

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER** en **GENIE-CIVIL**

**Option** : Efficacités Energétique dans les bâtiments de Constructions

**Par** : **BAHRAOUI MOHAMMED** et **BENOUIS DJAMEL EDDINE**

**Sujet** :

**AMELIORATION DU CONFORT THERMIQUE  
PAR INTEGRATION DE MATERIAUX  
ISOLANTS DANS LES PAROIS DE BATIMENT**

Soutenu le 22 juin 2022, devant le jury composé de :

Mme BENACHENHOU K.A

MCB

UABT

Présidente

Mr GHENNANI.B

MCB

UABT

Examineur

Mr SELKA G

MAB

UABT

Encadreur

**Année universitaire : 2021-2022**

## Remerciements :

Toute notre parfaite gratitude et remerciements à Allah le Tout Puissant, qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre encadrant, qui sans lui, ce projet de fin d'étude n'aurait pas été possible. Il s'agit particulièrement de **M.SELKA Ghouti**, enseignant à la faculté de technologie de l'université de Tlemcen.

Nous remercions également les membres de jury **M<sup>lle</sup> la présidente BENACHENHO. K** et **Mr l'examineur GHENNANI. B** d'avoir voulu accepter de juger ce travail, nous vous en sommes reconnaissantes et en espérant être à la hauteur de votre confiance.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Merci à toutes et à tous !

## **Dédicace :**

Je dédie ce travail :

A ma chère mère et mon cher père.

Qui m'a gardé jusqu'à ce que je sois aujourd'hui. Et je ne suis pas en mesure de répondre ne serait-ce qu'une partie de leur faveur

A mes frères et amis zakaria et ilyes, à ma sœur, mes professeurs et tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Je vous présente cette recherche, et j'espère qu'elle vous plaira

***BAHRAOUI MOHAMMED***

## **Dédicace :**

Je dédie ce travail à mon père, à ma mère, à ma femme, à mes enfants  
Firdaousse et djebriil, à mes soeurs et frères et à tous ceux qui ont laissé un impact  
positif et béni dans ma vie.

***BENOUIS DJAMEL EDDINE***

## **Résumé :**

Ce projet de fin d'étude s'articule essentiellement sur l'amélioration d'une partie très importante dans le bâtiment à savoir les murs par l'intégration des matériaux d'isolations naturels ou synthétiques et les faire comparer avec un mur témoin sans isolation pendant deux périodes différentes(hiver et été) . Une simulation de transfert thermique a été utilisé pour développer un modèle assez proche du réel pour le comportement thermique et dynamique des bâtiments intégrant des matériaux d'isolations existant dans le marché local, pour des raisons de simplification d'étude Le modèle a été pris en 2D en utilisant le logiciel ANSYS connu par son pouvoir de présenter des modèles variés avec des solutions plus au moins exactes .

**Mots clés :** confort thermique, matériaux d'isolation, modélisation numérique, température.

## المخلص :

يعتمد مشروع نهاية الدراسة هذا بشكل أساسي على تحسين جزء مهم جدًا من المبنى، ألا وهو الجدران، من خلال دمج مواد العزل الطبيعية والاصطناعية ومقارنتها بجدار تحكم بدون عزل وذلك في فترتين مختلفتين (صيف و شتاء). تم استخدام محاكاة نقل الحرارة لتطوير نموذج قريب من الواقع للسلوك الحراري والديناميكي للمباني التي تدمج مواد العزل الموجودة في السوق المحلية ولأسباب تبسيط الحساب تم الاعتماد على نموذج ثنائي الأبعاد باستخدام برنامج ANSYS المعروف بالتنوع و الدقة في الحلول.

الكلمات المفتاحية الراحة الحرارية ، مواد العزل ، النمذجة الرقمية ، درجة الحرارة

## **Abstract:**

This end-of-study project is essentially based on improving a very important part of the building, namely the walls, by integrating natural and synthetic insulation materials and comparing them with a control wall without insulation and that in two different periods. A heat transfer simulation was used to develop a model close to reality for the thermal and dynamic behavior of buildings integrating insulation materials existing in the local market. For reasons of simplification of study ,the model was taken in 2D using the ANSYS software known for its power to present various models with more or less exact solutions.

Keywords: thermal comfort, insulation materials, numerical modeling, temperature

## Nomenclature

**Q:** quantité de chaleur (J).

**t:** temps (s).

**R:** résistance thermique (K/W).

$\lambda$  : conductivité thermique (W/m.K).

**h:** coefficient d'échange par convection (W/m<sup>2</sup>.K).

**e:** épaisseur du mur(m).

**S:** section transversale de mur (m).

$\Phi$ : Flux de chaleur(W).

**S:** surface (m<sup>2</sup>).

**C:** chaleur spécifique (J/Kg.K).

**T:** température(K)ou (°C).

$\varphi$ : Densité de flux de chaleur (W/m<sup>2</sup>).

