiques, le PIV devenait rentable dès que le prix du m² à l'achat dépasse les 2200 €.m⁻². Il existerait donc un gisement de rénovation très important par les isolants minces¹⁷. Un calcul similaire réalisé pour les aérogels montre que le seuil de rentabilité se situe autour de 3300 €.m⁻². L'intérêt économique des superisolants de type aérogels devrait s'améliorer encore, grâce à l'accroissement des capacités de production faisant inévitablement chuter le coût des matériaux à (moyen) terme et à la percée de nouveaux développements technologiques.

Les résultats de A. Rashwan et al¹⁸, sur les possibilités offertes par l'utilisation de la technologie des nanomatériaux qui s'intègrent avec l'enveloppe du bâtiment pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments à travers

¹⁶ Jelle, B.P., *Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities*. Energy and Buildings, 2011. **43**(10): p. 2549-2563.

¹⁷ Rapport du commissariat général au développement durable L'état du logement en 2011. Service de l'observation et des statistiques, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr> 2013.

¹⁸Rashwan, A., O. Farag, and W.S. Moustafa, *Energy performance analysis of integrating building envelopes with nanomaterials*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2013. **2**(2): p. 209-223.

l'utilisation de logiciel de simulation d'énergie (Ecotect), montrent que la performance thermique du modèle nanométrique (NTM), en particulier la quantité de gain / perte de chaleur qui traverse l'isolant par rapport à une configuration d'enveloppe classique dans les conditions météorologiques typiques de l'Egypte-Assouan, (chaud et sec).

L'utilisation des isolants nanomatériaux peut améliorer les performances thermiques d'un bâtiment, en particulier les charges de refroidissement nécessaires pendant les mois d'été, et d'atteindre une valeur - U- ultra-faible et des performances avancées des gains de l'enveloppe (murs : 40% - toits : 44% %), Dans l'ensemble : 72%, moins que le modèle de référence. La valeur de déphasage thermique des peintures Nano est de 12.05 h et de l'isolation Nano pour les murs : 16.48 h – et les toits : 12.66h. La lecture des résultats démontre l'efficacité des isolants nanotechnologiques par rapport à ceux des matériaux isolants traditionnels. Ces technologies ultra-énergétiques efficaces sont nécessaires pour la politique énergétique dans le secteur du bâtiment. Voir fig. II-17-

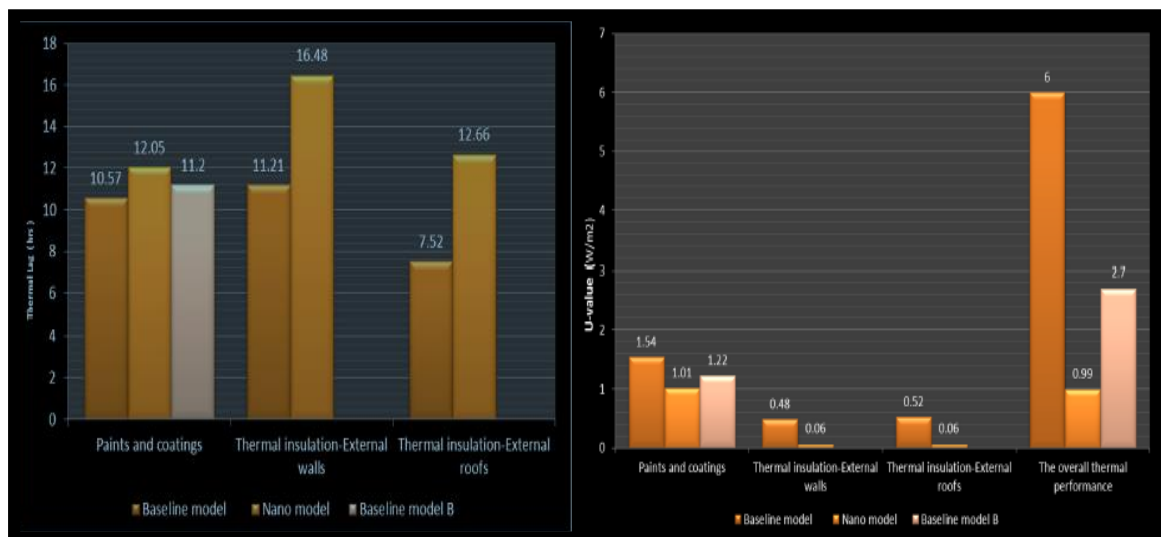


Fig.II.17- Augmentation des valeurs de déphasage thermique du modèle Nano par rapport au modèle de référence (à gauche). U-valeurs ultra-basses du modèle Nano moins que le modèle de base (à droite).

(Source : A. Rashwan, 2013).

II.4.3. L'isolation mince et réfléchissante (CMR)

Les CMRs (composite mince et réfléchissant), possèdent une faible émissivité thermique, qui peut aller de 0.05 jusqu'à 0.2 selon le nombre des couches existantes dans le composite. Il existe de grandes variétés d'isolants réfléchissants : les composites à bulles représentés dans la figure 16. Par un film de polyéthylène emprisonnant des bulles d'air et les composites multicouches qui sont constitués d'une mousse plastique, ou une matière fibreuse de plusieurs couches séparées par des feuilles réfléchissantes intermédiaires. Afin

d'assurer le bon fonctionnement des CMR comme une barrière aux rayonnement infrarouge, il est primordial que les faces réfléchissantes soient adjacentes à une ou deux lames d'air (respectivement d'un ou des deux côtés). En effet, il faut garantir la bonne mise en œuvre de ces isolants afin de réduire le transfert thermique par rayonnement. Voir fig. II-18-

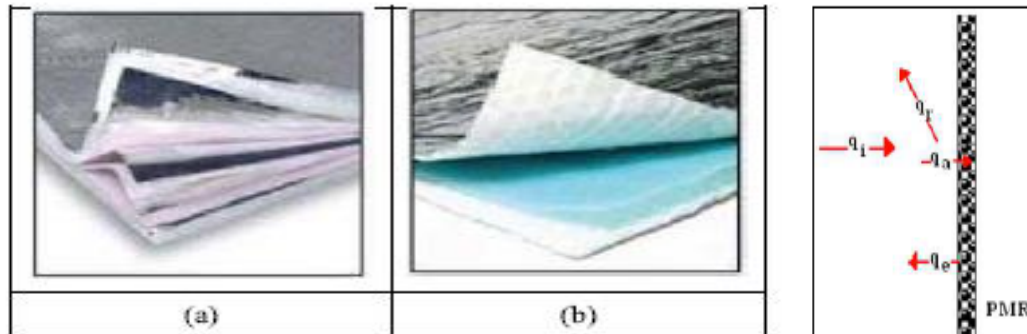


Fig.II.18- Isolants mince réfléchissants (a) multicouche, (b) à bulles. (c) - Principe de fonctionnement d'un CMR.

II.4.4. L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en stockage d'énergie en bâtiment

L'utilisation des matériaux à changement de phase dans le bâtiment est un concept relativement ancien. Il n'a jamais pu être réellement exploité en raison des difficultés de mise en œuvre inhérente à ces matériaux (Noël et al., 2007). Les MCPs matériaux changement de phase ont pour particularité de pouvoir stocké la chaleur latente, la chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa. Les MCPs reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, il se liquéfie en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et la restituée lorsque la température diminue. Les matériaux à changement de phase se trouvent principalement dans le bâtiment comme un isolant sous la forme de plaques encapsulées et la chaleur emmagasinée en période de surchauffe. Lorsque le bâtiment se refroidit, le MCP se solidifie, restitue l'énergie stockée, et l'inertie thermique du bâtiment s'accroît.

D'après le fabricant de MCP, BASF micronal, une paroi contenant 2 cm de MCP fabriqué par BASF a la même performance en termes d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm ou un mur en béton d'épaisseur de 24 cm ou du bois massif d'épaisseur 38 cm. Voir fig. II-19.

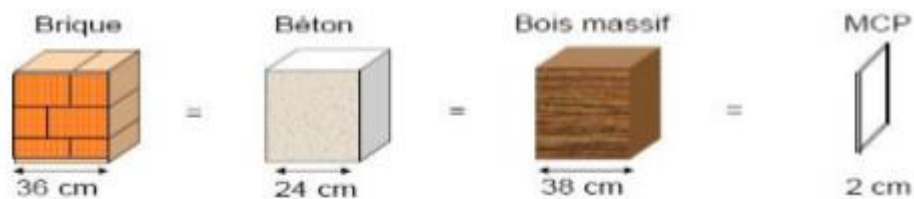


Fig.II.19. : Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau

(D'après Hill et al., 2004).

II.5- Les paramètres qui influent sur l'isolation

II.5.1. Effet de l'ombrage externe sur l'épaisseur optimale de l'isolant

Les dispositifs de protection solaire sont utilisés pour éviter les rayons directs du soleil, le gain de chaleur et la consommation d'énergie, et également procurer un impact significatif sur l'amélioration des conditions thermiques internes. L'association appropriée des dispositifs d'ombrage avec les types de verre, peuvent signifier d'importantes économies d'énergie, cela permet de régler l'effet thermique des fenêtres dans une large mesure. Ces dispositifs de protection extérieurs devraient être encouragés pour les utiliser comme des éléments architecturaux qui protègent l'enveloppe du bâtiment et les occupants des effets du rayonnement solaire.

E. Wati, P et. Al, a visé dans son étude d'optimiser les épaisseurs des couches d'isolation dans les murs extérieurs des bâtiments, en fonction du niveau d'ombrage. Le constat montre que lorsque le niveau d'ombre augmente, l'épaisseur optimale de l'isolation diminue, selon un rythme moyen de 0,035 cm, 0,029 cm et 0,036 cm par pourcentage de rayonnement solaire fixé respectivement sur les parois orientée sud, nord, est, ouest. Les résultats ont révélé que l'impact de l'ombrage externe sur l'épaisseur d'isolation optimale est plus important pour la paroi orientée est et ouest.¹⁹ L'étude menée par Yang et Hwang (1999) a indiqué également qu'une bonne installation d'ombrage externe, réalise une économie moyenne de 25 %, dans la consommation énergétique de la climatisation.

¹⁹Wati, E., P. Meukam, and M.K. Nematchoua, *Influence of external shading on optimum insulation thickness of building walls in a tropical region*. Applied Thermal Engineering, 2015. **90**: p. 754-762.

II.5.2. L'effet des ponts thermiques

Les ponts thermiques entraînent des déperditions de chaleur supplémentaires par rapport aux déperditions à travers les parois du bâtiment. Dans un bâtiment non isolé, les ponts thermiques représentent de faibles déperditions (en général inférieures à 15 %) car les déperditions totales par les parois sont très élevées. En revanche, dès lors que les parois sont fortement isolées, le pourcentage de déperditions dû aux ponts thermiques devient important. Il est de plus de 30 %²⁰. Mais, les déperditions globales sont très faibles. Les principaux ponts thermiques d'un bâtiment se situent aux jonctions des façades et planchers, façades et refends, façades et toitures, façades et planchers bas. Au niveau des percements (portes, fenêtres, loggias...), il s'agit de ponts thermiques structuraux. Ces ponts thermiques sont plus ou moins importants selon la constitution des parois, si elles sont isolées ou non. La photo par caméra infrarouge montre les ponts thermiques des pignons du mur de refend qui apparaissent clairement.

Il est possible de les éviter dès la phase amont du projet en utilisant les programmes de simulation. La Fig-II-20- ci-dessous reproduit une sortie écran d'un programme statique (Kobru 86) étudiant la répartition des températures dans un détail constructif (raccord mur/toiture). A partir de la géométrie du détail et des conditions de température intérieure et extérieure, une matrice de calcul qui détermine point par point les températures dans la paroi.

Julien Q.et. al,²¹ développent une méthode, précise et originale à l'aide d'un logiciel de simulation TRNSYS 17 qui permet de prendre en compte les effets réels des ponts thermiques en intégrant les techniques de simulation énergétique de bâtiment. Les paramètres de chaque couche, sont insérées dans le simulateur pour évaluer la conformité de ces structures, et pour comparer la différence relative de la consommation annuelle d'énergie et la différence mensuelle maximale, de chauffage et de la climatisation, en fonction des valeurs de la structure initiale. Les résultats de l'étude montrent que L'erreur annuelle de la meilleure structure vérifiée est d'environ 0,1 - 0,2% pour le chauffage et le refroidissement, pour les autres cas, cette erreur atteint plus de 0,6%, et celle mensuelle atteint environ 2% et 4% pour le chauffage et le refroidissement, néanmoins elle est inférieure à 1% pour les

²⁰ Malek Jedidi Omrane Benjeddou, La thermique du bâtiment du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation, p.52 édition 2016 .

²¹Quinten, J. and V. Feldheim, *Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method*. Energy and Buildings, 2016. **110**: p. 284-293.

meilleurs cas. Cependant, la zone d'influence du pont thermique doit être remplacée par la structure équivalente, du fait que la méthode de modélisation des ponts thermiques conduit à des résultats précis et à des solutions meilleures se rapprochant à la réalité pour déterminer les pertes et les gains pendant la simulation de la consommation d'énergie.

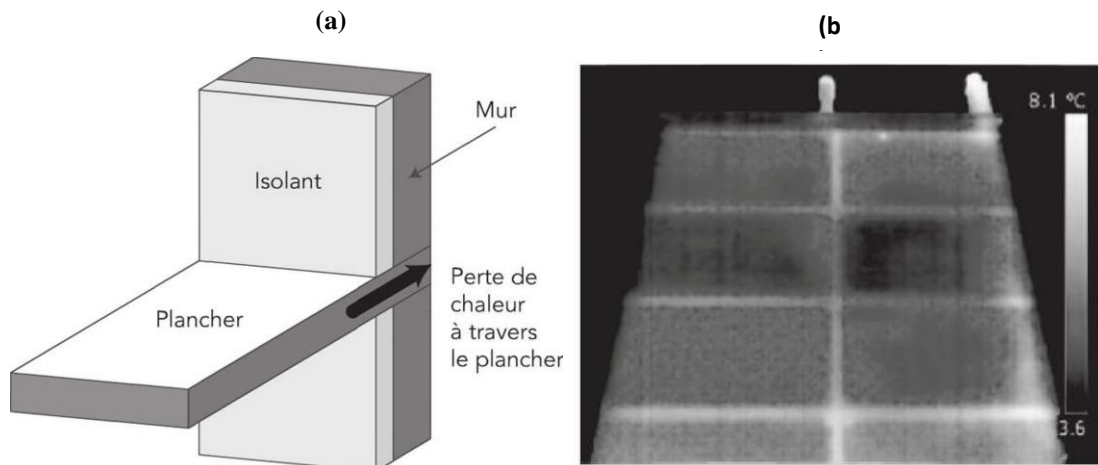


Fig.II.20. (a) Perte de chaleur à travers un pont thermique. (b) Les ponts thermiques des pignons et du mur de refend, (Source : Malek Jedidi 2016).

II.5.3. Phénomène de condensation dans une paroi avec isolation et sans isolation

Les phénomènes de condensation de surface peuvent être facilement contrôlés. Le plus souvent il s'agit d'un problème de défaut d'isolation ou d'une absence d'isolation.

Exemple avant isolation

Une paroi simple en béton de 14 cm d'épaisseur et de conductivité thermique $X = 1,7$ W/m°C. Le calcul de la résistance totale de la paroi permet de définir le profil de température pour deux hypothèses (méthode graphique selon proportions des résistances thermiques de chaque composant de la paroi) :

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} = 0,13 + 0,04 + \frac{0,14}{1,7} = 0,25 \text{ m}^2 \text{ °C/W}$$

On détermine le profil de température pour les deux cas suivants :

- ▶ cas 1 : la température extérieure est égale à -10 °C ;
- ▶ cas 2 : la température extérieure est égale à -20 °C.

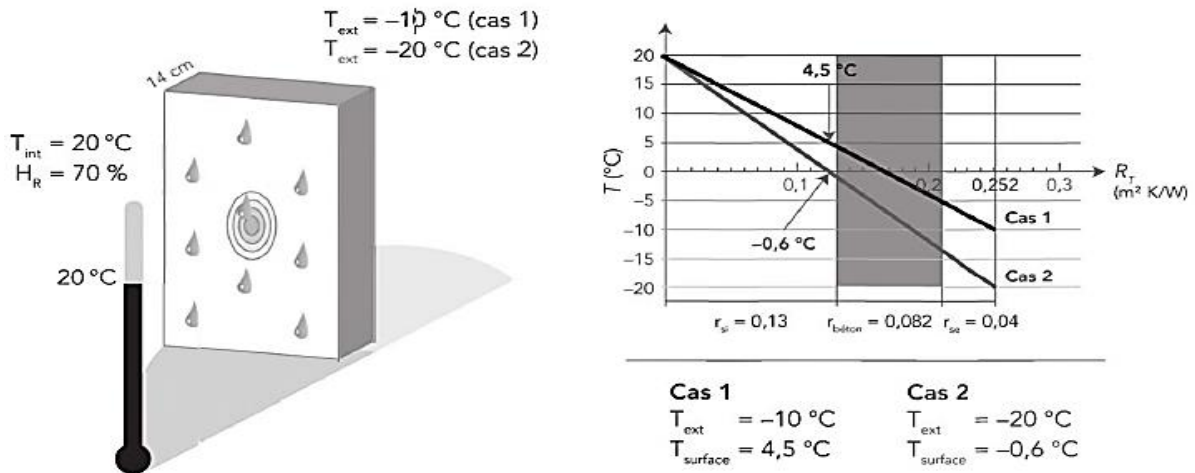


Fig.II.21. Profil de température pour une paroi simple sans isolation. (Source : Malek Jedidi 2016).

Le profil de température permet de définir les températures de surface intérieure pour les deux hypothèses : $-0,6\text{ °C}$ et $4,5\text{ °C}$. Les conditions de température intérieure (20 °C) et de température de surface intérieure de paroi pour 70% d'humidité relative définissent une température de point de rosée pour toute température de paroi inférieure à 15 °C \Rightarrow il y a phénomène de condensation dans les deux cas.

Exemple après isolation

L'isolation va permettre d'augmenter la résistance thermique de la paroi et faire augmenter la température de sa surface interne :

La nouvelle composition de la paroi de l'intérieur à l'extérieur est la suivante :

- ▶ 1 cm de plâtre de conductivité thermique $\lambda = 0,47\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$;
- ▶ 10 cm isolant de conductivité thermique $\lambda = 0,0317\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$;
- ▶ 14 cm de béton de conductivité thermique $\lambda = 1,7\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$.

La résistance thermique totale de la paroi est égale :

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} = 0,13 + 0,04 + \frac{0,01}{0,47} + \frac{0,1}{0,0317} + \frac{0,14}{1,7} = 3,423\text{ m}^2\text{ °C/W}$$

Le nouveau profil de température de la paroi isolée montre que la température de surface intérieure est de 19 °C pour les deux cas \Rightarrow pas de phénomène de condensation. (Cf .II.22).

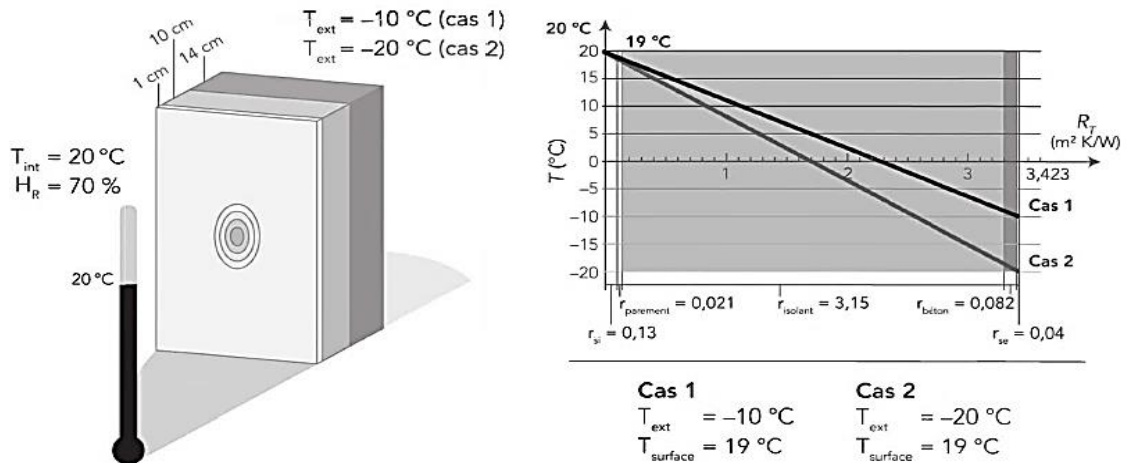


Fig.II.22. Profil de température pour une paroi simple avec isolation. (Source : Malek Jedidi 2016).

Généralement, il faut évacuer l'humidité piégée dans les deux côtes de la paroi provoquant les problèmes dus à la migration de vapeur et qui sont très rares lorsqu'il s'agit d'une isolation thermique par l'extérieure, contrairement, à celle de l'isolation par l'intérieure qui risque des pathologies importantes nécessitant la régulation des flux de vapeur. Souvent, prévoir au départ le traitement de ce phénomène avec un par-vapeur peut garantir la durabilité de la paroi, néanmoins dans le cas des climats humides, il est conseillé de réaliser une simulation hygrothermique dynamique pour s'assurer de la bonne conception des parois, et recourir aux matériaux capillaires qui permettent une rediffusion de la condensation en assurant un meilleur séchage.

Tab.II. 2 : Évolution de la conductivité thermique de quelques isolants en fonction de leur teneur en eau. (Source : Wufi Pro 4.2)

Isolant	Conductivité thermique sèche	Conductivité thermique à saturation
Ouate de cellulose	0.04	0.583
Laine minérale	0.04	0.6
Fibre de bois	0.042	0.175
Pavatex	0.044	0.16
Polystyrène expansé	0.04	0.14

II.6- Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la consommation énergétique

Les usagers des bâtiments exigent un meilleur confort en hiver et en été, qui demande l'utilisation de techniques de chauffage et de climatisation de plus en plus performantes pour maîtriser et fournir une température intérieure de confort. Le niveau de température requis sera fonction, des paramètres extérieurs qui influent la stabilité thermique de la construction.

II.6.1. Effet de l'isolation thermique sur l'efficacité énergétique

Bolattürk en 2008²² a déterminé cette fois-ci l'épaisseur optimale de l'isolant, en ce qui concerne à la fois les charges de chauffage et de refroidissement annuelles en utilisant la méthode des degrés heures. En examinant quatre différentes zones climatiques en Turquie, ils ont constaté que l'optimisation de l'épaisseur de l'isolant sur les charges de refroidissement est plus appropriée pour l'économie d'énergie dans les zones chaudes car l'épaisseur de l'isolant (polystyrène) a varié entre 0,032 et 0,038 m pour cooling degrees hours (CDHs) et entre 0,016 et 0,027 m pour heating degrees hours (HDHs).

II.6.2. L'impact de l'isolation du toit sur la climatisation

Fezzioui et al.²³ ont utilisé le logiciel TRNSYS pour étudier l'influence de l'enveloppe du bâtiment sur sa demande énergétique en période de surchauffe dans les villes du sud algérien Béchar et Tamanrasset. La comparaison des besoins de refroidissement pour les différents paramètres étudiés, nous montrent que l'isolation de la toiture a donné les meilleurs résultats, un taux de réduction de l'ordre de 21.55 % pour une toiture avec un faux plafond en plâtre avec lame d'air, et 20.31 % pour un faux plafond en bois avec lame d'air. L'utilisation de polystyrène d'une épaisseur de 5 cm a donné un taux de réduction de 23 %. L'isolation des parois diminue la consommation de refroidissement avec un pourcentage de 2.5 à 3 %, des valeurs moins importantes que celles de l'isolation de la toiture. En conclusion, la mesure d'amélioration la plus justifiée économiquement est donc l'isolation de la toiture.

Daouas et al.²⁴ Ont conclu que, les cas les plus avantageux pour réaliser des économies d'énergie sont l'utilisation de la pierre, et le mur sandwich en brique avec le polystyrène expansé comme isolant, dont l'épaisseur optimale est de 5,7 cm. Dans cette étude, les économies d'énergie peuvent atteindre jusqu'à 58% avec un amortissement économique de 3,11 ans. Ils ont étudié également les performances thermiques des murs dans des conditions

²² Bolattürk, A., *Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey*. Building and environment, 2008. **43**(6): p. 1055-1064.

²³ Fezzioui, N., et al., *Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien*. Revue des énergies renouvelables, 2008. **11**(1): p. 25-34.

²⁴ Daouas, N., Z. Hassen, and H.B. Aissia, *Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia*. Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(4): p. 319-326.

optimales, voir (Fig. II.23). Cette recherche est axée uniquement sur les paramètres économiques qui affectent l'épaisseur d'isolation optimale.

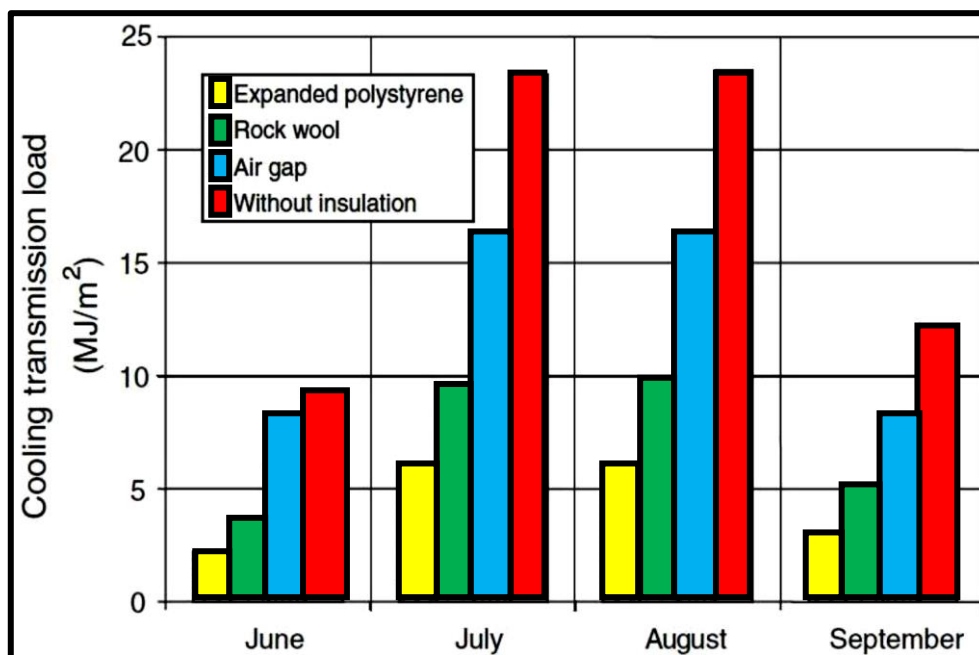


Fig. II. 23 : Effet de l'isolation avec lame d'air et d'autres matériaux analysés sur les charges de refroidissement mensuels. (Source : Daouas 2010). Réadapté par auteur.

Ultérieurement, cette étude a été confrontée avec la méthode des degrés-jours pour des valeurs de température intérieure différentes. voir (Fig. II.24).

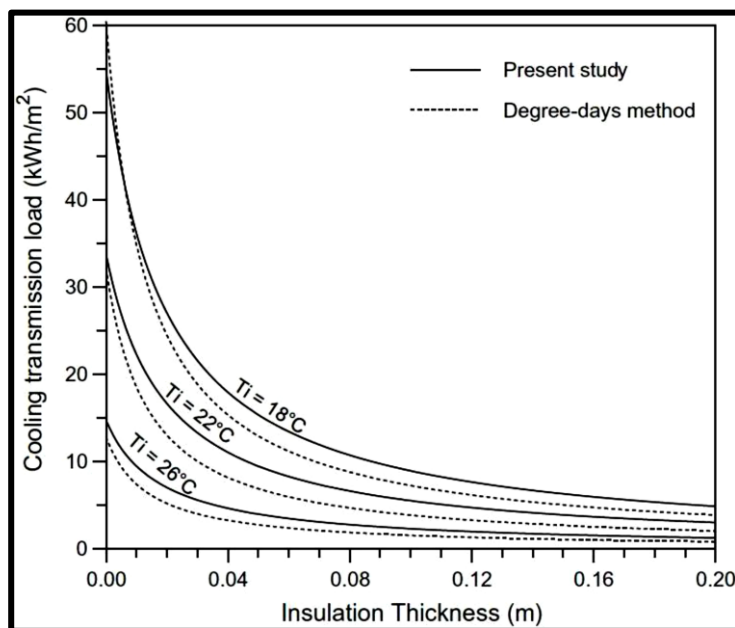


Fig. II. 24 : Effet de la température intérieure sur les charges de refroidissement et sur l'épaisseur optimale de l'isolant (Comparaison des deux méthodes). (Source : Daouas 2010).

II.6.3. Effet de l'orientation des parois sur l'épaisseur de l'isolation et la climatisation

Meral Ozel et al²⁵. Son objectif principal dans cette étude est de déterminer l'épaisseur optimale de l'isolation en fonction des besoins de refroidissement des bâtiments dans un climat chaud. L'étude est effectuée dans des conditions climatiques stables pour différentes orientations des murs, pendant la période estivale à Antalya, en Turquie. Un programme informatique Matlab a été utilisé pour calculer les caractéristiques thermiques de la charge de refroidissement, le déphasage temporel et l'amortissement, ensuite, déterminer les épaisseurs d'isolation optimales pour toutes les orientations murales à l'aide d'une analyse du coût sur une durée de vie du bâtiment étalée jusqu'à 20 ans. Il a été constaté que pendant la période d'été, l'épaisseur optimale d'isolation la plus faible et la charge de refroidissement minimale sont obtenues dans la paroi orientée vers le Nord, tandis que l'épaisseur de l'isolant la plus importante et la charge de refroidissement maximale sont localisées dans les parois orientées Est et Ouest. Les résultats sont comparés aux méthodes degré-jour et degré-heure, présentant que pour la saison de refroidissement, l'orientation la plus économique est celle du nord avec une épaisseur d'isolation optimale de 3,1 cm. Voir (fig. II-25-).

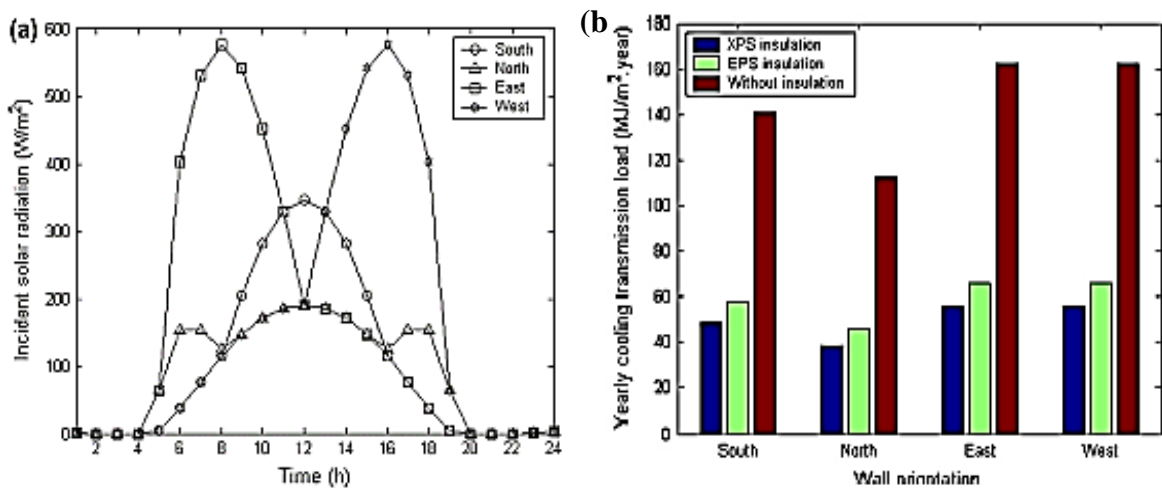


FIG.II.25. : a) Variation horaire du rayonnement solaire incident pour juillet, b) Charge annuelle de transmission de refroidissement des murs non isolés et 3 cm isolés pour toutes les orientations murales. (Source : Meral Ozel. 2014).

²⁵ Ozel, M., *Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate*. Energy conversion and management, 2013. **66**: p. 106-114.

II.6.4. Estimation des performances énergétiques du bâtiment dans le contexte méditerranéen

L'étude de (Laaouina, Benhamou, & Bennouna, 2012) montre que l'isolation thermique du toit est nécessaire pour le climat de Marrakech, cette isolation diminue le besoin en climatisation de 42% et de 18% pour le chauffage. Par contre, l'isolation thermique des murs extérieurs présente un effet mitigé. Cette isolation a un effet bénéfique en hiver mais présente un effet opposé en été. Les résultats des mesures expérimentales de température dans la maison ont été entreprises durant août 2011 sans occupation humaine et sans ventilation naturelle, montrent que la température dans la maison reste quasi-constante et a rarement dépassé 31°C à l'étage et 29°C au RDC, alors que la température extérieure a enregistré des pics au-delà de 35°C durant la majeure partie de la période du monitoring. La température dans la maison aurait été plus agréable avec une ventilation nocturne, étant donné que la température externe présente des minimas en dessous de 25°C durant toutes les nuits du monitoring.

(Benouali et al., 2011) ont étudié le comportement thermique de ces deux bâtisses et décrit les paramètres thermiques des parois de mur en BTC déterminés. Les investigations menées ont montré qu'une construction réalisée en mur homogène (sans isolant) peut aisément satisfaire les conditions passives pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement, ce qui peut constituer une solution garante d'économies d'énergie et de respect de l'environnement. Les résultats obtenus indiquent que la bâtisse réalisée en mur homogène est apte à remplir les conditions d'un fonctionnement passif, et est donc bien adapté au climat algérien. Il est vrai que si une isolation totale est intéressante en été, elle freine par contre les apports solaires gratuits du jour en hiver. Sur cet aspect, le rôle de l'isolant reste mitigé pour le contexte étudié



Prototype MEDENEC (PM)



Prototype Bioclimatique (PB)

Photo 1. Bâtisses en BTC réalisés au CNERIB

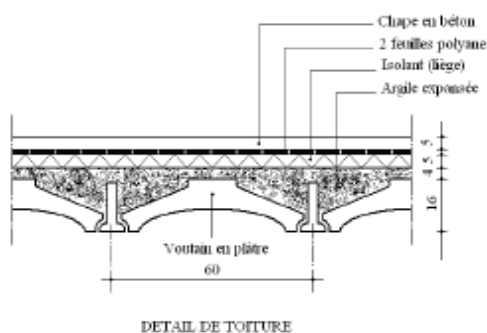


Fig.II. 26. Composition de la toiture dans (Prototype bioclimatique).

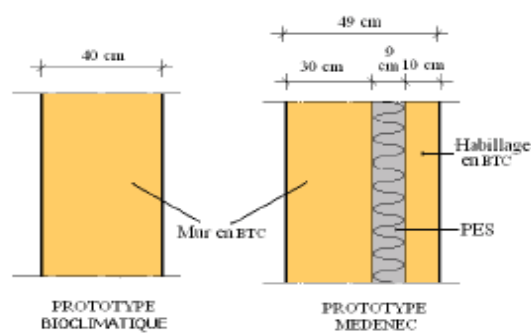


Fig.II. 27. Conception du mur chaque cas

Les figures 26 et 27 présentent le profil des ambiances interne et externe pour les journées d'été et d'hiver. L'isolation thermique complète du prototype PM a conduit à des conditions confortables l'été. Pour le prototype PB, nonobstant des températures nocturnes internes supérieures à celles de l'air extérieur, une ventilation naturelle nocturne (indispensable dans le cas étudié) permettra d'atténuer cette surchauffe interne. Sur un autre plan, selon que la bâtisse est isolée ou non, cette étude a mis également en évidence une variabilité dans les modes de transfert de chaleur intervenant lors des échanges diurnes et nocturne.

Tableau .II.3. Valeurs maximales et minimales des paramètres pour un jour d'été et d'hiver

		T_{int} (°C)		T_{ext} (°C)	HR int (%)		HR ext (%)
		PB	PM		PB	PM	
Max	Eté	32,71	27,8	38,46	67	68	96,00
	Hiver	17,27	13,8	20,8	56,5	80	87
Min	Eté	30,92	26,1	22,59	64	41	30
	Hiver	16,37	12,5	9,9	55,5	75	34

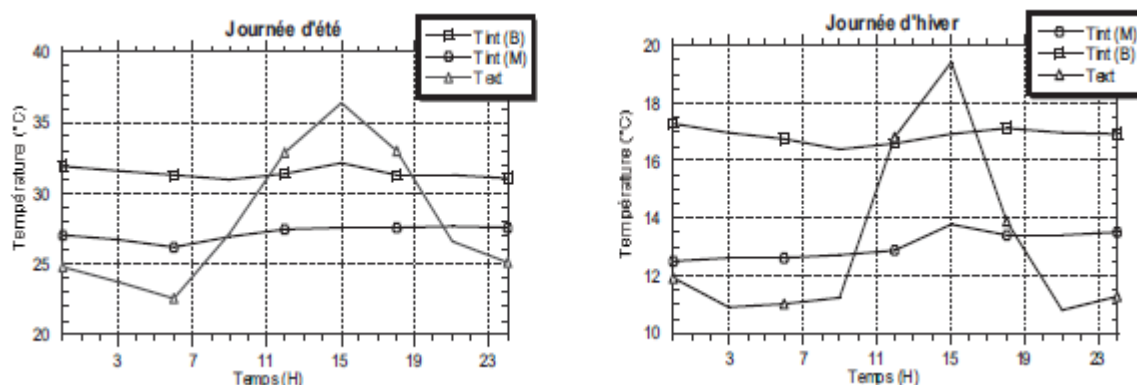


Fig. II.28. : Profil de la température extérieure (T_{ext}), interne prototype PB($T_{int}(B)$)et interne prototype PM($T_{int}(M)$), Source : (Benouali, Brara, Mahdad, & Mokhtari, 2011)

L'épaisseur de l'isolant a certainement un rôle non négligeable sur les performances thermiques du local. Pour la même constitution de l'enveloppe, (Annabi et al., 2006) ont considéré trois valeurs différentes de l'épaisseur de l'isolant. Le constate, à partir de la figure 29, le raccourcissement de la période de chauffage pour une épaisseur d'isolant égale à 8 cm, elle s'étale sur 4 mois (décembre - mars) par rapport aux deux autres épaisseurs (2 et 4 cm) dont la durée de chauffage est allongée de deux mois de plus (novembre - avril). La figure 6 montre que l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant entraîne une réduction des besoins de chauffage, donc une décroissance des pertes. La diminution des besoins est de l'ordre de 11 % en passant de 2 à 4 cm d'isolant, de 3 % en passant de 4 à 8 cm et de 14 % si on passe de 2 à 8 cm. On note qu'en arrivant à un certain niveau d'épaisseur, l'écart des besoins est peu considérable.

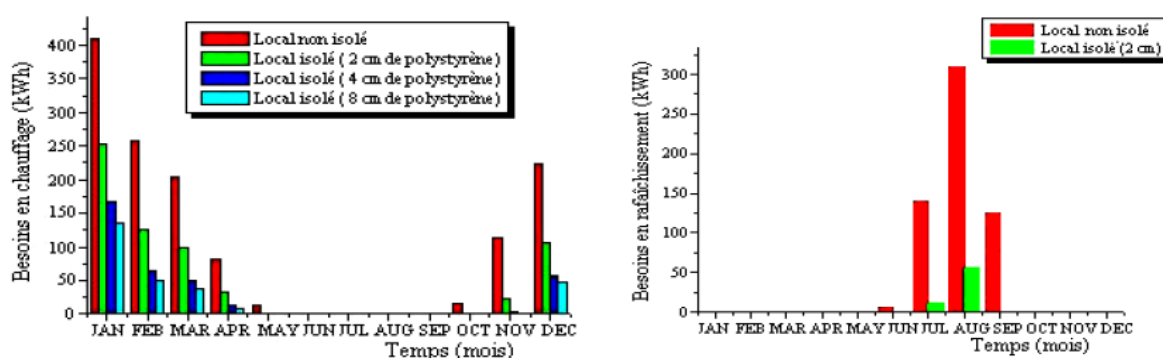


Fig.II.29. (À gauche) Influence de l'isolation sur les besoins mensuels de chauffage et à droite Influence de l'isolation sur les besoins mensuels de rafraîchissement (Oran) source : (Annabi, Mokhtari, & Hafrad, 2006)

N. Kadri et A. Mokhtari²⁶, ont présenté les résultats d'une étude de réhabilitation thermique de l'enveloppe d'un bâtiment afin d'améliorer ses performances thermiques et

²⁶Kadri11, N. and A. Mokhtari22, Contribution à l'étude de réhabilitation thermique de l'enveloppe du bâtiment. *Revue des Energies Renouvelables*, 2011. 14(2): p. 301-311.

énergétiques. En conséquence, l'objectif consiste à chercher les procédés qui améliorent le confort thermique et qui diminuent la consommation énergétique d'une manière passive.

Un calcul du bilan des déperditions calorifiques et des simulations à l'aide d'un code de calcul a été effectué sur un habitat collectif pour définir son identité thermique et mesurer l'impact de la réhabilitation sur la température intérieure et les besoins énergétiques.

Les résultats montrent que les déperditions après réhabilitation de l'enveloppe sont inférieures que celles du cas réel, et que l'amplitude de température entre les deux cas est de 2.5 °C, un gain de chaleur très utile après l'amélioration du confort thermique tout en diminuant la consommation d'énergie. Cependant en été, si la ventilation nocturne est ignorée, la forte isolation peut causer des surchauffes importantes, La consommation mensuelle de chauffage et de climatisation après réhabilitation a constitué la moitié 50 % des besoins du cas normal. Ces résultats obtenus des deux étapes démontrent que l'isolation thermique extérieure de l'enveloppe et le type de vitrage sont les solutions les plus efficaces qui permettent une réduction importante des besoins énergétiques. Voir (figure II-30-31).

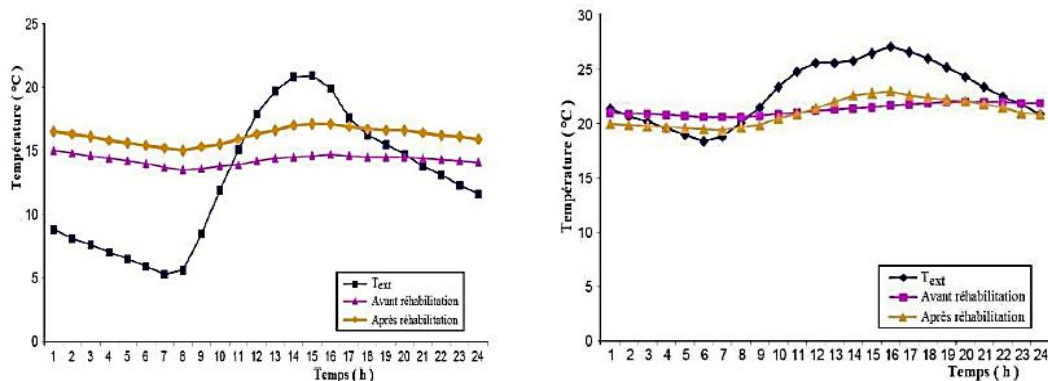


Fig.II- 30- : Evolution de la température de l'ambiance intérieure avant et après la réhabilitation pour le 1^{er} Janvier et le 1^{er} juillet. (Source N. Kadri 2011).

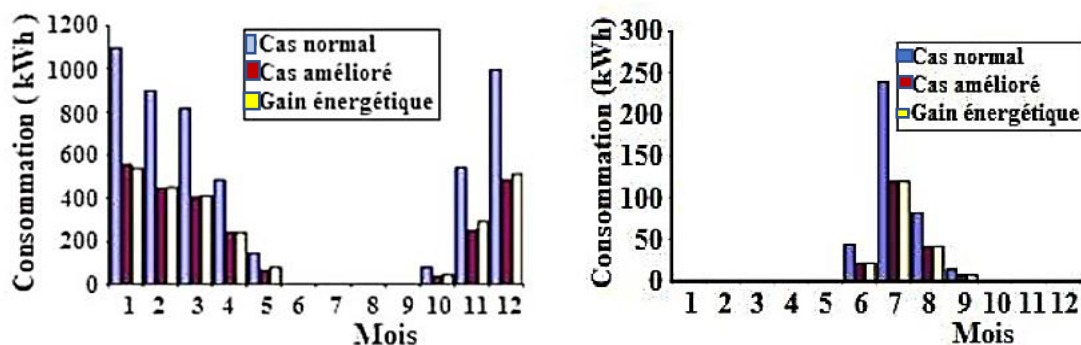


Fig.II-7- : Comparaison des besoins mensuels en chauffage et en climatisation avant et après réhabilitation. (Source N. Kadri 2011).

Conclusion

Les résultats de recherches exposés dans ce chapitre, montrent tous l'efficacité de l'isolation thermique sous différents climats, dans la création du confort thermique et la réduction de la consommation énergétique. En hiver, une isolation extérieure efficace permet au bâtiment d'augmenter sa performance thermique par rapport aux variations de la température extérieure, ce qui est générateur de confort et d'économie. En été, les parois qui ont une isolation extérieure ventilée en permanence, ou bien une ventilation nocturne permettent d'évacuer tout supplément de chaleur afin d'éviter les risques de surchauffe, en dissipant la chaleur restituée par les murs inerte pendant la nuit.

La construction massive exposée au rayonnement solaire permet d'accumuler la chaleur le jour et de la restituer la nuit en hiver. En été, si on favorise la stratégie de la ventilation nocturne, le rafraîchissement dont le bâtiment bénéficie la nuit est conservé plus longtemps le lendemain au cours de la journée. L'effet de l'épaisseur de l'isolation et son emplacement sur les parois ont un impact très important sur le temps de déphasage et sur le facteur d'amortissement ainsi que la constante de temps relative aux perturbations extérieures est maximale lorsque l'isolation est placée du côté extérieur.

Les travaux ont confirmé que la performance thermique et énergétique du bâtiment en relation avec son isolation dépend aussi d'autres paramètres comme la nature, l'emplacement, et l'épaisseur de l'isolant, l'orientation, la forme du bâtiment, l'occultation, les matériaux de construction et l'inertie thermique, qui influent sur la performance thermique et l'efficacité énergétique de la construction. Ainsi, le développement de systèmes d'isolation à haute performance énergétique, à faible épaisseur et à coût acceptable, adaptés aux systèmes d'isolation par l'intérieur et l'extérieur, apparaît comme un enjeu majeur de la problématique nationale d'amélioration de l'efficacité énergétique pour le parc des bâtiments existants et bientôt du parc « neuf ».

Table des matières

Introduction	47
II.1. Facteurs généraux affectant la performance thermique des isolants	47
II.1.1. L'inertie thermique.....	47
II.1.2. Constante du temps.....	48
II.1.3. Effet de l'emplacement de l'isolant thermique sur le déphasage et l'amortissement.....	50
II.1.4. Relation entre isolation et inertie.....	52
II.2. Epaisseur optimale et position meilleure de l'isolation thermique	54
II.2.1. Épaisseur des isolants.....	54
II.2.2. Positionnement de l'isolant.....	55
II.2.3. L'Emplacement de l'isolant dans différentes configurations murale.....	59
II.2.4. L'effet de la ventilation nocturne sur l'isolation thermique.....	60
II.3. Multiples configurations sur l'isolation ventilée	60
II.3.1. Couplage isolation thermique avec ventilation nocturne.....	60
II.3.2. Effet de l'isolant ventilé sur le confort intérieur.....	61
II.3.2. L'impact de l'épaisseur de l'air sur la résistance thermique.....	64
II.3.3. Système d'isolation dynamique passive-active.....	65
II.4. Impact des isolants à haute performance thermique sur le confort thermique et la consommation d'énergie	66
II.4.1. Isolation mince en aérogel.....	66
II.4.2. Panneaux d'isolation sous vide (VIP).....	67
II.4.3. L'isolation mince et réfléchissante (CMR).....	68
II.4.4. L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en stockage d'énergie en bâtiment.....	69
II.5- Les paramètres qui influent sur l'isolation	70
II.5.1. Effet de l'ombrage externe sur l'épaisseur optimale de l'isolant.....	70
II.5.2. L'effet des ponts thermiques.....	71
II.5.3. Phénomène de condensation dans une paroi avec isolation et sans isolation.....	72
II.6- Effet de l'épaisseur de l'isolant sur la consommation énergétique	74
II.6.1. Effet de l'isolation thermique sur l'efficacité énergétique.....	75
II.6.2. L'impact de l'isolation du toit sur la climatisation.....	75
II.6.3. Effet de l'orientation des parois sur l'épaisseur de l'isolation et la climatisation.....	77
II.6.4. Estimation des performances énergétiques du bâtiment dans le contexte méditerranéen.....	78
Conclusion	82

- Al-Khawaja, M. J. (2004). Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation. *Applied Thermal Engineering*, 24(17), 2601-2610.
- Al-Sanea, S. A., Zedan, M., & Al-Ajlan, S. A. (2005). Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model. *Applied Energy*, 82(4), 313-330.
- Annabi, M., Mokhtari, A., & Hafrad, T. (2006). Estimation des performances énergétiques du bâtiment dans le contexte maghrébin. *Revue des énergies renouvelables*, 9(2), 99-106.
- Antonopoulos, K., & Koronaki, E. (1998). Apparent and effective thermal capacitance of buildings. *Energy*, 23(3), 183-192.
- Antonopoulos, K., & Koronaki, E. (2001). On the dynamic thermal behaviour of indoor spaces. *Applied Thermal Engineering*, 21(9), 929-940.
- Asan, H. (1998). Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 28(3), 299-305.
- Asan, H. (2000). Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *Energy and Buildings*, 32(2), 197-203.
- Benouali, H., Brara, A., Mahdad, M., & Mokhtari, F. (2011). Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimée.
- Bojić, M. L., & Loveday, D. (1997). The influence on building thermal behavior of the insulation/masonry distribution in a three-layered construction. *Energy and Buildings*, 26(2), 153-157.
- Çomaklı, K., & Yüksel, B. (2003). Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Applied Thermal Engineering*, 23(4), 473-479.
- Kossecka, E., & Kosny, J. (2002). Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building. *Energy and Buildings*, 34(4), 321-331.
- Laaouina, D., Benhamou, B., & Bennouna, A. (2012). Étude théorique et expérimentale de l'effet de systèmes passifs sur la charge thermique d'une maison type villa à Marrakech: AUGC-IBPSA.
- Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, & Zinzi. (2006). Optimisation of opaque components of the building envelope. Energy, economic and environmental issues. *Building and Environment*, 41(8), 1001-1013.
- Mahlia, T., Taufiq, B., & Masjuki, H. (2007). Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall. *Energy and Buildings*, 39(2), 182-187.
- Tsilingiris, P. (2006). Wall heat loss from intermittently conditioned spaces—The dynamic influence of structural and operational parameters. *Energy and Buildings*, 38(8), 1022-1031.
- Ulgen, K. (2002). Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, 34(3), 273-278.

Introduction

Une Architecture devrait être bien conçue et bien réalisée. La plupart des concepteurs savent aujourd'hui de quoi il s'agit : penser la fuite avant de penser la suite. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments constitue un pari majeur de la maîtrise des impacts de la consommation énergétique sur l'environnement. L'isolation thermique permet de maîtriser les besoins en énergie devant être consacrés au confort des occupants, en été et en hiver, ainsi limiter les échanges thermiques avant de chauffer ou de refroidir. Elle répond également à d'autres enjeux économiques et réglementaires.

Cependant, la politique de l'efficacité énergétique en Algérie reste à l'état embryonnaire vue la situation dont se trouve, les bâtiments qui sont privés de l'isolation thermique, cela a certainement provoqué une hyperconsommation de l'énergie par l'occupant durant les périodes de froid ou de grande chaleur, l'utilisateur se trouve contraint d'utiliser les dispositifs d'appoints, de chauffage et de climatisation, pour garantir son confort. Les mesures d'urgence à présent s'inscrivent dans l'exigence de l'application de la réglementation thermique DTR C3.2 en vigueur en utilisant l'isolation thermique lors de la construction des bâtiments neufs, pour atténuer les besoins de consommation du chauffage, de la climatisation et améliorer le confort de l'utilisateur.

Dans le présent travail, une investigation a été menée sur un modèle de bâtiment qui remonte à l'époque coloniale, (établissement Henry Machat), situé au chalet des pins. (cf. figure. III. 1), récemment réhabilité et réaménagé. Selon l'objectif de la recherche une campagne de mesures a été effectuée sur site, des échantillons représentatifs ont servi de support à l'analyse du comportement thermique de la construction, pour vérifier l'efficacité de l'isolation. Dans l'intention d'atteindre l'objectif fondamental qui consiste à évaluer le rôle et l'impact de l'isolation thermique sur l'environnement intérieur et la consommation énergétique dans le bâtiment, nous avons eu appel à l'emploi de deux outils de recherche, l'investigation avec les mesures in situ à l'aide d'instrumentation et la simulation à l'aide d'un logiciel informatique « TRNSys 16 ».

Cette investigation recherche à apercevoir l'impact de l'isolation thermique par l'extérieur sur le confort thermique intérieur et l'efficacité énergétique du bâtiment. L'étude s'est fixée dans l'objectif de mettre en évidence l'importance de l'isolation dans le comportement thermique de l'enveloppe. Une enquête comparative est enclenchée sur trois espaces situés à différents niveaux dans le même bâtiment. (RDC, étage courant et étage sous comble). La paroi du foyer situé au

(Rez-de-chaussée) est composée d'une double murette de brique avec une lame d'air, celle du mess (étage courant) est constituée d'un panneau sandwich (isolant thermique) de 8 cm fixé à l'extérieur du mur en brique, et concernant la paroi du magasin (étage sous comble) sa composition est identique à celle du mess. (Voir tableau.III.2).

En conséquence des résultats de l'analyse bioclimatique de la wilaya de Constantine, deux saisons sont retenues pour l'investigation, celle d'été et celle d'hiver. De ce fait les mesures de température et d'humidité relative se sont effectuées lors des mois les plus défavorable de chaque période. Le mois d'août en été et le mois de janvier en hiver, pour une durée de six jours en été avec deux scénarios distincts, et trois jours successifs en hiver : (janvier 2016, août 2016), chapitre conséquemment, donne un descriptif détaillé de trois échantillons et la méthodologie du travail sur terrain.

III-1- Présentation du cas d'étude

III.1.1. Aperçu sur le climat de la ville de Constantine

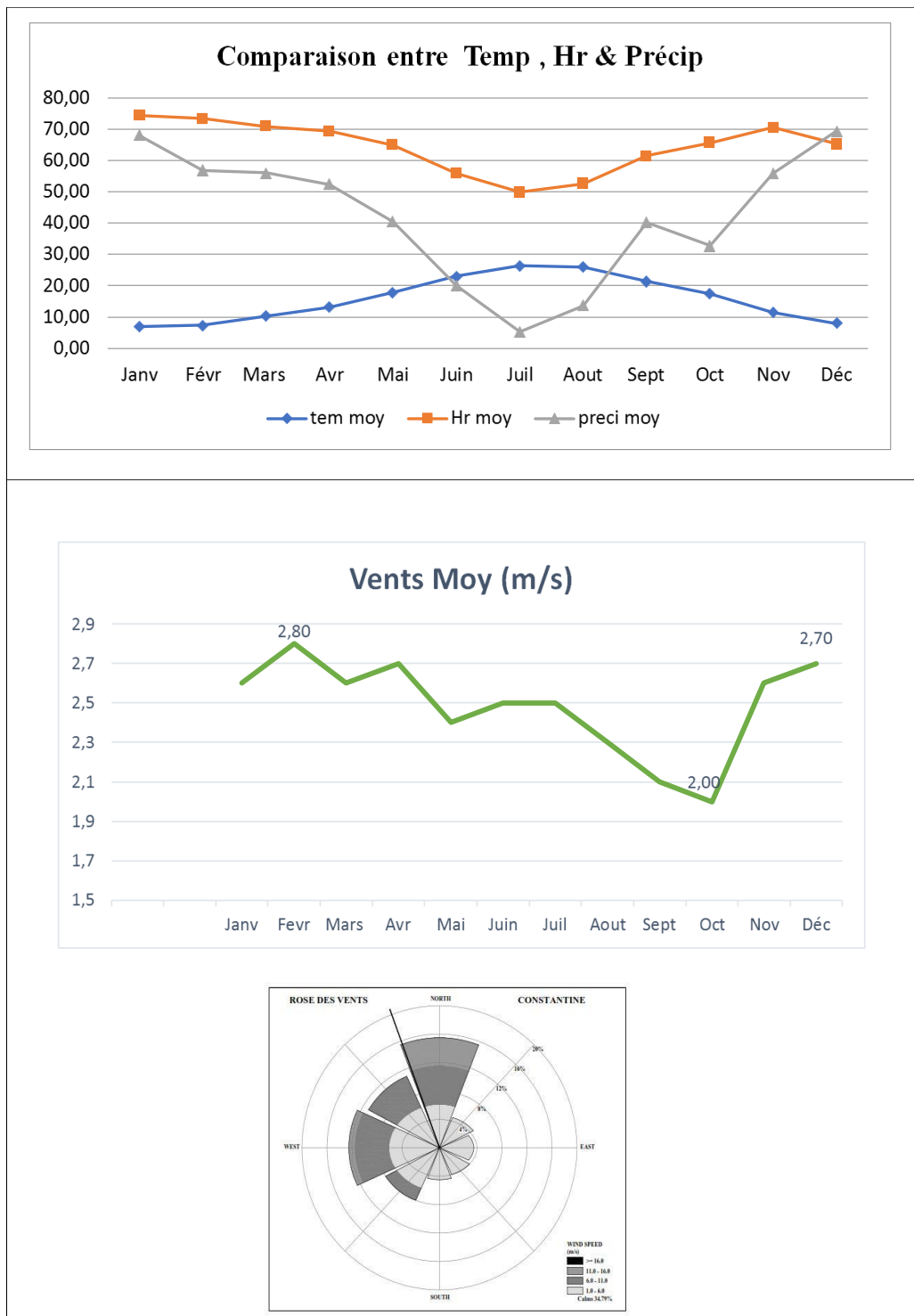
Les conditions climatiques régionales ont une influence sur la détermination du choix de l'orientation du bâtiment. Le positionnement du soleil pendant l'été et l'hiver, la direction et la vitesse du vent dominant, sont aussi fondamentales, pour définir l'orientation optimale de l'édifice. Pour cela, les résultats de l'analyse des conditions climatiques environnante tels que la température moyenne maximale et minimale de chaque saison, l'humidité relative, la direction du vent, le site, permet au bâtiment de s'intégrer parfaitement par rapport aux paramètres extérieurs qui caractérisent l'environnement immédiat de la construction. (Mcgee *c. et al*, 2013). Le climat de Constantine est un climat rude, chaud et sec en été, froid et humide en hiver (cf. Tab.II.1). Le paramètre qui est à l'origine des variations climatologiques est l'influence de l'altitude. Ces paramètres ont un impact sur le confort des occupants et la consommation énergétique du bâtiment.

Pour ce cas d'étude l'orientation de la construction n'est pas assez convenable pour l'été comme l'hiver. Celle du nord-est donnant sur la cour intérieure est protégée de l'intensité des radiations solaires en été. En revanche en hiver la façade est presque entièrement ombrée (cf. FigureIII.3 & 4), du fait que la durée d'ensoleillement est très courte. Celle du sud-ouest qui est exposée à l'extérieur de l'enceinte, intercepte le maximum de rayonnement solaire en hiver, cependant en été elle est exposée au rayonnement solaire direct et intense de l'après-midi jusqu'au

coucher du soleil. À ce moment les rayons solaires sont d'une incidence tangentielle, qui pénètrent plus profond à l'intérieur. L'azimut de la paroi sud-ouest est de +60° et celui de la paroi nord-est est de -120°.(figure.III.7).

Tab. III. 1 : Interprétation des données météorologiques de Constantine Période 2004-2015.

(Source : O.N.M 2015).



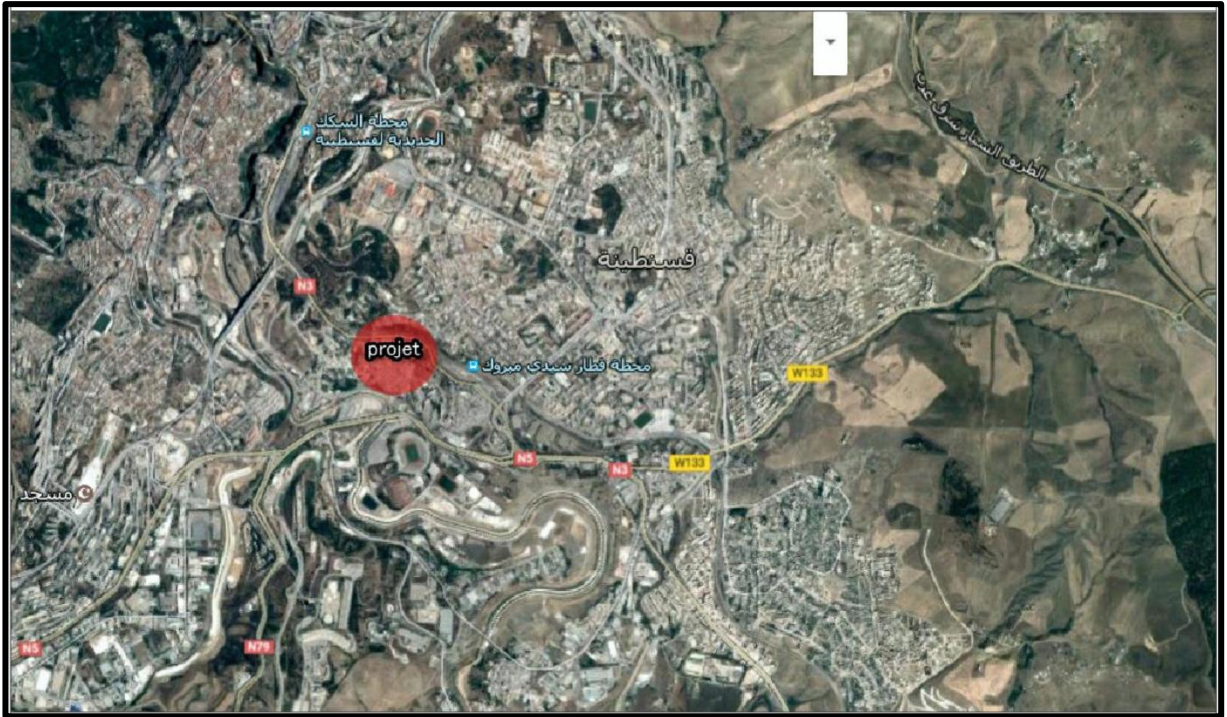


Fig- III-1- plan de situation du projet d'investigation sur image satellite Google (ville de Constantine). (Source : [http://users.telenet.be/h-consult/soleil/afstand_panelenZ.htm] 16/03/2017.).

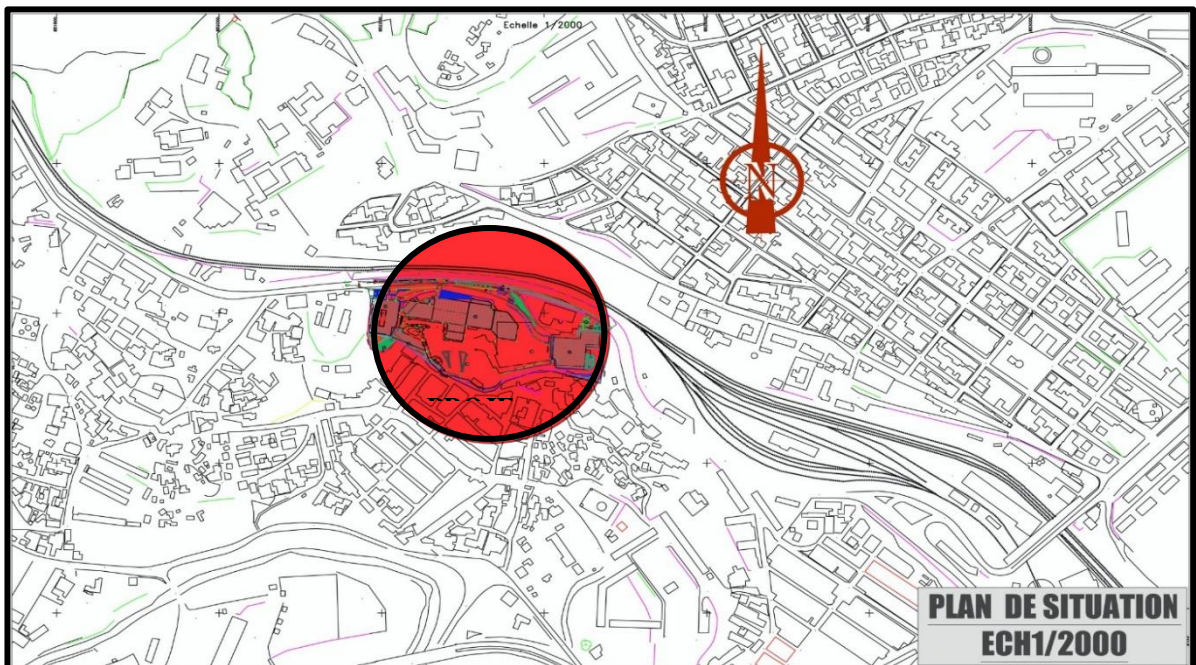


Fig- III-2- plan de situation du projet d'investigation, Source CD Rom (DUC-1993). Réadapté par auteur.

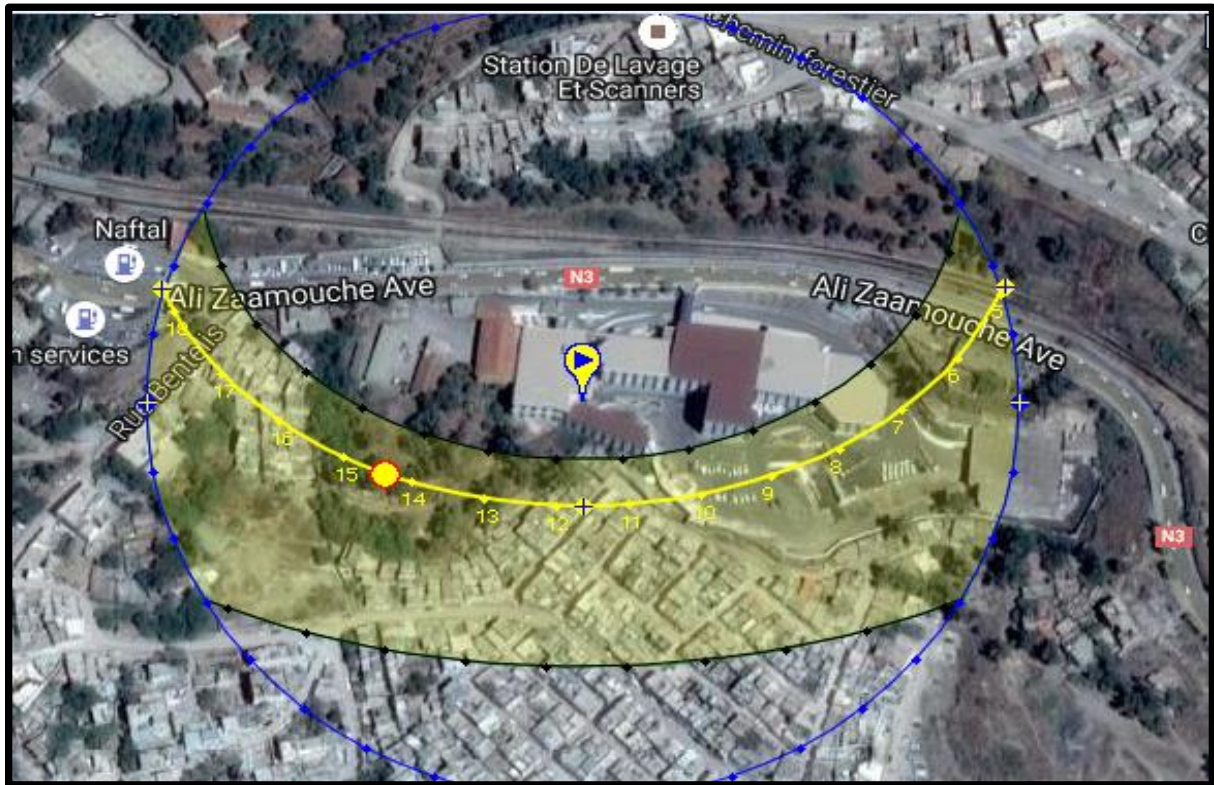


Fig-III-3- Présentation de la course solaire horizontale en été. (Source) : [http://users.telenet.be/h-consult/soleil/afstand_panelenZ.htm]18/08/2016.].



Fig-III-4- Présentation de la course solaire horizontale les zones ensoleillées et ombrées en été. (Source) : [http://users.telenet.be/h-consult/soleil/afstand_panelenZ.htm]18/08/2016.].



Fig-III-5- Présentation de la course solaire horizontale en hiver Source : [http://users.telenet.be/h-consult/soleil/afstand_panelenZ.htm]18/08/2016.].

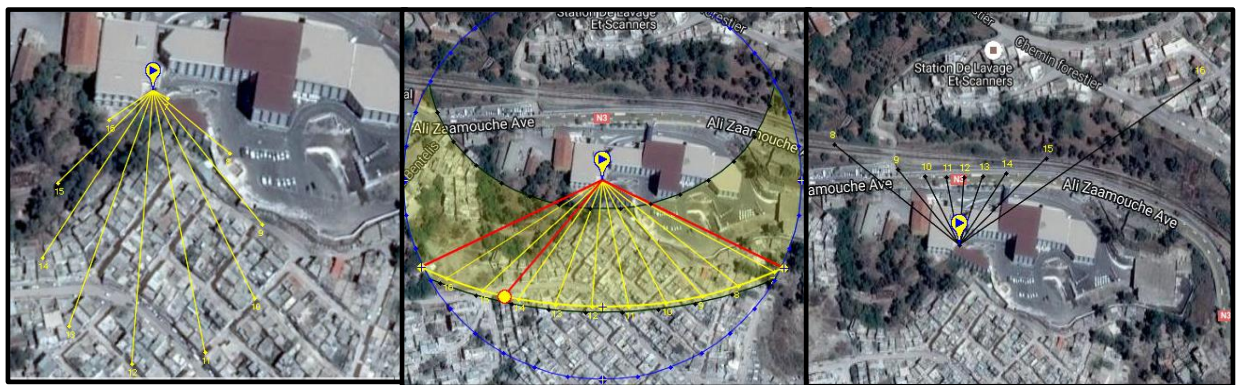


Fig-III-6- Présentation de la course solaire horizontale les zones ensoleillées et ombrées en hiver Source : [http://users.telenet.be/h-consult/soleil/afstand_panelenZ.htm]18/08/2016.].

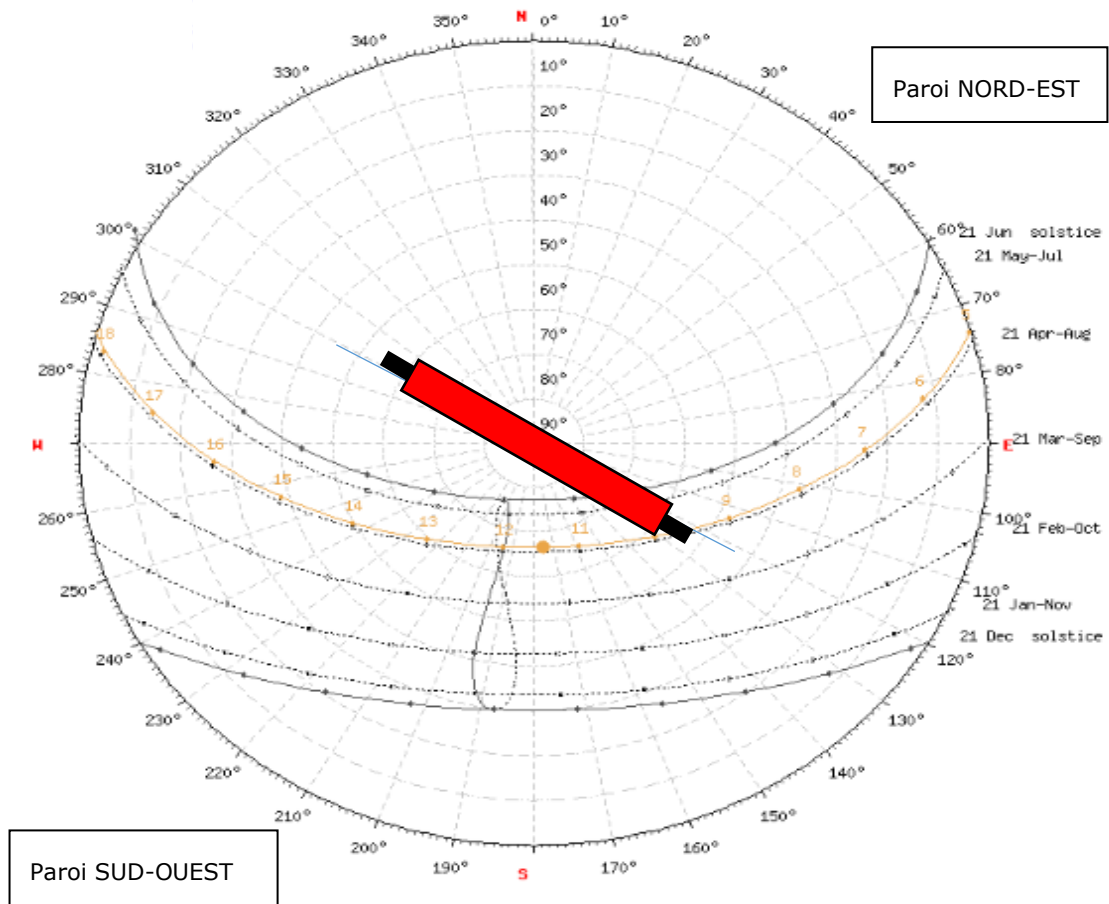


Fig- III-7- : Orientation de l'immeuble par rapport à la trajectoire solaire (Source : Auteur)

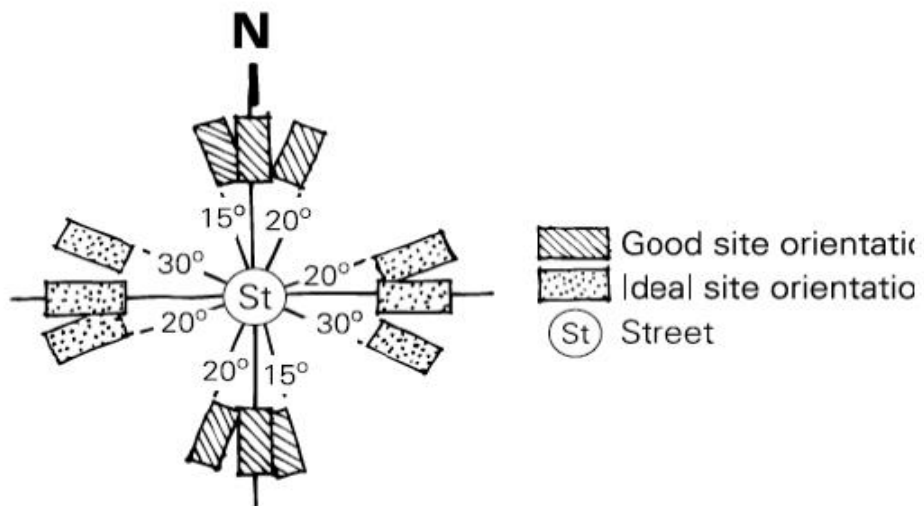


Fig- III-8- : Degré de flexibilité d'une orientation (Source : Mcgee C. et al.,2013.p.2).

III-2- Description du cas d'étude

L'imposante bâtisse qui servait de siège pour COMAMO est occupée par le service régional des finances et d'équipement de wilaya de Constantine (SRFE), domicile à l'endroit du siège de l'unité de production du matériel mobilier (ex-COMAMO). Cette entreprise a été soumise à la dissolution et la liquidation pendant la conjoncture économique vécue dans les années (90) en Algérie. L'usine longtemps abandonnée à son triste sort, après avoir été un fleuron de l'industrie à Constantine, cette structure, qui a pour vocation la fabrication des mobiliers métallique et en bois, ses produits à l'époque ont été exportés vers plusieurs pays de l'Afrique.

L'inexploitation de cette usine durant dizaines d'années, a provoqué la dégradation de l'état général des différents blocs. A cet effet, une étude technique a été lancée pour la réhabilitation de cette structure et la rendre fonctionnelle. Selon les recommandations du service de contrôle technique des constructions "CTC" les résultats de l'expertise du siège ont fait ressortir que les blocs en question, nécessitent des travaux de confortement, et cela pour se conformer à la réglementation parasismique du 2003. Néanmoins, ces travaux de consolidation qui ont été exigés engendrant une incidence financière sur les crédits alloués à cette opération. Pour cette raison, la commission technique du projet a préconisé la réalisation des aménagements intérieurs en bureaux paysagés, et utilisé un procédé léger enveloppant toute la façade extérieure du bâtiment, afin d'éviter la construction des murs de contreventement.

Pour habiller les murs extérieurs, le choix s'est arrêté sur l'utilisation des panneaux sandwich, qui ont une masse volumique de 34 kg/m³. Le procédé choisi a aussi d'autres caractéristiques techniques avantageuses représentées dans l'isolation thermique et phonique. La coïncidence dans la sélection du matériau qui couvre les surfaces extérieures du bâtiment m'a interpellé, pour vérifier l'influence de l'isolation des murs par l'extérieur sur le confort intérieur et la consommation énergétique de l'édifice. Sachant que la politique de l'efficacité énergétique algérienne se trouve actuellement dans un stade embryonnaire, comparativement aux pays occidentaux, malgré les tentatives qui sont souvent liées à la situation économique du pays.

III-3- Localisation du projet

Le projet est situé au chalet des pins, jouxtant la route nationale n° :03 menant à la destination de Batna du côté de l'est, en direction de Skikda et Annaba du côté de l'ouest, le bâtiment se localise dans un endroit stratégique par rapport au accès mécaniques, son approche de la bretelle du pont géant de Constantine permet d'emprunter plusieurs chemins de la ville. En considération des attributions affectées pour un tel service de logistique et d'équipement, et suite à des convenances fonctionnelles, la fluidité pour l'accessibilité mécanique devient nécessaire durant la réception quotidienne des différents services externe qui parviennent des 16 wilayas de l'est, puisqu'il a une vocation à échelonnement régionale.

III-4- Critères choix du bâtiment

La décision de l'utilisation d'un revêtement léger plaqué sur l'enveloppe extérieure est prise pour préserver la stabilité de l'édifice et éluder les travaux de confortement non fondés, exigeant la réalisation des voiles de renforcement en béton, qui traversent les plateformes et les planchers. La coïncidence de cet alternatif a permis d'arrêter le choix des panneaux en sandwichs, pour couvrir la façade extérieure du bâtiment, ce revêtement est considéré comme un bon isolant thermique selon l'attestation de conformité validée et délivrée par le fournisseur du produit.

Pendant le suivi du chantier, en période d'été, à l'intérieur du bloc principal une sensation de fraîcheur était aperçue par les différents intervenants, durant les jours de canicule durant le mois de juillet et d'aout 2013 et 2014, ce sentiment du confort à l'intérieur du bâtiment est probablement dû à l'utilisation de l'isolation thermique sur l'enveloppe extérieure de l'édifice. La curiosité m'interpellait pour palper les résultats et vérifier l'effet de l'isolation thermique extérieure sur l'ambiance intérieure des blocs réhabilités. Pour ces raisons, le choix du thème est effectué avec la collaboration des enseignants du laboratoire, dont l'objectif principal et de confirmer après l'investigation du terrain, l'efficacité de l'isolation thermique par l'extérieure dans l'optimisation du confort intérieur de l'utilisateur, ainsi que dans la réduction de la consommation énergétique durant l'été et l'hiver.

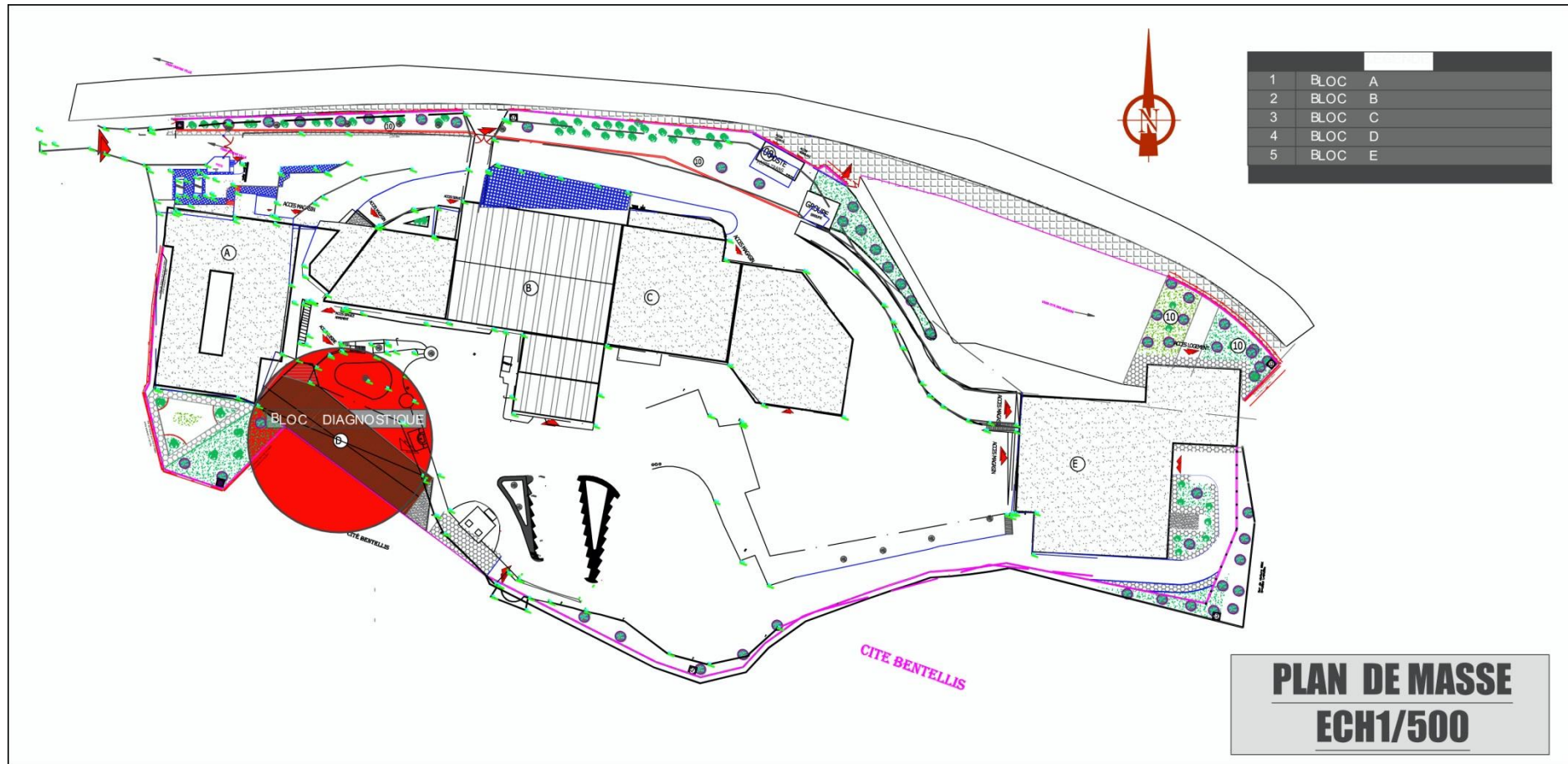


Fig- III-9- : Plan de masse indiquant l'endroit du bloc diagnostiqué. (Source auteur).

III-5- Descriptif du bâtiment diagnostiqué

L'échantillon qui a fait l'objet d'un choix pour l'investigation, se situe à l'orientation (sud-ouest) du bâtiment. Il est composé de quatre niveau, un R-D-C et trois étages, au niveau du rez-de-chaussée se localise le foyer, puis au premier étage s'inscrit le mess et enfin en dernier étage se trouve le magasin. La façade donnant sur l'extérieur constitue une surface plane excepté les parties saillantes de la structure du bloc. Les fenêtres du mess sont d'une surface de 3 m² et les châssis coulissant du foyer ont une surface de 2 m² et 1.5m² celle du magasin, garnies d'une ossature en aluminium blanc et du vitrage simple teinté en couleur bleu. Les fenêtres du mess sont protégées à l'extérieur par des volets roulant en PVC, et à l'intérieur par des stores californiens de couleur orange. L'absence d'obstacles environnementaux au bloc favorise son exposition au soleil. (cf.Photos-III-1-2).

Le système constructif de l'immeuble est constitué de poteaux poutres en béton armé dosé à 350 kg/M³, avec des parois extérieures en brique rouge creuse, qui ont une épaisseur de 0.15m. L'enduit extérieur utilisé sur les murs est le mortier de ciment d'une épaisseur de 1.5 cm, et à l'intérieur le plâtre de même épaisseur et la BA13 qui sont surfacés en enduit antipelliculaire. Les cloisons intérieures sont en briques de 0.10m revêtus en plâtre, Les planchers sont en corps creux. La toiture est à deux versants en pente de 25%, couverts en tuiles ondulées en fibre de ciment. Le vide entre le plafond et la panne faîtière est plus de 1.80cm. D'autres part la hauteur de chaque étage est de 3.70 m avec un faux plafond suspendu de 0.5m.



Photo -III-1- : Façade extérieure du bloc de l'investigation (Source Auteur).



Photo-III-2- Vue intérieure de l'échantillon mesuré du Foyer (*Source Auteur*).



Photo-III-3- Vue intérieure de l'échantillon mesuré du Mess ; (*Source Auteur*).



Photo-III-4- Vue intérieure de l'échantillon mesuré du Magasin ; (Source Auteur).

III-6- Programme et objectifs

L'investigation a été menée sur un bâtiment qui a une orientation nord-est, azimut 120° et composé de 4 niveaux superposés, le choix de l'échantillon s'est décidé sur le rez-de-chaussée, le 01^{er} étage, et le dernier étage, abritant respectivement le foyer, le mess, et le magasin. Ces espaces sont inoccupés du fait que le projet n'est pas encore réceptionné. La sélection de ces endroits est effectuée dans le but de permettre à la fois l'évaluation de l'effet de l'isolation extérieure sur la performance thermique de l'enveloppe ainsi que sur le confort et la consommation énergétique dans le bâtiment.

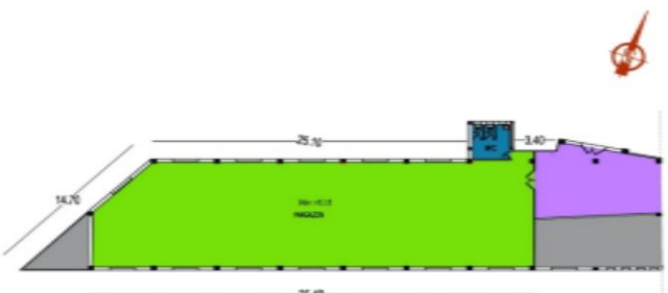


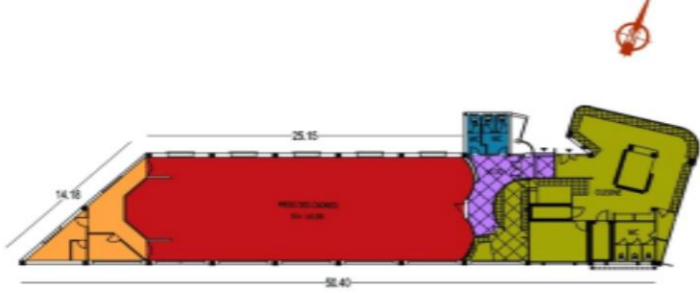

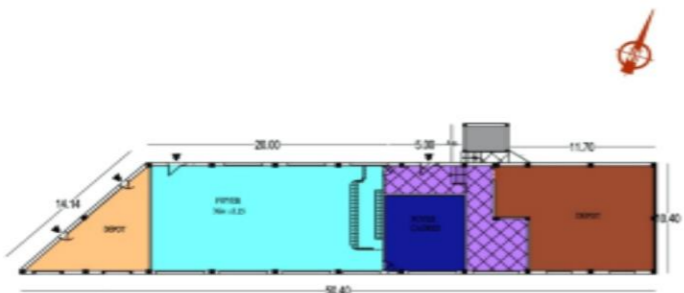


Les espaces retenus pour l'enquête sont les suivants :

- R-D-C, abrite l'espace foyer dont sa paroi extérieure de 30 cm d'épaisseur est constituée d'une brique creuse de 15cm, une lame d'air de 5cm et une autre brique de 10cm, cette composition se distingue des autres espaces choisis. (Voir, tabIII.3) ;

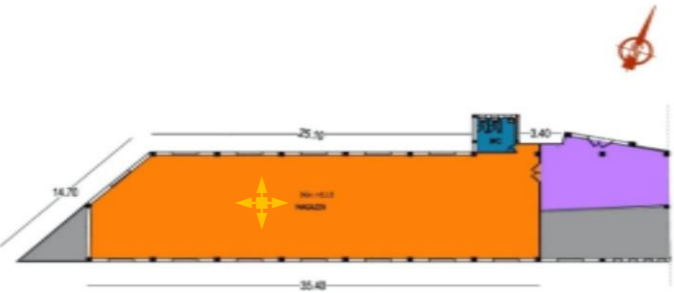

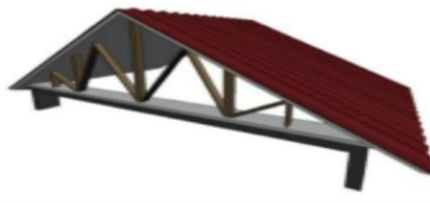

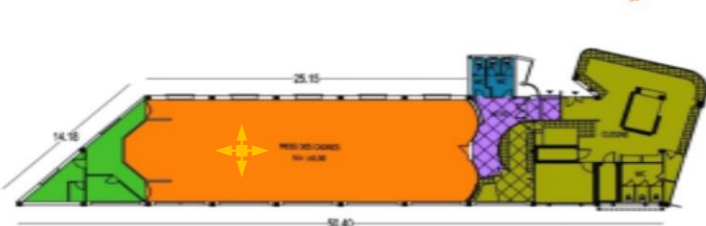
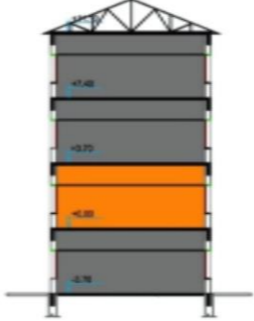
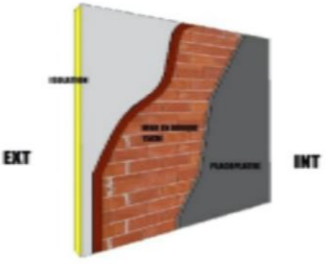

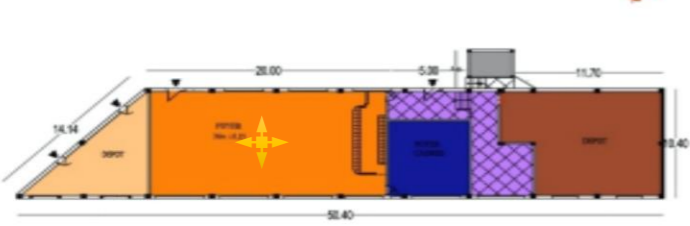
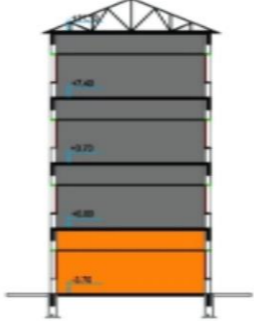
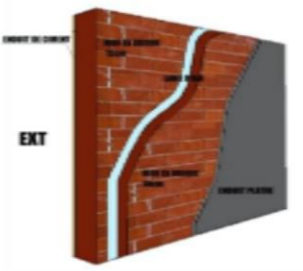

- Au 01^{er} étage, se trouve le mess qui a une paroi extérieure de 23 cm, composée d'un isolant en polyuréthane de 8 cm et une brique creuse de 15 cm. (Voir, tabIII.3) ;
- Dernier étage, se situe le magasin sa composition murale extérieure est identique à celle du mess, cet espace se localise sous un comble d'une tuile ondulée en fibre de ciment. (Voir, tabIII.3).

Une série de lecture de température et d'humidité relative ambiante est effectuée dans chacun des espaces retenus pour l'étude, des relevés de température surfacique dans la paroi de façade orientée Nord- Est sont également réalisés. Notons qu'au niveau du RDC, les murs du foyer sont dépourvus de l'isolation thermique contrairement à celle du mess et magasin, la toiture de ce dernier est aussi privé de l'isolation.

Tab N 02 : les plans, façades et perspectives des espaces investigués. (Source auteur).

Plans	Façades	Perspectives
 <p>PLAN DERNIER ETAGE MAGASIN</p>	 <p>FACADE NORD-EST</p>	
 <p>PLAN ETAGE COURANT MESS</p>	<p>FACADE NORD-EST</p>	
 <p>PLAN R.D.C FOYER</p>	 <p>FACADE SUD-OUEST</p>	

Tab N : 03 : indique les espaces diagnostiques et les détails de la structure. (Source auteur).

Espaces investigués	Structures détaillées		
<p>PLAN DERNIER ETAGE MAGASIN</p> 	<p>COUPE</p> 	<p>DETAILS TOITURE</p> 	
<p>PLAN ETAGE COURANT MESS</p> 	<p>COUPE</p> 	<p>DETAILS MUR MESS ET MAGASIN</p> 	
<p>PLAN R.D.C FOYER</p>  <p>Endroit de mesure Temn et Hum int</p>	<p>COUPE</p> 	<p>DETAILS MUR FOYER</p> 	

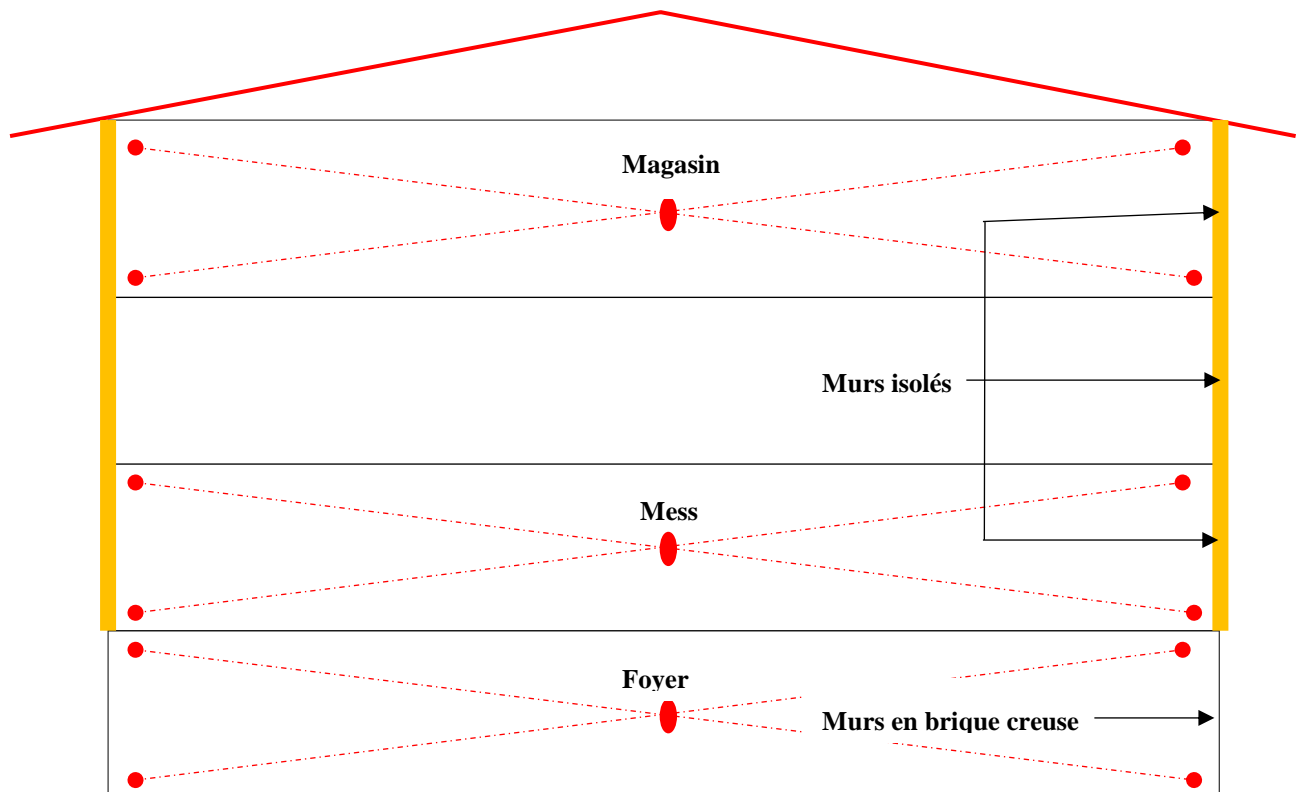


Fig-III-10- : Schéma représente les points de prise de mesures surfaciques sur façade du mur intérieure et extérieure Tsi et Tse (Source auteur).

III-7- Les appareils de mesures utilisés

Les appareils utilisés pour les relevés horaires des températures et des humidités relatives internes et externes, ainsi que les mesures de températures surfaciques intérieures et extérieures sont la station météo scientifique (Oregon), détecteur thermique infrarouge PTD1, Anémomètre Termo/hygro, luxmètre numérique LM-8000 Lutron, enregistreur TH0160, caméra infrarouge IR0002 vision nocturne. La description de capacité et de fiabilité de ces instruments de mesures est représentée ci-après respectivement.

III-7-1- Description des outils de mesures

III-7-1-1- La station météo Scientifique Oregon

Elle est composée d'un baromètre qui fonctionne sur une tendance de 24h ; Thermomètre et Hygromètre intérieur et extérieur ; Pluviomètre ; anémomètre ; une girouette indiquant la direction et la force du vent ; photo-11-. Elle a une console tactile intégrant le baromètre et une sonde pour enregistrer la températures et l'humidité intérieur et extérieur, aussi un petit panneau photovoltaïque permettant l'alimentation du thermo/hygro extérieur, la girouette et l'anémomètre, et enfin, un data logger intégré dans la console qui a une capacité de stockage des données étalées jusqu'à 38 jours avec un intervalle d'enregistrements de 2 minutes.

La console

La distance de transmission jusqu'à 100 mètres, logiciel en français inclus avec kit de connexion par USB, alimentation : adaptateur 6v inclus + 4 LR06 pour la sauvegarde en cas de panne de courant.

Baromètre :

- Pression de 600 à 1500 hPa.
- Compensation de l'altitude.

Thermo/Hygro

- De -30 à +60°C.
- Point de rosée.
- Humidité de 2 à 98 %.

Anémomètre :

Transmission en moyenne toutes les 14-20 secondes.

Pluviomètre :

Mesure de 0 à 9999mm avec un pas de 1 mm.



Photo-III-11- Station météo Oregon

III-7-1-2- Détecteur thermique infrarouge

Description

Le détecteur thermique PTD1, mesure les températures surfaciques sans contact, détecte les ponts thermiques et avertit de la formation de moisissure. Grâce à sa simplicité d'utilisation et à l'interprétation automatique des résultats de mesures, l'utilisateur aura un aperçu significatif des risques de formation de moisissures et de perte d'énergie. Il a un écran rétroéclairé pour une meilleure lisibilité, et un indicateur par un cercle laser de la zone de prise de mesure. Cet outil est utilisé pour mesurer les températures surfaciques intérieure et extérieure à distance de 01 mètre à travers à un capteur infrarouge (voir photo-III-12).

Fonctionnalités

- . Rayon laser circulaire avec 12 points laser. Capteur infrarouge pour température de surface
- . Capteur d'humidité et de température ambiante intégré
- . Affichage de la température, de l'humidité de l'air et de la température du point de rosée. Poignée ergonomique avec revêtement softgrip.



Photo-III-12- PTD1 détecteur thermique.

III-7-1-2- Mesure de la température (thermocouple)

Anémomètre Thermo/hygro, luxmètre numérique LM-8000 Lutron est un anémomètre 4 en 1 c-à-dire qu'il est multifonctionnel, peut être utilisé pour mesurer la vitesse de l'air en fonction de l'hygromètre, et l'humidité relative de l'air, la fonction du thermomètre permet d'enregistrer la température à l'aide d'un capteur externe de thermocouple (non inclus), il dispose également d'un capteur intégré pour indiquer la température et l'hygrométrie., Ce produit, a le double affichage LCD avec la possibilité de visualiser l'humidité et la température en même temps, ainsi que la vitesse de l'air en simultanément, Il dispose aussi d'une mémoire maximale et minimale pour stocker la valeur la plus élevée et la plus basse de la variable mesurée. (voir photo-III-13).

Instrument Description

- 1 - Power Button
- 2 - Hold Button
- 3 - Max/Min Button
- 4 - Unit/Zero Button
- 5 - °C/°F Button & Lux/Ft-cd Button
- 6 - Function Button
- 7 - Air Flow Sensor
- 8 - Thermocouple Input Socket
- 9 - R.H. Sensor
- 10 - Light Sensor
- 11 - LCD display
- 12 - Battery Compartment/Cover
- 13 - Wristlet

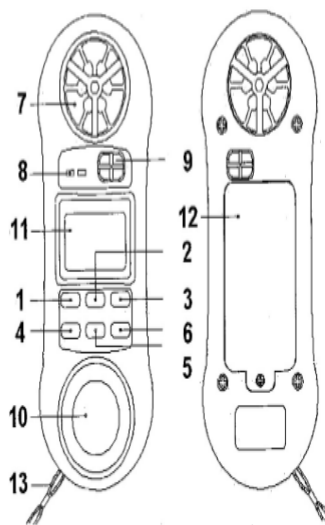


Photo-III-13- Anémomètre Thermo/hygro, luxmètre numérique LM-8000 Lutron.

III-7-1-3- Enregistreur de données de température et d'humidité

TH0160 est un enregistreur qui sert à mesurer la température et l'humidité en sauvegardant les données. Cet USB se connecte au PC pour le transfert, l'analyse et le stockage des données. Le logiciel fourni PC, est utilisé pour la fonction d'exportation des informations. L'intervalle d'enregistrement programmable en secondes ; Minute ou des intervalles d'heure. Le nombre d'enregistrement total envisageable, jusqu'à 21 000 enregistrements maximum. Il a également une fonction d'alarme paramétré pour la température et l'humidité. Enfin, nécessite une Faible consommation d'énergie pour une longue durée de fonctionnement. (Voir photo-III-14).

Description

1. Lid
2. USB interface
3. Switch
4. Battery cover
5. Sensor
6. Card clasp (press it, open the battery cover)
7. Alarm lamp (red/yellow)
8. Record lamp (green)
9. Product key



Photo-III-14- TH 0160-Enregistreur de données de température et d'humidité.

III-7-1-4- Caméra infrarouge vision nocturne

IR0002 est une caméra d'imagerie thermique combinant des fonctions de mesure de température de surface et d'imagerie thermique en temps réel. Le thermomètre infrarouge moyen mesure chaque point de température un par un, cet instrument aide à réduire le temps de mesure en identifiant les problèmes potentiels par l'image thermique sur l'écran couleur, les utilisateurs peuvent rapidement localiser le point central du curseur pour mesurer la température. Ce produit est équipé d'une caméra de vision pour améliorer la reconnaissance des fuites de chaleur à travers les bâtiments, il peut transformer l'image thermique en image visible selon les exigences pratiquées. L'image thermique et l'image visible peuvent être stockées dans la carte mémoire, et les images capturées peuvent aussi être stockées dans le PC pour un rapport

ou pour l'impression. Ce produit est le plus approprié pour ; le personnel d'entretien et les propriétaires de maisons pour identifier les zones à problème potentiel.

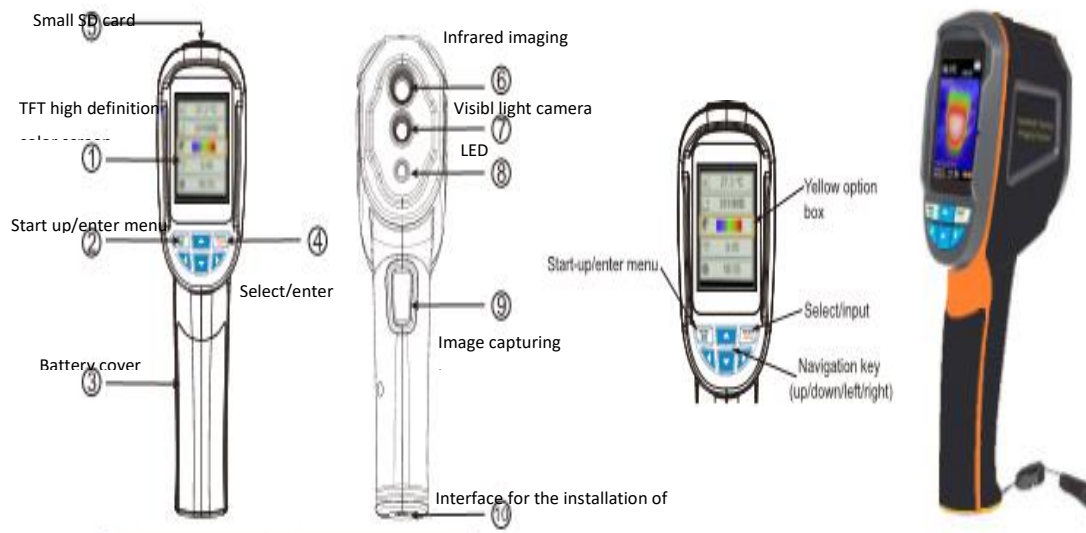


Photo-III-15- IR0002 Caméra infrarouge IR Vision nocturne.

III-7-1-5- vision nocturne du local investigué

La thermographie infrarouge est un outil de diagnostic permettant de détecter des désordres invisibles à l'œil nu. Elle permet, avec une image prise au plus près, de détecter des variations thermiques locales, et donc ainsi visualiser et mettre en évidence des défauts d'isolation non soupçonnés jusque-là. Dans l'existant, elle permet de mettre en évidence les défauts majeurs à traiter en priorité. Pour le neuf, elle peut-être un puissant outil de mesure de la qualité d'une réalisation.

La photo.III.16 représente une image thermique de la façade nord-est du local investigué composé de quatre niveaux, ce local est rénové récemment. Cet examen, est effectué durant une nuit d'hiver pendant le mois de février, permet d'observer en particulier la présence de ponts thermiques au niveau des planchers de chacun des niveaux, correspondant à des niveaux de température élevés. Quant aux murs isolés par l'extérieur l'image indique la fiabilité de l'isolant thermique qui couvre la paroi extérieure du bloc, excepté le rez-de-chaussée (Foyer), privé de l'isolant la température est plus élevée. Cette lecture visuelle peut être constatée même sans connaître au juste la température surfacique des parois. Cette image permet de mettre en évidence l'efficacité de la thermographie pour vérifier et localiser les déperditions thermiques

au niveau des bâtiments réhabilités ainsi offre l'opportunité d'observer une surface large à distance, et la visualisation immédiate des anomalies. Cette méthode ne peut être utilisée que s'il existe un gradient thermique entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment en période d'hiver.

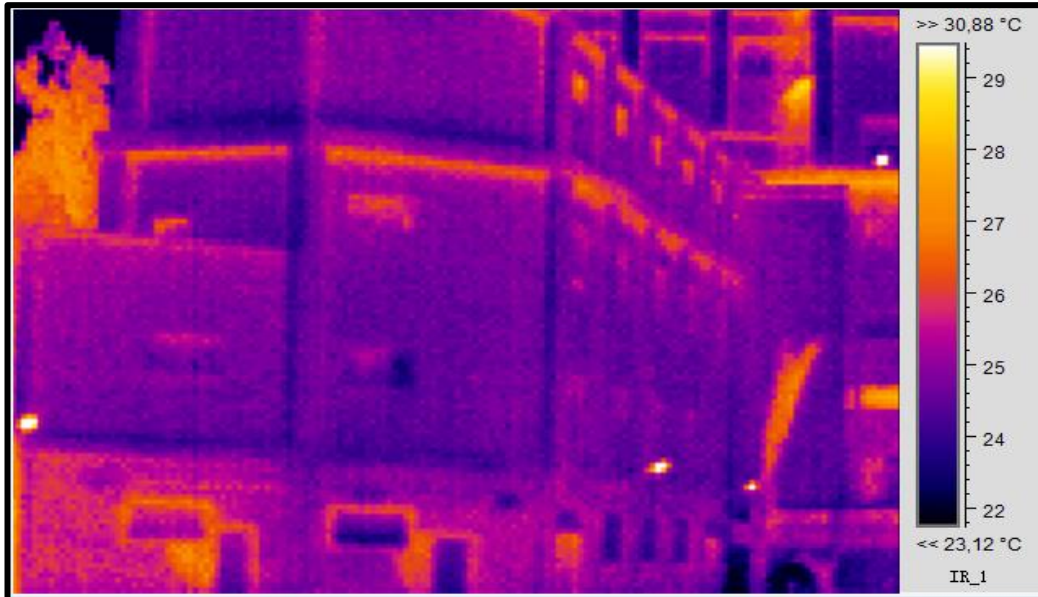


Photo-III-16- La thermographie à infrarouge au niveau du bâtiment diagnostiqué. (Source Auteur).

Durant les jours d'investigation les appareils de mesures ont été posés au-dessus d'une table à une hauteur de 1m, et les sondes réceptrices sont placées à l'extérieur sur les appuis de fenêtres. Les différents espaces soumis à l'enquête du terrain sont inoccupés. Les prises de mesures sont effectuées au centre de chaque niveau à une hauteur de 1.50m

Dans l'intention d'examiner l'effet de l'isolation thermique sur la température de l'air intérieur et l'humidité relative, le comportement thermique de la paroi, l'ambiance interne et sur la stabilité de la température intérieure. Une campagne de mesures a été entreprise pour relever les températures surfaciques intérieures, extérieures et de l'air intérieure ambiante, l'investigation s'est déroulée avec l'exploitation des différents appareils comme, La station météo Oregon Scientific, détecteur thermique PTD1, Anémomètre Termo/hygro, LM-8000 Lutron, l'enregistreur de données de température et d'humidité TH 0160-, et la caméra infrarouge IR vision nocturne.

III-8- Techniques de déroulement de mesures

III-8-1-Période estivale 1^{er} scénario sans ventilation : fenêtres et châssis fermés (03 jours consécutifs), 18-19-20/08/2016

III-8-1-1-Cas du R.D.C (foyer) : Période estivale

La station météorologique a été implantée à l'extérieur à une distance de 20m de l'échantillon soumis à l'expérimentation, cette dernière émet les informations de l'environnement extérieur (microclimat), vers les récepteurs placés à chaque niveau, qui ont également une double fonction, celle de l'enregistrement des renseignements qui intéressent les températures extérieures et intérieures synchroniquement. Le relevé des mesures concerne aussi la température surfacique interne et externe.

III-8-1-2-Cas de l'étage (mess) : Période estivale

Les instruments de mesure utilisés à l'intérieur du mess sont identiques à ceux utilisés dans le foyer, l'enregistrement des données s'effectue d'heure en heure, de 6h00 du matin jusqu'à minuit. En sauvegarde le scénario n° :01, des fenêtres fermées, sans l'utilisation des volets roulants et les stores californiens pour protéger l'ambiance intérieure des rayonnements solaires. Les mesures sauvegardées sont les températures et l'humidité relative intérieures et extérieures, et également les températures surfaciques interne et externe.

III-8-1-3-Cas du dernier étage (magasin) : Période estivale

Les mesures sont effectuées de même sorte que les 2 niveaux suscités. De plus les relevés de température surfacique intérieure et extérieure de la toiture sont également enregistrés.

III-8- 2-Période estivale 2^{ème} scénario (avec ventilation nocturne), entre 21-22-23 /08/2016

La même méthode de mesure est maintenue, excepté que les fenêtres et les châssis sont ouverts de minuit jusqu' à 5h30 du matin durant 03 jours successif.

III-8- 3-Mesures en période hivernale

III-8- 3-1-Cas des 03 échantillons (foyer, mess, magasin) : 16/01/2016

Les conditions climatiques pendant la période d'investigation sont traduites par un bulletin météorologique spécial (B.M.S) envoyé par l'office national de météorologie au différent service de sécurité. Indiquant la probabilité des chutes de neige par l'intermittence qu'atteindront les hauteurs dépassant les 400m d'altitude. Effectivement ces jours ont connu une vague de froid durant deux jours successifs ou la température extérieure a atteint -2°C .

Les fenêtres et les châssis sont fermées et les volets roulant au niveau du mess sont baissés pendant les 03 jours consécutif de la campagne de mesure. Les mesures sont prises de la même manière que la période estivale, celle de l'enregistrement des températures extérieures et intérieures simultanément. Le relevé des mesures concerne aussi les températures surfaciques interne et externe des parois verticales (N.N-E) et de la toiture.

III-9- Evaluation

Pour confirmer ou à infirmer l'hypothèse suggérée, l'évaluation du comportement thermique de l'isolation sera établie en deux phases distinctes. La première concerne son impact sur l'ambiance intérieure en période estivale et hivernale. La seconde s'accroît plutôt sur son influence sur la consommation énergétique.

La première évaluation sera débutée par l'interprétation des mesures de température et d'humidité relative désignant la réponse thermique de chaque niveau investigué envers les paramètres climatiques. En mettant l'accent sur le comportement de l'isolation thermique sur l'enveloppe par l'extérieur : parois extérieures, toiture et parois intérieures. Ceci a pour objectif de distinguer les effets que génèrent l'isolant et leur impact sur le confort thermique.

En prévision de déterminer les variations, ces valeurs seront comparées aux données météorologiques recueillies auprès de la station météorologique de la ville, durant la période de l'investigation, et à celles enregistrées à l'extérieur. Ensuite une étude comparative des écarts entre température intérieure et extérieure, et une interprétation des amplitudes de températures minimales et maximales intérieures et extérieures seront étudiées pour vérifier le rôle de

l'isolation. En sus d'une étude détaillée des variations de la température, de l'humidité relative et des températures surfaciques intérieures et extérieures. L'étude de variation des températures surfaciques sera établie dans le but d'évaluer l'effet de la paroi froide en hiver et l'effet de la paroi chaude en été. Notamment pour se rendre compte du gain thermique et identifier les sources externes et internes responsables du confort.

Conclusion

Pour évaluer le degré de confort des occupants, une lecture comparative se fera avec les limites de confort et les températures neutres selon les méthodes de l'investigation. Une seconde évaluation, s'effectuée par simulation avec le logiciel TRNsyst 16 entre la consommation énergétique des trois espaces du bâtiment.

Pour : 01- valider les résultats sur site.

02- Mettre en exergue l'importance de l'isolation par l'extérieur.

03-Evaluer le degré de réduction dans la consommation énergétique.

Lors de la simulation, il est essentiel de tester les différentes alternatives à choisir pour une meilleure isolation par l'extérieur.

Sommaire

Introduction	83
III-1- Présentation du cas d'étude.....	84
III.1.1. Aperçu sur le climat de la ville de Constantine.....	84
III-2- Description du cas d'étude.....	90
III-3- Localisation du projet	91
III-4- Critères choix du bâtiment	91
III-5- Descriptif du bâtiment diagnostiqué	93
III-6- Programme et objectifs	95
III-7- Les appareils de mesures utilisés	99
III-7-1- description des outils de mesures	100
III-7-1-1- La station météo Scientifique Oregon.....	100
III-7-1-2- Détecteur thermique infrarouge.....	101
III-7-1-2- Mesure de la température (thermocouple).....	102
III-7-1-3- Enregistreur de données de température et d'humidité.....	103
III-7-1-4- Caméra infrarouge vision nocturne.....	103
III-8- Techniques de déroulement de mesures	106
III-8-1-Période estivale 1er scénario sans ventilation : fenêtres et châssis fermés (03 jours consécutifs), 18-19-20/08/2016.....	106
III-8-1-1-Cas du R.D.C (foyer) : Période estivale	106
III-8-1-2-Cas de l'étage (mess) : Période estivale	106
III-8-1-3-Cas du dernier étage (magasin) : Période estivale	106
III-8- 2-Période estivale 2ème scénario (avec ventilation nocturne), entre 21-22-23 /08/2016...	106
III-8- 3-Mesures en période hivernale.....	107
III-8- 3-1-Cas des 03 échantillons (foyer, mess, magasin) : 16/01/2016.....	107

III-9-Rappel des hypothèses **Erreur ! Signet non défini.**

 III-9-1- Hypothèse principale : La réhabilitation énergétique des bâtiments existants contribue à augmenter leur performance énergétique et à réduire la consommation d'énergie en garantissant le confort de l'occupant. **Erreur ! Signet non défini.**

 III-9-2- Hypothèse secondaire : L'utilisation de l'isolation thermique par l'extérieur de l'enveloppe des édifices, offre les meilleures performances et constitue un axe de progrès prioritaire dans l'optimisation de la performance énergétique. **Erreur ! Signet non défini.**

III-10- Evaluation 107

Conclusion 108

Introduction

La température et le rayonnement solaire durant le mois de juillet affichent des valeurs élevées au milieu de la journée. Elles accentuent des causes potentielles de très fortes surchauffes à l'intérieur du bâtiment dans la deuxième partie de la journée particulièrement au niveau des trois espaces mesurés. D'autant plus que l'absence totale des masques naturels ou artificiels favorise l'absorption des rayonnements et des radiations solaires.

Pour déterminer l'importance de l'isolation de l'enveloppe par l'extérieur, une étude de comparaison a été effectuée entre les variations de température de l'air et d'humidité relative intérieure et extérieure, ainsi entre les températures surfaciques intérieures et extérieures pour chaque niveau (RDC-01^{er} étage- dernier étage), dans le but d'évaluer l'effet de l'isolation extérieur de l'enveloppe (murs – toits – fenêtres), vis-à-vis le confort thermique des usagers et d'estimer la consommation énergétique du bâtiment dans un climat semi-aride, en d'autre terme, vérifier l'efficacité énergétique.

IV.1- Evaluation de l'isolation extérieure sur le confort thermique

IV.1.1. Interprétation des résultats de la période estivale du (foyer, mess, magasin). Scénario (01) sans ventilation naturelle nocturne (18-19-20 Aout 2016)

IV.1-1-1-Etude comparative de la température moyenne (intérieure et extérieure)

La lecture des 03 graphes illustre que le mess (étage courant), affiche une valeur maximale de température moyenne de l'air qui est inférieure à celle du foyer (RDC) et du magasin (étage sous comble), cette valeur est de 28.93°C à 19h, alors que la maximale du foyer est de 29.90 °C à 18 h, et celle du magasin atteint la valeur de 31.67°C à 17h. L'écart de température maximale entre mess et foyer est de 0.97°C, ensuite mess et magasin est de 2.74 °C. En particulier, les fluctuations de la température extérieure sont déphasées dans le temps au niveau du mess et du foyer. Du fait que la température extérieure maximale de 33.67 °C atteinte à 14h a été d'une part amortie un déphasage de 4 à 5 heures est observable. Voir (la figure IV.1.).

Les fluctuations des températures intérieures dans le mess et le foyer sont insignifiante par contre la courbe des températures du magasin suit le même profil que celle des températures extérieure et météo. Le mess a toujours la moindre valeur, suivie consécutivement par le foyer et le magasin. Ce dernier affiche la plus grande température moyenne intérieure de l'air, en raison du temp de son enveloppe exposée directement aux radiations solaires entre midi et 16h durant la période défavorable de la journée, lesquelles ces radiations sont perpendiculaire à la surface horizontale de la toiture.

Néanmoins, par une comparaison attentive, dans la lecture des températures intérieures moyenne de l'air maximal entre le premier scénario (sans ventilation naturelle nocturne), et le deuxième scénario (avec ventilation naturelle nocturne), nous a permis de déduire que la température s'accroît dans les locaux investigués en l'occurrence (foyer-mess-magasin) d'une moyenne de 1.5°C comparativement à ceux du deuxième scénario. Cela démontre que la chaleur stockée puis restituée reste piégée à l'intérieur en raison des châssis et des fenêtres fermées d'une part, de l'isolation thermique qui améliore l'inertie séquentielle au niveau du mess et magasin, et la lame d'air dans les parois du foyer d'autre part, ces multiples phénomènes ralentissent les déperditions de l'intérieur vers l'extérieur surtout pendant la nuit ou la température extérieure est modérée.

Une recherche sur l'effet de l'emplacement de l'isolation sur les caractéristiques de transfert de chaleur dans les murs du bâtiment et sur l'épaisseur optimale de l'isolant menée par Meral Ozel¹, a démontré que les fluctuations de température maximale et la charge de pointe se produisent dans le cas où l'isolation est placée au milieu du mur et diminuent lorsque l'isolation est positionnée à l'extérieur. Les résultats montrent que la meilleure performance thermique est obtenue quand l'isolation thermique est placée à l'extérieur du mur, et indiquent que la position de l'isolation a un effet significatif sur le déphasage, et sur l'amortissement des murs. Donc l'isolation par l'extérieur a un rôle prépondérant sur le rafraichissement de la température intérieur de l'espace (foyer & mess).

¹M. Ozel, « *Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness* », Energy and Buildings, Volume 72, April 2014, Pages 288-295,

On peut déduire que le foyer et le mess analysés ne subissent pas directement les fluctuations de la température extérieure grâce à la couche d'air qui constitue la paroi du foyer et l'isolation thermique par l'extérieur de la paroi du mess. Cela rejoint l'étude de Tsilingiris qui démontre que la capacité thermique diminue lorsque la résistance augmente pour le cas où la couche isolante est placée à l'extérieur ou au milieu de la paroi².

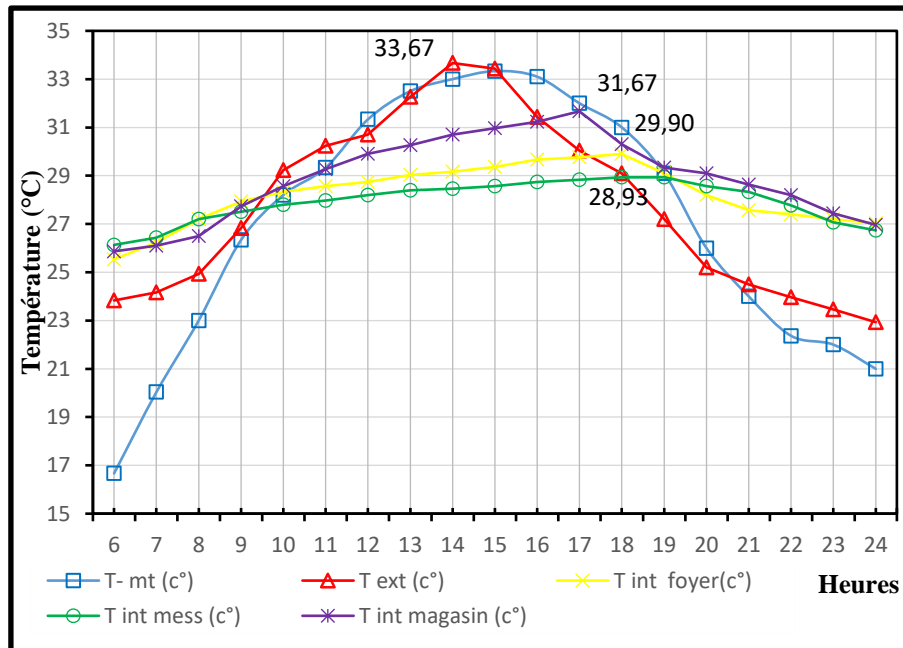


FIG. IV. 1. Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été (18-19-20, Aout 2016).

IV.1-1-2-Etude comparative des températures surfaciques (intérieure et extérieure)

IV.1-1-2-1- Les températures surfaciques intérieures

D'après le graphe de la figure (IV.2.), on peut constater que les températures moyennes des surfaces intérieures du foyer et du mess suivent presque la même allure, la température surfacique maximale du foyer est de 30.50°C atteint à 18h, et du mess est de 29.77°C obtenue à 18h avec un écart négligeable de (0.73°C). Alors que la température surfacique intérieure du magasin évolue progressivement jusqu'à 32.73°C à 16h, avec un écart de température élevé de l'ordre de 2.230°C et 3.04°C comparativement à celle du foyer et du mess. Ce dernier conserve la température presque stable jusqu'à minuit. L'écart important de température est dû à

² Tsilingiris, P., *Wall heat loss from intermittently conditioned spaces—The dynamic influence of structural and operational parameters*. Energy and Buildings, 2006. **38**(8): p. 1022-1031.

l'exposition de la toiture d'une couleur rouge sombre au rayonnement solaire pendant 10 heures, dont la maximale de température surfacique intérieure atteint la valeur de 46.93°C, cela veut dire que plus la toiture et la paroi coté (Sud-Ouest) sont soumis aux radiations solaires, plus le flux de chaleur qui traverse est élevé.

Afin de minimiser les gains importants de chaleur, pénétrant à l'intérieur du local magasin à travers la toiture et la paroi orientée (S-O) durant le jour, quand il fait froid pendant la nuit à l'extérieur, la ventilation naturelle nocturne de cas-là, s'impose comme une alternative pour rafraîchir les surfaces intérieures des différentes parois et notamment le toit. I.A Al Mofeez, explique que l'isolation extérieure de l'enveloppe permet l'augmentation du temps de déphasage, mais avec l'assurance de la ventilation nocturne, permet une faible et très stable température moyenne radiante (MRT)³.

On peut conclure que l'isolation thermique est déterminante dans les climats marqués par de fortes amplitudes jour & nuit, et par de forts ensoleillements d'hiver, qui ne sont compensables que par la ventilation nocturne ou par utilisation d'autres systèmes passifs de refroidissement. C'est exactement le cas du climat des régions méditerranéennes.

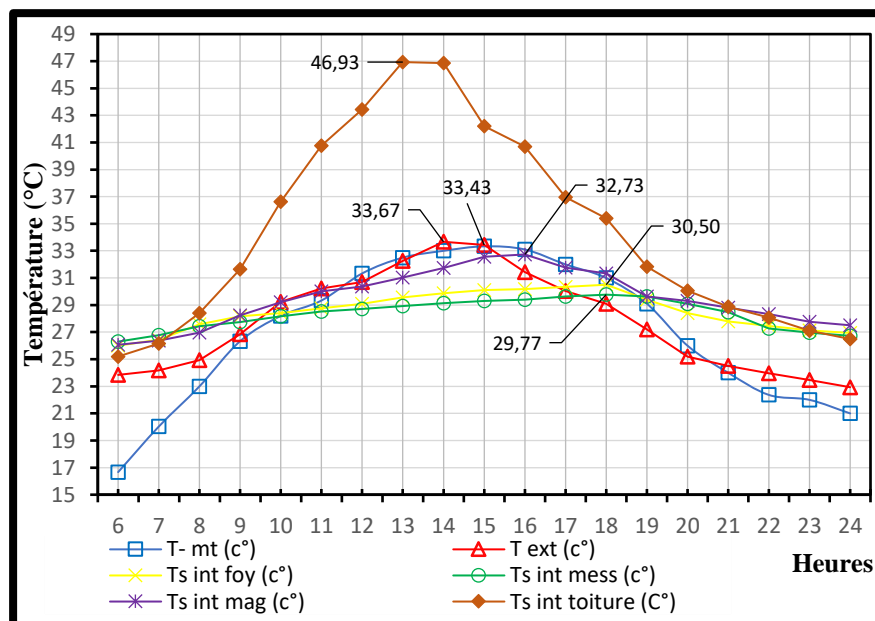


FIG. IV. 2. Variation de la température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Aout 2016).

³ Al-Mofeez, L. *Field Test Results of Interior vs. Exterior Insulation of Thermal Mass in Extremely Hot-Arid Climates*. in *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL PASSIVE SOLAR CONFERENCE*. 1992. AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY INC.

IV.1-1-2-2- Les températures superficielles extérieures

La lecture du graphe de la figure (IV.3), permet de constater que la température maximale obtenue de la surface externe de la façade N-E du mess et du magasin est de 44.43°C ,46.37°C, respectivement. Elle fluctue simultanément au-dessus du niveau moyen de la température externe. Néanmoins la courbe de la température superficielle du foyer atteint 33.50°C, son allure est presque stable de 12h jusqu'à 16h, par l'influence de la paroi ombragée à partir de 9 h du matin, ce qui explique l'effet des radiations solaires et la durée d'ensoleillement sur la surface. Concernant la température superficielle extérieure du toit atteint la valeur maximale de 54.37°C à 14h, et les maximales de température superficielle extérieure du mess et du magasin sont dus à l'effusivité de la tôle galvanisée pré laqué qui compose lame de l'isolant, et les fibres du ciment comprimé qui constituent la toiture. A propos du toit son exposition durant plus que 10 heures de temps à l'impact des radiations solaires perpendiculaire et directe a participé à la fluctuation de la température superficielle extérieure de la toiture.

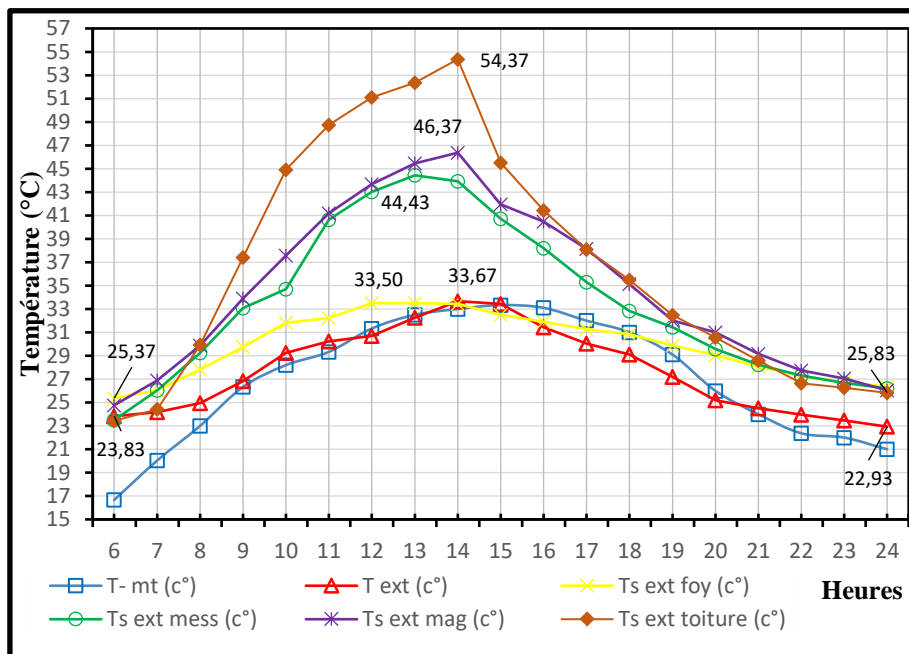


FIG. IV. 3. Variation de la température moyenne superficielle extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Aout 2016).

IV.1-1-2-3- Etude de l'humidité moyenne intérieure et extérieure

L'humidité relative externe atteint un niveau bas par rapport aux humidités interne. Cependant Le minimum de l'humidité relatif internes du magasin est de 34 % atteint à minuit, celui de l'extérieur de 29% à 11h. Dans ce cas-là l'air est considéré sec le matin du moment que l'humidité relative est inférieure à 35%. Tandis que le maximum interne est de 49 % atteint à 7h, celui de l'extérieur est de 47% enregistrée à 7h. Concernant le foyer et le mess l'humidité relative interne atteint son minimum de 42% et 36% à minuit. Les valeurs élevées de l'humidité intérieure sont remarquées pendant la matinée de 56% et 46% à 6h. Dans le cas des 2 locaux investigués (foyer-mess), l'air est moyennement humide entre 35 et 65% durant les jours de mesures. A l'issue des résultats enregistrés, on peut déduire qu'à l'intérieur d'un même espace, L'humidité relative varie en fonction des changements de température. Voir (Figure IV.4).

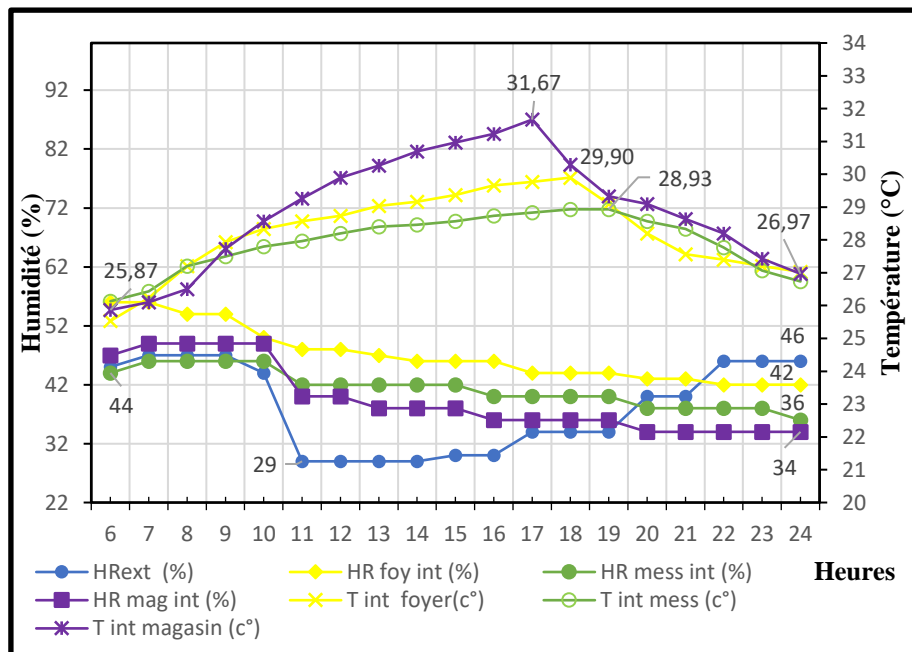


FIG. IV. 4.Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure avec température intérieure du foyer, mess, et magasin. Période d'été. (18-19-20 Mois d'Aout 2016).

IV.1-1-2-4-Comparaison des écarts entre température intérieure et extérieure ($\Delta T = t_i - t_e$)

La lecture du graphe indique que :

L'espace foyer a un écart positif entre 17h et 10h, ce qui offre un gain d'énergie venant de l'effet des parois externes exposées au soleil de (6h à 9h), ce gain de chaleur est stocké puis transmis à l'intérieur par la paroi opaque. Au cours de la journée de 10h à 17h le bilan est négatif, important (4.50°C), cette variation est appréciable surtout au cours de la journée la plus défavorable et ce qui justifie par sa localisation au niveau du R-D-C, la composition de la paroi

en double murette avec lame d'air ainsi l'orientation de la façade N-E est ombragée à partir de 9h00 jusqu'à le reste de la journée. À partir de 17h00 le bilan est positif et s'explique par l'effet des gains de chaleurs provenant des fenêtres fermées orientées (Sud-ouest) qui absorbent les radiations solaires et piègent la chaleur chassée au fil de la journée avec un déphasage rapide entre l'extérieur et l'intérieur à travers le vitrage dépourvu des masques solaires.

L'espace mess a présenté à un écart positif entre 18h et 9h, ce qui offre un gain d'énergie venant de l'effet des parois externes exposées au soleil de (6h à 9h), ce gain de chaleur est stocké puis transmis à l'intérieur par la paroi opaque. Au cours de la journée de 9h à 18h le bilan négatif est important de 5.20°C. Ce résultat confirme que malgré la présence de la barrière de l'isolation extérieure pour intercepter les flux de chaleurs, le rayonnement solaire les plus intense de l'après-midi jusqu'à 16h, et pour freiner les radiations solaires directe émanant des surfaces vitrées, qui représentent plus que 1/3 de la surface totale de la paroi, demeure insuffisante pour maintenir la température intérieure de l'air ambiante stable.

Concernant le magasin l'écart négatif entre 9h30 et 16h atteint un maximum de 2.97°C, ce qui offre un gain d'énergie provenant de la toiture et de la paroi externe exposée au soleil de (10h à 16h). Ce gain de chaleur est stocké puis transmis à l'intérieur à travers la toiture et le mur opaque. Durant la nuit au moment où la température extérieure décroît le bilan devient positif de 6h à 10h et de 16h à minuit avec une variation de 2.30 °C et 3.80 successivement.

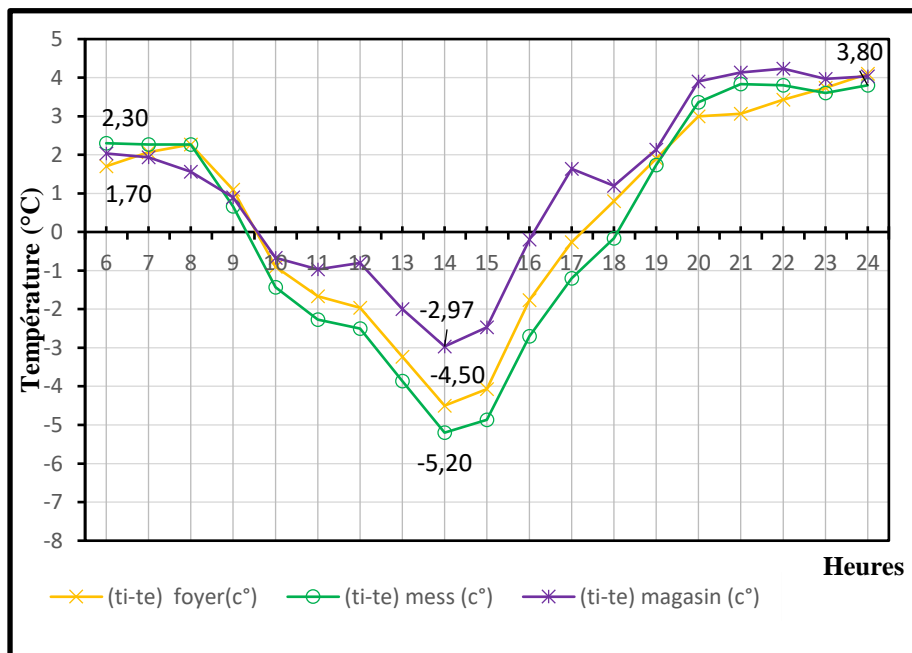


FIG. IV. 5. Ecart de températures moyennes horaires intérieures et extérieures période été, du foyer, mess, et magasin. Période d'été. (18-19-20 Mois d'Aout 2016).

IV.1-1-2-5-Evaluation du confort thermique

La courbe de la température moyenne intérieure du foyer, mess, et magasin s'éloigne de la zone du confort toutes la période diurne. Cela confirme que malgré la présence d'isolation ces locaux sont en dehors des conditions de la zone de confort. Voir (figure -IV-6-).

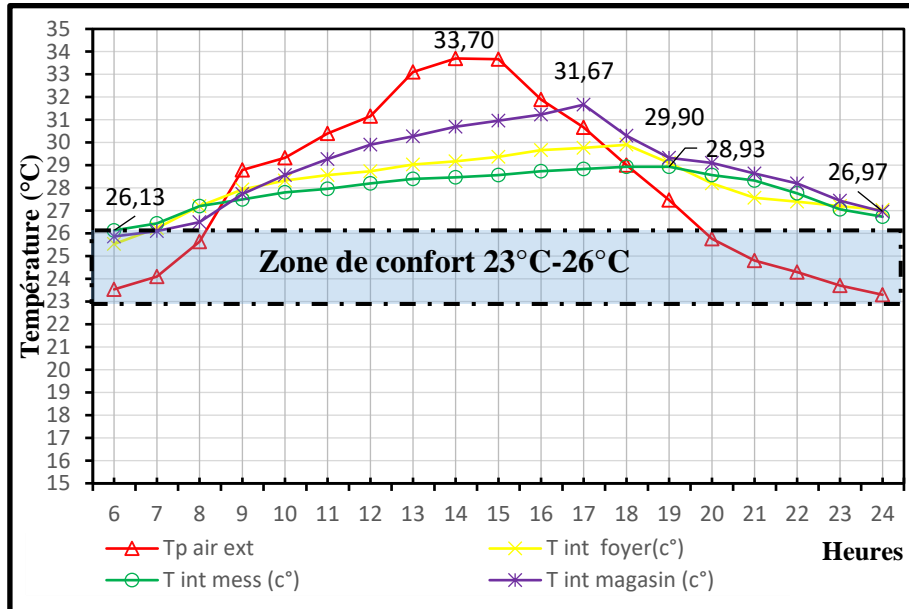


FIG. IV. 6. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort. Période d'été. (18-19-20 Mois d'Aout 2016).

IV.2. Interprétation des résultats de la période estivale du (foyer, mess, magasin) ; scénario (02) avec ventilation naturelle nocturne (21-22-23 aout 2016)

La lecture des 03 graphes illustre, que la température moyenne de l'air du mess (étage courant) affiche sa valeur maximum de 27.20°C à 17 heure, le foyer (RDC) atteint sa valeur maximum de 27.77°C à 17heure et le magasin (étage sous comble) à 17 heure une valeur de 31.60°C. L'écart de température maximale entre mess et foyer est de 0.57°C, mess et magasin est de 4.40 °C, les fluctuations de la température extérieure ont été écrasées et déphasées dans le temps au niveau du mess et du foyer, sachant que la température extérieure atteint son maximum de 33.70 °C à 14h. Voir (la figure IV.7).

Les fluctuations des températures intérieures ne sont pas importantes à l'exception du magasin, cela est dû d'une part à l'inertie de la paroi du foyer qui est composé de doubles murettes (15+10) cm avec une lame d'air (05) cm. Ce procédé a contribué à atténuer les fluctuations de la température intérieure en évitant les surchauffes. De plus la présence de l'isolation externe sur le mur du mess a joué le rôle d'une barrière étanche contre les vagues de

chaleur provenant de l'extérieur du bâtiment. La variation de température entre foyer et mess n'est pas significative ($\Delta t < 1^\circ\text{C}$), et cela s'explique par l'effet de l'isolation externe du mess qui amortit la transmission des rayons de chaleurs vers l'intérieur, et par l'orientation de la façade du foyer (N-N-Est) non isolé, situé au RDC, qui est ombragée durant presque toute la journée.

Concernant le magasin et malgré la présence de l'isolant à l'extérieur de la paroi, les fluctuations des températures intérieures moyennes de l'air demeurent conséquentes comparativement à celle du foyer et du mess, la raison fondamentale de cette oscillation dépend de l'impact perpendiculaire des radiations solaires à la surface horizontale de la toiture non isolée entre midi et 16heure. Elles constituent l'éventuel raison de surchauffes dans la deuxième partie de la journée. Surtout que l'orientation sud-ouest, de la paroi postérieure et la couleur sombre du toit, en l'absence totale de masques environnementaux et d'occultations qui permet la réduction des apports de chaleurs durant la journée.

Cette capacité de différer l'amplitude thermique, le mur la doit à deux propriétés intrinsèques : Propriétés de l'isolation et l'inertie, bien sûr en rapport avec l'épaisseur du mur. Nous rejoignant avec ces premières constatations les résultats de recherche sur la forte inertie de : Bekkouche S.M.A 2009, P.T. Tsilingiris 2006, V.Sambou 2008 et M. Ozel and K. Pihtili 2007.

Les résultats de Samar Jaber, Salman Ajib . 2011, affirment que les surfaces vitrées ont une influence sur l'énergie solaire incidente.de ce fait le taux des rapports surface vitrées surfaces opaques des parois N-Est et S-Ouest des espaces investigués dans ce travail qui représentent respectivement 20-35- et 10 % se confirment par l'augmentation de température de l'air à l'intérieur particulièrement dans le magasin.

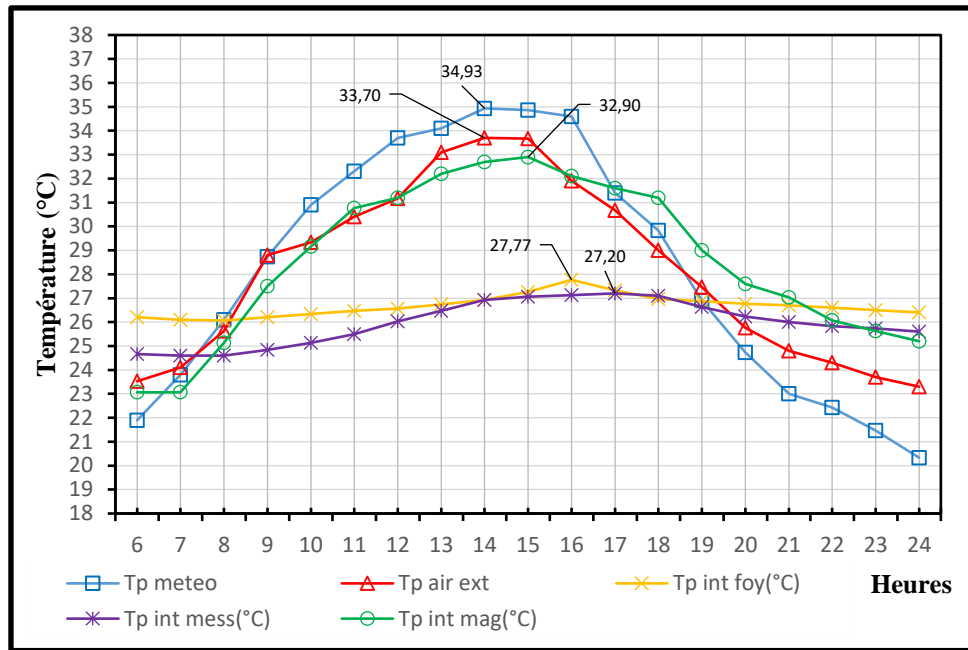


FIG. IV. 7. Variation de la température moyenne de l'air période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

IV.2.1. Etude comparative entre scénario (01) et scénario (02) des températures (intérieure et extérieure)

Les figures IV.8 et IV.9 présentent le profil des ambiances interne et externe pour les journées d'été (sans et avec ventilation naturelle nocturne). Leur examen montre des profils de température très stables, reconnaissables par la très faible amplitude entre les températures maximales et minimales internes sur 24 h (écart-type faible), contrairement à celui de l'air extérieur pour lequel, les amplitudes constatées sont fortes (10,74 °C et 10,40 °C). Son examen révèle que durant les journées d'investigation, le mur du mess isolé dans les deux scénarios a conduit à un bon amortissement du pic de chaleur de l'ordre de **4,73 °C** et **6,5 °C** et décalé de **04** à **05** heures. Autrement dit, le mur isolé par l'extérieur a permis, grâce à sa conductivité thermique (λ) $0.022 \text{ w.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ assez importante, de freiner la chaleur extérieure pendant la journée en l'amortissant et la restituer grâce à une valeur de diffusivité thermique relativement faible, 04 h plus tard, lorsque la température extérieure commence à baisser.

L'écart de température après la ventilation naturelle nocturne de l'espace foyer et mess est perceptible, atteint une valeur de **2,13 °C** et **1,73 °C** respectivement, quant au magasin est peu sensible 1,23 °C. L'allure des courbes du 1er scénario des espaces investigués sont quasiment collées durant le matin de 6h jusqu'à 10h et le soir de 19h jusqu'à minuit, elle évolue

progressivement. L'allure des courbes du 2^{ème} scénario du foyer et du mess est presque aplatie durant toute la journée, contrairement à celle du magasin qui évolue graduellement en suivant l'allure de la température de l'air extérieur. La comparaison des figure IV.8 et IV.9 (sans et avec ventilation) permet d'identifier l'effet de l'isolation des murs extérieurs. Il apparaît sur la figure IV.9 que cette (ventilation naturelle nocturne) permet de réduire nettement la température de l'air intérieure, par contre sur la figure 1 (non ventilé) présente des valeurs de températures intérieures plus élevées.

L'isolation thermique par l'extérieur couplée avec la ventilation naturelle nocturne ont conduit à des conditions approximativement confortables. Pour le 1^{er} scénario, nonobstant des températures nocturnes internes supérieures à celles de l'air extérieur, une ventilation naturelle nocturne (indispensable dans le cas étudié) permettra d'atténuer cette surchauffe interne. Les effets bénéfiques de l'isolation thermique par l'extérieur avec la ventilation naturelle nocturne sur l'abaissement des températures sont bien confirmés

IV.2.1.1. Etude comparative entre scénario (01) et scénario (02) des températures surfaciques (intérieure et extérieure)

IV.2.1.1.1. Etude comparative des températures surfaciques intérieures

La Figure IV.10 et IV.11 ci-après, donne l'évolution synchrone des températures relevées au cours d'été (mois d'aout 2016), sur les faces internes des murs des deux scénarios. Son examen fait ressortir des valeurs de température qui sont plus élevées dans le scénario 01 (sans ventilation nocturne) que dans le scénario 2 (avec ventilation nocturne). A noter aussi, l'évolution progressive de la courbe du toit est due à l'échauffement rapide et tôt le matin, l'écart important de température est dû à l'exposition de la toiture d'une couleur rouge sombre au rayonnement solaire pendant 10 heures, cela veut dire que plus la toiture et la paroi de la façade S-Ouest sont exposées aux radiations solaires, plus le flux de chaleur qui traverse est élevé. En période diurne, la surface se réchauffe simultanément par rayonnement solaire et par conduction. La chaleur freinée par l'isolant extérieur est restée confinée dans le mur, puis diffusée vers l'intérieur par conduction, durant un temp de déphasage qui varie entre 3 à 4 heures.

On déduit que l'effet de l'isolant avec la ventilation naturelle nocturne atténue les apports solaires gratuits du jour. La température de surface interne enregistrée (avec ventilation nocturne) du foyer et du mess est inférieure de 6.5 °C en moyenne par rapport à celle du magasin. La stratégie de ventilation nocturne des surfaces murales isolées résistant au transfert de la chaleur piégée de l'intérieur vers l'extérieur, semble mieux remplir les conditions passives pour ses besoins de climatisation. Contrairement au premier scénario (sans ventilation naturelle nocturne), il ne nécessite qu'une climatisation d'appoint l'été pour le confort d'été.

IV.2.1.1.2. Etude comparative des températures surfaciques extérieures

Plus le mur est exposé au soleil plus sa température surfacique augmente, Les températures surfaciques extérieures ont une relation entre l'intensité solaire et le degré d'incidence des rayons solaires. Le bâtiment étudié a une couleur blanche cela veut dire une absorption faible. D'après GIVONI.B (1978) la température de la surface externe à des grands effets sur les conditions thermiques intérieures, ce dernier, varie avec la clarté de la couleur et la vitesse de l'air en contact avec la surface.

La lecture de la figure IV.12 et IV.13 montre que les courbes des températures surfacique extérieur des espaces mesurés (mess & magasin) sont situés au-dessus des courbes de la température de l'air extérieur et celle de la météo. Excepté celle du foyer qui a une paroi sans isolant thermique, qui est composé d'une lame en tôle galvanisée prélaquée grâce à une valeur de diffusivité thermique relativement importante, ce qui explique l'effet des radiations solaires sur la surface et la durée d'ensoleillement, concernant la température surfacique du toit, elle atteint la valeur maximale de 52.93°C et 54.37°C dans les deux scénarios l'après-midi.

De plus, la ventilation nocturne des espaces investigués (deuxième scénario) a influencé sur la température intérieure de l'air comparativement au premier scénario (sans ventilation). L'écart de température entre les valeurs maximales au niveau du foyer et du mess est significatif, la différence est de 2.13°C, et de 1.73°C successivement ce qui rejoint les résultats Ralegaonkar RV, Gupta en 2014. Quant au magasin la ventilation nocturne n'a aucun impact du moment que de la toiture est exposée durant plus de 10 heures aux rayonnements solaires directes. Givoni en 1981 a confirmé que si on ventile le soir l'air chaud s'évacue et simultanément on rafraîchit l'intérieur du bâtiment par effet de convection. N. Kadri et A. Mokhtari en 2011 ont confirmé l'efficacité de la ventilation nocturne dans l'optimisation des températures de surface internes.

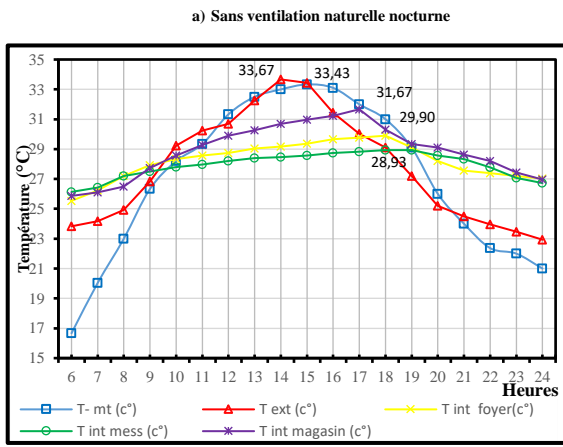


FIG. IV. 9. Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été (18-19-20, Aout 2016).

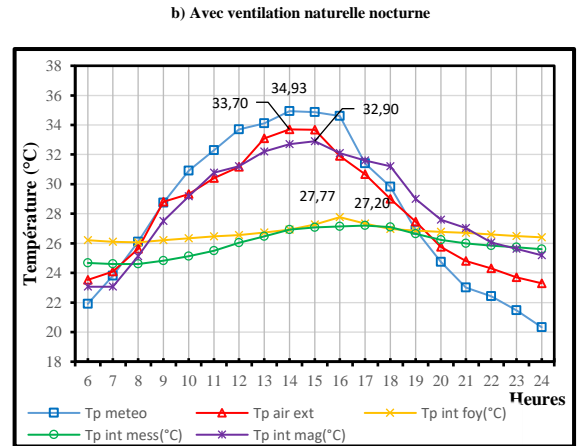


FIG. IV. 8. Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été (21-22-23, Aout 2016).

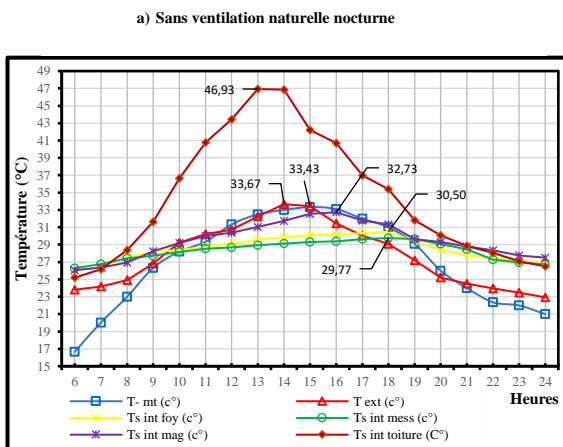


FIG. IV. 11. Variation de température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Mois d'Aout 2016).

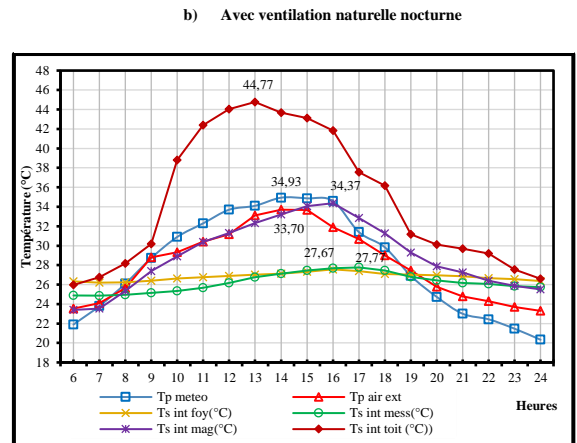


FIG. IV. 10. Variation de température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

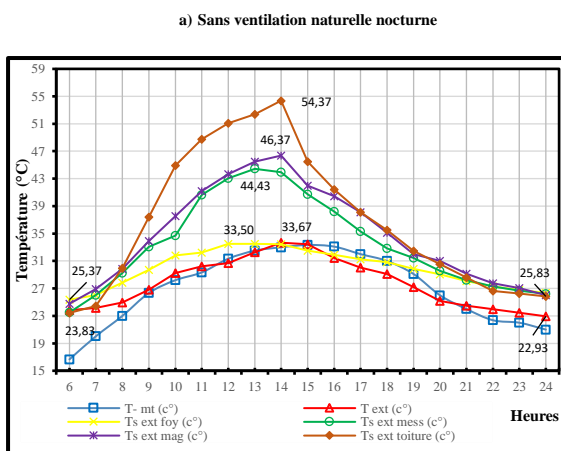


FIG. IV. 13. Variation de température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Mois d'Aout 2016).

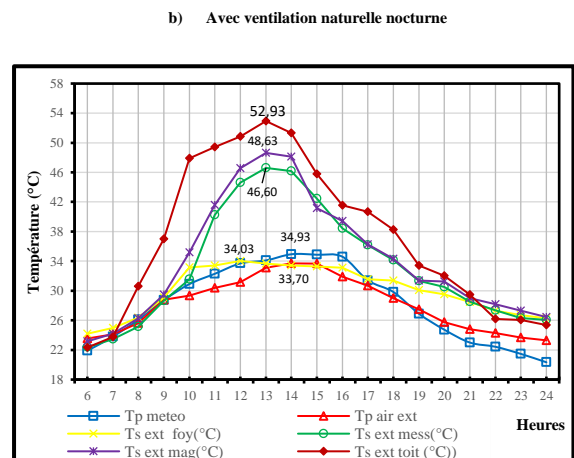


FIG. IV. 12. Variation de température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

IV.2.1.2. Evaluation du confort thermique

L'intervalle du confort thermique de la température opérative selon le type de vêtement, le niveau d'activité et la saison est exposé dans les tableaux 1 et 2⁴Dans cette étude nous allons baser sur la norme ASHRAE 55.

Tableau. IV. 1. Températures opérative recommandée pour une activité sédentaire selon le standard ISO 7730-1984.

Saison	vêtement (clo)	Niveau d'activité (met)	Temp opérative optimale (°C)	Intervalle de Temp opérative (°C)
Hiver	1.0	1.2	22	20-24
Eté	0.5	1.2	24.5	23-26

Tableau. IV. 2. Températures opérative recommandée pour une activité sédentaire, 50% d'humidité relative et une vitesse de l'air de 0.15 m/s selon le standard ASHRAE 55-1992.

Saison	vêtement (clo)	Niveau d'activité (met)	Temp operative optimale (°C)	Interval de Temp operative (°C)
Hiver	0.9	1.2	22	20-24
Eté	0.5	1.2	24.5	23-26

La courbe de la température moyenne intérieure du mess se situe à l'intérieur de la zone de confort entre les deux limites de 6h jusqu'à 12h et de 21h à minuit, et un écart maximum seulement de 1.20°C à 17h avec la limite supérieure. Concernant le foyer la courbe de la température moyenne intérieure est tangentielle avec la limite supérieure du confort entre 6h et 9h, le reste du temps l'allure marque un écart maximum de 1.77°C à 16h avec la limite supérieure, La température intérieure du mess et du foyer se rapproche plus de la limite supérieure que de la limite inférieure. Quant au magasin la courbe s'écarte largement de la zone de confort entre 8h et 22h, avec un écart de 6.90°C. cela confirme que le magasin est en dehors des conditions de température ambiante favorable durant presque toute la journée. Voir figure (Fig-IV-13-) ci-dessous

⁴ Mohammad Taleghani, Martin Tenpierik, Stanley Kurvers, Andy van den Dobbelsteen, A review into thermal comfort in buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 26, October 2013.

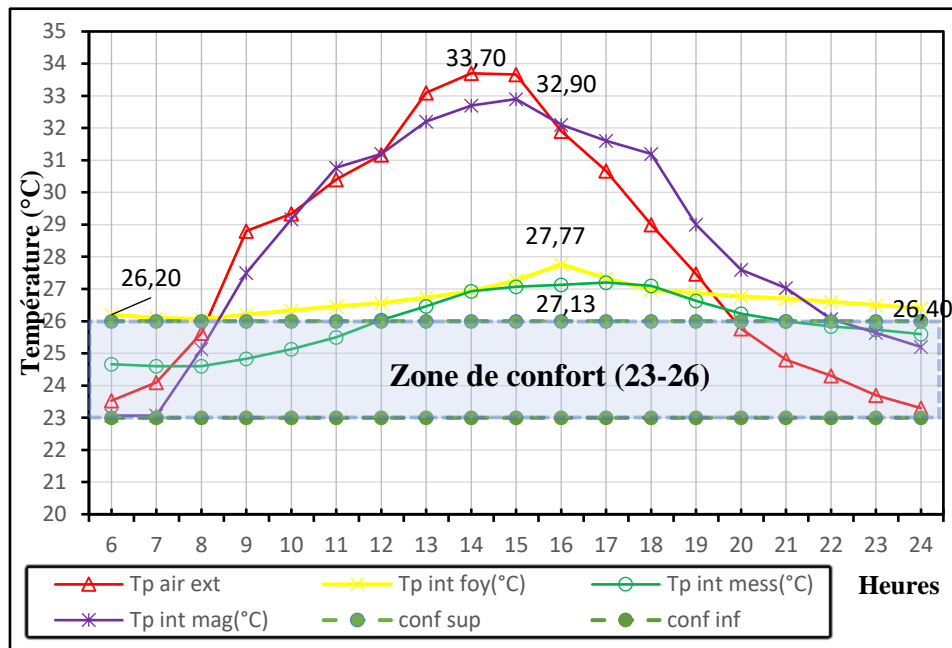


FIG. IV. 14. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort. Période d'été. (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

IV. 3. Interprétation des résultats de la période hivernale du (foyer, mess, magasin)

IV.3.1. Etude comparative de la température moyenne intérieure et extérieure

D'après la Fig-V-15-, la température moyenne à l'intérieur du foyer, a enregistré une faible amplitude de 3.23°C entre une valeur maximale de 17.92°C à 16h et une autre minimale de 14.69°C à minuit. Cependant le mess a aussi marqué une amplitude faible de 4.01°C entre une valeur maximale de 18.70°C à 16h et une autre minimale de 14.69°C à minuit. Alors que celle du magasin est de 3.62°C, la température intérieure varie entre une maximale de 19.09°C et une minimale de 15.47°C. Concernant la température moyenne extérieure, elle oscille entre un maximum de 7 °C et un minimum de 2°C. aussi la moyenne de température météorologique varie entre une valeur minimale de 1°C et une valeur maximale de 7°C. à signaler que la période d'investigation a connu une vague de froid intense et même des chutes de neige dans les hauteurs de 400 m d'altitude durant deux jours consécutifs.

Un écart important de 12.77°C, 13.30°C et 14.14°C, est constaté consécutivement entre la température intérieure du foyer, mess et magasin, à 6h00 et celle de l'extérieure. Donc

l'évolution de la température à l'intérieur de ces locaux est progressivement équilibrée et plus importante comparativement à celle de l'extérieur ou celle de la météo.

Le comportement de l'isolation thermique associée à l'inertie thermique de la paroi en période d'été, effectivement comme un ralentisseur qui résiste à toute les fluctuations de température. En période hivernale elle agit plutôt comme un absorbeur d'énergie extérieure, en contrepartie un obstacle anti pertes de la chaleur intérieure. Ainsi elle empêche les surchauffes en été, l'isolation thermique évite les décroissances brusquées de température en hiver. Cela est constaté dans la chute de la température extérieure jusqu'à 1°C. Selon Balcomb les murs internes sont beaucoup plus efficaces pour le stockage de chaleur que les murs externes étant donné que chacune des deux surfaces, en accentuant l'impact de l'isolant, peut travailler à emmagasiner la chaleur⁵. L'effet de l'inertie est même présent en hiver en protégeant le bâtiment des déperditions par convection ou infiltrations.

On peut conclure que l'isolation thermique extérieure couplée avec l'inertie thermique de la paroi, (brique creuse) par sa capacité et son épaisseur, met bien en évidence la gestion optimale des apports de la chaleur. Elle est plus efficace en hiver lorsque les apports gratuits sont importants, surtout quand 'il s'agit d'un rapport important entre les surfaces vitrées et la surface de la paroi. Ce qui rejoint le résultat de l'investigation de Meral Ozel en 2014. Affirmant l'effet de l'isolation thermique simultanément en saison chaude et froide en justifiant la réduction considérable des périodes de climatisation et du chauffage.

⁵ BALCOMB. J 1983 In " Thermal inertia and natural ventilation – Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil " Octobre, 2004.

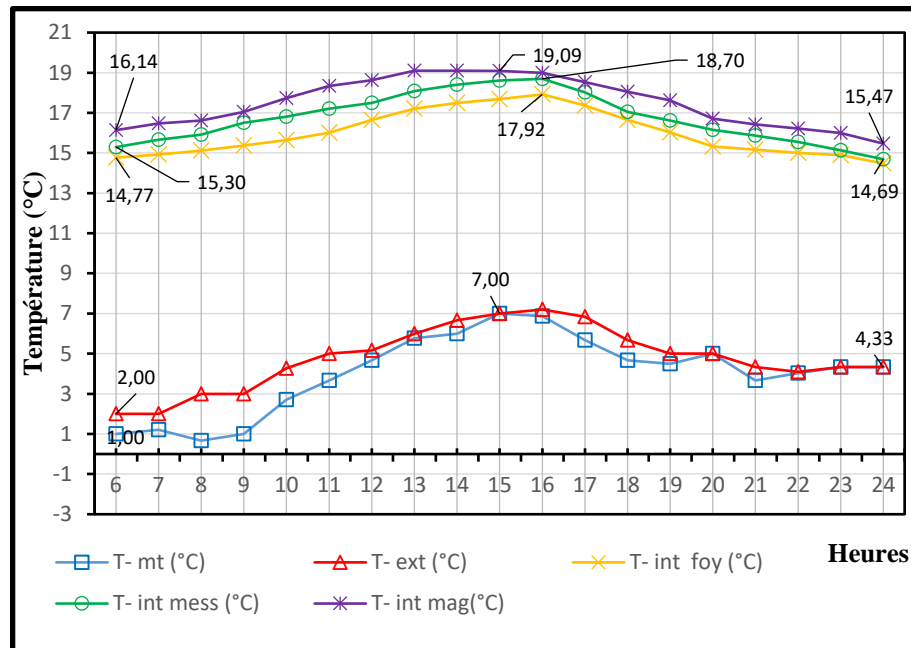


FIG. IV. 15. Variation de la température moyenne de l'air période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).

IV.3.1.1. Etude comparative des températures surfaciques (intérieure et extérieure)

IV.3.1.1.2. Les températures surfaciques intérieures

La lecture du graphique de la Fig-V-16- fait ressortir que la température de surface interne de la paroi des espaces investigués suit l'allure de la température de l'air ambiant interne ; avec un écart max enregistré de $1,7^{\circ}\text{C}$ à 16h, au moment où la température interne est la plus élevée. La température intérieure et surfacique interne enregistrent leur valeur minimale à 6h de $14,89^{\circ}\text{C}$, $15,42^{\circ}\text{C}$, et $16,27^{\circ}\text{C}$ consécutivement au niveau du foyer, mess et magasin.

L'isolation thermique limite les pertes de la chaleur intérieure et étale le temps de la pénétration du froid extérieur. Outre, le rapprochement de la température intérieur des 3 espaces et celle de la surface interne exclu l'effet de la paroi froide, du fait que la différence entre les deux températures ne dépasse pas $1,7^{\circ}\text{C}$ ($T < 3^{\circ}\text{C}$). Le rayonnement direct de l'orientation nord-est du bloc est pratiquement inexistant, à cet effet la transmission de la chaleur par rayonnement solaire est nulle. Un édifice exposé au Nord-est contribue à la réduction des températures surfacique intérieure en l'hiver, suite aux déperditions par convection et par conduction. Ce qui fait que le froid de la nuit ne pénètre dans les locaux que dans la journée, et il est souvent compensé à ce moment par les apports solaires qui passe à travers les vitrages.

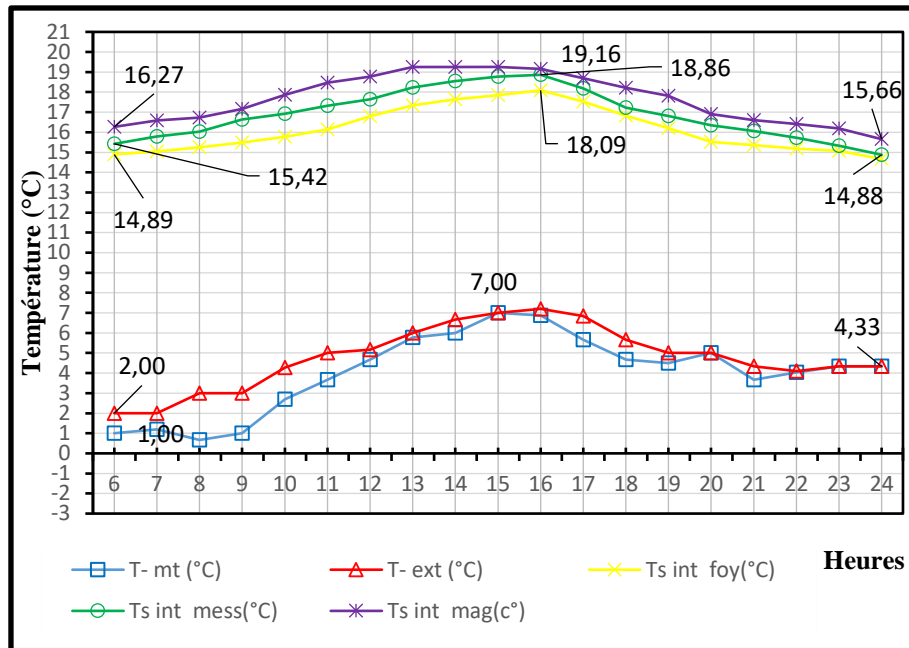


FIG. IV. 16. Variation de la température moyenne surfacique intérieure période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).

IV.3.1.1.2. Les températures surfaciques extérieures

La lecture des graphes ci-dessous fait ressortir que les courbes des températures surfaciques des espaces mesurés progressent parfois avec des fluctuations. La température maximale obtenue au niveau du mess est de 5.86°C à 17h. Cependant celle du foyer est de 5.23°C atteint à 17h, alors que l'espace magasin marque sa maximale de 3.97°C à 14h.

On peut déduire que les températures surfaciques extérieures enregistrées ont une relation directe avec la composition de la paroi et de l'isolation thermique extérieure. Ce procédé couvre la façade du mess et du magasin. L'instabilité de la température surfacique de ces locaux est due d'une part, à l'influence de la tôle galvanisée qui enveloppe la mousse en polyuréthane, sur le changement du coefficient de conductivité initiale de l'isolant exposé à l'impact des vents dominants Nord-Ouest. En outre, l'absence des rayonnement solaires en raison du ciel couvert pendant les jours d'intempéries.

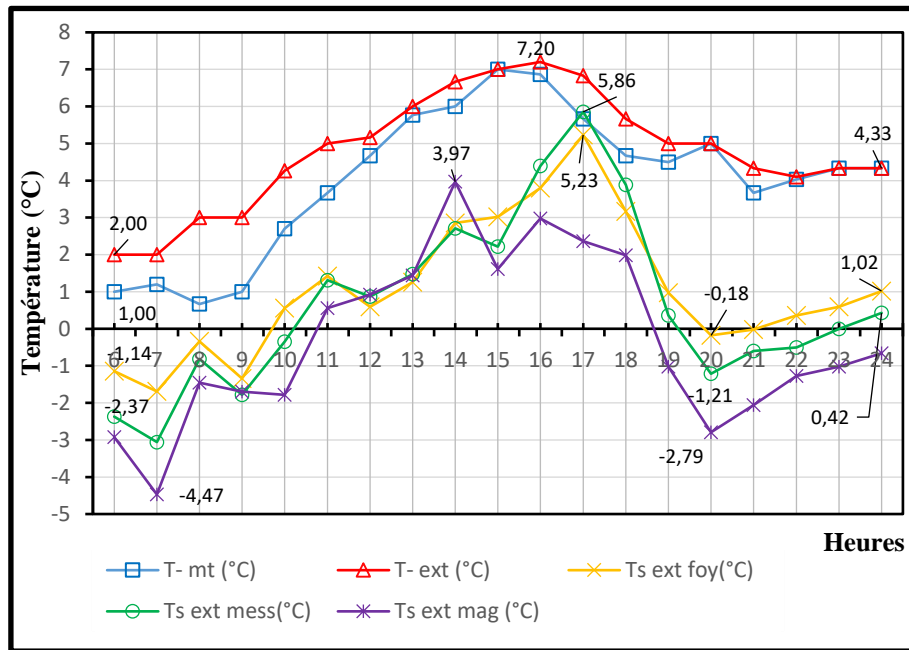


FIG. IV. 17. Variation de la température moyenne surfacique extérieure période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).

En effet le transfert de chaleur trouve son origine dans les écarts de température, qui est obtenu chaque fois qu'un gradient thermique existera au sein de la paroi. Le transfert du flux thermique par conduction à travers le mur s'oppose par les résistances thermiques. Celles-ci dépendent principalement de la conductivité et l'épaisseur de chaque composant, qui lui donne des propriétés d'amortissement plus propices Fig-VI-18et 19. Voir le calcul en **annexe**.

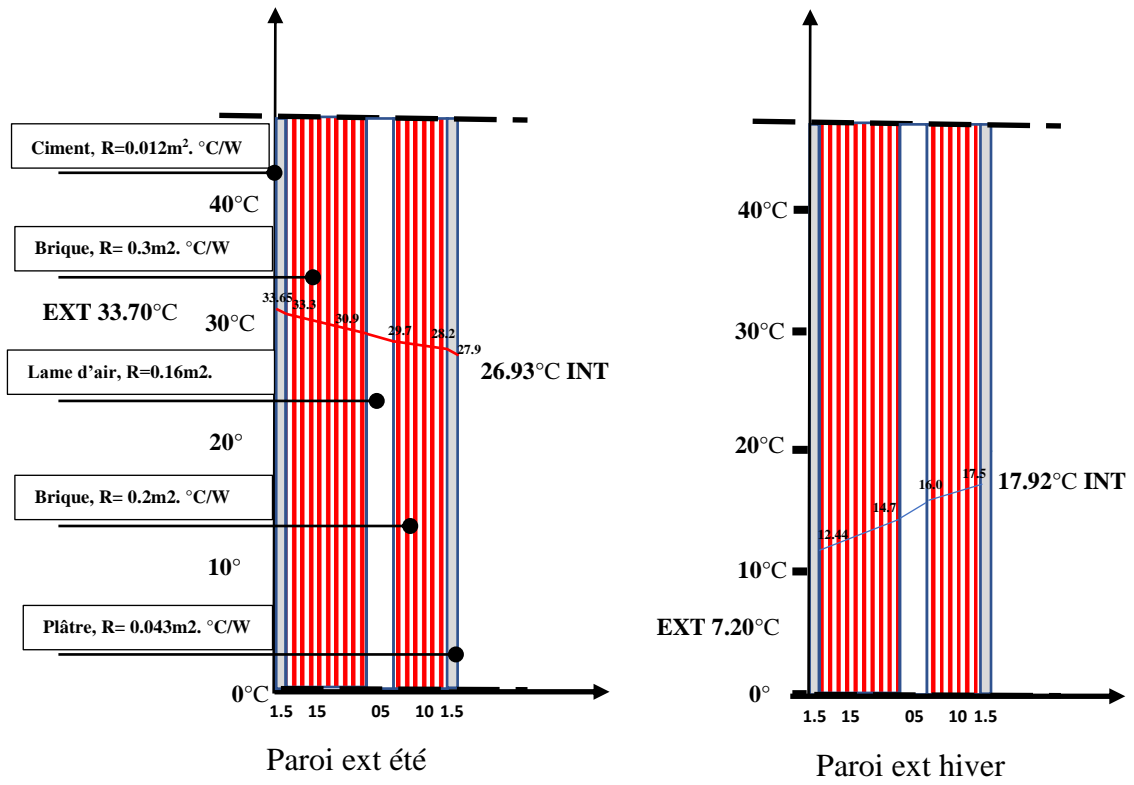


FIG. IV. 18. Gradient thermique de la paroi extérieure du foyer

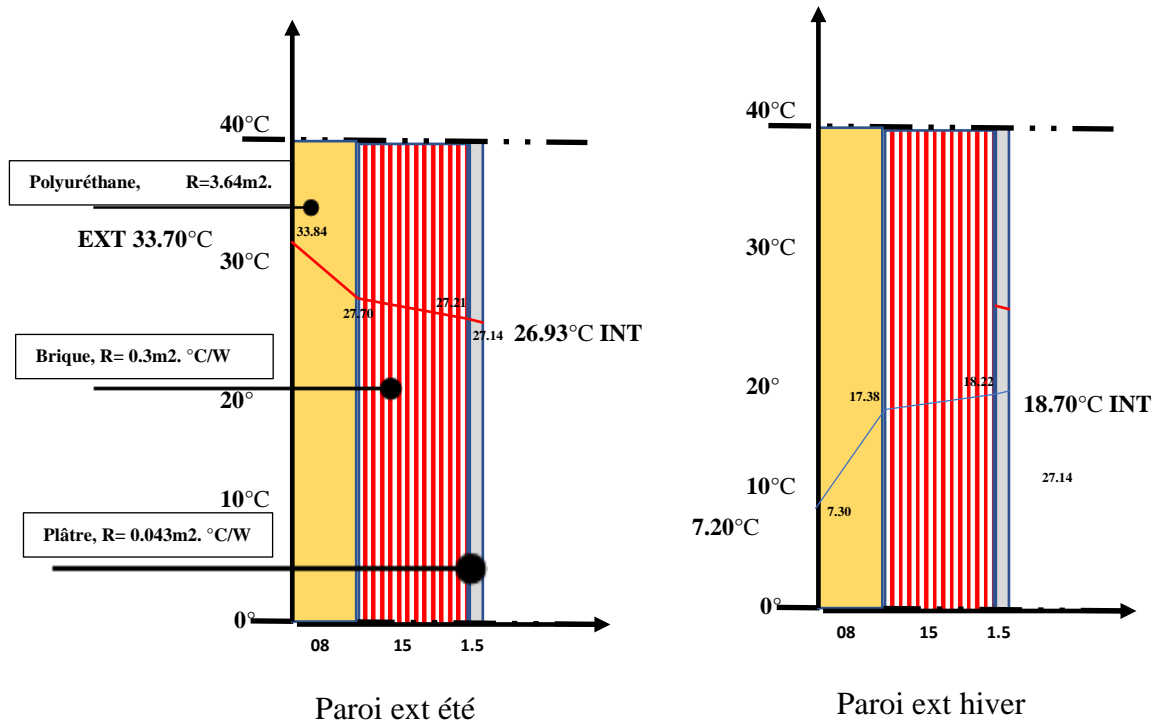


FIG. IV. 18. Gradient thermique de la paroi extérieure du mess

IV.3.2. Etude de l'humidité moyenne intérieure et extérieure

L'humidité relative externe atteint un niveau supérieur par rapport aux humidités interne. Cependant Le minimum de l'humidité relative interne du magasin est de 38 % atteint à 18h, celui de l'extérieur de 61% à 18h. Tandis que le maximum interne est de 50.84 % atteint à 23h, celui de l'extérieur est de 80.33% enregistrée à 6h. Concernant le foyer et le mess l'humidité relative interne atteint son minimum de 40.67% et 43.42% à 18h. Les valeurs élevées de l'humidité intérieure sont remarquées pendant la nuit de 50.84 à 23h. Dans le cas des 3 locaux investigués (foyer-mess, magasin), l'air est moyennement humide entre 35 et 65% durant les jours de mesures. A l'issue des résultats enregistrés, on peut déduire qu'à l'intérieur d'un même espace, l'HR varie en fonction des changements de température : elle augmente si la température baisse. (Figure IV.20).

Donc on constate de ce qui précède, que l'équilibre hygrométrique à l'intérieur est assuré d'une part par l'inertie de la paroi en gardant un faible écart de l'humidité. D'autre part par l'uniformité de la température ambiante.

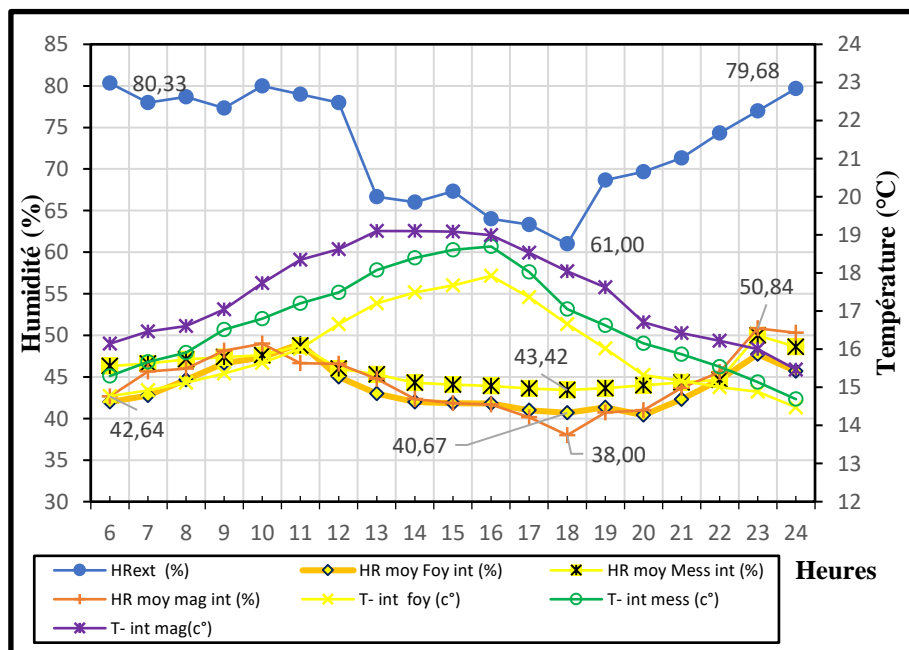


FIG. IV. 19. Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure avec température intérieure du foyer, mess, et magasin. (16-17-18 Mois de janvier 2016).

IV.3.3. Etude des températures moyennes maximales, minimales

Comme ci-indiqué dans la Fig-IV-21- la marge des températures intérieures maximales et minimales est située au-dessus de l'amplitude des températures extérieures maximales et minimales. Même si l'amplitude des températures extérieures est importante celle de l'intérieur demeure réduite. La fluctuation de la température extérieure n'a pas une conséquence directe sur celle de l'intérieur. Cette dernière évolue régulièrement et d'une façon très uniforme. Ce qui traduit l'effet de l'isolation thermique au niveau du mess et magasin, aussi par celui de l'inertie thermique qui marque le déphasage et l'amortissement de l'onde thermique au niveau du foyer.

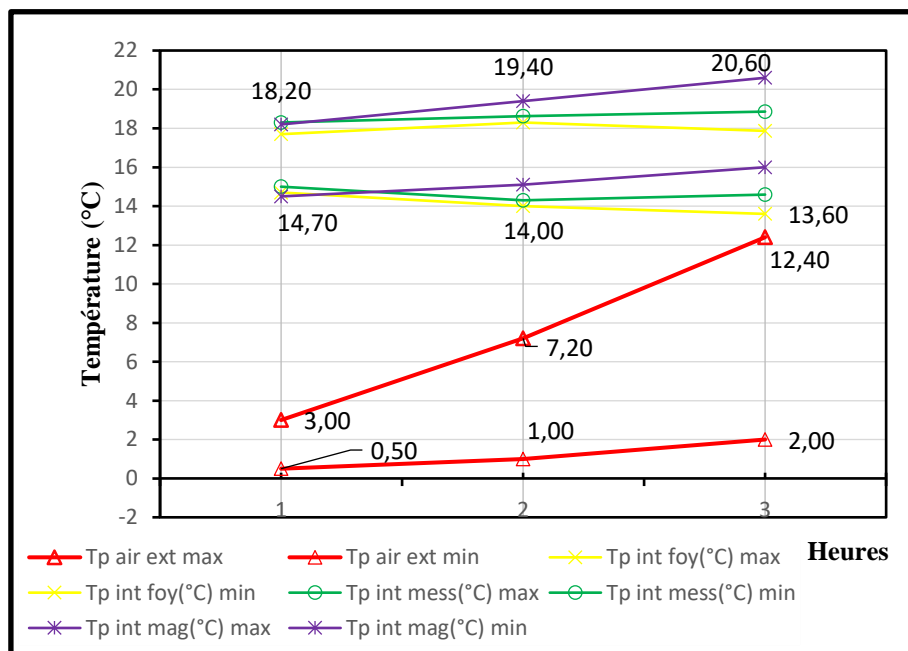


FIG. IV. 20. Variation des températures moyennes maximales, minimales intérieures et extérieures des jours d'investigation période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).

IV.3.4. Comparaison des écarts entre température intérieure et extérieure ($\Delta T = t_i - t_e$)

La lecture du graphe indique que :

La Figure -VI-22- ci-après affirme un écart positif entre la courbe de la moyenne de la température intérieure et celle de la moyenne de la température extérieure dans les différents locaux. Soit un maximum enregistré au niveau du magasin de 14.47.8°C à 7h et un minimum de 10.14 °C obtenu au foyer à minuit. La courbe d'écart du mess est située entre les deux courbes suscitées. Ces écarts expriment l'apport solaire généré par la dissipation de la chaleur stockée vers l'intérieur.

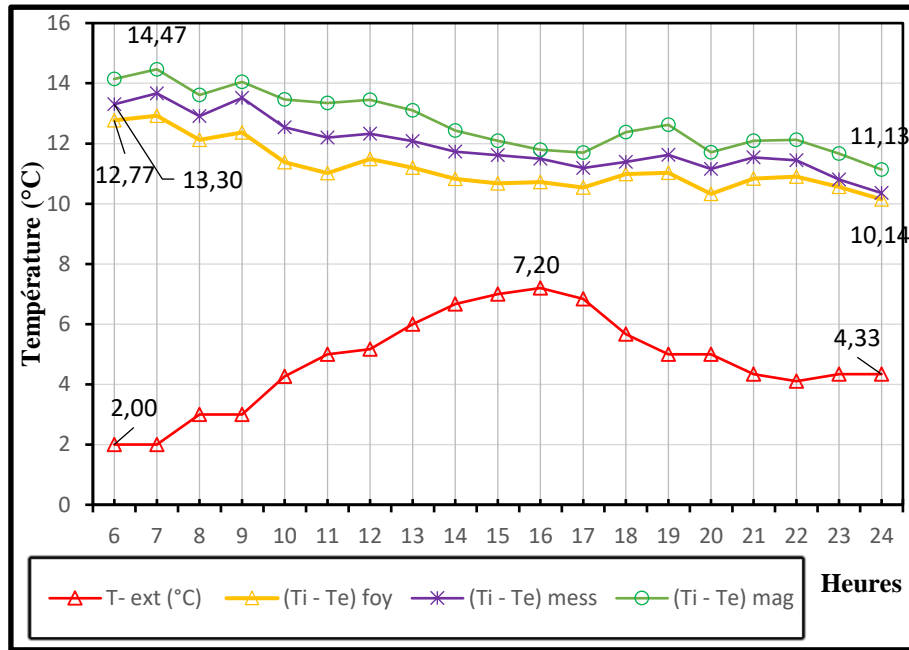


FIG. IV. 21. Ecart de températures moyennes horaires intérieures et extérieures période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).

IV.3.5. Evaluation du confort thermique

La lecture de la figure IV-21, indique que les températures intérieures du foyer restent supérieures à celle de la température moyenne extérieure, toutefois la courbe de ses valeurs se situe au-dessous de la valeur inférieure de confort. Elle reste durant toute la journée inférieure à la limite de confort avec un écart maximal de 5.31°C à minuit et un écart minimal de 2.32°C à 15h.

Pour le mess, les températures intérieures demeurent inférieure de la zone de confort minimale, et supérieures à la température moyenne extérieur pendant toute la journée, la courbe de ses valeurs se situe au-dessous de la limite inférieure de confort avec une température interne varie entre 16.14°C et 19.10°C. L'écart maximal de 5.31°C à minuit et un écart minimal de 1.39°C à 15h.

Concernant le magasin, les températures intérieures demeurent inférieure de la zone de confort minimale, et supérieures à la température moyenne extérieur pendant toute la journée, la courbe de ses valeurs se situe au-dessous de la limite inférieure de confort avec une température interne varie entre 16.14°C et 18.61°C. L'écart maximal de 3.53°C à minuit et un écart minimal de 0.9°C à 15h.

On distingue que le magasin affiche la température moyenne de l'air la plus élevée comparativement à ceux du foyer et du mess, en raison du gain émanant des radiations solaires transmises à l'intérieur du local par la toiture horizontale, d'une couleur rouge sombre dont le coefficient d'absorption est très élevé, ainsi par la paroi et les vitrages orientée Sud-Ouest durant la 03^{ème} journée de mesure ensoleillée.

Quant aux températures moyennes de l'air du foyer et du mess sont très proches et suivent la même évolution. Cela traduit par la résistance de la double murette qui empêche les déperditions thermiques vers l'extérieur qui présente des températures très basses. Pour le mess l'isolation par l'extérieure a permis d'augmenter l'inertie du mur qui a amorti les pertes de température à travers la paroi. Néanmoins le taux de vitrage de 35% estimé important a participé à la fuite de la température intérieure vers l'extérieure, mais l'efficacité de l'isolation thermique a permis la stabilisation de la température par l'équilibre et la compensation entre gain et perte.

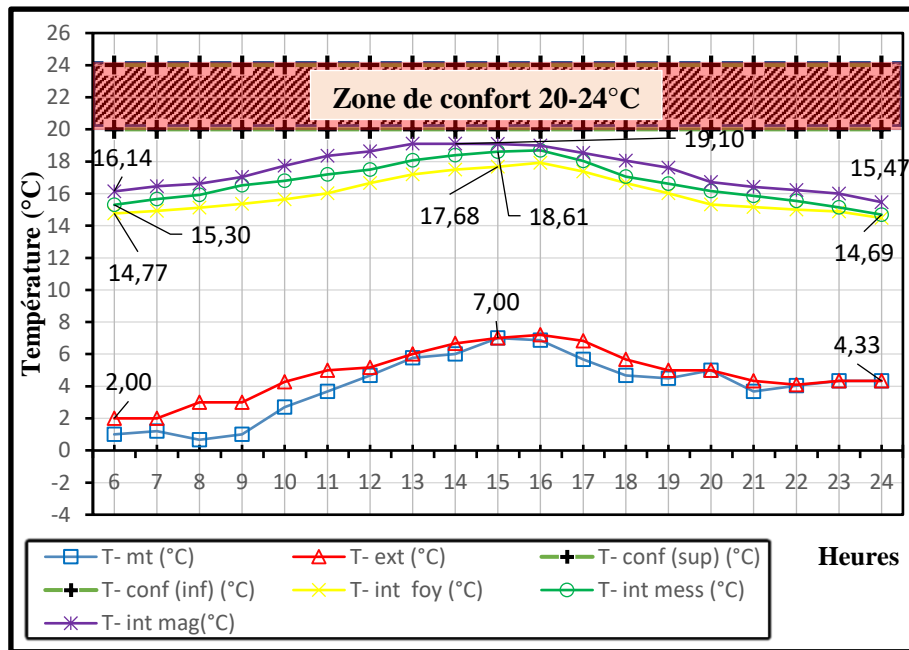


FIG. IV. 22. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort, du foyer, mess, et magasin période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).

Conclusion

L'impact de l'isolation thermique est déterminé par certaines variables et circonstances extérieures. Il est essentiel de connaître la relation de ces variables et de quelle manière elles peuvent affecter la performance de l'isolant thermique, pour pouvoir réaliser de meilleurs résultats. L'optimisation de l'isolation thermique dépend des conditions du climat, des propriétés thermiques et physiques de l'isolant, de l'enveloppe du bâtiment, de la ventilation nocturne et diurne, de l'inertie thermique, de l'occupation et des gains de chaleur interne. L'emplacement et l'épaisseur, aussi bien que les dimensions de fenêtre dans une ambiance intérieure ont également une influence sur l'efficacité.

En effet, l'isolation thermique par l'extérieur a contribué à l'atténuation des fluctuations de la température intérieure pour éluder les surchauffes et contrôler l'amplitude entre température interne et externe. Cette aptitude de retarder l'amplitude thermique, l'isolant associé avec le mur la doit à deux propriétés inhérentes de la brique : Propriétés de l'isolation et l'inertie, certainement en rapport avec l'épaisseur du mur. P.T. Tsilingiris 2006 a confirmé l'efficacité de l'isolation thermique par l'extérieur dans l'optimisation du confort thermique intérieur. L'introduction d'un isolant permet un abaissement important de la température intérieure qu'avec la lame d'air tandis que l'emplacement idéal de l'isolant dans la paroi est celui du côté externe de la masse thermique. La position de l'isolation a également un effet significatif sur le déphasage, et sur l'amortissement des murs.

Cependant, une enveloppe bien isolée peut entraîner des surchauffes durant les jours chauds d'été où le rayonnement solaire absorbé pendant la journée (entrée par les fenêtres) peut être piégé à l'intérieur. Le rapport surface vitrées surface opaques des parois (N.Est) et (S.Ouest), du point de vue thermique est très complexe, surtout dans les climats où le chauffage est essentiel en hiver et le refroidissement est exigé en été. Dans notre cas d'étude les fenêtres notamment orientées (sud-ouest) ont fourni un gain de chaleur maximal en hiver pendant le jour ou la perte de la chaleur est minimale à cause de l'isolant thermique qui a préservé les gains du jour en freinant les fuites de chaleur durant le soir.

De l'autre côté, la même fenêtre a provoqué l'augmentation de température de l'air à l'intérieur notamment dans le magasin en été. L'utilisation d'autres systèmes passifs de refroidissement pour adapter l'exploitation des surfaces vitrées, à travers l'occultation mobile ou bien ombragée la fenêtre complètement pendant l'été, afin de réduire le gain de chaleur

directe par radiation solaire durant le jour, en autorisant ainsi la dissipation thermique pendant la nuit, mais également peut être exposée à la radiation solaire pour profiter des gains de chaleur en hiver. En conséquence la sélection du vitrage pour la performance thermique du bâtiment à la fois en hiver et en été, J.L.Izard, 1993 suggère que le vitrage idéal serait celui qui présenterait un facteur de transmission énergétique en allant en diminuant, lorsque l'énergie solaire incidente augmente

Le moyen d'améliorer les performances de l'isolation thermique devrait être associée à une ventilation nocturne appréciable pendant l'été pour évacuer la chaleur répartie à l'intérieur. En outre, avec la compensation entre gains et pertes, la température intérieure reste stable. Rejoignant par cette révélation l'avis de plusieurs chercheurs sur l'effet du couplage isolation thermique extérieure avec de la ventilation nocturne comme Mohammed Salah-Eldin Imbabi (2012), S. M. A. Bekkouche et al (2013), Francesca Stazi (2013), en adoptant la stratégie d'isolation mixte et en utilisant une couche d'isolation externe ventilée. Cette solution s'avère être optimale, tant en termes de confort que de consommation d'énergie, en été et en hiver et permettant aux environnements intérieurs des bâtiments de maintenir leur comportement dynamique. L'application de l'isolation thermique du côté externe avec l'assurance de la ventilation nocturne, permet une faible et très stable température.

De cette investigation, il ressort que le rôle de l'isolation thermique par l'extérieur est certainement déterminant dans la création du confort thermique intérieur. Dépendant de l'épaisseur, l'emplacement, les critères thermiques (conductivité et résistance) de l'isolant. Son impact est aussi appréciable sur la consommation énergétique dans le bâtiment, l'été comme l'hiver.

Dans le but de valider les résultats de cette investigation, on procède dans le chapitre suivant à une simulation à l'aide d'un programme informatique (TRNsys 16). Justifiant d'une part l'évaluation de la performance des espaces étudiés et d'autre part l'opportunité de l'amélioration de leur performance thermique et énergétique. Suivant différents types d'isolation thermique et épaisseurs.

Introduction	109
IV.1- Evaluation de l'isolation extérieure sur le confort thermique.....	109
IV.1.1. Interprétation des résultats de la période estivale du (foyer, mess, magasin). Scénario (01) sans ventilation naturelle nocturne (18-19-20 Aout 2016).....	109
IV.1-1-1-Etude comparative de la température moyenne (intérieure et extérieure).....	109
IV.1-1-2-Etude comparative des températures surfaciques (intérieure et extérieure).....	111
IV.1-1-2-1- Les températures surfaciques intérieures	111
IV.1-1-2-2- Les températures surfaciques extérieures	113
IV.1-1-2-3- Etude de l'humidité moyenne intérieure et extérieure	114
IV.1-1-2-4-Comparaison des écarts entre température intérieure et extérieure ($\Delta T = t_i - t_e$) .	114
IV.1-1-2-5-Evaluation du confort thermique.....	116
IV.2. Interprétation des résultats de la période estivale du (foyer, mess, magasin) ; scénario (02) avec ventilation naturelle nocturne (21-22-23 aout 2016).....	116
IV.2.1. Etude comparative entre scénario (01) et scénario (02) des températures (intérieure et extérieure).....	118
IV.2.1.1. Etude comparative entre scénario (01) et scénario (02) des températures surfaciques (intérieure et extérieure)	119
IV.2.1.1.1. Etude comparative des températures surfaciques intérieures.....	119
IV.2.1.1.2. Etude comparative des températures surfaciques extérieures	120
IV.2.1.2. Evaluation du confort thermique.....	122
IV. 3. Interprétation des résultats de la période hivernale du (foyer, mess, magasin).....	123
IV.3.1. Etude comparative de la température moyenne intérieure et extérieure	123
IV.3.1.1. Etude comparative des températures surfaciques (intérieure et extérieure).....	125
IV.3.1.1.2. Les températures surfaciques intérieures	125
IV.3.1.1.2. Les températures surfaciques extérieures.....	126
IV.3.2. Etude de l'humidité moyenne intérieure et extérieure	129

IV.3.3. Etude des températures moyennes maximales, minimales	130
IV.3.4. Comparaison des écarts entre température intérieure et extérieure ($\Delta T = t_i - t_e$)	130
IV.3.5. Evaluation du confort thermique.....	131
Conclusion.....	133

FIG. IV. 1.Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été	111
FIG. IV. 2.Variation de la température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Aout 2016).	112
FIG. IV. 3.Variation de la température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin.....	113
FIG. IV. 4.Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure avec température intérieure du foyer, mess,	114
FIG. IV. 5.Ecart de températures moyennes horaires intérieures et extérieures période été, du foyer, mess, et magasin. Période d'été. (18-19-20 Mois d'Aout 2016).....	115
FIG. IV. 6. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort. Période d'été.....	116
FIG. IV. 7. Variation de la température moyenne de l'air période d'été du foyer, mess et magasin ..	118
FIG. IV. 8.Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été (21-22-23, Aout 2016).....	121
FIG. IV. 9. Variation de la température moyenne de l'air du foyer, mess et magasin d'été (18-19-20, Aout 2016).....	121
FIG. IV. 10.Variation de température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV. 11.Variation de température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV. 12. Variation de température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV. 13. Variation de température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (18-19-20 Mois d'Aout 2016).....	121
FIG. IV. 14. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort. Période d'été.....	123
FIG. IV. 15. Variation de la température moyenne de l'air période d'hiver du foyer, mess et magasin	125
FIG. IV. 16. Variation de la température moyenne surfacique intérieure période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).	126
FIG. IV. 17. Variation de la température moyenne surfacique extérieure période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016).	127

FIG. IV. 19. Gradient thermique de la paroi extérieure du mess 128

FIG. IV. 19. Gradient thermique de la paroi extérieure du foyer 128

FIG. IV. 20. Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure avec température intérieure du foyer, mess, et magasin. (16-17-18 Mois de janvier 2016). 129

FIG. IV. 21. Variation des températures moyennes maximales, minimales intérieures et extérieures des jours d'investigation période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016)... 130

FIG. IV. 22. Ecart de températures moyennes horaires intérieures et extérieures période été, du foyer, mess, et magasin période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016)..... 131

FIG. IV. 23. Comparaison de la température moyenne intérieure avec les limites de confort, du foyer, mess, et magasin période d'hiver du foyer, mess et magasin (16-17-18 Mois de janvier 2016)..... 132

Introduction

L'investigation réalisée sur les trois locaux étudiés nous a permis d'obtenir des résultats expérimentaux et tirer des conclusions sur le comportement thermique des locaux expérimentés. L'influence de l'isolation thermique sur la température de l'air intérieur ainsi que la température surfacique des différentes parois est mise en évidence.

Afin de généraliser ces résultats sur plusieurs scénarios, une simulation numérique s'impose. La simulation numérique permet d'envisager des cas d'étude difficilement réalisables sous différents scénarios. Pour cela nous allons entamer une étude du comportement thermique de ces locaux par le logiciel TRNSYS 16.

V.1. Descriptif et critères du choix du programme TRNSYS

Le logiciel TRNSYS offre la possibilité de prendre en compte plusieurs phénomènes compliqués et offre des résultats plus adéquats. En effet, la simulation dynamique en régime transitoire permet de considérer l'effet de l'inertie thermique du bâtiment et le stockage de la chaleur. Doté d'une bibliothèque riche en éléments (environ 50 familles), ce logiciel permet de simuler les bâtiments (mono et multizone) et plusieurs systèmes de climatisation et de chauffage ainsi que les équipements solaires.

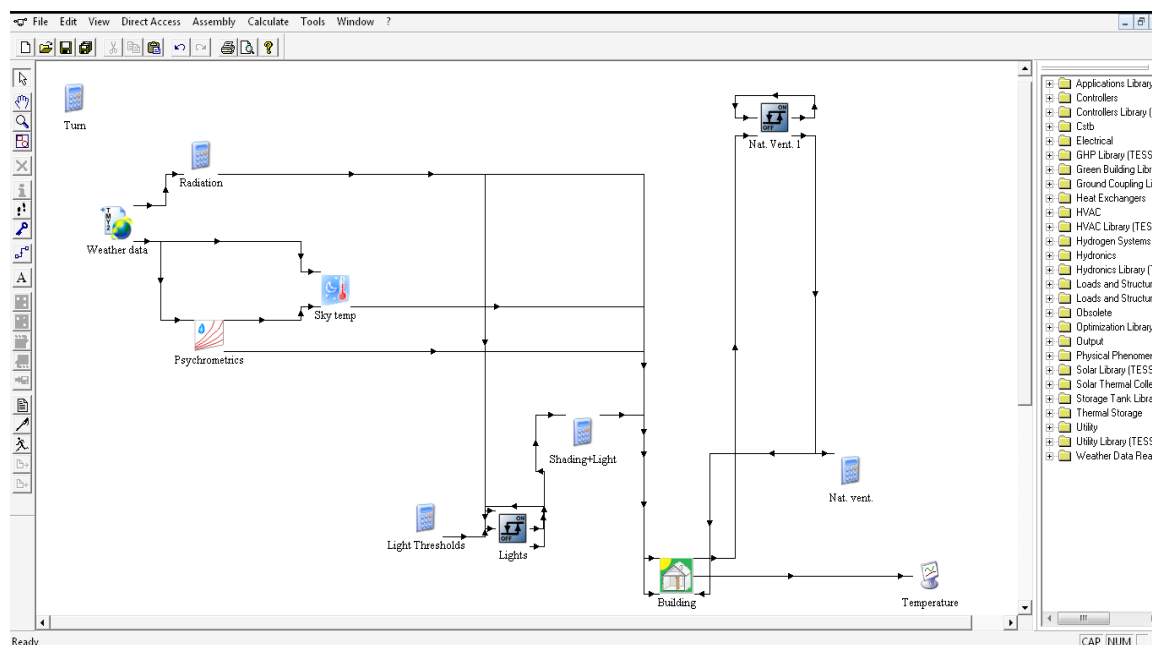


FIG.V. 1 : Interface du logiciel TRNSYS 16. (Source : image du logiciel).

V.2. Etapes de la simulation

La simulation doit suivre un ordre logique afin d'aboutir à des résultats corrects. D'abord, les propriétés thermo physiques et géométriques du bâtiment sont introduites sous l'extension TRNBUILD. Il permet de modéliser le bâtiment et choisir les matériaux.

Le premier objectif est de valider les résultats des mesures in situ. La confrontation des résultats de la simulation avec ceux de l'expérimentation permettent d'évaluer la capacité du logiciel à simuler le ou les paramètres souhaités est ensuite réalisée.

Les données météorologiques de type TMY (Typical Meteorological Year) sont obtenues via le logiciel METEONORM 7. Seulement pour cette étude et vu la disponibilité des données météo mesurées et celles in situ, nous allons utiliser en premier temps ces données là pour la validation des résultats de l'investigation, ensuite le fichier météo généré par le logiciel METEONROM sera employé.

V.2.1. Confrontation avec les résultats de l'expérimentation

La confrontation des résultats de la simulation à ceux mesurés in situ s'effectue en deux étapes. La validation des températures de l'air intérieur des trois locaux ensuite la validation des températures surfaciques des parois choisies.

Les jours choisis sont :

- Pour la période hivernale, nous allons prendre la journée 16 janvier.
- Pour la période estivale sans ventilation nocturne, nous allons prendre la journée 18 Aout, et la journée 21 Aout pour la ventilation nocturne.

V.2.1.1. Validation des résultats in situ par le modèle TRNSYS

V.2.1.1.1. Validation de la température de l'air intérieur en période hivernale 16-17-18 janvier 2015

A) - RDC local foyer

La figure -V-2- illustre la variation de la température de l'air du local foyer pendant les trois jours d'hiver. Nous remarquons que les courbes de température simulée et mesurée suivent

la même allure avec certain écart obtenu. En effet, la température maximale de la première journée est obtenue entre 16 h et 17h dans les deux cas. Alors que pour la deuxième journée, la température maximale est obtenue à 16 h. Cette constatation est valable pour la troisième journée. Les écarts de température entre la température expérimentale et celle simulée varient entre 0.2 °C et 1.02 °C pour la première journée et entre 0 °C et 1.68 °C pour la deuxième journée. Cependant pour la troisième journée, un écart de température entre 0.21 °C et 1.58 °C est obtenu. Le logiciel TRNSYS reproduit pratiquement les mêmes températures obtenues par l'expérimental pour ce local.

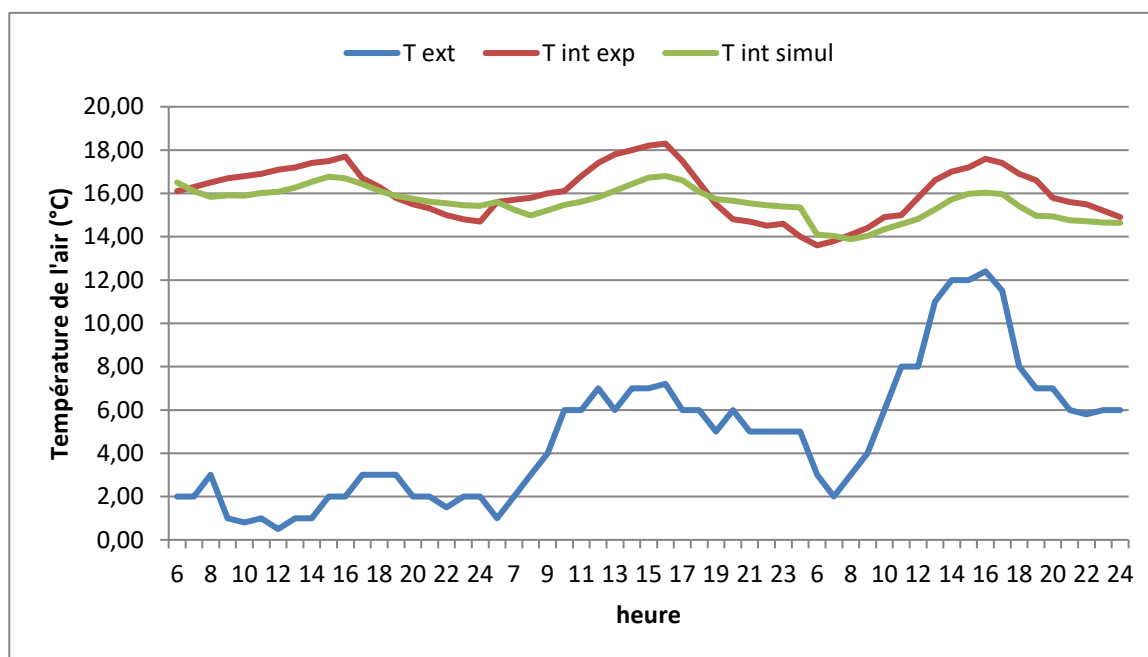


FIG.V. 2 : Variation de la température de l'air du foyer pour les trois jours d'hiver.

B) - Etage courant local mess

La variation des deux températures mesurée et simulée du local mess pendant les trois jours d'hiver est représentée sur la figure-V-3-. Les deux courbes suivent la même allure. La température maximale pendant la première journée est obtenue entre 15h et 16h pour les deux cas alors que l'écart de température varie entre 0 °C et 1.26 °C pendant cette journée. Pour le deuxième jour de simulation, la température maximale est obtenue à 16 h pour les deux cas avec une différence de température variant entre 0 °C et 1.62 °C. Cependant pour la troisième journée, la température maximale est obtenue à 16 h pour les deux cas avec un déphasage de deux heures par rapport à la température de l'air extérieure. L'écart de température entre les deux valeurs expérimentales et de simulation varie entre 0.12 °C et 1.42 °C.

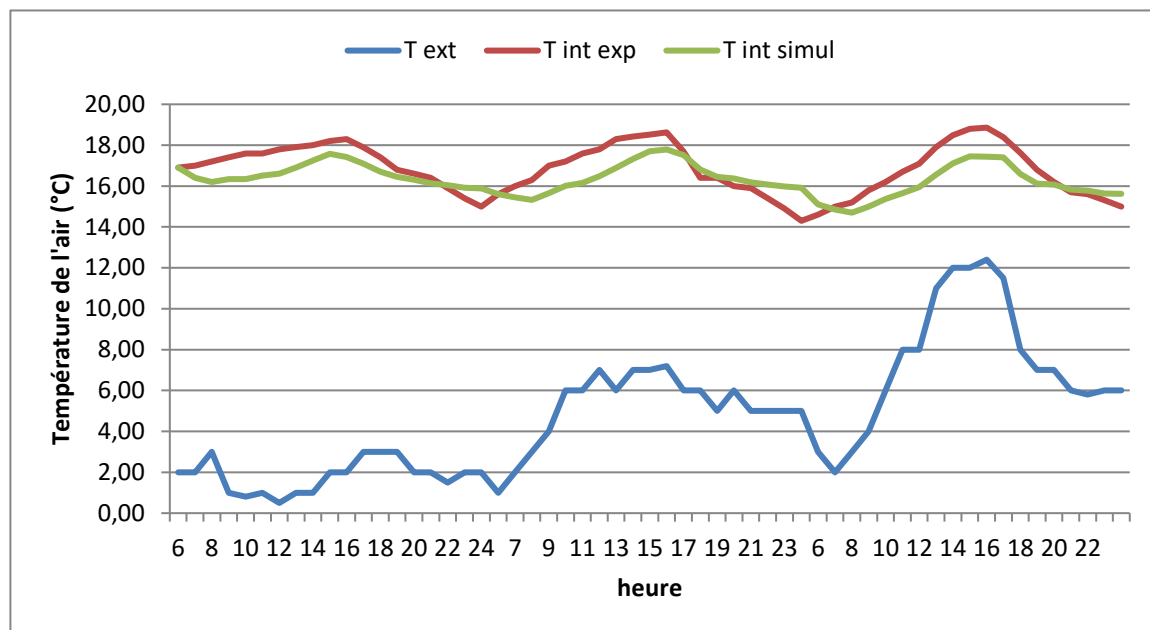


FIG.V. 3 : Variation de la température de l'air du mess pour les trois jours d'hiver

C)-Etage sous comble local magasin

Cependant pour le local magasin représenté sur la figure -V-4, nous pouvons constater que certaines différences existent. En effet, pour la première journée (16 janvier) la température maximale de la journée est atteinte à 15 h en expérimental et à 16 h pour la simulation, néanmoins cette température est pratiquement stable entre 15 h et 16h. La différence de température obtenue entre l'expérimental et la simulation pendant cette journée varie entre 0°C et 1.26 °C. Alors que pour le deuxième jour représenté sur la même figure, nous constatons que la température maximale de la journée est obtenue à 13 h pour l'expérimental et à 16 h pour la simulation avec un décalage de 3 h. l'écart de température entre les deux valeurs expérimental et simulation varie entre 0° C et 1.87 °C. Pour la troisième journée d'hiver, la température maximale est obtenue à 16h pour le cas expérimental et à entre 15 h et 16 h pour la simulation. L'écart de température entre les deux cas varie entre 0 °C et 1.62 °C (sauf à minuit avec un écart de 2°C).

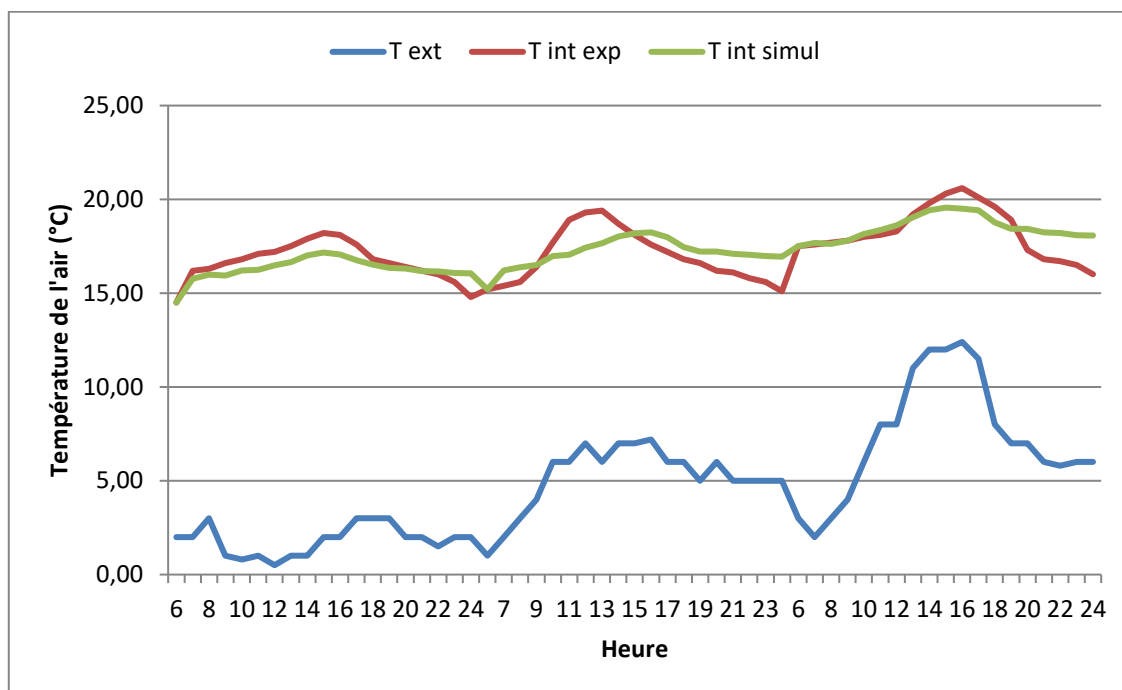


FIG.V. 4 : Variation de la température de l'air du magasin pour les trois jours d'hiver

V.2.1.2. Validation de la température de l'air intérieur période estivale

A₁) -RDC local foyer (sans ventilation nocturne)

La figure-V-5- illustre la variation de la température de l'air du local foyer pendant les trois jours (18 au 20 Aout) pour le cas sans ventilation nocturne. Nous remarquons pour la première journée (18 Aout) que la température de l'air maximale est obtenue à 16 h pour les deux cas. La différence entre les deux températures mesurée et simulée varie au cours de la journée entre 0.05 °C et 1.49 °C. Un déphasage de 2 heures entre la température de l'air extérieure maximale et la température de l'air intérieure maximale. Alors que pour la deuxième journée (19 Aout) représentée sur la même figure, la température de l'air maximale mesurée est obtenue à 16 h tandis que pour la simulation cette température est obtenue entre 16h et 17h. L'écart de température entre les valeurs mesurées et simulées pendant la journée varie entre 0.16 °C et 1.41°C. Cependant pour la troisième journée (20 Aout), nous remarquons que l'écart de température varie entre 0.2 °C et 1.71 °C avec une température maximale obtenue expérimentalement à 16 h et par la simulation entre 16h et 17 h. l'écart de température obtenue entre la température de l'air extérieure maximale et la température de l'air intérieure maximale est estimé à 2 h.

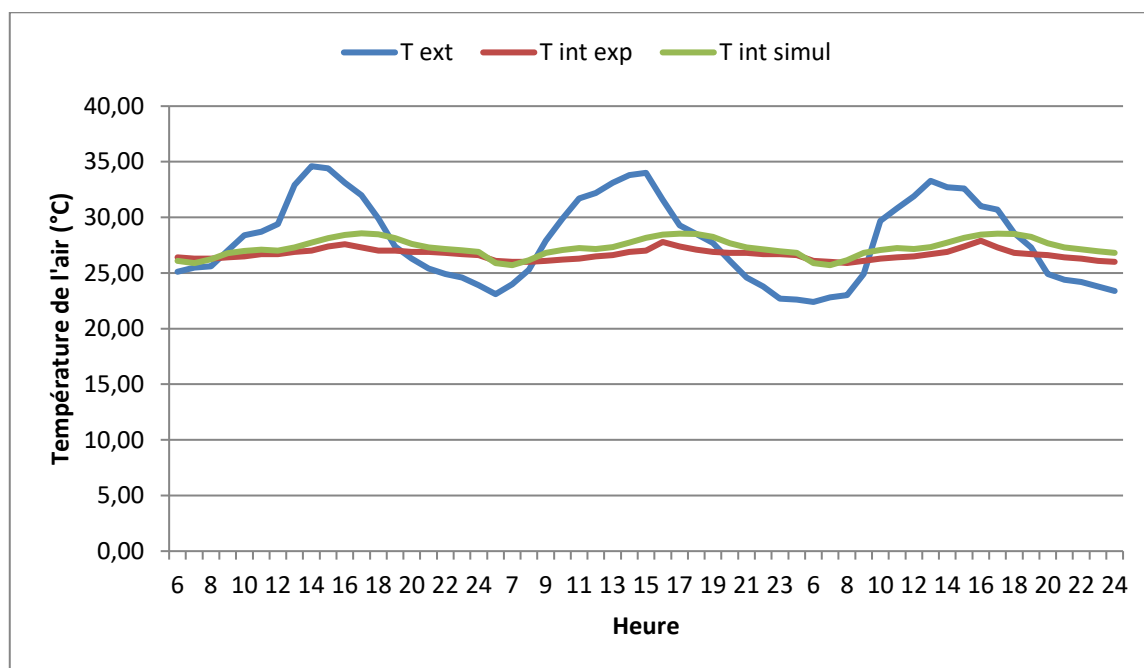


FIG.V. 5 : Variation de la température de l'air du foyer pour les trois jours d'été (Journée 18-20 Aout).

A₂) -RDC local foyer (avec ventilation nocturne)

La figure-V-6- illustre la variation de la température de l'air du foyer pendant les trois jours d'été avec ventilation nocturne (21-23 Aout). Pour la première journée (21 Aout) nous constatons que les deux courbes suivent la même allure avec un décalage légère. En effet la température de l'air maximale est atteinte à 18 h expérimentalement alors que pour la simulation, cette température est atteinte entre 17 h et 18h. L'écart de température maximal entre les deux valeurs varie au cours de la journée entre 0°C et 1.19 °C. Le déphasage de température entre l'intérieure et l'extérieure est obtenu de 4h.

Tandis que pour la deuxième journée, un écart de température de l'air entre les deux cas de 0 °C à 0.71 °C est obtenu. La température maximale de l'air est obtenue expérimentalement à 18h tandis que pour la simulation cette température est obtenue à 15 h. Pour la troisième journée représentée sur la même figure, nous remarquons que les deux courbes suivent la même allure. L'écart de température entre les deux valeurs varie entre 0 °C et 1.48 °C avec un maximum de température de l'air intérieure obtenue à 18h.

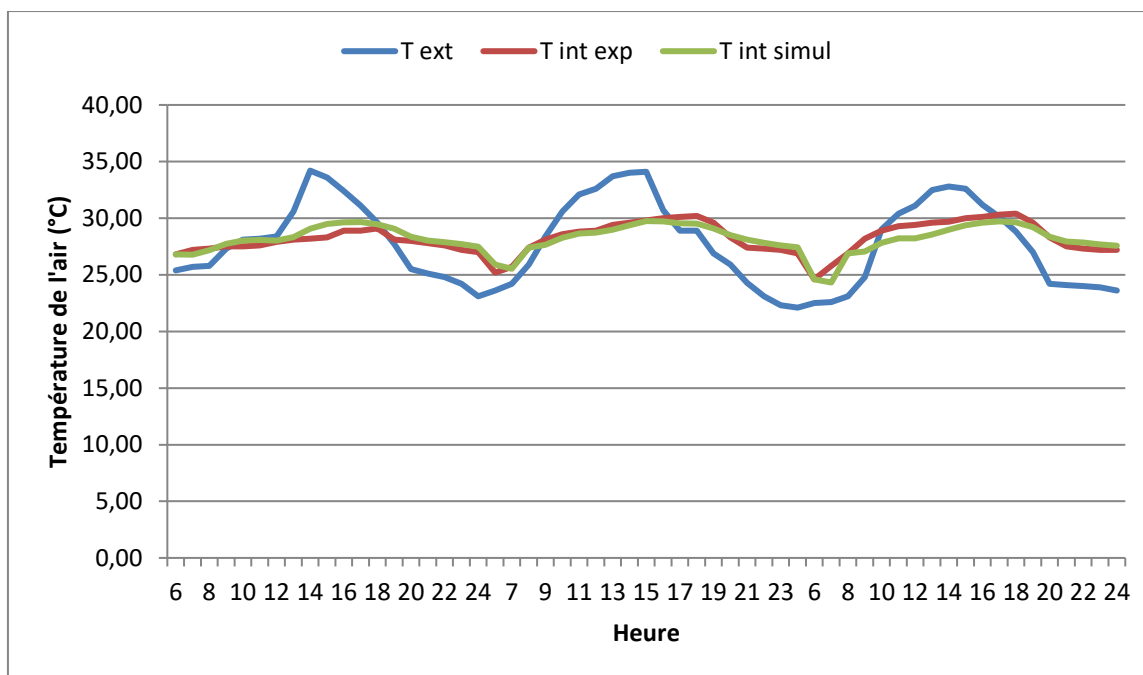


FIG.V. 6 : Variation de la température de l'air du foyer pour les trois jours d'été (Journée 21-22-23 Aout).

La simulation du local foyer pour les trois jours d'été avec et sans ventilation naturelle nocturne montre que le logiciel TRNSYS peut reproduire avec une grande précision la variation de la température de l'air à l'intérieure de ce local.

B₁) - Etage courant local mess (sans ventilation nocturne)

La variation de la température dans le local mess pour les trois jours sans ventilation nocturne (journée 18-20 Aout) est représentée sur la figure-V-7-. Pour la première journée, nous ne constatons que les deux températures de l'air mesurée et simulée suivent la même allure avec un maximum de température de l'air obtenu à 17 h soit un déphasage de 3h par rapport à la température de l'air extérieure. Une différence de température entre les deux valeurs entre 0.22 °C et 1.27 °C est obtenue pour cette journée. Alors que pour la deuxième journée, l'écart de température entre les deux valeurs varie entre 0.09 °C et 1.32 °C. La température maximale journalière est obtenue à 17h pour les deux cas. Cependant que pour la troisième journée, nous remarquons que l'écart de température varie entre les deux cas varie entre 0.05 °C et 1.30 °C avec une température maximale obtenue à 17 h.

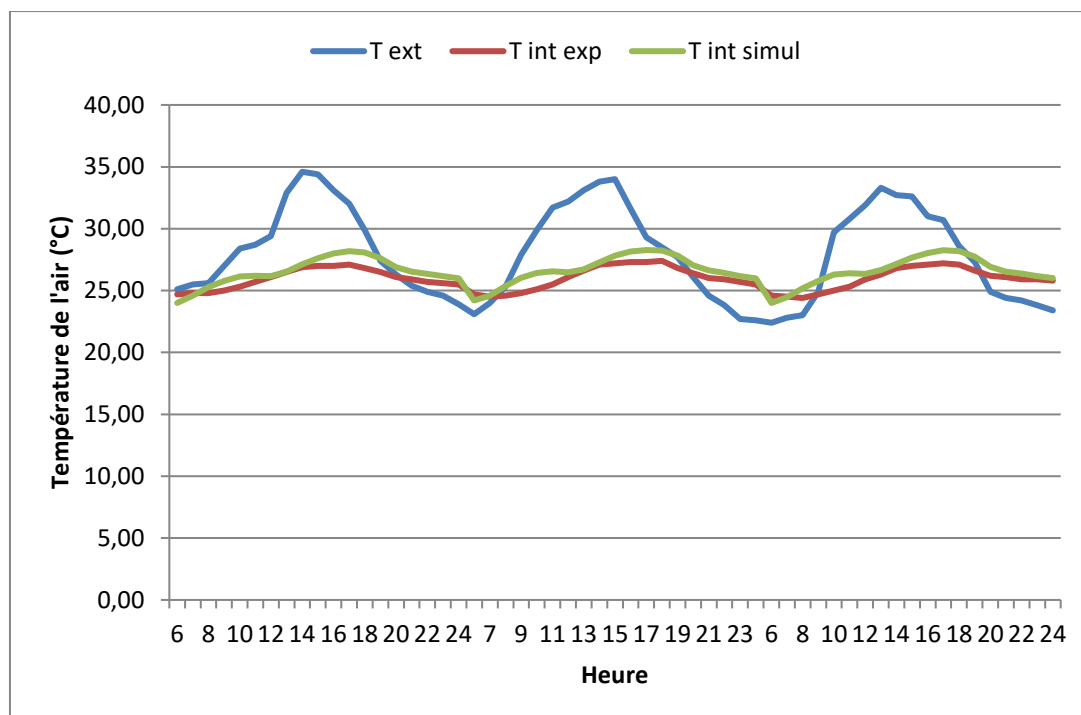


FIG.V. 7 : Variation de la température de l'air du mess pour les trois jours d'été (Journée 18-20 Aout).

B₂) - Etage courant local mess (avec ventilation nocturne)

La figure-V-8- illustre la variation de la température de l'air dans le local mess avec une ventilation naturelle nocturne pour les trois jours d'été (21-23 Aout). Nous remarquons que pour la première journée (21 Aout), les deux courbes suivent la même allure. Un écart de température entre les deux valeurs mesurée et simulée entre 0 °C et 0,92 °C est obtenu pendant la journée. Alors que la température journalière maximale est obtenue à 18 h expérimentalement et entre 17h et 18h par la simulation. Tandis que pour la deuxième journée (22 Aout), l'écart de température entre les deux valeurs s'étale entre 0 °C et 0,87 °C pendant cette journée avec une température maximale obtenue expérimentalement à 18 h et à 16 h par la simulation. Alors que pour la troisième journée représentée sur la même journée, nous observons que l'écart de température entre les deux valeurs pendant la journée varie entre 0 °C et 0,93 °C (sauf à 7h où un écart de température de 1,70 °C est obtenu). La température maximale journalière est obtenue à 19 h expérimentalement et à 18 h par la simulation. La température de l'air est pratiquement stable entre 18 h et 19 h pour les deux cas.

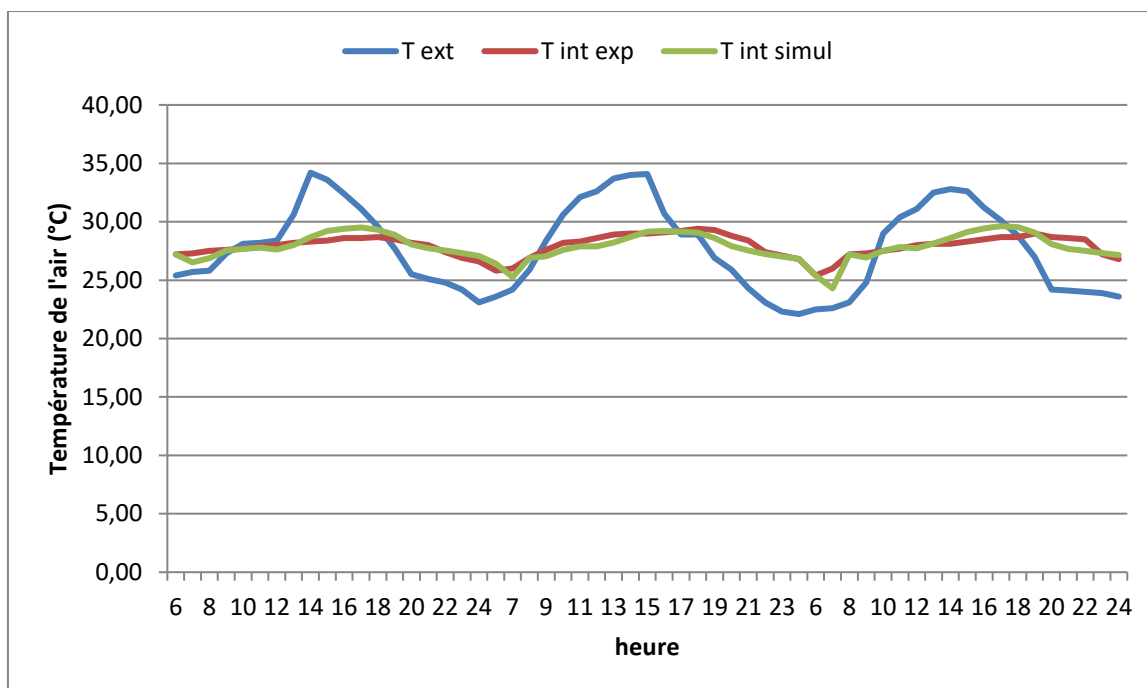


FIG.V. 8 : Variation de la température de l'air du mess pour les trois jours d'été (Journée 21-23 Aout).

Pour le local mess, le logiciel TRNSYS donne des résultats satisfaisants. Les températures de l'air obtenues par la simulation sont très proches de celles obtenues par l'expérimental.

C1) - Etage sous comble local magasin (sans ventilation nocturne)

La variation de la température pour le local magasin pendant les trois jours d'été (18-20 Aout) est illustrée sur la figure-V-9-. Pour le premier jour (18 Aout), un certain décalage entre les deux courbes est obtenu. En effet, l'écart de température journalière varie entre 0,49 °C et 1,92 °C. La température maximale journalière est obtenue expérimentalement à 15h pour les deux cas. Alors que pour la deuxième journée (19 Aout), un écart de température entre 0,11 °C et 1,57 °C est obtenu. La température maximale est obtenue à 15 h pour les deux cas. Cependant pour la troisième journée (20 Aout), l'écart de température varie entre 0,14 °C et 1,55 °C (sauf à 10 h et 11 h où un écart de 2 °C est obtenu). La température maximale journalière de l'air est obtenue à 15 h pour les deux cas.

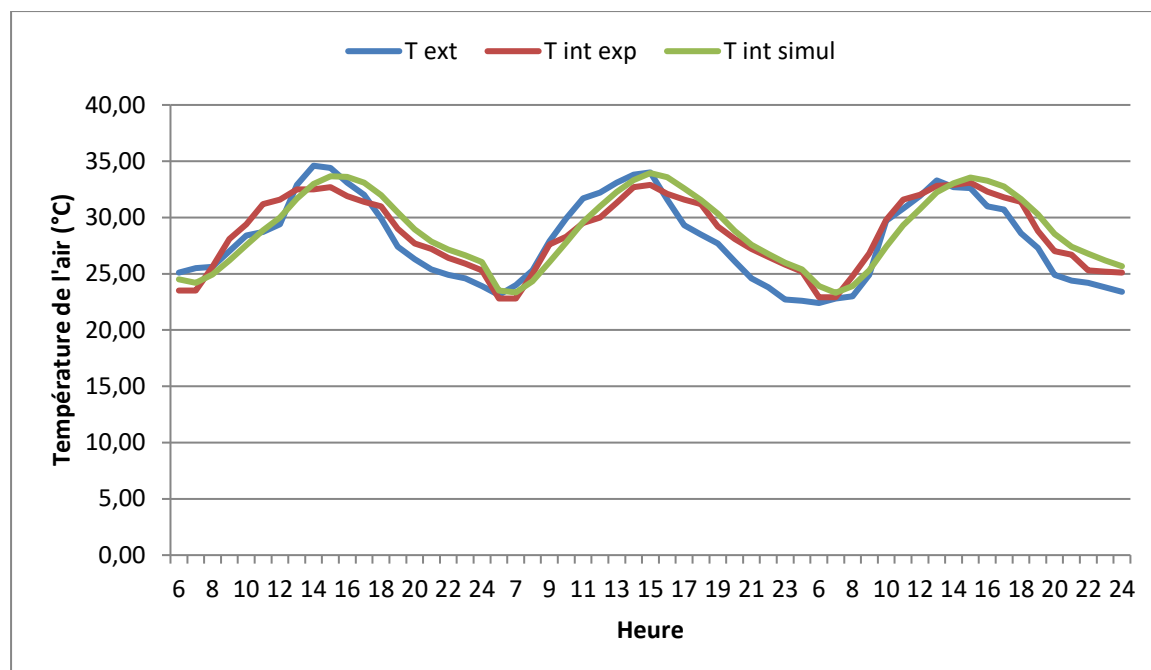


FIG.V. 9 : Variation de la température de l'air du magasin pour les trois jours d'été (Journée 18-20 Aout).

C₂) - Etage sous comble local magasin (avec ventilation nocturne)

La variation de la température de l'air du magasin pendant les trois jours d'été avec ventilation nocturne (21- 23 Aout) est illustrée sur la figure-V-10-. Nous remarquons que pour la première journée la température de l'air mesurée et simulée suit la même allure avec une température maximale obtenue entre 15 h et 16 h et un écart de température entre les deux valeurs de 0 °C à 1.84 °C. Cependant pour la deuxième journée (22 Aout) représentée sur la même figure, nous remarquons que la température maximale est obtenue expérimentalement entre 16 h et 17 h alors que cette dernière est obtenue par la simulation entre 15 h et 16 h. l'écart de température entre les deux cas pour cette journée varie entre 0 °C et 1.8 °C (sauf à 10 h où l'écart obtenu est de 2.07 °C). Cependant pour la troisième journée représentée sur la même figure, l'écart de température entre les deux cas varie entre 0.08 °C et 1.74 °C (sauf à 14 et 15 h où l'écart dépasse 2 °C). La température maximale est obtenue entre 16 h et 17 h par les mesures et entre 15 h et 16 h par la simulation.

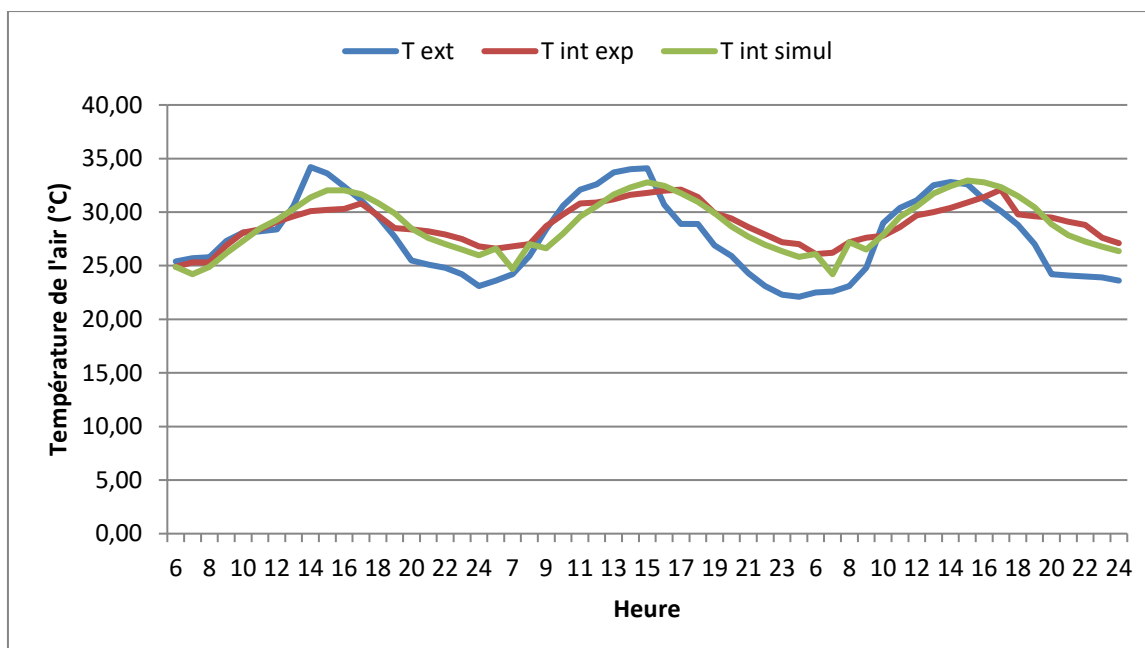


FIG.V. 10 : Variation de la température de l'air du magasin pour les trois jours d'été (Journée 21-23 Aout).

V.2.1.3. Validation de la température surfacique

Après avoir validé les températures de l'air ambiant, nous allons par la suite valider les températures surfaciques intérieures obtenues.

V.2.1.3.1. Période hivernale

A) - RDC local foyer

La figure-V-11- illustre la variation de la température surfacique intérieure du local foyer pendant les trois d'hiver (16-18 janvier). Pour le premier jour, nous remarquons que les deux courbes suivent la même allure. La température surfacique maximale est obtenue à 16 h. Cependant l'écart de température surfacique (simulée et mesurée) varie entre 0 °C et 1.51 °C pendant la journée. Alors que pour la deuxième journée (17 Janvier) illustrée sur la même figure, l'écart de température entre les deux cas varie entre 0.27 °C et 1.61 °C au cours de la journée (sauf à minuit ou l'écart obtenu est de 1.87 °C). La température maximale surfacique est obtenue à 16 h pour les deux cas. Cependant pour la troisième journée (18 janvier), l'écart de température varie entre 0.13 °C et 1.87 °C. La température surfacique maximale est obtenue entre 16 h et 17h pour les deux cas.

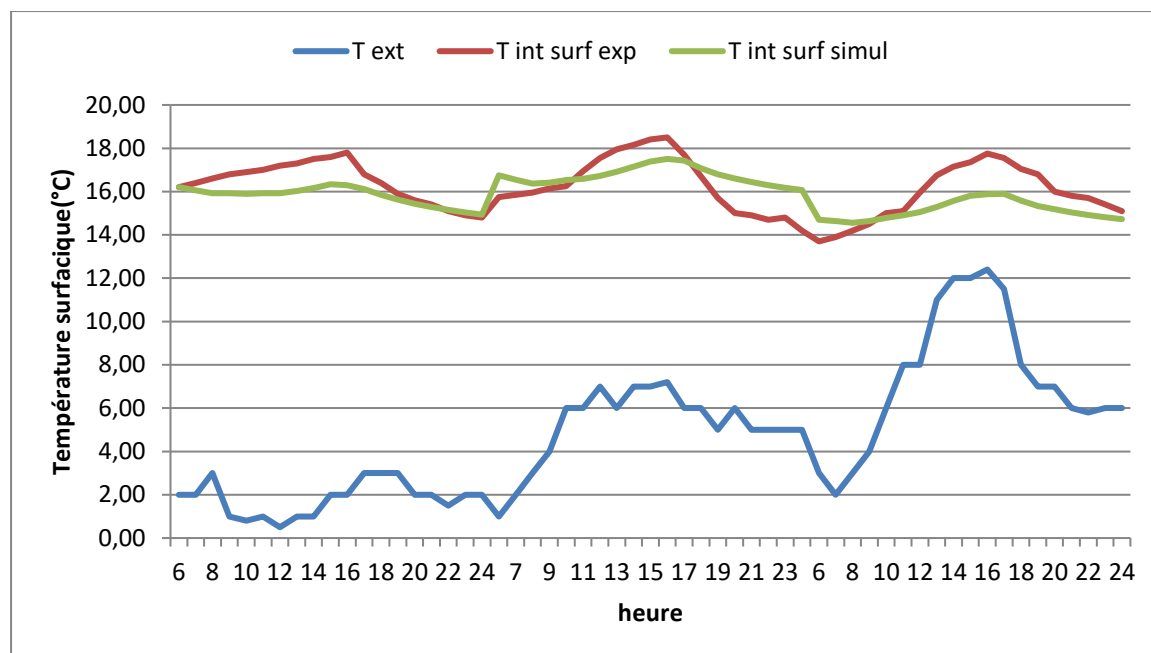


FIG.V. 11 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'hiver (Journée 16-18 Janvier).

B) - Etage courant local mess

La figure 12 illustre la variation de la température surfacique du local mess pour les trois jours d'hiver. Pour le premier jour (16 janvier), nous observons que les deux températures surfaciques simulée et mesurée du local mess suivent la même allure. En effet, l'écart de température obtenu entre ces deux valeurs varie entre 0 °C et 1.21 °C pendant la journée avec une température surfacique maximale obtenue à 16 h. Pour le deuxième jour représenté sur la même figure, l'écart de température obtenu entre les deux cas varie entre 0.07 °C et 1.68 °C (sauf à 23 h et minuit où l'écart obtenu est de 2 °C). La température surfacique maximale pendant la journée est obtenue entre 15 h et 16 h. Concernant la troisième journée (18 janvier), l'écart de température obtenu entre les deux cas varie de 0.01 °C et 1.78 °C.

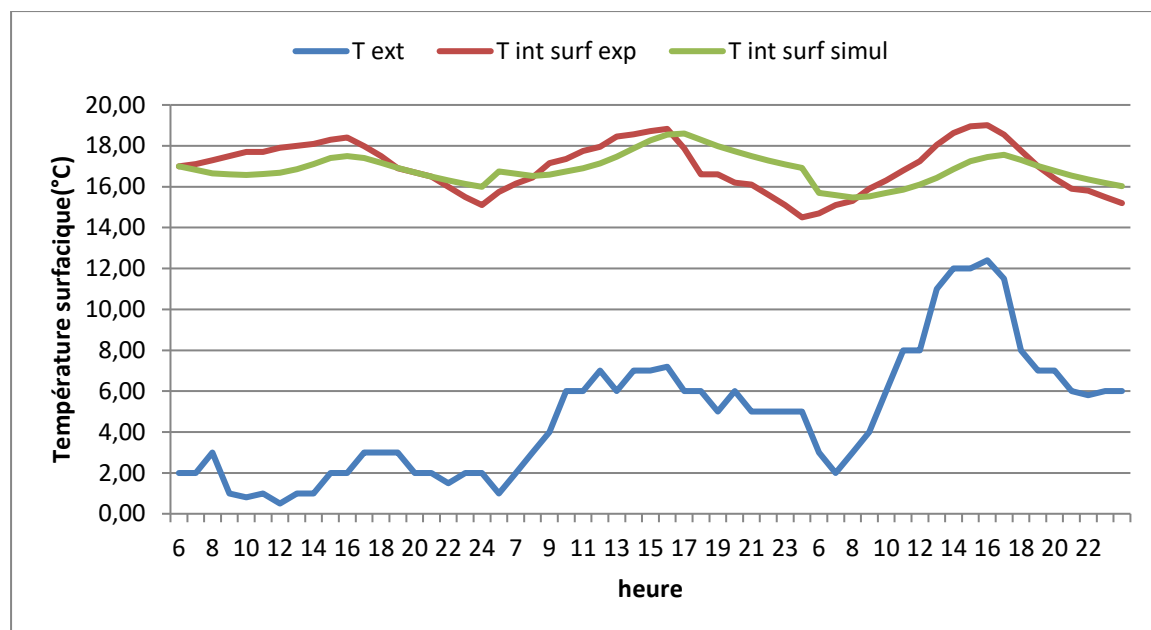


FIG.V. 12 : Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'hiver (Journée 16-18 Janvier).

L'analyse des résultats obtenus pour le local mess, nous pouvons constater que le logiciel TRNSYS reproduit pratiquement les mêmes températures surfaciques de ce local.

C)- Local magasin

- Température surfacique du mur

La variation de la température surfacique du mur du local magasin pendant les trois jours de l'hiver est illustrée sur la figure-V-13 qui montre que pour le premier jour (16 janvier), l'écart de température entre les deux cas varie entre 0 °C et 1.55 °C avec une température maximale obtenue entre 15 h et 16 h. Cependant pour le deuxième jour, la température surfacique maximale est obtenue expérimentalement à 13h et à 17 h par la simulation. L'écart de température entre les deux valeurs varie entre 0 °C et 1.34 °C pendant la journée (sauf entre 11 h et 13h où l'écart dépasse 2 °C). Alors que pour la troisième journée (18 Janvier) représentée sur la même figure, nous remarquons que les deux courbes suivent la même allure. La température surfacique maximale est obtenue entre 16 h et 17 h pour les deux cas. L'écart de température entre ces deux cas varie entre 0.66 °C et 1.78 °C (à l'exception entre 15 et 16 h où l'écart est de 2 °C).

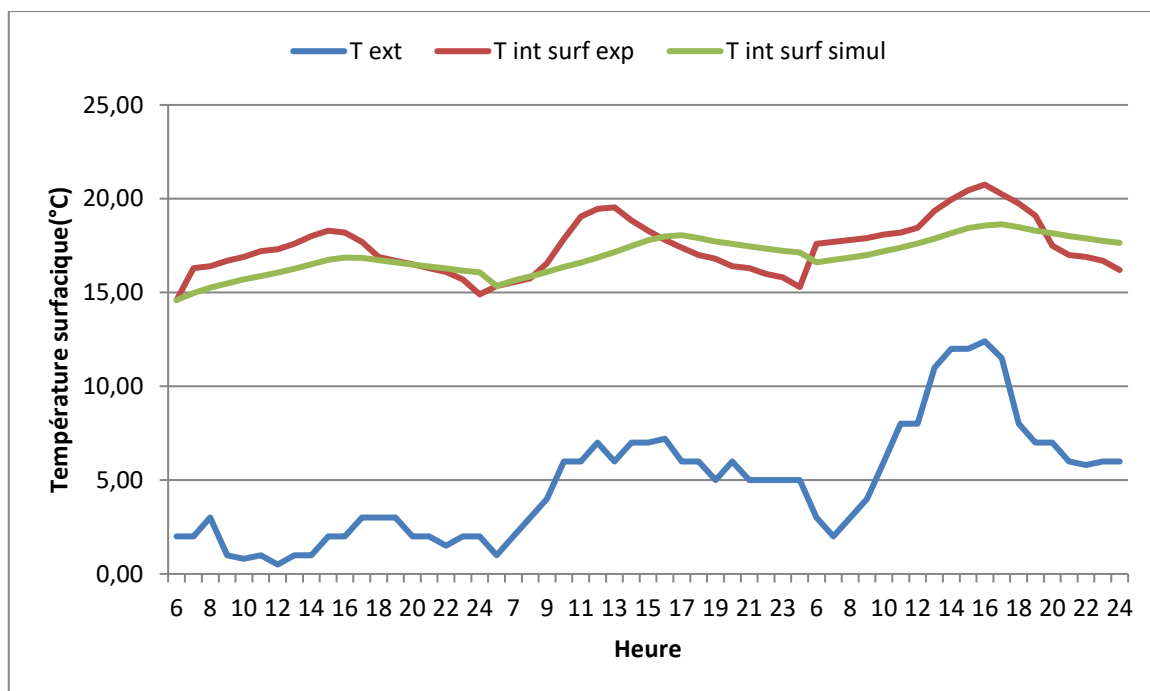


FIG.V. 13 : Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'hiver (Journée 16-18 Janvier).

Les résultats obtenus auparavant pour le local magasin montrent que certains écarts de température existent sur quelques heures. Mais d'une façon générale, le logiciel donne des résultats fiables pour ce local.

- Température surfacique du toit

La température surfacique du toit est illustrée sur la figure 14 qui montre que pour le premier jour de simulation (16 Janvier), les deux courbes suivent la même allure. En effet pendant cette journée, l'écart de température obtenu entre les deux cas varie entre 0.03 °C et 1.2 °C avec un maximum obtenu à 15 h pour les deux cas. Cependant pour la deuxième journée (17 janvier), un écart de température entre 0.16 °C et 1.91 °C. La température maximale journalière est obtenue à 15 h pour les deux cas. Alors que pour la troisième journée, un certain décalage de la température surfacique maximale est obtenu. Cette température atteint le point maximal expérimentalement à 17 h alors que dans la simulation ce point est obtenu à 15 h. l'écart de température entre les deux cas obtenu pendant cette journée varie de 0.33 °C à 1.62 °C.

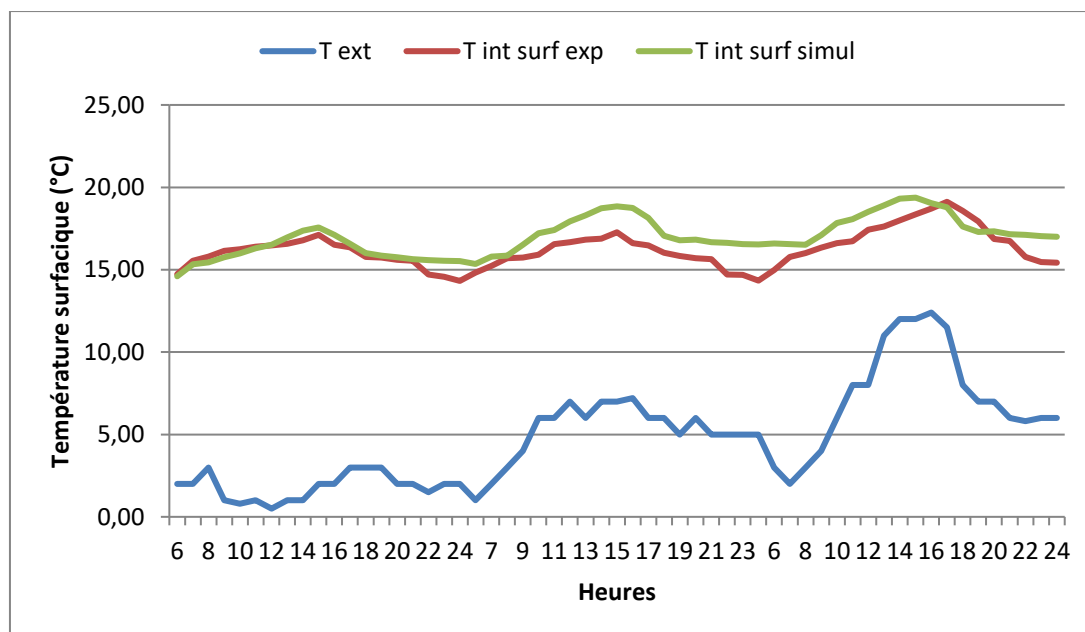


FIG.V. 14 : Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'hiver (journée 16-18 Janvier).

V.2.1.3.2. Période estivale

A1) - RDC local foyer (sans ventilation nocturne)

La figure 15 illustre la variation de la température surfacique du foyer pendant les trois d'été (18-20 Aout) pour le cas sans ventilation naturelle nocturne. Pour la première journée (18 Aout), l'écart de température obtenu entre les deux valeurs varie entre 0,05 °C et 1,95 °C. La température surfacique maximale est obtenue expérimentalement pour ce local à 16h, alors que dans la simulation cette température est obtenue à 17 h. Cependant pour le deuxième jour (19 Aout), l'écart de température obtenu entre les deux cas varie entre 0,01 °C et 1,70 °C avec une température surfacique maximale obtenue pendant cette journée à 16 h par les mesures et à 17 h par la simulation. Alors que pour la troisième journée, nous remarquons qu'un léger décalage est obtenu. En effet la température surfacique maximale est obtenue expérimentalement à 16 h alors que par la simulation à 18 h.

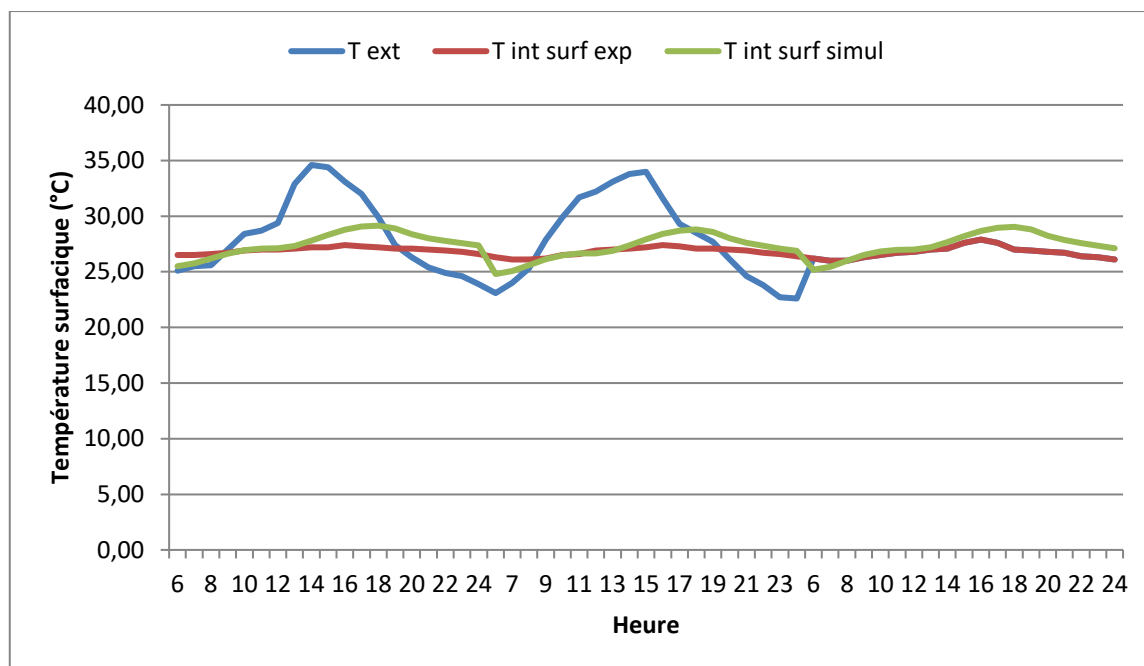


FIG.V. 15 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'été (Journée 18-20 Aout).

A₂) - RDC local foyer (avec ventilation nocturne)

La variation de la température surfacique du mur du local foyer pendant les trois jours d'été avec ventilation naturelle nocturne est illustrée sur la figure 16 qui montre que pour le premier jour (21 Aout), l'écart de température entre les deux cas varie entre 0.10 °C et 1.91 °C avec une température maximale obtenue à 18h. Alors que pour le deuxième jour, la température surfacique maximale est obtenue expérimentalement et par la simulation à 18h et à 19 h. L'écart de température entre les deux valeurs varie entre 0.25 °C et 1.96 °C pendant la journée. Alors que pour la troisième journée (23 Aout) représentée sur la même figure, nous remarquons que les deux courbes suivent la même allure. La température surfacique maximale est obtenue à 18 h pour les deux cas. L'écart de température entre ces deux cas varie entre 0.31 °C et 1.76 °C.

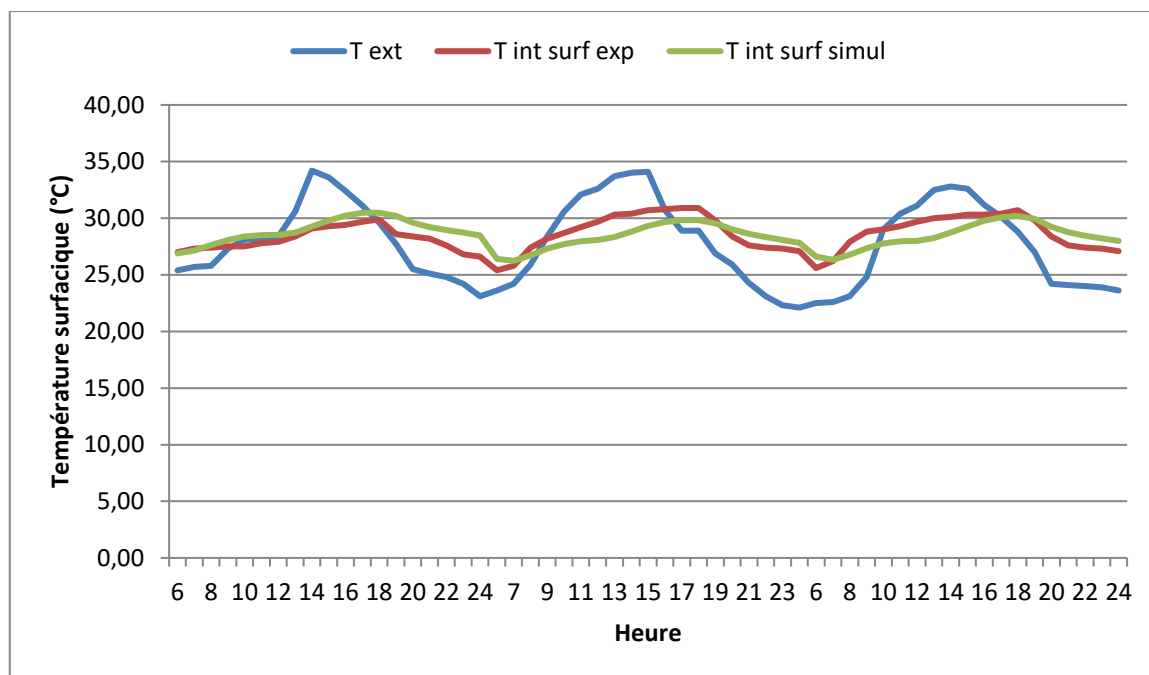


FIG.V. 16 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'été (Journée 21-23 Aout).

B1) -Etage courant local mess (sans ventilation nocturne)

La figure 17 illustre la variation de la température surfacique du local mess pour les trois jours d'été (18-20 Aout). Nous remarquons que pour la première journée (18 Aout) l'écart de température entre les deux cas varie entre 0.29 °C à 2.56 °C. La température surfacique maximale est obtenue à 17 h pour les deux cas. Alors que pour le deuxième jour, nous constatons qu'un écart de température de 0.25 °C à 2.07 °C est obtenu. La température maximale surfacique est obtenue entre 17 h et 18 h. cependant pour le troisième jour (20 Aout), un écart de température entre 0.35 °C et 2.35 °C est obtenu. La température maximale est obtenue entre 17 h et 18 h.

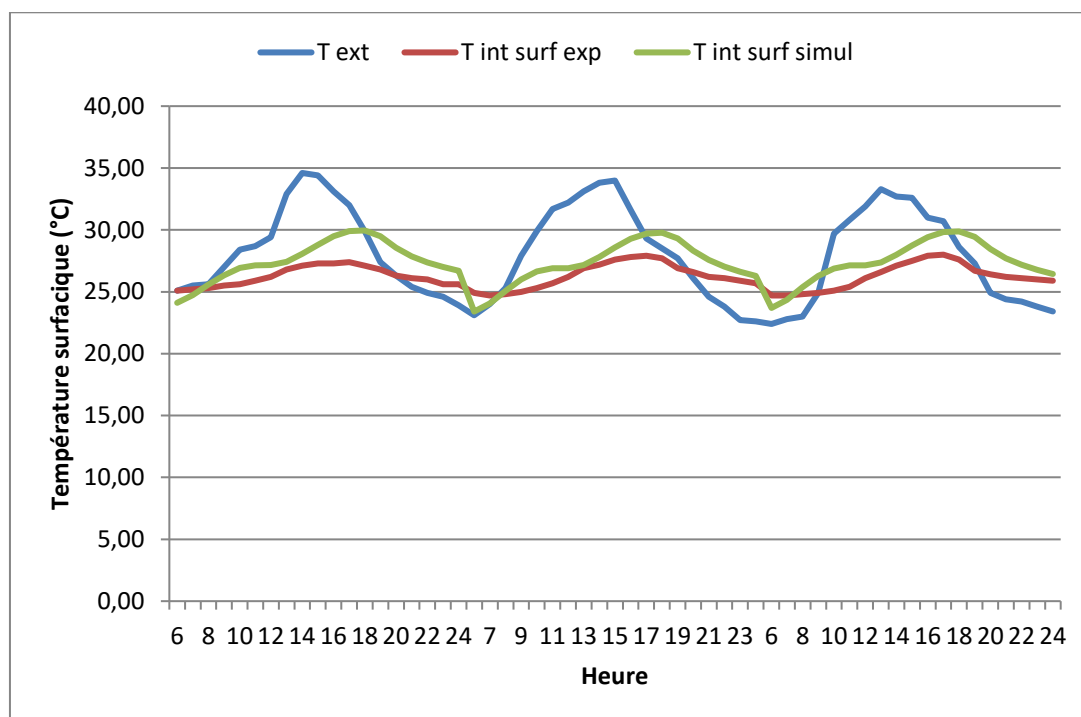


FIG.V. 17 : Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'été (Journée 18-20 Aout).

B2) -Etage courant local mess (avec ventilation nocturne)

Alors que pour les jours d'été avec ventilation nocturne (21-23 Aout). Nous observons pour la première journée (21 Aout), les deux courbes suivent la même allure. La température surfacique maximale est obtenue à 18 h pour les deux cas. L'écart de température surfacique (simulée et mesurée) varie entre 0,02 °C et 2,18 °C pendant la journée. Alors que pour la deuxième journée (22 Aout) représentée sur la même figure, l'écart de température entre les deux cas varie entre 0,06 °C et 1,07 °C au cours de la journée. La température maximale surfacique est obtenue à 18 h pour les deux cas. Les deux courbes suivent la même allure. Cependant pour la troisième journée (23 Aout), l'écart de température varie entre 0°C et 1,37 °C. La température surfacique maximale est obtenue entre 18h pour les deux cas.

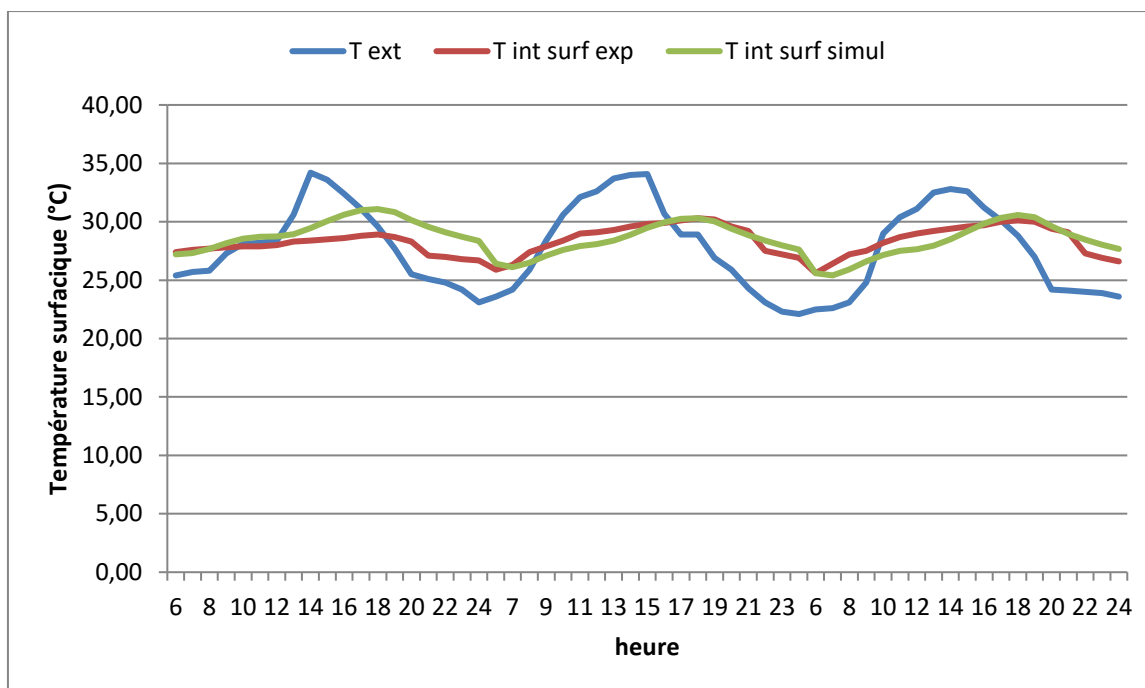


FIG.V. 18 : Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'été (Journée 21-23 Aout).

Les résultats obtenus par la simulation pour le local mess montrent que le logiciel donne de bons résultats comparés aux résultats de mesures.

C 1) - Etage sous comble local magasin (sans ventilation nocturne)

- Température surfacique du mur

La variation de la température surfacique du mur du local magasin pendant les trois jours de l'été (18-20 Aout) pour le cas sans ventilation naturelle nocturne est illustrée sur la figure-V-19 qui montre que pour le premier jour (18 Aout), l'écart de température entre les deux cas varie entre 0,05 °C et 2,31 °C avec une température maximale obtenue entre 17 h. Cependant pour le deuxième jour, la température surfacique maximale est obtenue expérimentalement à 16 h et par la simulation. L'écart de température entre les deux valeurs varie entre 0,06 °C et 2,53 °C pendant la journée (sauf entre 19 h et 20 h où l'écart atteint 3 °C). Alors que pour la troisième journée (20 Aout), la température surfacique maximale est obtenue entre 16 h pour les deux cas. L'écart de température entre ces deux cas varie entre 0,05 °C et 2,36 °C (à l'exception entre 19 et 22 h où l'écart est de 3 °C).

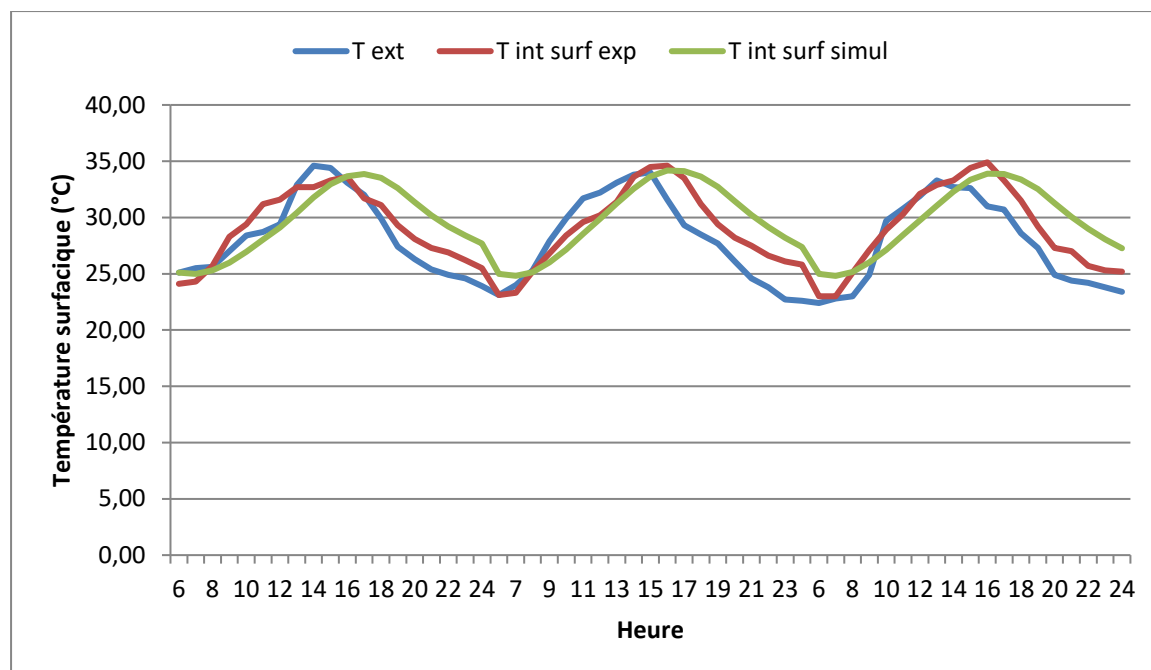


FIG.V. 19 : Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'été (Journée 18-20 Aout).

C 2) - Etage sous comble local magasin (avec ventilation nocturne)

La variation de la température surfacique du mur du local magasin pendant les trois jours d'été (21-23 Aout) pour le cas de la ventilation naturelle nocturne est illustrée sur la figure-V-20. Pour le premier jour (21 Aout), un certain décalage entre les deux courbes est obtenu. En effet, l'écart de température journalière varie entre 0.12 °C et 2.77 °C. La température maximale journalière est obtenue expérimentalement à 16h pour les deux cas. Alors que pour la deuxième journée (22 Aout), un écart de température entre 0 °C et 2.68 °C est obtenu. La température maximale est obtenue entre 16 h et 17 h pour les deux cas. Cependant pour la troisième journée (23 Aout), l'écart de température varie entre 0.03 °C et 1.55 °C (sauf à 10 h et 12 h où un écart de 2 °C est obtenu). La température maximale journalière de l'air est obtenue entre 16 h et 17h pour les deux cas.

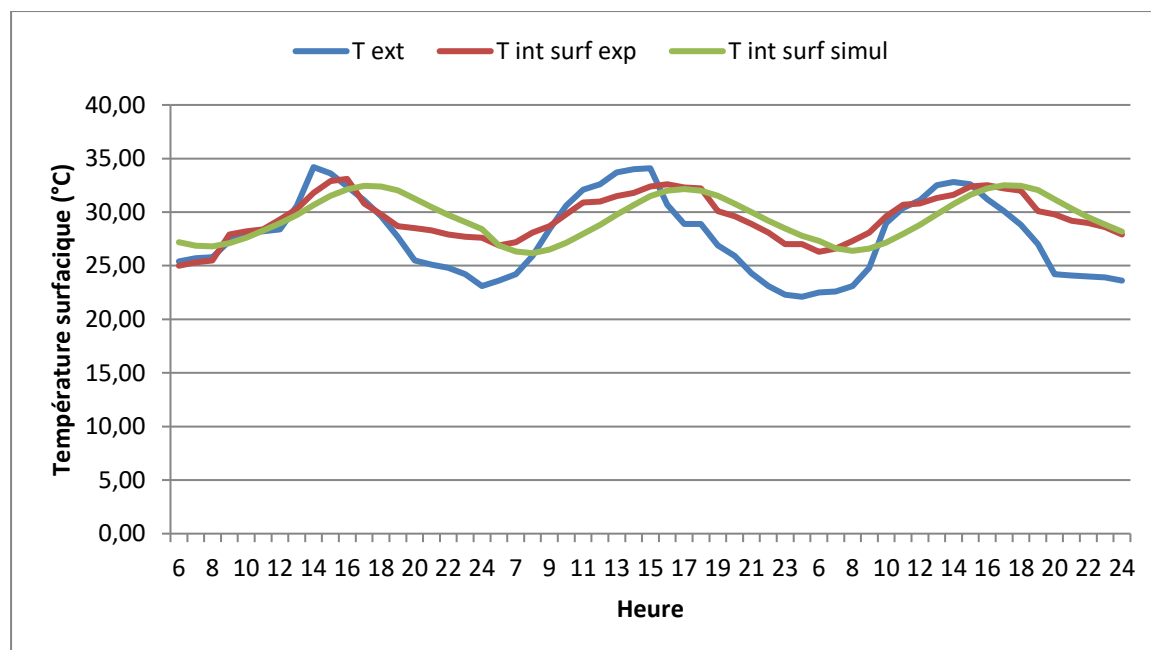


FIG.V. 20 : Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'été (journée 21-23 Aout).

- Température surfacique du toit (sans ventilation nocturne)

La figure-V-21- illustre la variation de la température surfacique du toit du magasin pendant les trois d'été (18-20 Aout) pour le cas sans ventilation naturelle nocturne. Pour la première journée (18 Aout), un écart de température obtenu entre les deux valeurs de 0.15 °C et 2.02 °C (sauf à 10h où un écart de 3 est obtenu). La température surfacique maximale est obtenue expérimentalement pour ce local à 15 h, alors que dans la simulation cette température est obtenue à 14 h. Cependant pour le deuxième jour (19 Aout), l'écart de température obtenu entre les deux cas varie entre 0.06 °C et 2.56 °C avec une température surfacique maximale obtenue pendant cette journée entre 12 h et 13 h pour les deux cas. Alors que pour la troisième journée, nous remarquons que la température surfacique maximale est obtenue à 13 h pour les deux cas. L'écart de température varie entre les deux cas entre 0.17 °C et 2.46 °C.

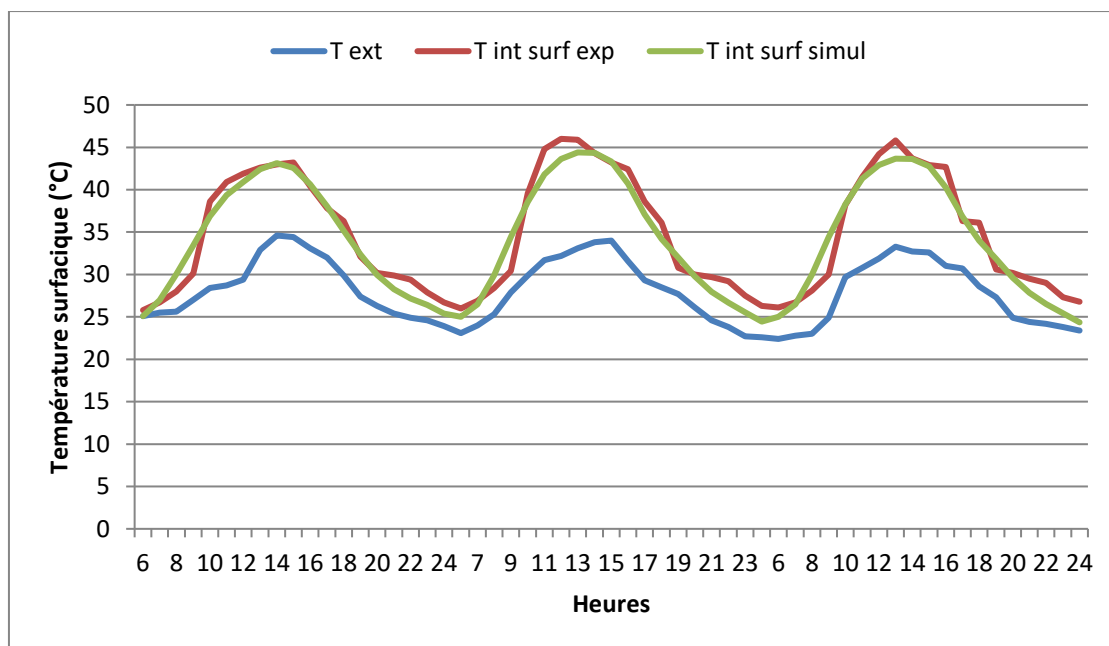


FIG.V. 21 : Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'été (journée 18-20 Aout).

- Température surfacique du toit (avec ventilation nocturne)

La figure-V-22- illustre la variation de la température surfacique du toit pendant les trois d'été (21-23 Aout) pour le cas avec ventilation naturelle nocturne. Pour la première journée (21 Aout), l'écart de température obtenu entre les deux valeurs varie entre 0.05 °C et 1.95 °C. La température surfacique maximale est obtenue expérimentalement pour ce local à 16h, alors que dans la simulation cette température est obtenue à 17 h. Cependant pour le deuxième jour (22 Aout), l'écart de température obtenu entre les deux cas varie entre 0.06 °C et 1.94 °C avec une température surfacique maximale obtenue pendant cette journée à 13 h pour les deux cas. Alors que pour la troisième journée, nous remarquons que la température surfacique maximale est obtenue à 13 h pour les deux cas avec un écart de température inférieur à 2 °C pendant la journée.

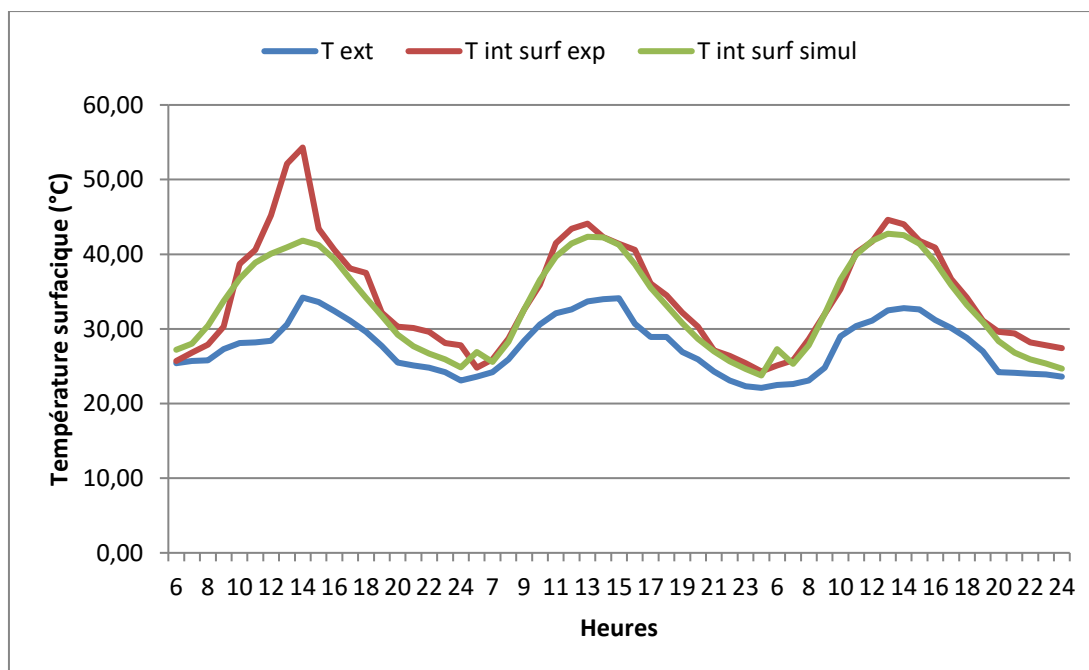


FIG.V. 22 : Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'été (journée 21-230 Aout)

V.3. Amélioration du confort thermique dans les locaux

L'étude représentée auparavant montre qu'une situation de confort thermique existe dans les trois locaux pendant les jours d'hiver et d'été. Nous allons par la suite proposer quelques solutions pour améliorer le confort thermique.

V.3.1. Emplacement de la couche isolante

Il est évident que le confort thermique est relié étroitement à la température surfacique des parois du local considéré. L'augmentation de la température surfacique des parois augmente la température opérative et par conséquent améliore ou réduit la sensation du confort thermique. L'analyse du local mess a montré que ce local présente de bonnes conditions de confort thermique pendant les deux saisons comparé aux deux autres locaux. Cela est dû aux performances thermiques des parois extérieures. Dans ce qui suit nous allons par la suite étudier l'impact de l'emplacement du matériau isolant sur le confort thermique dans le local mess.

Les figures-V- 23a-b-c illustrent la variation de la température opérative pour les deux cas à savoir : isolant placé à l'intérieur (cas avec changement) et à l'extérieur (cas réel). Nous pouvons constater que pour les trois jours d'hiver la température opérative pour le cas de l'isolant placé à l'intérieur est légèrement élevée. Cette augmentation est due à la capacité de

l'isolant à garder la température surfacique plus chaude pendant la journée. Cependant pour les jours d'été, il est constaté que les deux températures sont pratiquement identiques.

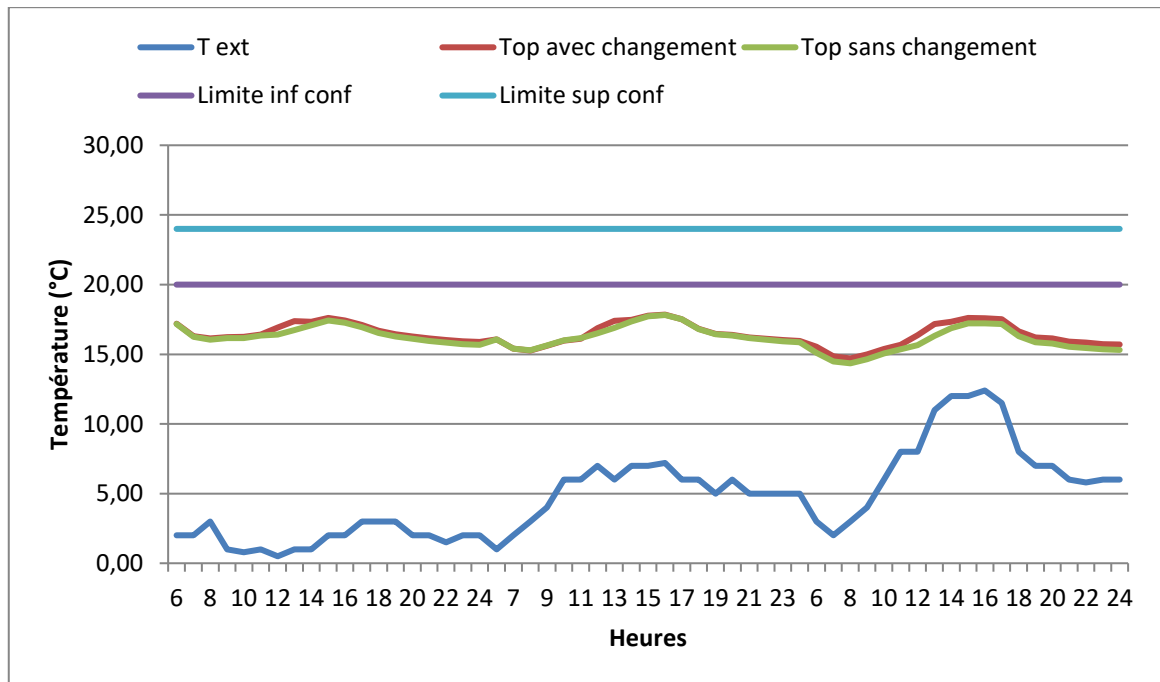


FIG.V. 23 :a. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'hiver (16-18 Janvier).

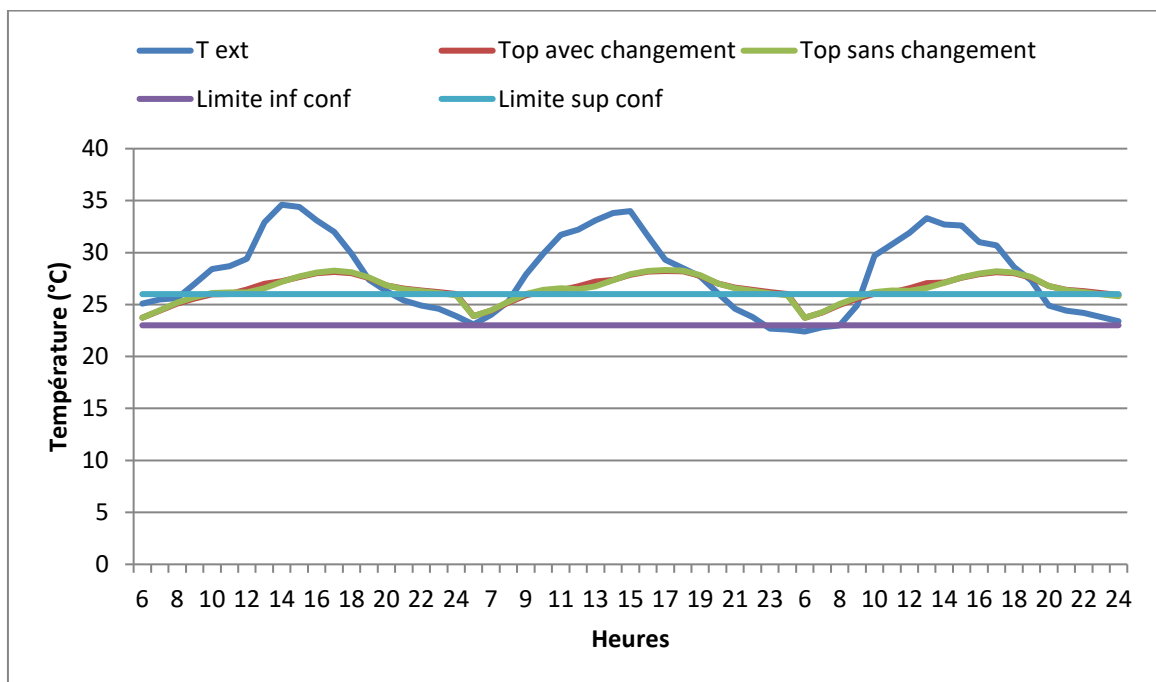


FIG.V. 24 :b. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'été (18-20 Aout)

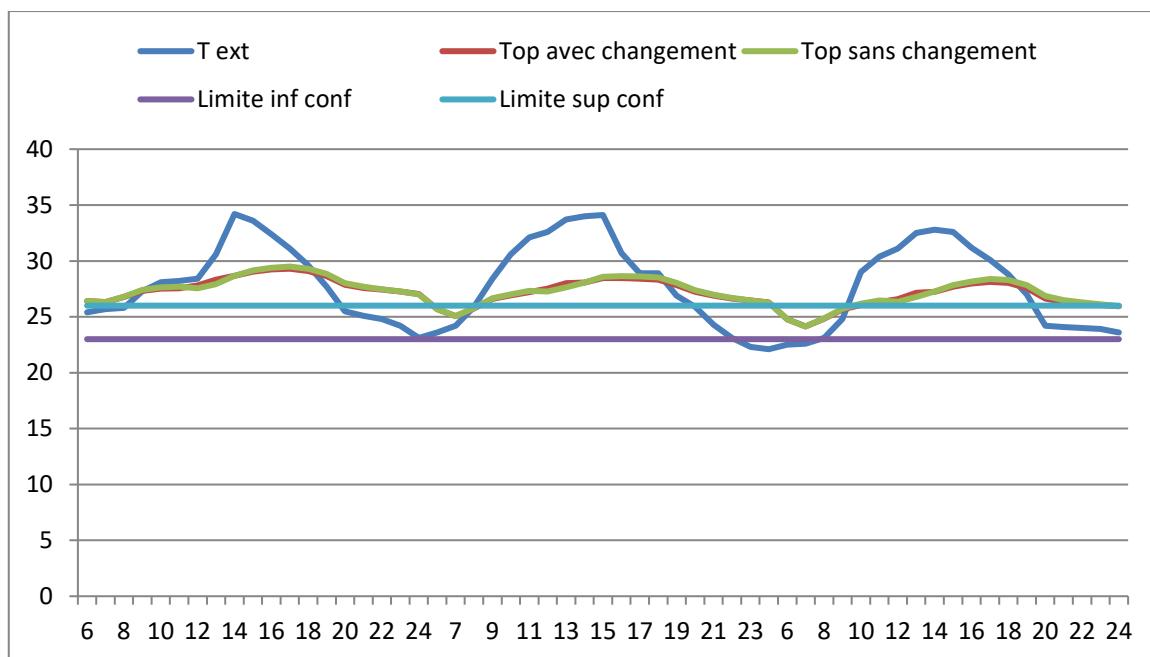


FIG.V. 25 :c. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'été (21-23 Aout).

V.3.2. Effet de la ventilation naturelle nocturne

Les résultats précédents montrent que la ventilation naturelle nocturne a un effet significatif sur la diminution de la température opérative pendant l'été. Cette diminution va réduire la consommation énergétique des locaux choisis.

La figure-V- 26 illustre la variation de la consommation de climatisation pour les deux locaux Foyer et Mess pendant l'été (Juin-Aout) pour les deux cas avec et sans ventilation nocturne. Nous pouvons constater que la ventilation nocturne conduit à une diminution des charges de climatisation. En effet pour le local Foyer, une diminution de charge de 10720 kWh à 9029 kWh est obtenue soit 15.77 % de réduction. Ainsi que pour le local mess où la consommation énergétique de la climatisation est diminuée de 3986 kWh à 3382 kWh soit 15.15 % de réduction.

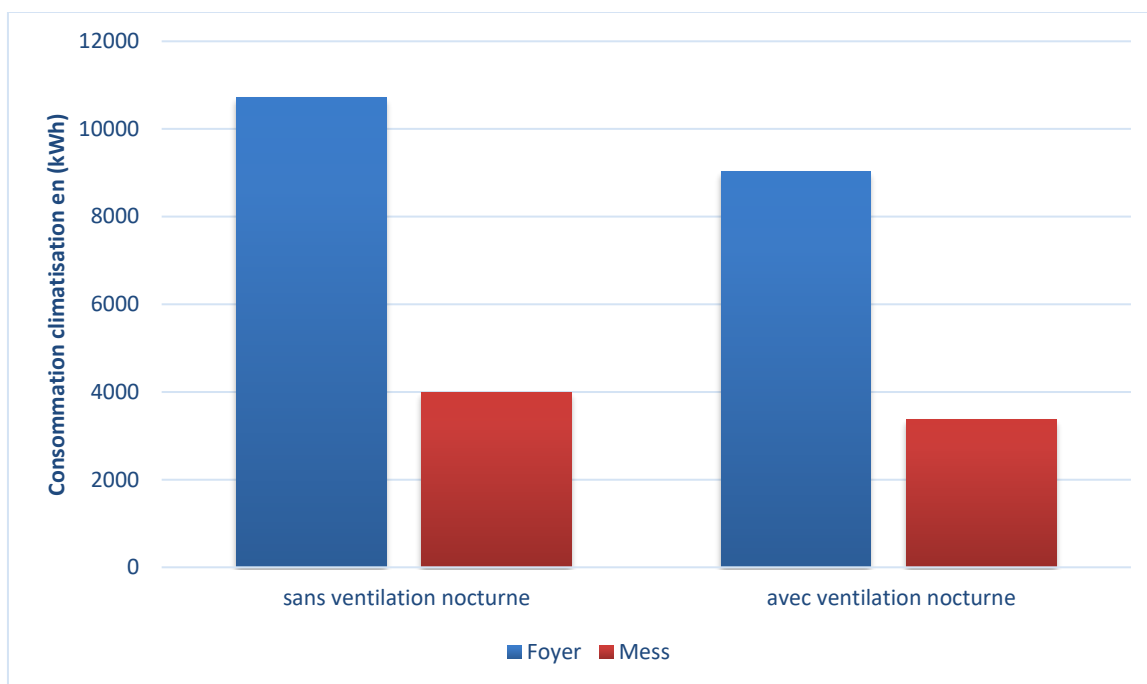


FIG.V. 26 : Variation de la consommation de climatisation pour le local Foyer et mess pendant l'été

V.3.3. Effet de la structure des murs sur la consommation énergétique

L'effet de la structure extérieure sur la consommation énergétique de la construction est illustré sur la figure-V- 27 qui montre que pour le cas 03(utilisation d'un isolant écologique « laine de mouton »), la consommation énergétique est la moins basse. La diminution de cette consommation est estimée à 2.32 % par rapport au cas réel. L'utilisation d'une couche d'air supplémentaire dans le local mess (cas 04) conduit aussi à une diminution des besoins énergétique de la construction de 1.95 %. Cependant l'utilisation d'une paroi double murette en brique pour tout le bâtiment augmente la consommation de 0.41 % ainsi que l'utilisation de l'isolation pour tout le bâtiment (cas 02) avec augmentation de la consommation énergétique de 0.18 %. L'utilisation d'un matériau aérogel super isolant (cas05) avec une épaisseur de 02 cm permet de réduire la consommation énergétique totale du bâtiment de 18.46 % par rapport au cas réel (c.f.V-28).

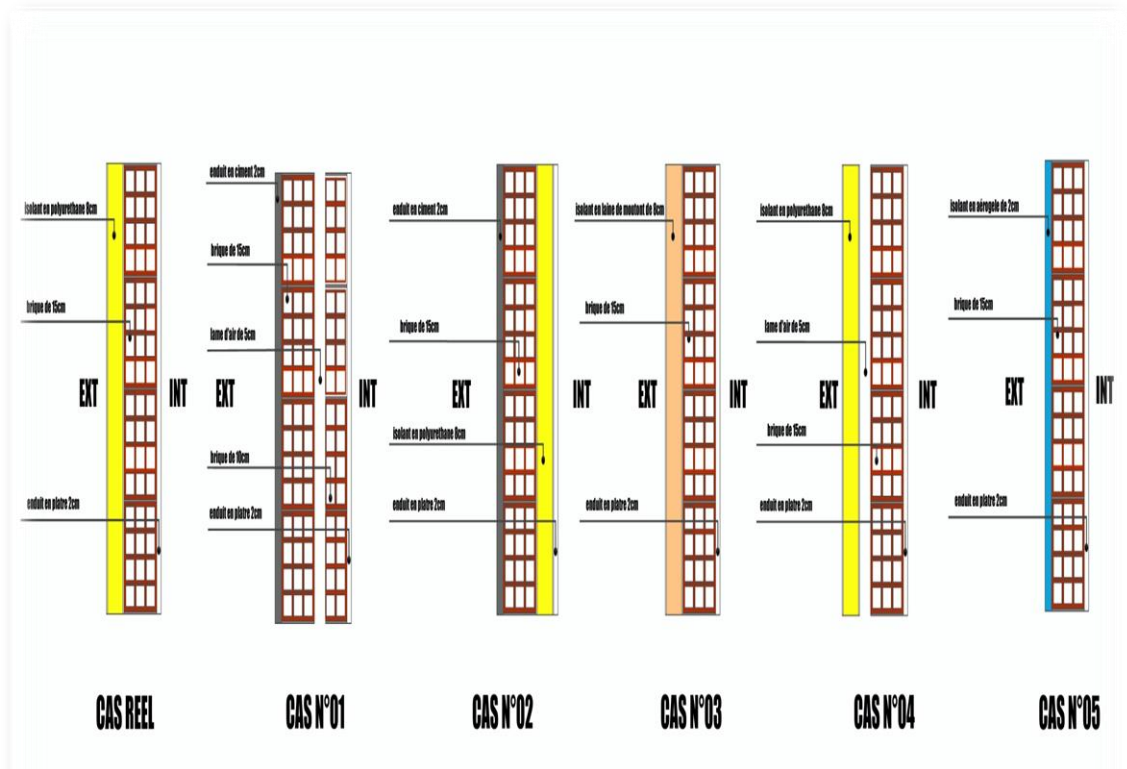


FIG.V. 27 : Différents emplacements de l'isolant sur une paroi en brique. (Source auteur).

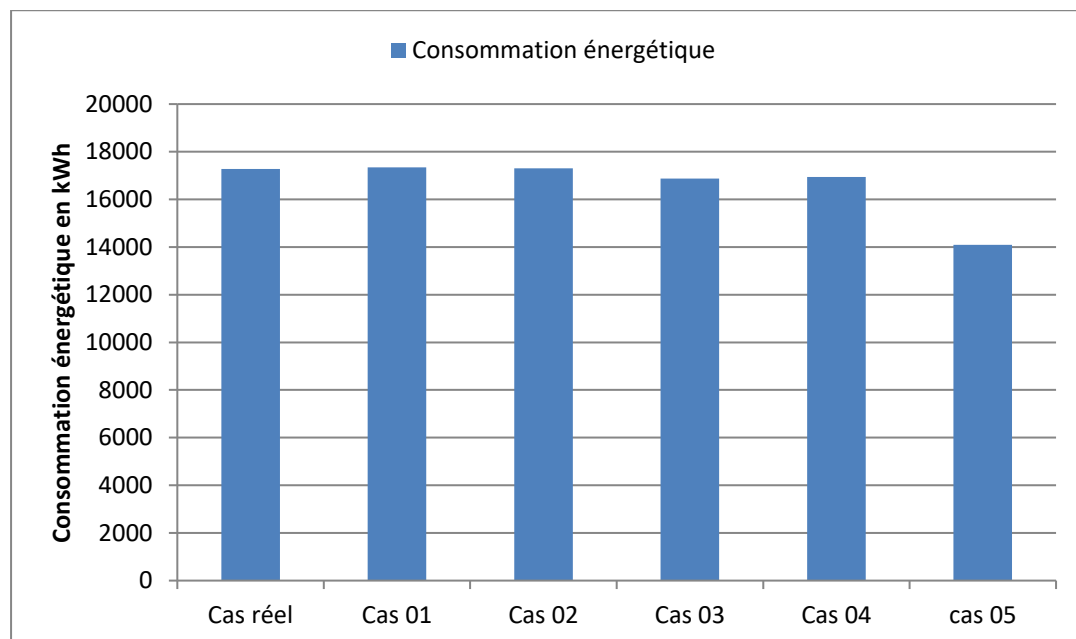


FIG.V. 28 : Variation de la consommation énergétique pendant l'année.

L'influence de la composition de la construction est apparente et permet de réduire ou augmenter la consommation énergétique de la construction. Le meilleur procédé obtenu est l'utilisation d'un matériau aérogel (super isolant) avec des caractéristiques thermiques plus élevées que celle utilisé dans le cas réel. Alors que l'ajout d'une lame d'air au local mess pour bien isoler ce local est aussi une solution bénéfique et bien adéquate. Bien isoler un local conduit à des surchauffes pendant la période estivale et peut engendrer une augmentation de la consommation énergétique de la construction.

V.3.4. Effet de la structure des murs sur la température ambiante

La ventilation naturelle nocturne et l'isolation thermique améliore la performance énergétique des locaux étudiés. L'utilisation de l'isolation thermique comme précédé passif permet la réduction de la consommation énergétique du chauffage mais en revanche une augmentation possible de la consommation de la climatisation. Cette augmentation est due à l'inertie thermique élevée de l'isolant. La combinaison des deux solutions (ventilation naturelle nocturne et l'isolation thermique améliorée) permet la diminution significative de la consommation énergétique. En effet selon la figure-V-29-, le cas 06 (couplage de l'isolation thermique et la ventilation naturelle nocturne) présente une diminution de la consommation énergétique de 18.76 % par rapport au cas réel alors que pour le cas 03 (mur avec isolation écologique), la diminution est de 2.32 %.

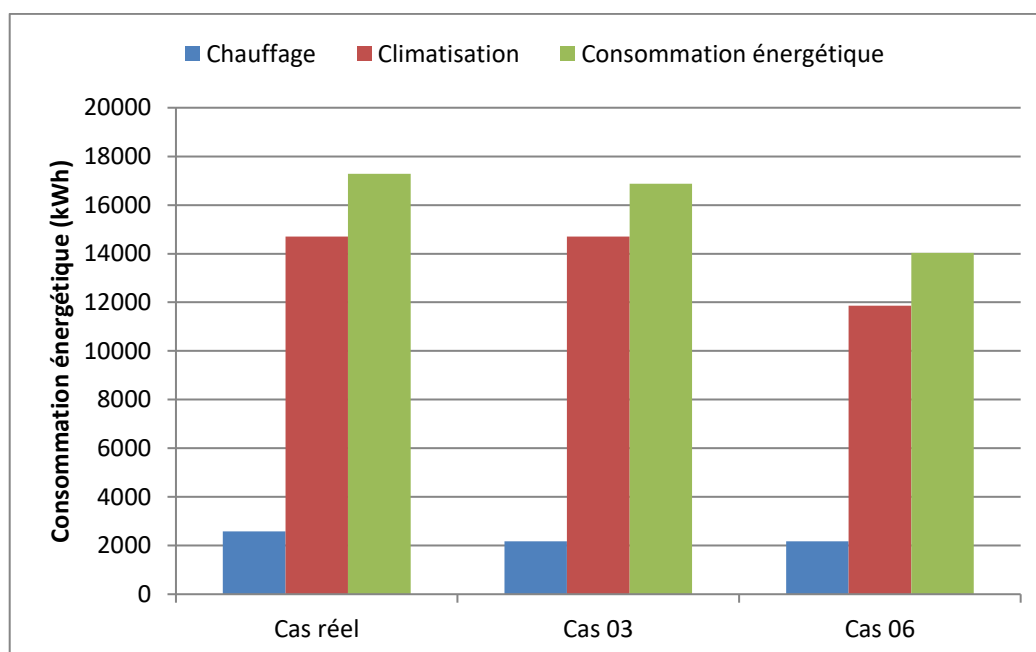


FIG.V. 29 : Variation de la consommation énergétique annuelle selon le cas étudié.

V.3.5. Effet de l'isolant sur la température de l'air

La variation de la température de l'air ambiant du local mess pour la journée 16 janvier est illustrée sur la figure-V-30- qui montre que la température de l'air pour le cas 05 (super isolant) est la plus élevée alors que cette température est plus basse pour le cas 01 (double murette brique). Le refroidissement du local pour le cas 03 est plus rapide pendant le soir à cause de la chute de température extérieure. Le local ne préserve pas la chaleur intérieure ce qui influe sur le confort à l'intérieure. La température de l'air du cas 05 est la plus élevée pendant cette journée. Le local avec cette configuration de paroi préserve longtemps la chaleur d'où l'amélioration du confort thermique.

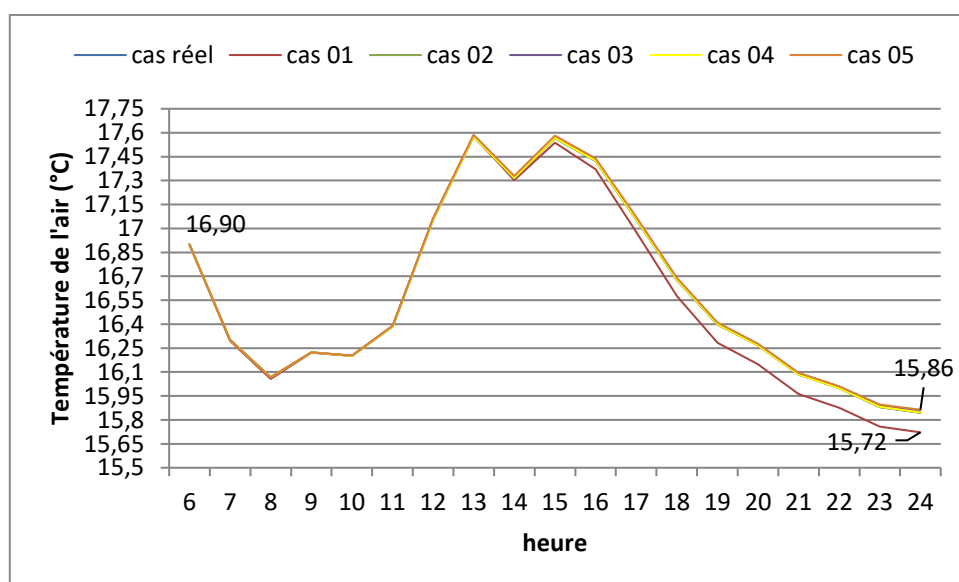


FIG.V. 30 : Variation de la température de l'air pour le local mess (journée 16 janvier).

Cependant pour la journée du 18 Aout et pour le même local, nous observons que le cas 03 représente les meilleures températures. La structure permet au local de se refroidir rapidement le soir. Alors que pour le cas 04 et 05, le refroidissement du local est plus lent et la température de l'air reste plus élevée que les autres cas (c.f.V-31-).

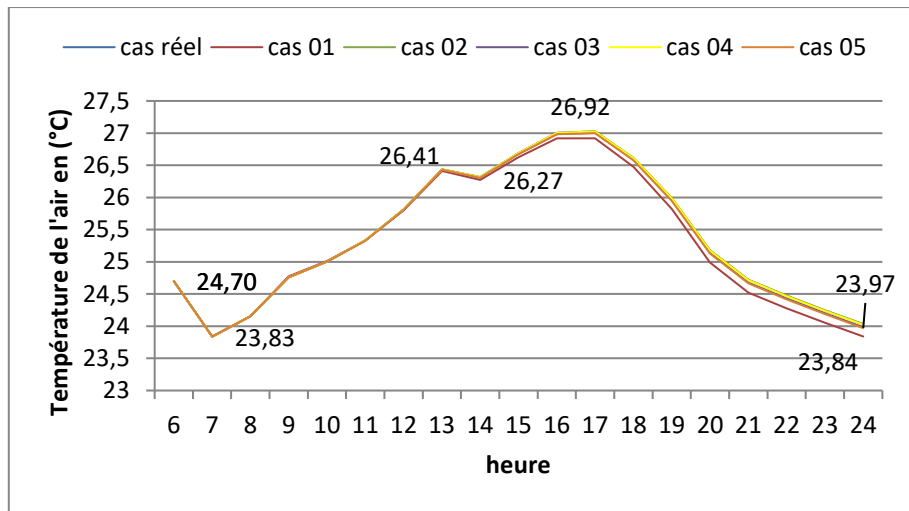


FIG.V. 31 : Variation de la température de l'air pour le local mess (journée 18 Aout).

Conclusion

L'utilisation de l'isolation thermique permet une amélioration du confort thermique pendant l'hiver. Mais pour l'été et vu que le local mess possède une surface vitrée importante permettant au rayonnement solaire de pénétrer. L'augmentation de la chaleur stockée au niveau de ce local va engendrer une surchauffe, le refroidissement du local dépend de la structure elle-même. Une structure non isolée permet l'écoulement de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. La solution la plus adéquate pour remédier à ce problème reste la ventilation naturelle nocturne qui permet le refroidissement du local pendant la nuit. La structure garde cette fraîcheur pendant la journée et la température de l'air sera plus proche de la zone de confort thermique. La protection des fenêtres par les stores ou autres dispositifs permet aussi de garder un niveau de confort thermique souhaitable dans le local. La chaleur transmise par rayonnement solaire reste le facteur le plus influant sur la température de l'air intérieur.

La ventilation naturelle nocturne et l'isolation thermique améliore la performance énergétique des locaux étudiés. L'utilisation de l'isolation thermique comme précédé passif permet la réduction de la consommation énergétique du chauffage mais en revanche une augmentation possible de la consommation de la climatisation. La combinaison des deux solutions (ventilation naturelle nocturne et l'isolation thermique améliorée) permet la diminution significative de la consommation énergétique.

L'influence de la composition de la construction est apparente et permet de réduire ou augmenter la consommation énergétique de la construction. Le meilleur procédé obtenu est l'utilisation d'un matériau aérogel (super isolant) avec des caractéristiques thermiques plus élevées que celle utilisé dans le cas réel. Alors que l'ajout d'une lame d'air au local mess pour bien isoler ce local est aussi une solution bénéfique et bien adéquate. Bien isoler un local conduit à des surchauffes pendant la période estivale et peut engendrer une augmentation de la consommation énergétique de la construction.

Introduction	134
V.1. Descriptif et critères du choix du programme TRNSYS	134
V.2. Etapes de la simulation	135
V.2.1. Confrontation avec les résultats de l'expérimentation.....	135
V.2.1.1. Validation du modèle TRNSYS	135
V.2.1.1.1. Validation de la température de l'air intérieur en période hivernale 16-17-18 janvier 2015	135
V.2.1.2. Validation de la température de l'air intérieur période estivale.....	138
V.2.1.3. Validation de la température surfacique	144
V.2.1.3.1. Période hivernale	144
V.2.1.3.2. Période estivale.....	148
C ₂) - Etage sous comble local magasin (avec ventilation nocturne).....	153
V.3. Amélioration du confort thermique dans les locaux	156
V.3.1. Emplacement de la couche isolante	156
V.3.2. Effet de la ventilation naturelle nocturne.....	158
V.3.3. Effet de la structure des murs sur la consommation énergétique	159
V.3.4. Effet de la structure des murs sur la température ambiante	161
V.3.5. Effet de l'isolant sur la température de l'air	162
Conclusion.....	164

FIG.V. 1 : Interface du logiciel TRNSYS 16. Source : image du logiciel.....	134
FIG.V. 2 :Variation de la température de l'air du foyer pour les trois jours d'hiver.	136
FIG.V. 3 : Variation de la température de l'air du mess pour les trois jours d'hiver.....	137
FIG.V. 4 : Variation de la température de l'air du magasin pour les trois jours d'hiver	138
FIG.V. 5 : Variation de la température de l'air du foyer pour les trois jours d'été(Journée 18-20 Aout).	139
FIG.V. 6 :Variation de la température de l'air du foyer pour les trois jours d'été (Journée 21-22-23 Aout).	140
FIG.V. 7 : Variation de la température de l'air du mess pour les trois jours d'été(Journée 18-20 Aout).	141
FIG.V. 8 : Variation de la température de l'air du mess pour les trois jours d'été (Journée 21-23 Aout).	142
FIG.V. 9 : Variation de la température de l'air du magasin pour les trois jours d'été(Journée 18-20 Aout).	143
FIG.V. 10 : Variation de la température de l'air du magasin pour les trois jours d'été(Journée 21-23 Aout).	144
FIG.V. 11 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'hiver (Journée 16-18 Janvier).	145
FIG.V. 12 : Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'hiver(Journée 16-18 Janvier).	146
FIG.V. 13 : Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'hiver (journée 16-18 Janvier).	147
FIG.V. 14 : Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'hiver (journée 16-18 Janvier).	148
FIG.V. 15 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'été(Journée 18-20 Aout).	149
FIG.V. 16 : Variation de la température surfacique du foyer pour les trois jours d'été(Journée 21-23 Aout).	150
FIG.V. 17 :Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'été(Journée 18-20 Aout).	151
FIG.V. 18 :Variation de la température surfacique du mess pour les trois jours d'été(Journée 21-23 Aout).	152
FIG.V. 19 : Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'été (journée 18-20 Aout).	153
FIG.V. 20 :Variation de la température surfacique du mur du magasin pour les trois jours d'été (journée 21-23 Aout).	154
FIG.V. 21 :Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'été (journée 18-20 Aout).	155
FIG.V. 22 : Variation de la température surfacique du toit du magasin pour les trois jours d'été (journée 21-230 Aout)	156
FIG.V. 23 :a. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'hiver (16-18 Janvier).	157
FIG.V. 24 :b. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'été (18-20 Aout).	157
FIG.V. 25 :c. Variation des températures opératives dans le local mess pendant les trois jours d'été (21-23 Aout).	158

FIG.V. 26 : Variation de la consommation de climatisation pour le local Foyer et mess pendant l'été	159
FIG.V. 27 : Variation de la consommation énergétique pendant l'année.	Erreur ! Signet non défini.
FIG.V. 28 : Variation de la consommation énergétique annuelle selon le cas étudié.	Erreur ! Signet non défini.
FIG.V. 29 : différents emplacement de l'isolant sur une paroi en brique. Source : auteur.....	160
FIG.V. 30 : Variation de la consommation énergétique pendant l'année.....	160
FIG.V. 31 : Variation de la consommation énergétique annuelle selon le cas étudié.....	161
FIG.V. 32 : Variation de la température de l'air pour le local mess (journée 16 janvier).	162
FIG.V. 33 : Variation de la température de l'air pour le local mess (journée 18 Aout).	163

Conclusion générale et recommandations

L'Algérie est un pays qui jouit d'une position relativement enviable en matière énergétique. Les réserves en hydrocarbures dont il dispose et les niveaux actuels de consommation nécessaires à la couverture de ses besoins propres lui permettent de rester serein pour quelque temps encore. Les défis de la politique énergétique sont confrontés à toutes les contraintes internes et externes (prix du baril, croissance économique, croissance démographique...). Dans l'immédiat, le problème énergétique de l'Algérie est un problème qui se pose en matière de stratégie de valorisation de ses ressources pour les besoins du développement du pays, de choix d'une véritable politique énergétique à long terme et de définition immédiate d'un modèle cohérent de consommation énergétique couvrant le court et le moyen terme, avant la date fatidique de l'épuisement de ces ressources fossiles stratégiques.

Dans le domaine de la construction et du bâtiment, maîtriser le confort d'été et d'hiver, en favorisant des solutions élémentaires plus au moins passives, est une exigence absolue pour maintenir le confort thermique et réduire les besoins énergétiques dans ce premier. Avec l'adaptation de la construction aux paramètres climatiques, les divers besoins énergétiques sont amplement diminués. Notamment que la mauvaise conception thermique impose un surdimensionnement des équipements et une hyperconsommation d'énergie des bâtiments engendrant un impact économique et environnemental. Pour cette considération, l'optimisation des apports solaires est essentielle lors de l'élaboration d'une architecture durable, qui assure une meilleure balance entre les sources environnantes gratuites et les dépenses énergétiques.

Pour une architecture consciente de l'énergie, une approche globale et judicieuse des problèmes énergétiques devrait donc enclencher par l'intégration du bâtiment dans son contexte climatique. Plusieurs paramètres agissent sur le comportement thermique du bâtiment, pour cela, réfléchir à l'isolation des bâtiments est une nécessité et représente un moyen efficace et rentable. Les matériaux d'isolation permettront d'avoir une vision la plus objective possible du panel de solutions d'amélioration thermique des bâtiments.

L'étude bioclimatique avec les techniques fréquentes proposées concrètement par les chercheurs sous différentes formes, offre la possibilité d'identifier les dispositifs de contrôle microclimatique et de conception architecturale, qui sont susceptibles de générer les conditions

de confort intérieur dans le bâtiment. Cependant, les conditions qui caractérisent un environnement considéré confortable persistent non indéfinissables. Vu l'influence des paramètres historiques, culturels, sociaux, sur la notion du confort.

L'enveloppe joue un rôle de filtre thermique qui permet de créer un microclimat à l'intérieur du bâtiment, indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. La composition de l'enveloppe est un élément déterminant des caractéristiques de ce filtre. Les ambiances intérieures du bâtiment ne pouvant pas répondre toujours aux exigences de confort des occupants, la réponse du bâtiment est corrigée par des appareils de chauffage ou de climatisation agissant comme des sources contrôlées de chaleur ou de froid. Dans tous les cas, les appareils de chauffage et de climatisation consomment de l'énergie. Les engagements de Kyoto visant à la réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre concernent aussi bien le logement que le secteur tertiaire.

Les recommandations et réglementations thermiques préconisent une isolation thermique renforcée des parois opaques des bâtiments. Avec les renforcements des normes, les recherches au niveau de la thermique du bâtiment se sont accentuées, en particulier l'isolation thermique de l'enveloppe qui joue un rôle important dans la maîtrise de la consommation d'énergie. En effet, une grande part des déperditions thermiques est liée aux pertes de chaleur à travers les murs, la toiture et le plancher. Pour cela, les recherches s'orientent principalement dans l'amélioration des performances thermiques des isolants thermiques existants sur le marché et la conception de nouveaux matériaux d'isolation tels que les isolants à forte inertie, les super isolants panneaux isolants sous vide, aerogels, et les isolants à propriétés réfléchissantes.

Les résultats de recherches démontrent l'efficacité de l'isolation thermique sous différents climats, chaud et sec, chaud et humide, froid... etc., dans la création du confort thermique et la réduction de la consommation énergétique. C'est une recommandation nécessaire pour la conception architecturale dans les climats à grand écart diurne. L'isolation par l'extérieur on outre permet de résister à toutes les variations rudes de température en amortissant l'effet des conditions extérieures par les phénomènes de déphasage et décalage. C'est aussi un important absorbeur d'énergie.

Le développement de nouveaux matériaux isolants, de haute performance est crucial pour les besoins du secteur de bâtiment, d'un point de vue économique, mais aussi d'un point de vue

environnemental. Par conséquent, des efforts de recherche importants se sont attachés à développer des procédés super-isolants thermiques de structure nanotechnologique qui répondent aux exigences du développement durable.

À cet effet, la présente recherche a examiné le rôle et l'impact de l'isolation thermique des murs par l'extérieur sur le confort thermique et la consommation énergétique du bâtiment sous le climat semi-aride de Constantine. Le but de la recherche était la vérification de l'effet de l'isolation thermique et son impact sur la consommation énergétique, de plus mettre en exergue l'importance de l'isolation par l'extérieur pour assurer le confort des occupants ; le meilleur choix des matériaux d'isolation utiles pour l'épaisseur ainsi que pour la conductivité (λ) thermique, ensuite l'exploitation des super-isolants qui ont une haute performance thermique telle que l'aérogel, ce matériau appartient à une famille de structure nanotechnologique ayant des perspectives très prometteuses, son pouvoir isolant est obtenu grâce à sa structure ultra-poreuse. Enfin, l'adoption des solutions passive comme la ventilation nocturne et l'aération de l'isolant par une lame d'air permettent d'évaluer le degré de réduction dans la consommation énergétique et limitent le recours à l'énergie d'appoint.

L'investigation a été menée sur un bâtiment réhabilité, ces murs extérieurs ont été revêtus par une isolation thermique en polyuréthane, la sensation de fraîcheur à l'intérieur du projet durant les journées de canicule en été, nous a interpellé pour vérifier l'effet de l'isolation par l'extérieur sur le confort intérieur et la consommation de l'énergie. La vérification de l'impact de l'isolation thermique sur le bâtiment a nécessité une investigation sur site, où des séries de mesures d'éléments physiques d'analyse tels que la température et l'humidité relative (ambiante et surfacique) sont effectuées pendant 6 jours en été et 3 jours en hiver.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons eu recours à l'usage de deux outils de recherche « l'investigation » avec les mesures in situ à l'aide d'instrumentation et « la simulation » à l'aide d'un logiciel informatique. Le recours à l'outil informatique par le biais d'un logiciel TRNSYS (version 16) a permis de valider les résultats in situ, et de proposer des solutions pour une amélioration des conditions de température intérieure suivant le type d'isolant, l'aération et la ventilation nocturne. La validation des résultats de l'investigation par le logiciel TRNSYS.16, concernant la température intérieure et l'humidité de l'air ambiant, réaffirme le rôle prépondérant de l'isolant thermique par l'extérieur dans le maintien de

l'équilibre thermique intérieur. Aussi ça affirme l'efficacité et l'utilité des mesures in situ en plus de leur importance dans l'utilisation.

En effet les résultats de l'investigation ou de simulation affirment que le choix de l'isolant qui couvre l'enveloppe du bâtiment par l'extérieur a une incidence importante sur le confort thermique, il est estimé comme étant la pièce maitresse de la régulation thermique des échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. Le comportement thermique de ces matériaux isolants, vis-à-vis de la radiation solaire et la température, joue un rôle prépondérant dans l'évaluation des conditions du confort dans les espaces intérieurs. En conséquence, pour optimiser le confort intérieur des bâtiments, l'isolation thermique doit également être compensée, en intégrant des protections solaires statiques ou dynamiques selon les exigences de l'orientation du bâtiment. La prise en compte, des isolants de l'enveloppe en relation avec le climat et l'environnement extérieur qui va conditionner l'épaisseur, l'emplacement et le choix des types, requiert ainsi, une réflexion d'ensemble sur toute la conception architecturale.

En outre, l'intérêt que nous accordons à notre thème réside dans la capacité de l'isolant qui se conjugue avec les paramètres bioclimatiques, pour rétablir l'architecture dans son rapport avec le climat en prévision d'assurer un meilleur confort des espaces intérieurs. En hiver, une isolation extérieure efficace permet au bâtiment d'augmenter sa performance thermique par rapport aux variations de la température extérieure, ce qui est générateur de confort et d'économie. En été, les parois qui ont une isolation thermique extérieure couplée avec une ventilation nocturne permettent d'évacuer tout supplément de chaleur et d'éviter les risques de surchauffe, par dissipation de la chaleur restituée par les murs inertes pendant la nuit. Par ailleurs les résultats de la simulation ont démontré l'effet de l'épaisseur de l'isolation et son emplacement sur les parois générant un impact sensible sur le temps de déphasage et sur le facteur d'amortissement ainsi que la constante de temps relative aux perturbations extérieures est maximale lorsque l'isolation est placée du côté extérieur.

Pour un confort intérieur adéquat, il est important de prendre en considération l'aspect « inertie thermique » de la construction dans le choix et l'emplacement de l'isolant. Cette interaction entre l'isolation et l'inertie a incité la curiosité des chercheurs à travers le monde pour déterminer l'emplacement de l'épaisseur et les types d'isolant sans affecter la performance

de l'inertie thermique, comme suggère Bekkouche S.M.A. (2009), Ozel (2007), et V.Sambou (2008).

Dans notre cas d'étude, l'impact de la fenêtre est ressenti en hiver, notamment que l'écart affiché des températures dans les 3 échantillons investigués est appréciable du côté (S.Ouest). La raison majeure consiste dans l'isolation thermique par l'extérieur qui a préservé les gains de chaleur du jour en empêchant leurs déperditions vers l'extérieur le soir. D'autre part, en été l'enveloppe bien isolée a entraîné des surchauffes durant les jours chauds d'été où le rayonnement solaire absorbé pendant la journée (entrée par les fenêtres) est piégé à l'intérieur, par l'influence de l'isolant extérieur qui a joué un rôle déterminant sur le comportement thermique des murs extérieurs. Le seul moyen de les rafraîchir est d'évacuer la nuit la chaleur qu'elles ont stocké le jour, grâce à la ventilation nocturne de tous les locaux.

Les ponts thermiques de liaison sont de véritables trous à travers l'isolation de l'enveloppe. Ils sont ainsi responsables de 10 à 40 %, selon (CSTB 2012), de fuite de chaleur supplémentaire vers l'extérieur. L'isolation thermique des murs par l'extérieur dans notre cas d'étude a contribué ainsi à la limitation des déperditions de chaleur à travers les ponts thermiques qui constituent les points faibles de l'enveloppe du bâtiment.

Les risques du phénomène de condensation de surface devraient être contrôlés lorsque le taux d'humidité relative excède la valeur de 80 %, le plus souvent il s'agit d'un problème de défaut d'isolation. L'isolation thermique par l'extérieur, contrairement, à celle de l'isolation par l'intérieur qui risque des pathologies importantes nécessitant la régulation des flux de vapeur, permet d'évacuer l'humidité piégée dans les deux côtes de la paroi due aux problèmes de migration de la vapeur.

De ce fait, on confirme la première hypothèse de ce travail concernant l'utilisation de l'isolation thermique par l'extérieur de l'enveloppe des édifices, offre les meilleures performances et constitue une stratégie à apprécier dans l'optimisation de la performance énergétique des bâtiments. La deuxième hypothèse relative à la réhabilitation énergétique des bâtiments existants contribue à augmenter leur performance énergétique et à réduire la consommation d'énergie en garantissant le confort de l'occupant.

La simulation numérique offre ainsi la possibilité de prendre en compte plusieurs phénomènes compliqués, suggère des résultats plus adéquats et permet d'envisager des cas d'étude difficilement réalisables, cet outil deviendra une réalité indissociable dans la vie quotidienne des chercheurs scientifiques, il sera bien difficile de l'ignorer. Par simulation, nous avons trouvé que l'isolation thermique par l'intérieur ou par l'extérieur donne presque de mêmes résultats. L'effet des ponts thermiques est négligé, puisque le logiciel TRNsyst 16 ne permet pas de traiter tous les types de ponts thermiques.

L'utilisation de l'isolation thermique permet une amélioration du confort thermique pendant l'hiver. Mais pour l'été et vu que le local mess possède une surface vitrée importante permettant au rayonnement solaire de pénétrer. L'augmentation de la chaleur stockée au niveau de ce local a engendré une surchauffe, le refroidissement du local dépend de l'inertie de la structure elle-même. La combinaison des deux solutions, ventilation naturelle nocturne et isolation thermique par l'extérieur améliore la performance énergétique des locaux étudiés et présente une diminution de la consommation énergétique de **18.76 %** par rapport au cas réel. L'utilisation de l'isolation thermique extérieure comme procédé passif permet la réduction de la consommation énergétique du chauffage, mais en revanche une augmentation possible de la consommation de la climatisation.

L'effet de l'isolation par l'extérieur sur la consommation énergétique de la construction montre que l'utilisation d'un isolant écologique « laine de mouton » la consommation énergétique est moins basse. La diminution de cette consommation est estimée à **2.32 %** par rapport au cas réel (isolation extérieure). L'utilisation d'une couche d'air supplémentaire dans le local mess conduit aussi à une diminution des besoins énergétique de la construction de **1.95 %**. Cependant, l'utilisation d'une paroi double murette en brique pour tout le bâtiment augmente la consommation de **0.41 %**, ainsi que l'utilisation de l'isolation intérieure pour tout le bâtiment augmente la consommation énergétique de **0.18 %**. Cela reste insignifiant, alors que l'utilisation d'un matériau aérogel (super-isolant) avec une épaisseur de 2cm permet de réduire la consommation énergétique totale du bâtiment de **18.46 %** par rapport au cas réel, ce résultat est jugé meilleur.

Les résultats de la simulation (TRNSYS 16) ont démontré que le meilleur procédé obtenu est l'utilisation d'un matériau (super isolant) aérogel a permet d'obtenir une meilleure performance de la paroi au local mess. Bien isoler un local conduit à des surchauffes pendant la période estivale et peut engendrer une augmentation de la consommation énergétique de la construction. Il faut donc le compléter par d'autres stratégies (protection solaires – ratio du rapport surface vitrée/ surface opaque).

Une exploitation optimale de l'isolation thermique passe par une sélection appropriée des matériaux de construction lors de la phase d'avant-projet et par le développement de stratégies visant à exploiter leur capacité d'isolation. Les outils de simulation thermique dynamique dont on dispose permettent de modéliser de façon assez précise les transferts de chaleur dans l'enveloppe du bâtiment mais leur niveau de précision n'est pas nécessairement adapté aux besoins des concepteurs au moment de faire les choix les plus fondamentaux. Néanmoins ils demeurent indispensables non seulement pour la validation de ces choix mais aussi pour le développement de méthodes destinées à améliorer l'exploitation de l'énergie avant de procéder à la réalisation d'un projet. Les conclusions dérivées des résultats de la recherche des caractéristiques de l'isolant performant (type super-isolant et écologique) ont été utilisées pour définir une série de directives de conception visant l'amélioration de la performance thermique et énergétique des bâtiments.

Recommandations sur l'optimisation de l'isolation thermique dans un climat semi-aride.

L'intégration du bâtiment dans son environnement est le premier principe de l'architecture bioclimatique, qui passe donc inévitablement par une excellente connaissance des paramètres essentiels du climat, comme l'ensoleillement, les vents et l'humidité. En plus de la localisation du bâtiment, sa forme et les paramètres sur lesquels peut agir le concepteur pour améliorer les conditions de confort et limiter les consommations de chauffage, il est tout d'abord nécessaire de limiter les déperditions. Pour ce faire, il faut réaliser un bâtiment bien isolé pour optimiser le confort en été et en hiver et réduire la consommation énergétique des bâtiments, il est judicieux d'anticiper la maturation de la conception architecturale de départ qui doit s'inscrire dans le cadre de la durabilité.

Les résultats de la présente recherche ont illustré que l'isolation thermique dans les bâtiments ne peut pas être considérée comme l'unique solution. Les études de simulation ont autorisé la découverte de la meilleure combinaison qui doit être appliquée pour améliorer la performance thermique et énergétique d'un bâtiment.

1 - L'isolation de l'enveloppe du bâtiment :

- L'introduction d'un isolant permet un abaissement important de la température intérieure qu'avec la lame d'air ;
- L'emplacement idéal de l'isolant dans la paroi est celui du côté externe de la masse thermique ;
- L'utilisation des isolants écologiques est recommandée pour des raisons économiques et environnementales ;
- Divulguer l'utilisation des super-isolants minces pour optimiser la performance thermique et énergétique des bâtiments.

Axes et voies de recherche

Plusieurs axes de progrès et voies de recherche autour de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments sont en cours d'exploration. En ce qui concerne l'enveloppe, le développement de solutions d'isolation classique à l'isolation alternatives. Les matériaux isolants traditionnellement utilisés dans le bâtiment sont bon marché, mais peu performants, ils ne sont plus adaptés aux nouveaux enjeux. Il s'agit notamment de mettre au point des matériaux et solutions d'enveloppe ayant une efficace capacité d'isolation pour une légère épaisseur. Ce type d'isolation est notamment envisagée en réhabilitation des bâtiments d'où la contrainte d'espace intérieur est souvent soulevée. Toutefois, la question de la durabilité et la performance des matériaux isolants délimitent actuellement l'horizon de leur utilisation. Parmi ces solutions, le super-isolant et les isolants écologiques.

- Les isolants thermiques sous vide (VIP) et les aérogels, qui permettent d'atteindre des conductivités thermiques très faibles de l'ordre de $0.005 \text{ W}/(\text{mC}^\circ)$.

- Les aérogels nanostructures peuvent être utilisés dans l'isolation des façades opaques et transparentes. Cette opportunité ouvre l'éventail de l'épanouissement pour la production d'une architecture serein et amie de l'environnement.
- La façade ventilée est une solution de construction de hautes prestations pour le parement de bâtiments dont l'objectif principal est de séparer la fonction d'imperméabilité de celle de l'isolement thermique répondant ainsi aux exigences de protection thermique, d'économie d'énergie et de protection environnementale.
- Développer une isolation écologique, en utilisant les matériaux poreux, « respirant », qui possèdent une grande capacité hygroscopique ce qui permet de bénéficier des échanges entre les parois et l'air extérieur. Il faut tenir compte de l'ensemble du cycle de vie d'un matériau, de sa conception à son élimination ou son recyclage éventuel.
- La solution thermique de demain pourrait être trouvée dans les matériaux et les solutions non encore pensés, ce qui exige de réfléchir le futur de ces isolants dans l'invention de la nanotechnologie des matériaux qui ne sont pas encore pensés.

Livres

1. Beddiar, K. and J. Lemale, *Bâtiment intelligent et efficacité énergétique - Optimisation, nouvelles technologies et BIM*. 2016.
2. Branchu, M. and C. Branchu, *Isolation thermique et acoustique : Rouleaux, panneaux, cloisons, murs et planchers, tuyauteries, survitrages* 1ed. 2012.
3. Chenaf, M., *Planchers et rupteurs de ponts thermiques : Conception et mise en oeuvre - En application des normes européennes, des Eurocodes et des DTU* 2ed. 2013.
4. Delaire, A., R. Bouchié, and B. Cormier, *Performance énergétique : les matériaux et procédés d'isolation : Choix et mise en oeuvre des matériaux et des procédés - Performances et références réglementaires - Plus de 35 solutions techniques analysées* 1ed. 2013.
5. Dobbelsteen, A.v.d., M.v. Dorst, and A.v. Timmeren, *Smart Building in a Changing Climate*. 2009.
6. Dutreix, A., *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*. 2010.
7. Farkh, S., Bel, Thierry, *Les ponts thermiques dans le bâtiment : Mieux les connaître pour mieux les traiter* 1ed. 2012.
8. Fedullo, T.G.e.D., *Le grand livre de l'isolation thermique*. 3 ed. 2012.
9. Gallauziaux, T., Fedullo, David, *L'isolation par l'extérieur* 1ed. 2015.
10. Garnier, A., *Le bâtiment à énergie positive : Comment maîtriser l'énergie dans l'habitat ?* 2012.
11. Gonzalo, R.H., Karl J., *Architecture et efficacité énergétique principes de conception et de construction*. . 2008.
12. Harold Kroto., Michael Veith., and C.b.M.K.a.S. Peters, *Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design*. 2008.
13. Jedidi, M. and O. Benjeddou, *La thermique du bâtiment : Du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de clim*. 2016.
14. Leblond, P., *L'essentiel de la RT 2012 : Obligations et mise en oeuvre de la réglementation thermique*. 2 ed. 2015.
15. Maes, P., *Labels d'efficacité énergétique : HQE, BBC-Effinergie, maison passive, RT 2005/2012, Qualitel*. 2009.
16. Maugard, R.F.G.J.F.H.A., *L'efficacité énergétique du bâtiment : optimiser les performances énergétiques, le confort et la valeur des bâtiments tertiaires et industriels* 2014.

17. Munch, L., *Démarche d'efficacité énergétique*. 2016.
18. Oliva, J.-P. and S. Courgey, *L'isolation thermique écologique*. 2010.
19. Pajani, D., *La thermographie du bâtiment : Principes et applications du diagnostic thermographique*. 2012.
20. Pavie, O.s.M.V.z.V., *Détails de réhabilitation écologique*. 2015.
21. Penu, G., *La thermique du bâtiment : en 37 fiches-outils* 2ed. 2015.
22. Rabourdin, S., *Vers une nouvelle révolution énergétique ?* . 2011.
23. Roaf, S. and D.C.a.F. Nicol, *Adapting buildings and cities for climate change*. 2 ed. 2009.
24. Roulet, C.-A., *Eco-confort : pour une maison saine, confortable et à basse consommation d'énergie*. 2012.
25. Ruot, B., *Isolation thermique extérieure par enduit sur isolant PSE : Mise en oeuvre sur parois en béton ou en maçonnerie* 1ed. 2015.
26. Schittich, C., W. Lang, and R. Krippner, *in detail Building Skins*. 2006.
27. Tissot, M., *L'énergie solaire, thermique et photovoltaïque*. 2012.
28. Vu, B., *Maison basse consommation (BBC)*. 2010.

Articles publiés

1. Al-Mofeez, L. *Field Test Results of Interior vs. Exterior Insulation of Thermal Mass in Extremely Hot-Arid Climates*. in *Proceedings of the national passive solar conference*. 1992. AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY INC.
2. Al-Sanea, S.A. and M. Zedan, *Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass*. *Applied Energy*, 2011. **88**(9): p. 3113-3124.
3. Asan, H., *Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view*. *energy and buildings*, 2000. **32**(2): p. 197-203.
4. Asphaug, S.K., et al., *Accelerated ageing and durability of double-glazed sealed insulating window panes and impact on heating demand in buildings*. *Energy and Buildings*, 2016. **116**: p. 395-402.

5. Bekkouche, S., et al., *Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance*. Journal homepage: www. IJEE. IEEFoundation. org, 2013. **4**(3): p. 459-466.
6. Bolattürk, A., *Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey*. Building and environment, 2008. **43**(6): p. 1055-1064.
7. Cuce, E., et al., *Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings*. Energy and Buildings, 2014. **77**: p. 28-39.
8. Cuce, E., et al., *Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: a comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **34**: p. 273-299.
9. Daouas, N., Z. Hassen, and H.B. Aissia, *Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia*. Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(4): p. 319-326.
10. DOUNIA, B.D., *Nouveaux matériaux nanoporeux et bio-hybrides à base de nanoparticules minérales et/ou cellulosiques: Relation structure/propriétés*. 2016.
11. Dowson, M., et al., *Streamlined life cycle assessment of transparent silica aerogel made by supercritical drying*. Applied Energy, 2012. **97**: p. 396-404.
12. Dutreix, A., *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*. 2010: Editions Eyrolles.
13. El Hassar, S.M.K., et al., *Réglementation thermique algérienne des bâtiments: Contribution à la définition de nouveaux coefficients réglementaires*. Revue française de génie civil, 2002. **6**(4): p. 661-681.
14. FAGLA, B.F., *Etude Thermique Expérimentale des Suspensions Newtoniennes en Solutions du Glucose et de l'Eau en Écoulement dans une Conduite Horizontale à Section Constante*. Sciences Appliquées et de l'Ingénieur, 2014. **1**(2): p. 109-121.
15. Fezzioui, N., et al., *Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien*. Revue des énergies renouvelables, 2008. **11**(1): p. 25-34.
16. Ghardaïa, e.p.s.a., *influence de l'isolation thermique intérieure et extérieure d'un bâtiment*.
17. Guechhati, R., et al., *Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda*. Revue des Energies Renouvelables, 2010. **13**(2): p. 223-232.
18. Imbabi, M.S.-E., *A passive-active dynamic insulation system for all climates*. International journal of sustainable built environment, 2012. **1**(2): p. 247-258.

19. Jelle, B., et al. *Vacuum and nanotechnologies for the thermal insulation materials of beyond tomorrow—From concept to experimental investigations*. in *Proceedings of the 10th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS-X)*. 2011.
20. Jelle, B.P., *Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities*. *Energy and Buildings*, 2011. **43**(10): p. 2549-2563.
21. Jelle, B.P., *Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings*. *Start-Up Creation: The Smart Eco-efficient Built Environment*, 2016: p. 129.
22. Jelle, B.P., A. Gustavsen, and R. Baetens. *The high performance thermal building insulation materials and solutions of tomorrow*. in *Buildings XI Proceedings*. 2010.
23. Kadri¹¹, N. and A. Mokhtari²², *Contribution à l'étude de réhabilitation thermique de l'enveloppe du bâtiment*. *Revue des Energies Renouvelables*, 2011. **14**(2): p. 301-311.
24. Kalnæs, S.E. and B.P. Jelle, *Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways*. *Applied Energy*, 2014. **116**: p. 355-375.
25. Kalnæs, S.E. and B.P. Jelle, *Phase change materials and products for building applications: a state-of-the-art review and future research opportunities*. *Energy and Buildings*, 2015. **94**: p. 150-176.
26. Kaynakli, O., *Parametric investigation of optimum thermal insulation thickness for external walls*. *Energies*, 2011. **4**(6): p. 913-927.
27. Li, H., et al., *Degradation of VIP barrier envelopes exposed to alkaline solution at different temperatures*. *Energy and Buildings*, 2015. **93**: p. 208-216.
28. McArdle, P. and P. Lindstrom, *Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2008, US Energy Information Administration*. 2008, DOE/EIA-0573.
29. McArdle, P., P. Lindstrom, and S. Kalopedis, *Emissions of greenhouse gases in the United States 2007*. *Energy Information Administration DOE/EIA-0573 (2007)*, Washington, DC, 2008.
30. Medjelekh, D., *Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure*. *Revue des Energies Renouvelables*, 2010. **13**(2): p. 265-273.
31. Musson, A., *Construire et mesurer l'attractivité durable au niveau régional: l'apport de la représentation des entrepreneurs*. *Géographie, économie, société*, 2015. **17**(1): p. 97-131.
32. Nezzar, S. and M. Gourdache, *Etude des performances énergétiques d'une conception bioclimatique en région aride*. *World Energy Council*, 1999.
33. Ozel, M., *Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate*. *Energy conversion and management*, 2013. **66**: p. 106-114.

34. Ozel, M., *Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness*. Energy and Buildings, 2014. **72**: p. 288-295.
35. Ozel, M. and K. Pihtili, *Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations*. building and environment, 2007. **42**(8): p. 3051-3059.
36. Pacheco-Torgal, F., *Introduction to the start-up creation for the smart eco-efficient built environment*. Start-up creation: The smart eco-efficient built environment, ed. Pacheco-Torgal, Rasmussen, Granqvist, Ivanov, Kaklauskas and Makonin, Woodhead Publishing Ltd-Elsevier Science and Technology, Abington Hall, Cambridge, UK, 2016: p. 1-15.
37. Quinten, J. and V. Feldheim, *Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method*. Energy and Buildings, 2016. **110**: p. 284-293.
38. Rashwan, A., O. Farag, and W.S. Moustafa, *Energy performance analysis of integrating building envelopes with nanomaterials*. International Journal of Sustainable Built Environment, 2013. **2**(2): p. 209-223.
39. Sambou, V., *Transferts thermiques instationnaires: vers une optimisation de parois de bâtiments*. 2008, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
40. Stazi, F., et al., *Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies*. Energy and buildings, 2013. **60**: p. 429-441.
41. Thermique, R., *Méthode de calcul Th-CE*. Annexe {l'arrêté du 19 juillet 2006, 2005.
42. Tsilingiris, P., *On the thermal time constant of structural walls*. Applied Thermal Engineering, 2004. **24**(5): p. 743-757.
43. Tsilingiris, P., *Wall heat loss from intermittently conditioned spaces—The dynamic influence of structural and operational parameters*. Energy and Buildings, 2006. **38**(8): p. 1022-1031.
44. Ucar, A. and F. Balo, *Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls*. Renewable Energy, 2010. **35**(1): p. 88-94.
45. Ulgen, K., *Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor*. energy and buildings, 2002. **34**(3): p. 273-278.
46. Wati, E., P. Meukam, and M.K. Nematchoua, *Influence of external shading on optimum insulation thickness of building walls in a tropical region*. Applied Thermal Engineering, 2015. **90**: p. 754-762.

Lois et documents techniques

1- **APRUE** « Consommation énergétique finale de l'Algérie. Chiffres clés, année 2005 » Données et indicateurs, Alger, APRUE 2007.

2- **Journal Officiel de République Algérienne** « *Loi N°99-09 du 28 Juillet 1999 Relative à la Maîtrise de l'Énergie* », J.O.R.A., N°51, Alger, 2 Août 1999.

3- **Ministère de l'énergie**, *Bilan énergétique national de l'année 1999*/ DGE, 2000, EPE Novembre, 2000.

4- **Ministère de l'équipement des transports, du logement, du tourisme de la mer** : Centre d'Étude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions techniques C.E.R. TU : Mémento thermique du bâtiment pour le chargé de constructions publiques, *Confort thermique*, Lyon, juillet 2003.

5- **Ministère de l'habitat D.T.R C 3-4 Climatisation** : Règles de calcul des apports calorifiques des bâtiments. CNERIB (Centre National d'Études et de Recherches Intégrés du Bâtiment) Alger PAO- 1998

6-**Ministère de l'habitat, Document technique réglementaire(D.T.R.C3-2)** Réglementation thermique des bâtiments d'habitation Règles de calcul des déperditions calorifiques Fascicule1, Centre National d'Étude et de Recherche Intégrées du Bâtiment CNERIB, Alger 1998.

7- **ONM**. *Office national de la météorologie*, 2015.

8- Réglementation thermique, française, 2005.

Sites internet

[En ligne] <http://portail.cder.dz>.

[En ligne] <http://reta.cder.dz>.

[En ligne] http://users.telenet.be/h-consult/soleil/afstand_panelenZ.htm.

[En ligne] <http://www.aps.dz/economie-de-la-consommation-electrique-des-foyers-algeriens-est-10-fois-superieure-la-norme-aprue>.

Annexe : I

I.1. Dessin de l'isotherme

Sur le même tableau qui comporte les mois en abscisse et les heures en ordonnées, on joint à l'aide de courbures les points de mêmes températures, on choisit séquentiellement (10°C, 15°C, 20°C, 25°C 30°C). On obtient l'isotherme qui nous permet de déterminer les différentes zones (sous chauffe, confort, surchauffe) en fonction des tranches horaires propre à chaque mois.

- D'après la formule de Humphrey

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times T_m)$$

$$T_n = 22.93 \text{ °C.}$$

- Les températures limitent de confort Tc

$$T_c = T_n \pm 2 \text{ K.}$$

$$T_c = T_n + 2\text{K} = \mathbf{24.93^\circ\text{C}}$$
 c'est la limite supérieure du confort.

$$T_c = T_n - 2\text{K} = \mathbf{20.93^\circ\text{C}}$$
 c'est la limite inférieure du confort.

❖ La zone de surchauffe

Comprend les températures au-delà de 25°C, elle englobe les mois de de mai, juin, juillet, aout et septembre.

❖ La zone de confort

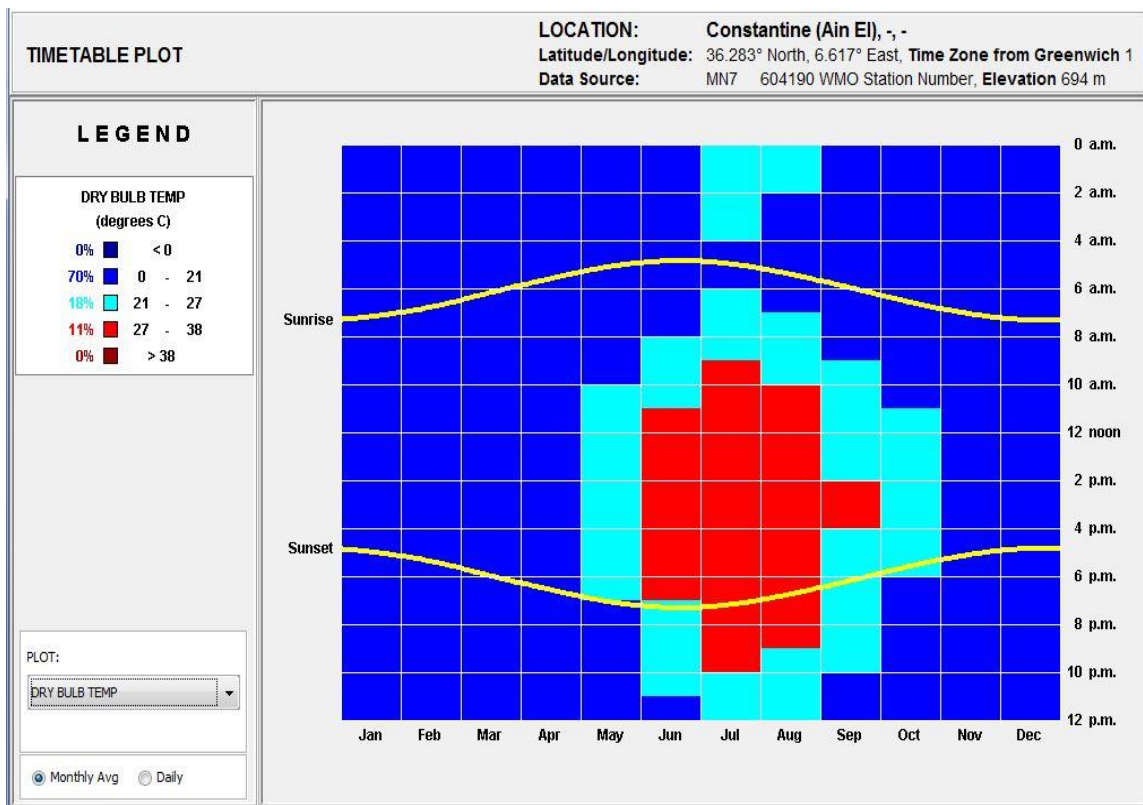
Elle est incluse dans l'intervalle de $\pm 2^\circ\text{C}$.

On aura donc la zone de confort qui s'étale de 21°C au 25°C, englobant les mois d'avril, mai et octobre avec des tranches horaires différentes, ainsi que quelques heures de mois de mars.

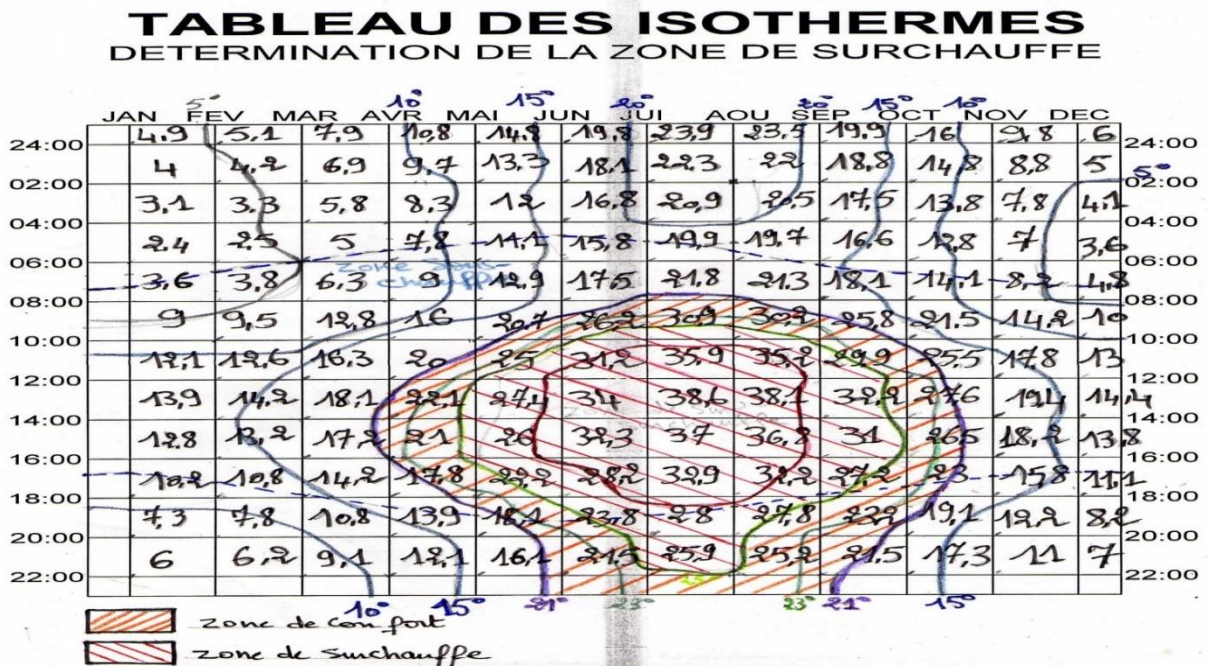
❖ La zone de sous-chauffe :

C'est la zone qui comprend les températures inférieures à 20°C, et qui englobe pratiquement les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre

Tab.I.1 : Tableau des isothermes Source. Internet.



Tab.I.2 : Tableau des isothermes Source. Internet.



Annexes : II

II.1. Les fondamentaux de la thermique

II.1.1. La propagation de la chaleur

Dans le bâtiment, la chaleur se propage essentiellement de trois façons différentes qui sont la conduction, la convection et le rayonnement. Ces trois modes se combinent très souvent dans les parois. La quantité de chaleur échangée augmente avec le gradient de température entre les éléments qui échangent de la chaleur. La conduction est le transfert de chaleur à travers un corps solide en partant du côté chaud vers le côté froid. La convection est le transfert de chaleur d'un corps solide vers un gaz en mouvement et inversement. Enfin, le rayonnement est le transfert de chaleur à distance par rayonnement infrarouge (grandes longueurs d'ondes).

II.1.2. La conductivité thermique λ W/(m.K)

La conductivité thermique d'un matériau homogène représente le flux de chaleur par unité de surface traversant 1 m d'épaisseur du matériau pour une différence de température de 1 degré. La conductivité thermique des matériaux isolants thermiques les plus courants varie entre 0,023 et 0,050 environ. Les métaux sont des matériaux conducteurs qui possèdent des conductivités thermiques élevées (230 pour l'aluminium, 50 pour l'acier galvanisé et 15 pour l'inox). Le verre a une conductivité thermique de 1. Le bois et le plastique, une conductivité thermique proche de 0,2. Le mode de justification de la valeur utile de la conductivité thermique des matériaux de construction est donné dans les règles Th-Bât, règles professionnelles pour l'application des réglementations thermiques.

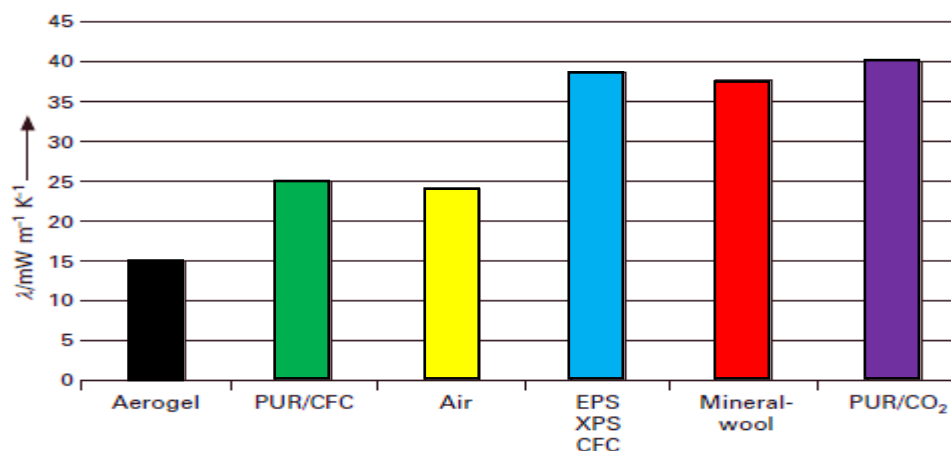


FIG. II. 1 Comparing thermal conductivity of aerogel with other commercially available materials. PUR: polyurethane foam, CFC: chlorofluorohydrocarbons; EPS, XPS: expanded and extruded polystyrene (Husing & Schubert, 1998).

II.1.3. La résistance thermique R m².K/W

La résistance thermique d'un matériau est sa capacité à résister au passage de la chaleur qui le traverse. Pour un matériau homogène ou quasi homogène, R est égale au rapport entre son épaisseur exprimée en mètre et sa conductivité thermique. Plus R est importante et plus la paroi est isolante thermiquement. $R = e / \lambda \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$

Afin d'obtenir une bonne résistance thermique d'un matériau, on peut donc soit augmenter son épaisseur soit diminuer sa conductivité thermique, soit les deux à la fois. La résistance thermique totale de plusieurs couches homogènes empilées ayant des épaisseurs constantes, est égale à la somme des résistances thermiques de toutes les couches.

La résistance thermique d'une lame d'air dépend de la direction du flux (horizontal, vertical ascendant, vertical descendant). Au-delà de 20 mm d'épaisseur, la résistance thermique d'une lame d'air se stabilise sauf pour les flux descendants où la résistance thermique continue à croître avec l'épaisseur.

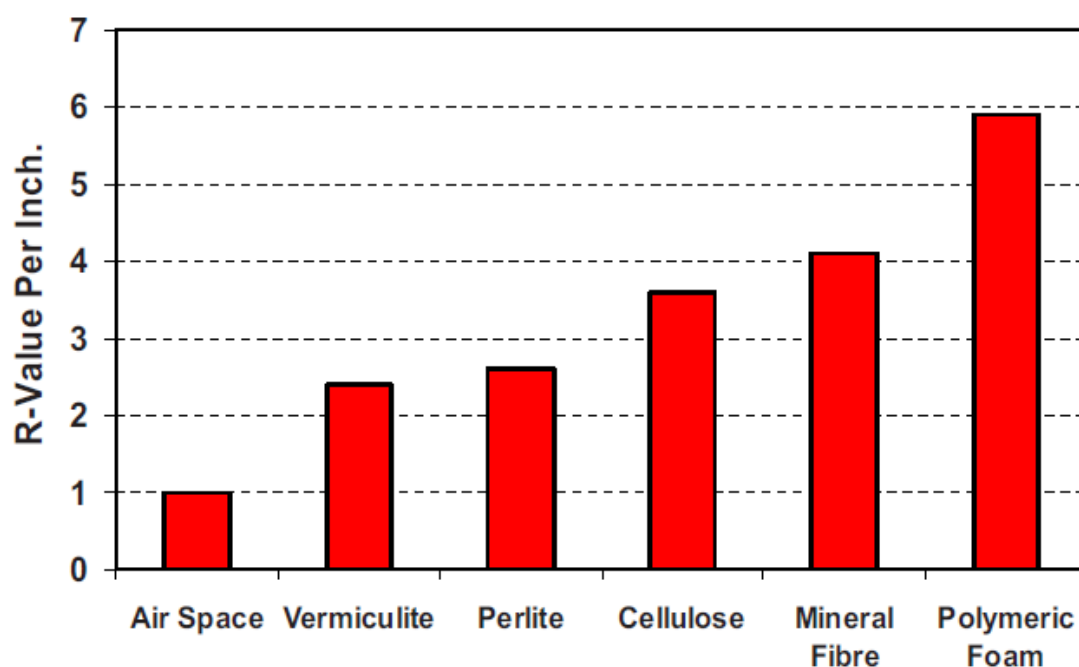


FIG. II. 2. Valeur (R) résistances des matériaux isolants couramment utilisés

II.1.4. Les résistances thermiques superficielles R_{si} , R_{se} $m^2.K/W$

La résistance thermique superficielle représente la résistance à l'échange de chaleur par convection et par rayonnement entre la face d'une paroi et l'ambiance adjacente. La valeur de la résistance thermique superficielle dépend notamment de la vitesse d'air (sur la face extérieure), de la direction du flux de chaleur (horizontal, vertical ascendant, vertical descendant) de la température et de la rugosité de la surface. Des valeurs conventionnelles des résistances superficielles intérieure et extérieure sont données dans les règles Th-Bât (règles professionnelles pour l'application des réglementations thermiques).

II.1.5. Le coefficient de transmission surfacique U $W/(m^2.K)$

Le coefficient de transmission surfacique d'une paroi comportant une ou plusieurs couches homogènes empilées et d'épaisseurs constantes est la capacité de la paroi à échanger la chaleur entre les deux ambiances adjacentes. Il se calcule comme étant l'inverse de la somme de toutes les résistances thermiques y compris les résistances superficielles. Plus U est faible et plus la paroi est isolante thermiquement. $U_c = 1/(R_{si} + R_{se} + \sum R_i)$.

Le coefficient de transmission surfacique d'une paroi comportant également des éléments hétérogènes doit tenir compte de l'impact des ponts thermiques intégrés qui en résultent (profilés métalliques, vis, tiges, pattes...). U_p se calcule en rajoutant à U_c une valeur ΔU qui représente l'impact des ponts thermiques noyés dans la paroi. $U_p = U_c + \Delta U$ $W/(m^2.K)$.

ΔU est obtenue en pondérant les ponts thermiques linéiques et ponctuels par leurs linéaires et leur nombre respectifs. Le mode de calcul détaillé de U_p est donné dans les règles Th-Bât.

II.1.6. Le coefficient de transmission linéique ψ $W/(m.K)$

Le coefficient de transmission linéique caractérise les déperditions supplémentaires qui ont lieu au niveau d'un élément filant plus conducteur de la chaleur que le reste de la paroi (exemple un rail métallique filant qui transperce un isolant thermique). Le coefficient ψ caractérise également les déperditions par transmission à travers une jonction entre deux parois (par exemple, un plancher et un mur isolé par l'intérieur).

II.1.7. Le coefficient de transmission ponctuel χ W/k

Le coefficient de transmission ponctuel caractérise les déperditions supplémentaires qui ont lieu au niveau d'un élément ponctuel plus conducteur de la chaleur que le reste de la paroi (exemple : une tige métallique qui transperce un isolant thermique).

II.1.8. Le facteur solaire

Le facteur solaire représente la capacité d'un élément d'enveloppe à transmettre l'énergie solaire reçue. Il se calcule comme étant le rapport entre l'énergie transmise à l'intérieur du local et l'énergie reçue. Le facteur solaire varie entre 0 et 1. Pour les parois opaques courantes le facteur solaire est directement proportionnel au coefficient de transmission thermique U_p et au coefficient d'absorption énergétique de la paroi.

II.1.9. L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un matériau à stocker et à restituer la chaleur ou la fraîcheur. Elle est fonction à la fois de sa masse volumique, de sa conductivité thermique et de sa capacité thermique. À l'échelle du bâtiment d'autres paramètres viennent s'ajouter comme l'épaisseur des matériaux et la surface d'échange avec l'ambiance intérieure.

II.1.10. Nombre de Knudsen

Le nombre de Reynolds par contre est un nombre qui compare les ordres de grandeur des termes d'advection et de viscosité dans l'équation de Navier Stokes il est compris dans la description hydrodynamique de l'écoulement. Dans ce cas l'écoulement peut être considéré continu sauf dans des régions spécifiques : un choc, la région qui jouxte une paroi, de quelques libres parcours moyens d'épaisseur, baptisée couche de Knudsen. Celle-ci peut être traitée comme une condition aux limites particulière du problème continu décrit par les équations de Navier-Stokes

Annexe : III

III.1. Définition et localisation des ponts thermiques

Un pont thermique est une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est sensiblement réduite par une absence ou une dégradation locale de l'isolation et donne lieu à d'importantes fuites de chaleur vers l'extérieur.

Les ponts thermiques dépendent du système constructif, du niveau et du type d'isolation des parois. On les localise généralement aux jonctions entre parois (ponts thermiques de liaison ou PTL); mais ils sont également présents dans les parois (ponts thermiques intégrés ou PTI).

Les ponts thermiques linéaires (jonction entre une dalle et une façade par exemple) sont quantifiés par un coefficient linéique ψ exprimé en $W/(m.K)$ (Watt par mètre linéaire et par degré Kelvin). Les ponts thermiques ponctuels (une cheville métallique traversant l'isolant, par exemple) sont quantifiés par un coefficient ponctuel χ exprimé en W/K (Watt par degré Kelvin).

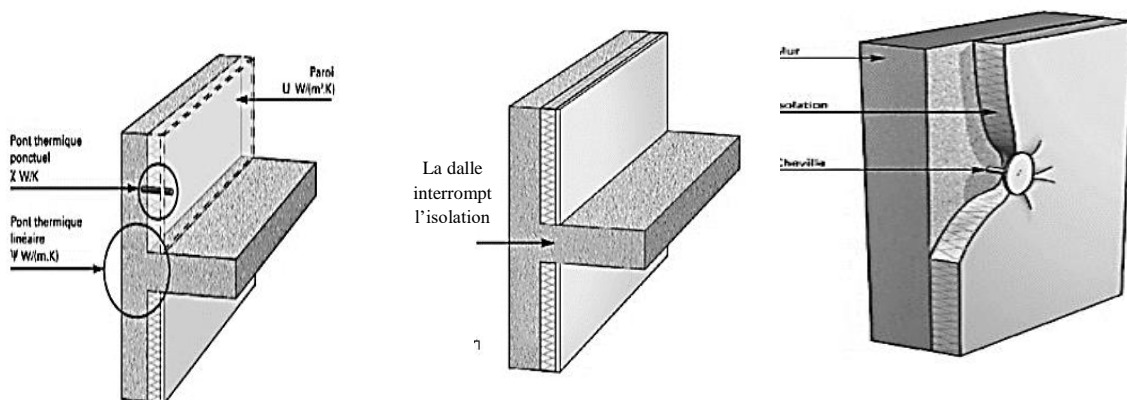


FIG.III. 1. a) Ponts thermiques linéaires et ponctuels. b). Pont thermique à l'isolation dalle- façade. c). Pont thermique intégré à une cheville métallique pénétrant l'isolation

III.2. Impacts des ponts thermiques sur le bâtiment

Impact énergétique :

Les ponts thermiques de liaison sont de véritables trous à travers l'isolation de l'enveloppe. Ils sont ainsi responsables de 10 à 40% de fuite de chaleur supplémentaire vers l'extérieur. Cet impact dépend de la géométrie du bâtiment (forme, volume), du système constructif (béton, parpaing, ossature légère, etc.) ainsi que du niveau et du type d'isolation pratiqués (par l'intérieur, par l'extérieur, répartie, etc.).

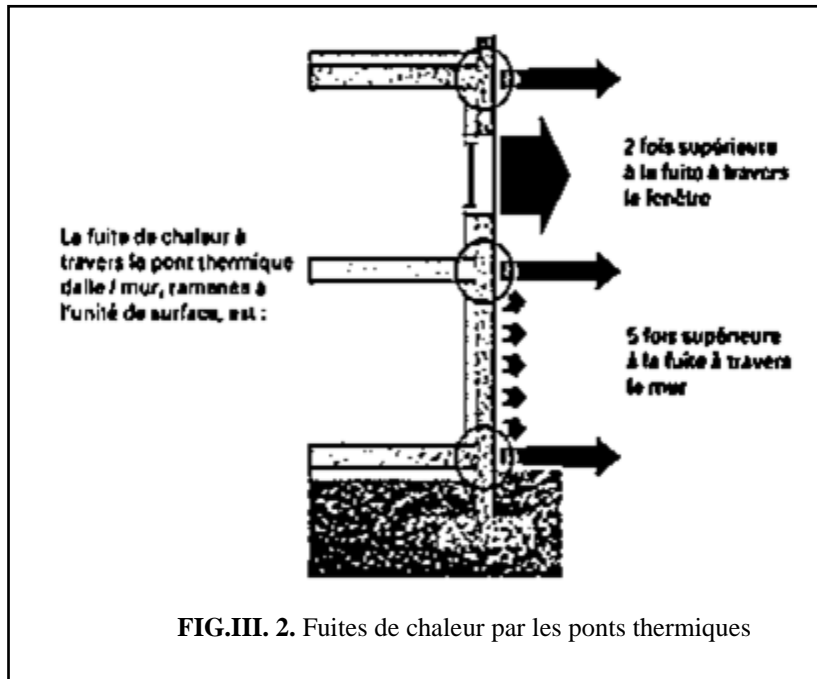


FIG.III. 2. Fuites de chaleur par les ponts thermiques

III.3. Le rupteur thermique

Description du procédé

Il s'agit d'un procédé de traitement des ponts thermiques entre une dalle en béton et une façade en béton. Il peut également être utilisé en position verticale pour traiter le pont thermique entre un refend en béton et une façade en béton. Il est généralement constitué de trois éléments

- Un isolant permettant de limiter la transmission thermique périphérique dans la dalle en béton ;
- Un système d'armatures ponctuelles pour assurer la transmission des efforts mécaniques entre les parois ;
- Une protection éventuelle selon le type de produit isolant, permettant de limiter la propagation du feu en cas d'incendie. L'isolant est en général un bloc en laine minérale ou en plastique alvéolaire d'épaisseur inférieure à l'épaisseur du doublage. Les armatures métalliques peuvent être :
 - En acier, enrobées dans des noyaux de béton ;
 - Ou en acier inoxydable lorsque les armatures traversent directement l'isolant.

La protection incendie peut-être constituée d'une plaque silico-calcaire placée au-dessus et en dessous de l'isolant.

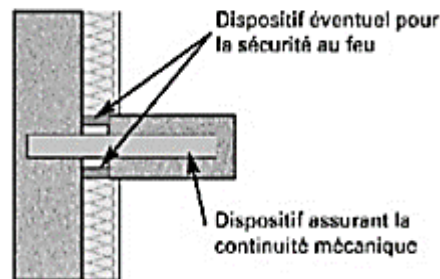


FIG.III.3. Schéma de principe d'un rupteur pour dalle béton.

Le procédé de rupteur de pont thermique pour dalle béton est un procédé très particulier dans le sens où il est inséré dans le gros œuvre du bâtiment et doit donc assurer, en plus de sa fonction d'isolation thermique, l'ensemble des fonctions du plancher :

- Stabilité mécanique de l'ouvrage ;
- Compartimentage pour éviter la propagation du feu ;
- Isolation acoustique vis-à-vis du bruit entre locaux.

III.4. Critère d'analyse : conception, mise en œuvre, exploitation de l'isolation thermique

III.4.1. Coefficient de transmission du pont thermique

La déperdition par transmission à travers les ponts thermiques s'exprime par un coefficient de transmission thermique linéique ψ , exprimé en $W/(m.K)$. dans le cas d'une liaison courante d'une façade béton avec un plancher en béton de 20 cm environ, la valeur du pont thermique qui en résulte est en général d'environ $1 W/(m.K)$. les rupteurs de pont thermique permettent de diminuer les valeurs ψ des ponts thermiques de liaison entre un mur et un plancher ou entre un mur et un refend, en interrompant partiellement ou totalement la continuité du béton entre les deux parois. Selon le type de procédé, l'épaisseur de la dalle de plancher et la liaison traitée, les rupteurs de pont thermique pour dalle béton permettent de diminuer le pont thermique de liaison traité de 40 à 80 %.

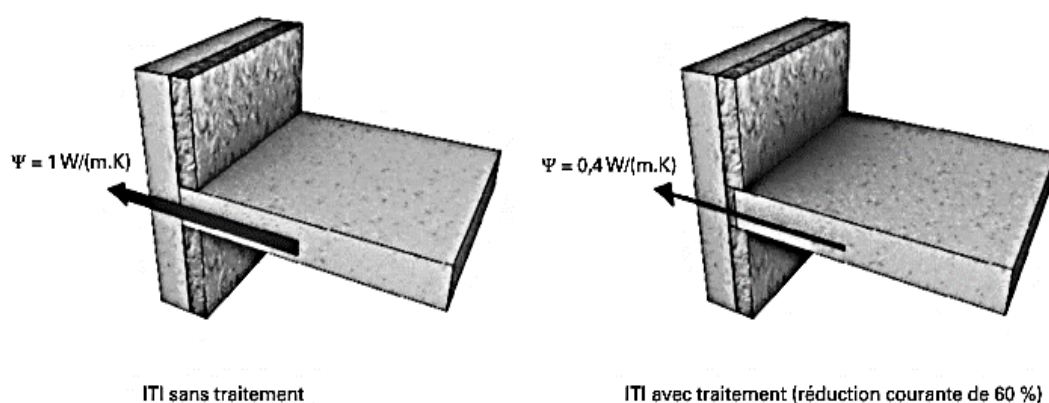


FIG.III. 4.Coefficient de transmission.

III.4.2. Impact des rupteurs sur la déperdition globale

Plusieurs types de rupteurs permettent de traiter les liaisons suivantes

- Mur isolé par l'intérieur avec refend vertical, plancher intermédiaire, plancher haut ou plancher bas
- Mur isolé par l'extérieur avec balcon.

L'impact de ces procédés sur la déperdition globale du bâtiment dépend essentiellement de la configuration géométrique du bâtiment, notamment son nombre d'étages, mais peut représenter une diminution allant jusqu'à 20 %. À titre d'exemple, on donne ci-dessous l'impact des ponts thermiques de liaison sur la déperdition totale avec et sans rupteur pour un bâtiment collectif de type R+5 sans balcon et isolé par l'intérieur.

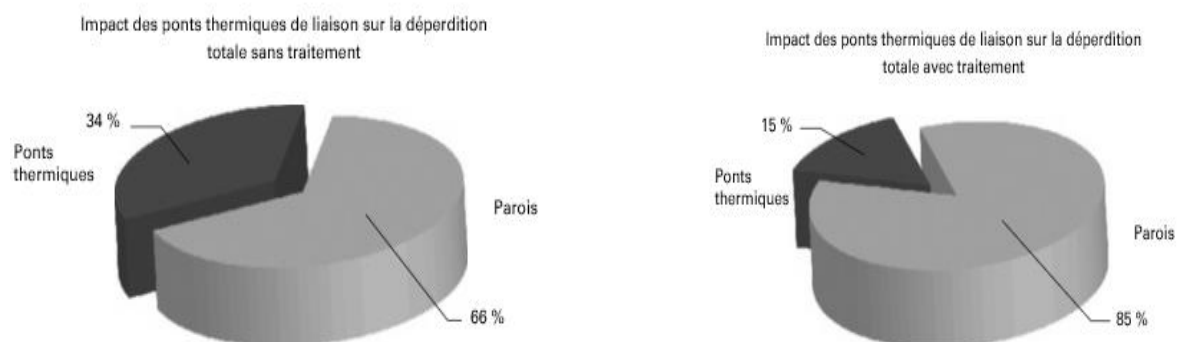


FIG.III. 5.Comparatif des déperditions sur un immeuble collectif R+5 (niveau RT 2005) isolé par l'intérieur avec et sans traitement des ponts thermiques avec des rupteurs.

Annexe : IV

IV.1. Correspondance des unités :

IV.2.1. Température : (Source : D.T.R, 1998)

Degrés Celsius (°C) anciennement centigrade. Les points de référence sont :

- 0°C température de la glace fondante ;
- 100°C température de l'eau bouillante à la pression atmosphérique normale.

Kelvin (K) unité du système international SI. La graduation est celle de l'échelle Celsius mais la température de la glace fondante correspond à 273.15 K. On obtient donc une température en K à partir d'une température en °C en ajoutant 273.15.

Degrés Fahrenheit (°F) unité utilisée dans les pays de langue anglaise. Les points de référence sont :

- 32°F température de la glace fondante
- 212 °F température de l'eau bouillante à la pression atmosphérique normale.

$$1^{\circ}\text{F} = 0.55^{\circ}\text{C} \quad 0^{\circ}\text{F} = (\theta^{\circ}\text{C} / 0.55) + 32$$

IV.2.2. Quantité de chaleur : (Source : D.T.R, 1998)

1 calorie (cal) = 4.185 J.

1 kcal est la quantité de chaleur pour augmenter de 1°C la température de 1kg d'eau.

1 kcal = 4185 J.

1kJ = 0.239 kcal

1 kcal = 4.186 kJ

1 thermie = 1000 kcal.

1 Wh = 3600 J.

1 B.T.U. (British thermal Unit) = 1044 J

IV.2.3. Conductivité thermique : (Source : Givoni, 1976)

1 W/m°C = 0.861 kcal / m.h.°C

1 kcal / m.h.°C = 1.163 W/m°C

1 W/m°C = 6.94 B.T.U. / ft².h.°F

IV.2.4. Puissance : (Source : D.T.R, 1998)

$$1\text{kcal} / \text{h} = 1.162 \text{ W.}$$

$$1 \text{ BTU} / \text{h} = 0.29\text{W}$$

IV.2.5. Pression : (Source : D.T.R, 1998)

- 1 bar = 10 Pa.
- 1 mbar = 100 Pa.
- 1mm CE (colonne d'eau) = 9.8 Pa.
- 1 mm Hg (mercure) ou le torr = 133.323 Pa.

Annexe : V

V.1. Résultats des mesures

Température moyennes 16-17-18 janvier 2016

TAB. 1. Mesure de température période hivernale

Paramètres	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T mt (c°)	1.00	1.20	0.67	1.00	2.70	3.67	4.67	5.77	6.00	7.00	6.87	5.67	4.67	4.50	5.00	3.67	4.03	4.33	4.33
T ext (c°)	2.00	2.00	3.00	3.00	4.27	5.00	5.17	6.00	6.67	7.00	7.20	6.83	5.67	5.00	5.00	4.33	4.10	4.33	4.33
T int mag(c°)	15.73	16.40	16.53	16.93	17.50	18.03	18.27	18.70	18.80	18.87	18.77	18.30	17.73	17.37	16.63	16.37	16.17	15.90	15.30
T int mess (c°)	15.70	16.00	16.23	16.73	17.00	17.30	17.57	18.03	18.30	18.51	18.60	17.99	17.14	16.67	16.27	16.00	15.63	15.20	14.77
T int foy (c°)	15.10	15.27	15.47	15.70	15.93	16.23	16.77	17.20	17.47	17.63	17.87	17.20	16.57	15.97	15.37	15.20	15.00	14.87	14.53
Ts ext mag (c°)	-3.54	-4.55	-2.29	-2.31	-2.52	0.67	0.15	0.76	2.31	0.95	1.69	1.42	1.44	-1.40	-2.59	-1.89	-1.53	-1.03	-1.13
Ts ext mess(c°)	-2.98	-3.39	-1.70	-2.12	-0.51	0.93	0.71	0.13	1.63	1.55	3.27	4.27	2.85	-0.19	-1.16	-0.71	-0.73	-0.24	-0.11
Ts ext foy(c°)	-1.11	-1.39	-0.36	-0.83	0.87	0.79	0.82	0.56	2.16	2.47	3.30	4.13	2.42	0.55	-0.26	-0.35	0.03	0.37	0.53
Ts int mag(c°)	15.85	16.52	16.65	17.05	17.62	18.15	18.40	18.83	18.93	19.02	18.92	18.45	17.88	17.53	16.80	16.53	16.33	16.07	15.47
Ts int mess(c°)	15.82	16.12	16.35	16.85	17.12	17.42	17.70	18.17	18.43	18.66	18.75	18.14	17.29	16.83	16.43	16.17	15.80	15.37	14.93
Ts int foy(c°)	15.22	15.38	15.58	15.82	16.05	16.35	16.90	17.33	17.60	17.78	18.02	17.35	16.72	16.13	15.53	15.37	15.17	15.03	14.70
Ts int toit (°c)	14.84	15.52	15.83	16.07	16.26	16.56	16.85	17.01	17.22	17.58	17.28	17.31	16.79	16.51	16.05	15.97	15.06	14.91	14.69

Température moyennes : 18-19-20 Aout 2016

(Sans ventilation naturelle nocturne)

Paramètres	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T- mt (c°)	16.67	20.03	23.00	26.33	28.20	29.33	31.33	32.50	33.00	33.33	33.10	32.00	31.00	29.10	26.00	24.00	22.37	22.00	21.00
T ext (c°)	23.83	24.17	24.93	26.83	29.23	30.23	30.70	32.27	33.67	33.43	31.43	30.03	29.10	27.20	25.20	24.50	23.97	23.47	22.93
T int foyer(c°)	25.53	26.23	27.20	27.93	28.33	28.57	28.73	29.03	29.17	29.37	29.67	29.77	29.90	29.10	28.20	27.57	27.40	27.20	27.03
T int mess (c°)	26.13	26.43	27.20	27.50	27.80	27.97	28.20	28.40	28.47	28.57	28.73	28.83	28.93	28.93	28.57	28.33	27.77	27.07	26.73
T int magasin (c°)	25.87	26.10	26.50	27.73	28.57	29.27	29.90	30.27	30.70	30.97	31.23	31.67	30.30	29.33	29.10	28.63	28.20	27.43	26.97
Ts ext foy (c°)	25.37	26.03	27.83	29.73	31.83	32.23	33.50	33.50	33.43	32.50	31.90	31.27	30.83	29.87	29.07	28.07	27.27	26.77	26.33
Ts ext mess (c°)	23.50	26.03	29.23	33.07	34.70	40.63	43.03	44.43	43.93	40.73	38.20	35.30	32.83	31.43	29.57	28.23	27.30	26.67	26.20
Ts ext mag (c°)	24.77	26.90	29.87	33.90	37.57	41.20	43.67	45.47	46.37	41.97	40.47	38.13	35.13	32.00	31.00	29.17	27.73	27.07	26.03
Ts int foy (c°)	26.00	26.43	27.57	28.17	28.40	28.77	29.10	29.57	29.87	30.10	30.17	30.33	30.50	29.40	28.40	27.80	27.47	27.13	26.93
Ts int mess (c°)	26.30	26.77	27.43	27.73	28.17	28.53	28.70	28.93	29.13	29.30	29.40	29.63	29.77	29.63	29.10	28.47	27.27	26.97	26.73
Ts int mag (c°)	26.07	26.37	26.97	28.23	29.20	30.00	30.37	31.03	31.73	32.57	32.73	31.77	31.33	29.63	29.30	28.80	28.33	27.77	27.50
Ts int toiture (C°)	25.20	26.17	28.40	31.63	36.63	40.77	43.43	46.93	46.87	42.20	40.70	36.97	35.40	31.83	30.07	28.87	28.07	27.10	26.50

TAB. 2. Mesure de température période estivale

Température moyennes 21-22-23 Aout 2016

(Avec ventilation naturelle nocturne)

Paramètres	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T.Météo	21.9	23.80	26.10	28.73	30.90	32.30	33.70	34.10	34.93	34.87	34.60	31.40	29.83	26.90	24.73	23.00	22.43	21.47	20.33
T. air ext	23.53	24.10	25.63	28.80	29.33	30.40	31.17	33.10	33.70	33.67	31.90	30.67	29.00	27.47	25.77	24.80	24.30	23.70	23.30
T. int foy(°C)	26.20	26.10	26.07	26.20	26.33	26.47	26.57	26.73	26.93	27.27	27.77	27.33	26.97	26.87	26.77	26.70	26.60	26.50	26.40
T. int mess(°C)	24.67	24.60	24.60	24.83	25.13	25.50	26.03	26.47	26.93	27.07	27.13	27.20	27.10	26.63	26.23	26.00	25.83	25.73	25.60
Tp int mag(°C)	23.07	23.07	25.13	27.50	29.17	30.77	31.20	32.20	32.70	32.90	32.10	31.60	31.20	29.00	27.60	27.03	26.07	25.63	25.20
Ts int foy(°C)	26.33	26.20	26.23	26.40	26.63	26.77	26.90	27.03	27.13	27.33	27.57	27.40	27.10	27.03	26.97	26.87	26.67	26.57	26.37
Ts int mess (°C)	24.90	24.87	24.97	25.13	25.33	25.67	26.17	26.77	27.13	27.47	27.67	27.77	27.47	26.80	26.43	26.17	26.07	25.83	25.73
Ts int mag(°C)	23.40	23.53	25.33	27.40	28.90	30.37	31.30	32.33	33.20	34.07	34.37	32.83	31.27	29.30	27.87	27.27	26.40	25.87	25.50
Ts int toit (°C)	25.97	26.77	28.17	30.17	38.80	42.40	44.03	44.77	43.67	43.10	41.83	37.57	36.17	31.17	30.13	29.70	29.20	27.57	26.60
Ts ext foy(°C)	24.20	24.97	26.37	29.07	33.17	33.43	34.03	33.67	33.40	33.30	33.10	31.57	31.40	30.10	29.50	28.47	27.33	26.70	26.27
Ts ext mess (°C)	22.37	23.47	25.17	28.63	31.57	40.27	44.63	46.60	46.17	42.47	38.43	36.17	34.13	31.33	30.53	28.53	27.37	26.30	26.07
Ts ext mag(°C)	23.17	24.20	26.27	29.47	35.20	41.60	46.57	48.63	48.13	41.17	39.43	36.27	34.33	31.37	31.27	29.00	28.17	27.33	26.47
Ts ext toit (°C)	22.33	23.77	30.60	37.00	47.90	49.40	50.83	52.93	51.33	45.77	41.57	40.67	38.27	33.40	32.03	29.47	26.20	26.07	25.37

TAB. 3.Mesure de température période estivale

V.2. Les figures de l'investigation

V.2.1. Les températures surfaciques intérieures

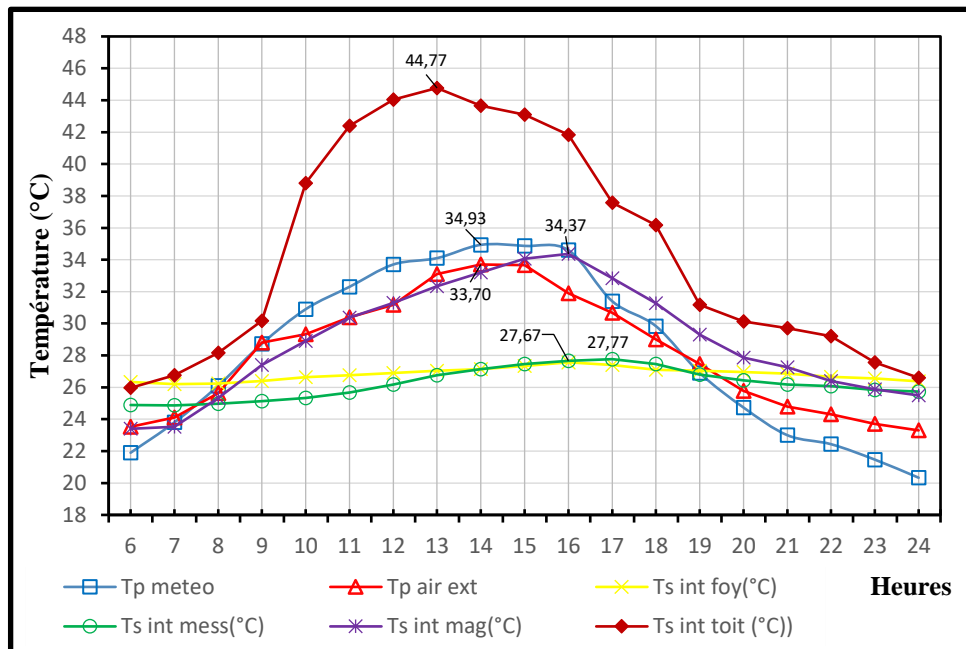


FIG.V. 1. Variation de la température moyenne surfacique intérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

V.2.2. Les températures surfaciques extérieures

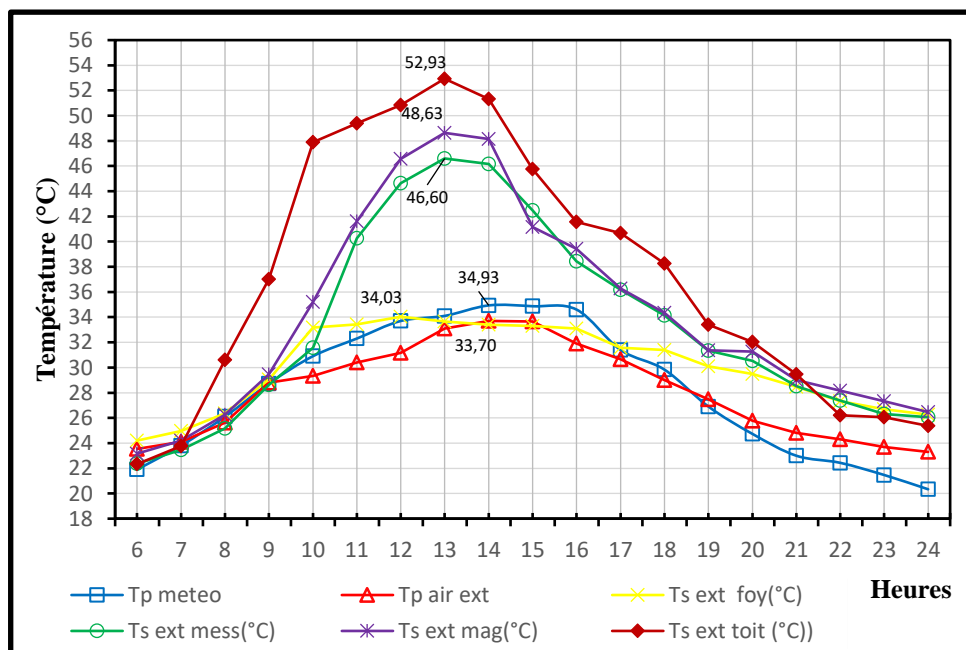


FIG.V. 2. Variation de la température moyenne surfacique extérieure période d'été du foyer, mess et magasin (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

V.2.3. Etude de l'humidité moyenne intérieure et extérieure

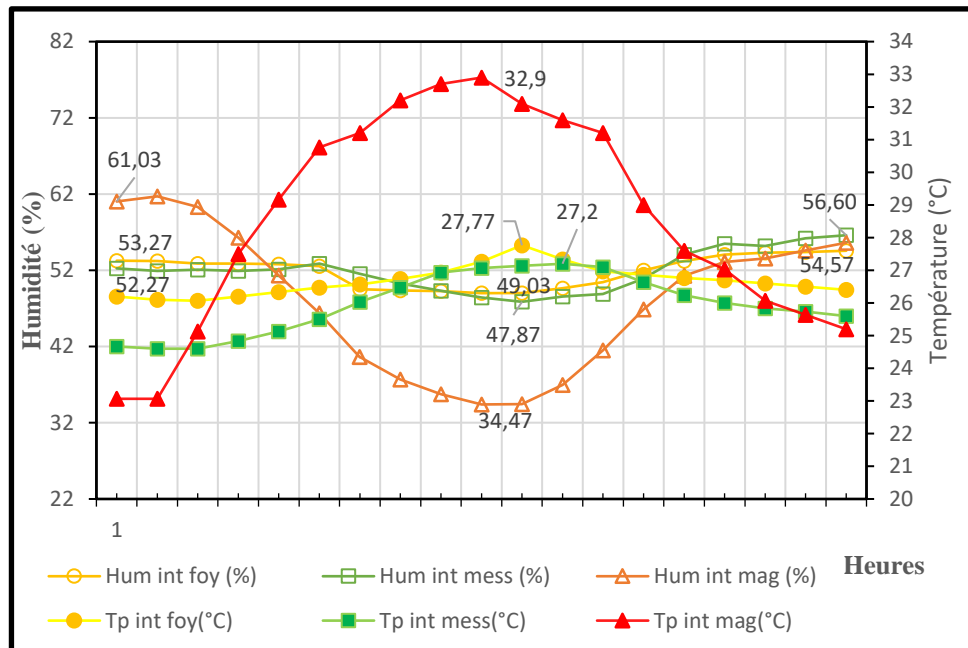


FIG.V. 3.Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure avec température intérieure du foyer, mess, et magasin. Période d'été. (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

V.2.4. Comparaison des écarts entre température intérieure et extérieure ($\Delta T = t_i - t_e$)

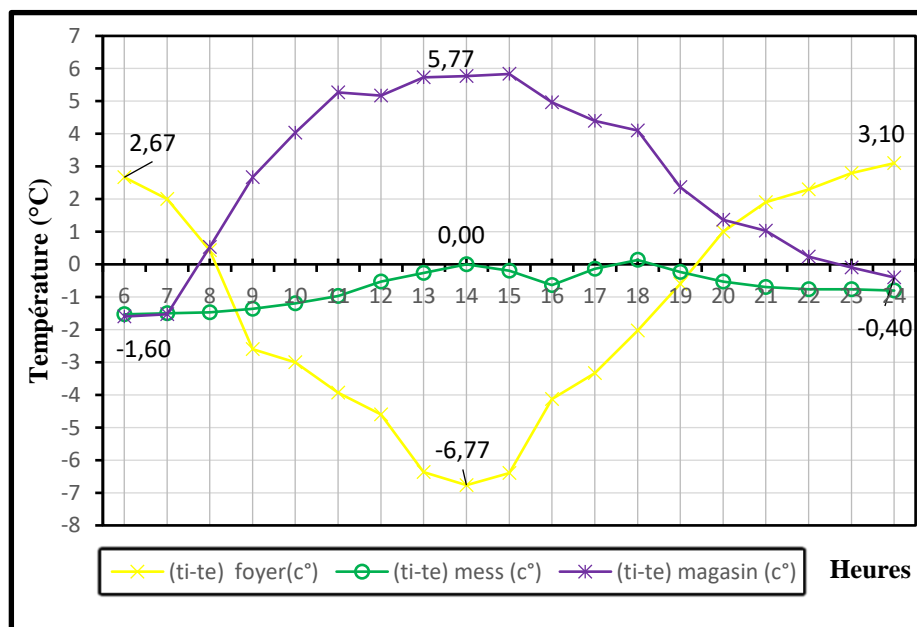


FIG.V. 4.Ecart de températures moyennes horaires intérieures et extérieures période été, du foyer, mess, et magasin. Période d'été. (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

V.2.5. Etude des températures de l'air moyennes maximales et minimales

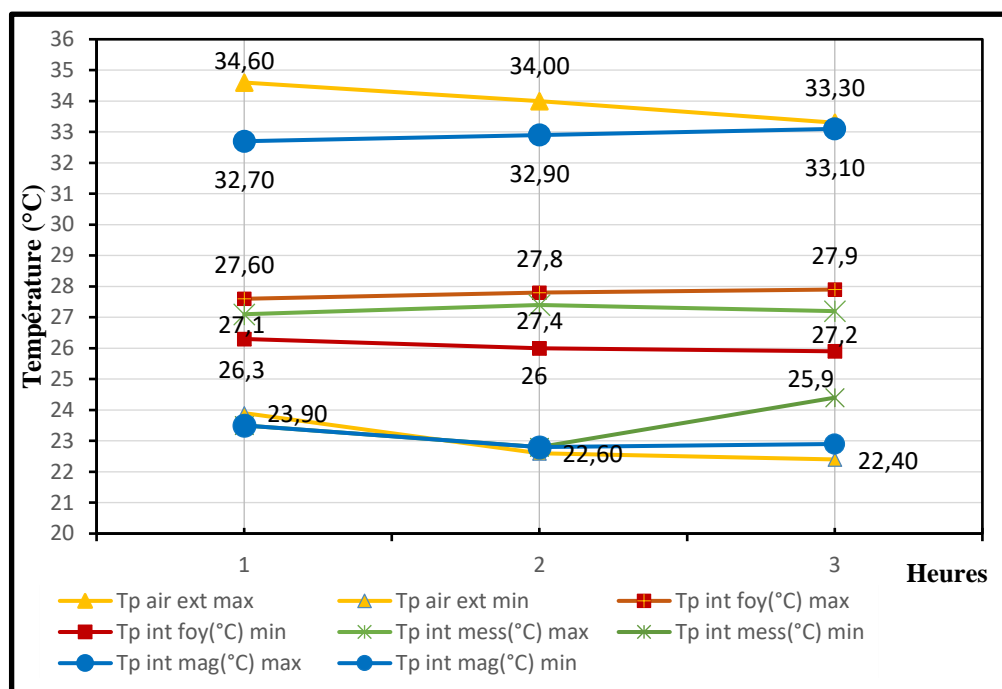


FIG.V. 5. Variation des températures moyennes maximales, minimales intérieures et extérieures des jours d'investigation période été, du foyer, mess, et magasin. (21-22-23 Mois d'Aout 2016).

V.3. Caractéristiques thermiques des matériaux isolants

TAB. 4. Matériaux isolants pour une isolation efficace et durable

	Isolant	conductivité thermique en W/m.K λ	densité en kg/m ³ ρ	capacité thermique en J/kg.K C_p	résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ	énergie grise en kWh/kg
Matériaux Biosourcés	ouate de cellulose	0,037 - 0,042	30 -70	2000	2	1-2
	fibres de bois denses	0,038 - 0,049	110-240	2000-2100	3-5	1-3
	laines biosourcées	0,032 - 0,047	20-80	1350-1800	1-3	5-10
	béton de chanvre	0,06-0,15	200-800	1350-1800	5-8	1,8
	botte de paille	0,052-0,080	80-120	1550	1-2	0,1
	liège expansé	0,037-0,044	65-180	1600-1900	5-30	2-7
Matériaux Minéraux	laines minérales nues	0,030-0,045	10-150	800-1000	1-2	7-10
	verre cellulaire panneau	0,041	115	1000	infini	2-5
	verre cellulaire granulat	0,075-0,12	170-250	1000	4	2-5
	perlite-vermiculite-argile expansée	0,05-0,12	90-700	900-1000	3-5	NC
Matériaux Synthétiques	polystyrène expansé	0,032-0,038	10-30	1200-1400	20-100	30-35
	polystyrène extrudé	0,028-0,040	15-30	1000	80-200	30-85
	polyuréthane	0,022-0,028	30-40	1000	80-200	25-35

TAB. 5. Matériaux constituant l'enveloppe et leurs caractéristiques thermiques (Source : Malek jedidi 2016).

Paroi	Matériaux	Epaisseur Ep(m)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)	Chaleur spécifique c (J/KG.°C)	Masse volumique m (kg/m ²)	Surface S (m ²)
Paroi Extérieure En Brique Creuse	Isolant en polyuréthane	0.08	0.022	39	12	100
	En duit en ciment	0.015	1.4	1080	1800	
	Brique creuse	0.15	0.5	936	1900	
	Lame d'air	0.05	0.31	1005	1.29	
	Brique creuse	0.10	0.5	900	1900	
	Enduit-en ciment	0.015	1.4	1080	1800	

TAB. 6. Conductivité thermique des différents matériaux (Source : Malek jedidi 2016).

Matériau ISOLANTS	Densité (Kg/m ³)	Conductivité Thermique (W/m.K)	Chaleur Spécifique (J/Kg.k)	Résistance Diffusion Vapeur d'eau μ mu(-)	Energie grise d'origine non renouvelable (KWh/ m ³)	Impact environnem ent/ Chargement climatique Kg eq CO ₂ / m ³)
Laine de roche en vrac	35	0.065	1030	1	315	77
Polystyrène expansé	18	0.039	1450	60	486	67
Polystyrène extrudé (Plaques expansées aux HCFC)	34	0.035	1450	150	918	136

Mousse de polyuréthane 30Kg/ m ³ (plaques moulées)	34	0.029	1450	150	905	131
Verre cellulaire 160Kg/m ³ (plaques)	120	0.042	3000	1 500 000	1174	156
Béton cellulaire multiport	115	0.040	864	3	447	150
Panneaux laine de bois 200Kg/ m ³	275	0.100	1700	5	19	-503
Panneaux laine de bois 150Kg/ m ³	175	0.070	1700	5	12	-320
Panneaux laine de bois 130Kg/ m ³	140	0.042	1700	5	10	-256
Laine de chanvre, lin, coton	40	0.060	1600	1	336	72

TAB. 7.Détermination de la valeur U à l'aide du catalogue (Source : Malek jedidi 2016).

W/ (m.K)	Epaisseur d'isolation, en cm									
	valeur U en W(m ² .K) (L'isolation thermique)									
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
0.050	0.39	0.34	0.30	0.27	0.24	0.22	0.20	0.19	0.17	0.16
0.045	0.38	0.32	0.28	0.25	0.23	0.20	0.19	0.17	0.16	0.15
0.040	0.35	0.30	0.26	0.23	0.21	0.19	0.17	0.16	0.15	0.14
0.035	0.33	0.28	0.24	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12
0.030	0.30	0.25	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11

V.4. Calcul du gradient thermique (la courbe des températures à l'intérieur d'un mur).

$$R_1 = e_1 / \lambda_1 = 0.012 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{w}$$

$$R_2 = e_2 / \lambda_2 = 0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{w}$$

$$R_3 = e_3 / \lambda_3 = 0.16 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{w}$$

$$R_4 = e_4 / \lambda_4 = 0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{w}$$

$$R_5 = e_5 / \lambda_5 = 0.043 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{w}$$

$$RT = \sum R \quad RT = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

$$RT = (e_1 / \lambda_1) + (e_2 / \lambda_2) + (e_3 / \lambda_3) + (e_4 / \lambda_4) + (e_5 / \lambda_5)$$

$$RT = (0.015 / 1.4) + (0.15 / 0.5) + (0.05 / 0.31) + (0.1 / 0.5) + (0.015 / 0.35)$$

$$RT = 0.0107 + 0.3 + 0.161 + 0.2 + 0.0428$$

$$RT = 0.71 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{w}$$

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{cond}1}$$

$$1/R.S.(Q_i - Q_e) = e_1 / \lambda_1.S. (Q_i - Q_{12}) = 1/0.71.(26.93 - 33.70) = 1.4/0.015.(26.93 - Q)$$

$$Q/S = T_i - T_1 / (1 / \lambda_{si}) = T_1 - T_2 / (e_1 / \lambda_1) = T_2 - T_3 / (e_2 / \lambda_2) = T_3 - T_4 / (e_3 / \lambda_3) = T_4 - T_5 / (e_4 / \lambda_4)$$

$$Q/S = T_i - T_e / \left((1 / \lambda_{si}) + (1 / \lambda_{se}) + (e_1 / \lambda_1) + (e_2 / \lambda_2) + (e_3 / \lambda_3) \right)$$

V.4.1. La Résistance thermique

$$R_{\text{th}} = (1/0.13) + (1/0.04) + (0.015/1.4) + (0.15/0.5) + (0.05/0.31) + (0.1/0.5) + (0.015/0.35)$$

$$R_{\text{th}} = 0.88 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^\circ / \text{w}$$

$$Q/S = T_i - T_e / R_{\text{th}} = 26.93 - 33.70 / 0.88 = -7.69 \text{ w} / \text{m}^2$$

V.4.2. Période estivale paroi en double brique creuse (15+5+10).

$$T_1 = T_i - Q/S \times (1 / \lambda_{si}) = 26.93 - (-7.69) \times 0.13 = 26.93 + 7.63 \times 0.13 = 27.93 \text{ C}^\circ$$

$$T_2 = T_1 - Q/S \cdot (e_1 / \lambda_1) = 27.92 + 7.63 \times 0.0428 = 28.24 \text{ C}^\circ$$

$$T_3 = T_2 - Q/S \cdot (e_2 / \lambda_2) = 28.24 + 7.63 \times 0.2 = 29.76 \text{ C}^\circ$$

$$T_4 = T_3 - Q/S \cdot (e_3 / \lambda_3) = 29.76 + 7.63 \times 0.16 = 30.98^\circ\text{C}$$

$$T_5 = T_4 - Q/S \cdot (e_4 / \lambda_4) = 30.98 + 7.63 \times 0.3 = 33.27^\circ\text{C}$$

$$T_6 = T_5 - Q/S \cdot (e_5 / \lambda_5) = 33.27 + 7.63 \times 0.011 = 33.35^\circ\text{C}$$

$$T_7 = T_6 - Q/S \cdot (e_6 / \lambda_6) = 33.35 + 7.63 \times 0.04 = 33.65^\circ\text{C}$$

$$Q/S = T_i - T_e / R_{th} = (17.92 - 7.20) / 0.71 = 7.78 \text{ W/m}^2$$

V.4.3. Période hivernale paroi en double brique creuse (15+5+10).

$$T_1 = (17.92 - 7.78) \times 0.043 = 17.58^\circ\text{C}$$

$$T_2 = (17.58 - 7.78) \times 0.2 = 16.02^\circ\text{C}$$

$$T_3 = (16.02 - 7.78) \times 0.16 = 14.78^\circ\text{C}$$

$$T_4 = (14.78 - 7.78) \times 0.3 = 12.44^\circ\text{C}$$

$$T_5 = (12.44 - 7.78) \times 0.012 = 12.35^\circ\text{C}$$

$$R_t = 0.17 + 3.64 + 0.3 + 0.043$$

$$R_t = 4.15$$

$$Q/S = T_i - T_e / R_{th} = 26.93 - 33.70 / 4.15$$

$$Q/S = -1.63$$

V.4.4. Période estivale paroi simple de 15 cm avec isolation extérieure en polyuréthane

$$T_1 = T_i - (-1.63) \times 0.13 = 26.93 + 1.63 \times 0.13 = 27.14^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 27.14 + 1.63 \times 0.043 = 27.21^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 27.21 + 1.63 \times 0.3 = 27.70^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 27.70 + 1.63 \times 3.64 = 33.63^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 33.63 + 1.63 \times 0.13 = 33.84^\circ\text{C}$$

$$Q/S = T_i - T_e / R_{th} = 18.70 - 7.20 / 4.18$$

V.4.5. Période hivernale paroi simple de 15 cm avec isolation extérieure en polyuréthane

$$T_1 = 18.70 - 2.77 \times 0.13 = 18.34c^\circ$$

$$T_2 = 18.30 - 2.77 \times 0.043 = 18.22c^\circ$$

$$T_3 = 18.22 - 2.77 \times 0.3 = 17.38c^\circ$$

$$T_4 = 17.38 - 2.77 \times 3.64 = 7.30c^\circ$$

Abstract :

In Algeria, the building sector is the most energy intensive sector. Its consumption accounts for more than 42% of final consumption. The energy control actions proposed for this sector include the introduction of thermal insulation of buildings, which will reduce the energy consumption related to heating and air conditioning of a building of about 40%. Thermal comfort is a recognized and justified demand in buildings because of its impact on the quality of indoor thermal environments. This comfort can only be ensured by optimizing the thermal insulation, the criterion of thermal inertia and, of course, taking into account the parameters of the bioclimatic architecture during its design.

At a time when energy challenges are becoming a priority, it becomes decisive not only to rethink the way of building but also to renovate a dilapidated housing stock. The thermal insulation technology from outside the walls is an effective precept for energy saving, used on a large scale to spread to the original goal of reducing the building's energy consumption.

This research is prompted by the reality of the field, it is found that some projects have facades covered with very expensive materials (curtain wall and Allico-band); Called kits, adversely affecting the user's interior comfort, as well as on the increase in its energy consumption. These materials can be replaced by thermal insulation methods applied to the exterior wall of the building. The judicious choice of the thermal insulation material can have a great impact on the indoor thermal comfort, according to its thermo-physical characteristics, and makes it possible to effectively fight against the thermal bridges responsible for significant energy losses.

In this work, the investigation is carried out on a model of a building dating back to the colonial period (Henry Machat establishment), recently rehabilitated and refurbished. The aim of the study is to see the impact of external thermal insulation on the interior thermal comfort conditions and energy efficiency of the building. At the same time, the use of dynamic thermal modeling software "TRNSYS 16" in order to validate site results, and then to look for the type of insulation, thickness, and location, which offers optimal solution for comfort thermal and energy efficiency.

The results of the present research have shown that thermal insulation in buildings cannot be considered the only solution. The simulation studies allowed the discovery of the best combination that must be applied to improve the thermal and energy performance of a building.

Keywords & concept:

Energy efficiency, Thermal comfort, Outdoor thermal insulation, Night ventilation, Super-insulating, Thermal bridge. Thermal performance.

في الجزائر يعتبر قطاع البناء أكثر القطاعات استخداما للطاقة حيث يقدر استهلاكها ب 42 في المائة من الاستهلاك النهائي. وتشمل إجراءات التحكم في الطاقة المخصصة لهذا القطاع في إدماج مواد العزل الحراري للمباني حتى يقلل من استهلاك الطاقة المتعلقة بالتدفئة والتكييف في المساكن التي بلغت 40 من المائة. الرفاهية الحرارية تشكل مطلب معترف به ومبرر في قطاع البناء بسبب تأثيرها على نوعية البيئة الحرارية الداخلية، لا يمكن ضمان هذه الراحة إلا من خلال تحسين نوعية العازل الحراري مع الأخذ بعين الاعتبار الخصائص المعمارية للعمارة البيومناخية أثناء تصميمها.

في الوقت الذي أصبحت فيه تحديات الطاقة أولوية بات من الأجر إعادة النظر في طريقة البناء لتجديد حظيرة السكنات القديمة. تكنولوجيا العازل الحراري المستعمل لتغليف الجدران من الخارج لها دور فعال في توفير الطاقة وتستخدم على نطاق واسع الهدف الرئيسي منها هو الحد من استهلاك الطاقة في المباني.

تم اختيار هذا البحث من الواقع المعاش ميدانيا، أين تطور بشكل كبير استعمال مواد بناء باهظة الثمن من أجل تزيين واجهات المباني و فقط (جدار من الستار الزجاجي - تغليف من الألمنيوم). هذه المواد يمكن استبدالها بمواد عازلة حراريا تطبق على الجدار الخارجي للمبنى لها فائدة وتأثير كبير على الرفاهية الحرارية الداخلية، مستمدة من خصائصها الفيزيائية ما يمنحها فعالية لصد الجسور الحرارية المتسببة في تسريبات كبيرة للطاقة.

على مستوى هذا العمل أجرينا التحقيق على نموذج لمبنى يعود إلى الحقبة الاستعمارية (مؤسسة ماشا هنري) أعيد تأهيله مع تهيئته وتجديده مؤخرا. الهدف من اختيار هذه العينة للدراسة يتمثل في معرفة تأثير العزل الحراري الخارجي على الراحة الداخلية والكفاءة الطاقة للمبنى. في نفس السياق استخدام برنامج "TRNSYS المحاكي للواقع من أجل التحقق من صحة النتائج المستقاة ميدانيا. كل ذلك من أجل التوصل لتحديد نوع العازل سمكه ومكان موقعه في الجدار الخارجي وتوفير حل للراحة وكفاءة الطاقة. حيث أظهرت نتائج البحث الحالي أن العزل الحراري في المباني لا يمكن اعتباره كحل مطلق ووحيد، فالدراسة المحاكية للواقع سمحت باكتشاف وسائل أخرى يستحسن تطبيقها لتحسين الأداء الحراري وتطوير فعالية طاقة المبنى.

الكلمات المفتاحية: كفاءة الطاقة - الراحة الحرارية - العزل الحراري الخارجي - التهوية الليلية - العازل الممتاز - الجسر الحراري- الفعالية الحرارية.