**a** : diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s).

**Lambda** : Conductivité thermique d'un matériau isolant (W/(m.K)).

**R** : Résistance thermique (m<sup>2</sup>. (K/W)).

**U** : Coefficient de transfert de chaleur global (W/ (m<sup>2</sup>.K)).

**Q** : perte de chaleur des murs par unité de surface w/m<sup>2</sup>

**Clo** : Unité d'isolement vestimentaire



## Sommaire

Remerciements : .....	2
Dédicace : .....	3
Résumé : .....	5
المخلص: .....	6
Abstract: .....	7
Nomenclature .....	8
Introduction générale : .....	15
Chapitre 1 : Confort thermique Dans Le Bâtiment .....	16
Introduction .....	16
1. Définition .....	16
1.1 Les paramètres du confort thermique : .....	16
1.1.1 La température de l'air ( $T_a$ ) : .....	17
1.1.2 La vitesse de l'air : .....	18
1.1.3 La température moyenne radiante ( $T_p$ ) : .....	18
1.1.4 Le Degré hygrométrique de l'air : .....	19
1.1.5 L'activité métabolique : .....	19
1.1.6 La résistance des vêtements : .....	19
1.2 Les approches du confort thermique : .....	20
1.2.1 Approches analytiques (statiques) : .....	20
1.2.2 Approche adaptative : .....	23
1.3 Les causes d'inconfort : .....	24
1.3.1 Les courants d'air : .....	24
1.3.2 L'asymétrie d'un rayonnement thermique : .....	24
1.3.3 Le gradient thermique vertical de l'air : .....	24
1.3.4 La température du sol : .....	24
Conclusion : .....	25
Chapitre 2 : L'enveloppe thermique du bâtiment et l'isolation .....	26
Introduction .....	26
2 L'évolution historique d'une construction : .....	26
2.1.1 L'évolution historique de l'enveloppe : .....	26
2.1.2 Les matériaux de construction : .....	27

2.1.3	Propriété et performances thermiques des matériaux :.....	27
2.1.4	Le vitrage et ses propriétés thermiques :.....	29
2.1.5	L'inertie thermique :.....	30
2.1.6	Les défauts de l'enveloppe thermique.....	31
2.2	L'isolation thermique : .....	33
2.2.1	Les principes de l'isolation thermique.....	34
2.2.2	Les types d'isolant.....	36
2.2.3	L'isolation du vitrage et de menuiserie extérieure .....	61
	Conclusion :.....	64
Chapitre 3 : Isolation thermique en Algérie .....		65
	Introduction : .....	65
3.1	L'isolation thermique en Algérie: .....	65
3.1.1	L'état de lieu : .....	65
3.1.2	Les logements collectifs :.....	66
3.1.3	Les logements individuels :.....	66
3.2	La réglementation en isolation thermique:.....	66
3.3	Document techniques réglementaires:.....	66
3.4	En voie de la recherche: .....	68
3.5	Les types d'isolants disponibles en Algérie: .....	68
3.6	Différents matériaux d'isolation usuels .....	68
3.6.1	Le liège :.....	68
3.6.2	Le polystyrène expansé (PSE) .....	69
3.6.3	Polystyrène extrudé .....	70
3.6.4	Le polyuréthane .....	70
3.6.5	La laine de mouton.....	70
3.7	Le prix des matériaux isolants: .....	71
	Conclusion : .....	71
Chapitre 4 : Simulation thermique du confort.....		72
	Introduction : .....	72
4.1	Transfert unidirectionnel .....	72
4.2	TECHNIQUES DE MODÉLISATION SOUS ANSYS .....	75
4.1.2	Choix du domaine d'application D'ANSYS : .....	75
4.1.1	Définition des propriétés des matériaux en régime permanent : .....	75
4.1.2	Modélisation des solides conductifs : .....	75

4.1.3	Modélisation de la convection : .....	77
4.1.4	Chargements et conditions aux limites : .....	77
4.1.5	Méthodes de résolution et algorithmes en régime stationnaire : .....	79
4.1.6	Post-traitement et validation des résultats : .....	80
4.1.7	Méthode de travail : .....	81
4.3	Résultat et interprétations : .....	81
4.1.8	Modèle mathématique : .....	83
Résultats et discussion: .....		83
4.4	Période D'ETE : .....	83
	Polyuréthane.....	84
	<i>LAINES DE VERRE</i> : .....	87
4.5	Période D'HIVER : .....	90
Conclusion : .....		97
Conclusion générale : .....		98

## Listes des figures :

<i>Figure 1-1 :aspect physique du confort thermique</i> .....	21
<i>Figure 1-2 : les échanges thermiques avec le corps humain</i> .....	22
<i>Figure 2-1:coefficient de la transmission lumineuse d'un simple vitrage et double vitrage</i> .....	30
<i>Figure 2-2: l'inertie thermique</i> .....	30
<i>Figure 2-3: exemple des ponts thermique</i> .....	32
<i>Figure 2-4: déperditions thermiques</i> .....	33
<i>Figure 2-5: isolation intérieur</i> .....	34
<i>Figure 2-6: isolation extérieur</i> .....	35
<i>Figure 2-7:isolation répartie</i> .....	36
<i>Figure 2-8: polystyrène expansé</i> .....	37
<i>Figure 2-9 : polystyrène extrudé</i> .....	38
<i>Figure 2-10: les polyuréthanes</i> .....	39
<b>Figure 2-11: la laine de verre</b> .....	40
<i>Figure 2-12: la laine de roche</i> .....	41
<i>Figure 2-13: le verre cellulaire</i> .....	42
<i>Figure 2-14: la perlite</i> .....	43
<i>Figure 2-15: la vermiculite</i> .....	44
<i>Figure 2-16: l'argile expansée</i> .....	45
<i>Figure 2-17: le chanvre et la laine du chanvre</i> .....	46
<i>Figure 2-18: le lin</i> .....	47
<i>Figure 2-19:les fibres de coco et le corkoco</i> .....	48
<i>Figure 2-20: le liège</i> .....	48
<i>Figure 2-21: bouchons liège</i> .....	49
<i>Figure 2-22: la laine de coton</i> .....	51
<i>Figure 2-23: la ouate de la cellulose</i> .....	51
<i>Figure 2-24: la laine du mouton</i> .....	53
<i>Figure 2-25: la plume du canard</i> .....	53
<i>Figure 2-26: les aérogels</i> .....	54
<i>Figure 2-27: les panneaux sous vide</i> .....	55
<i>Figure 2-28: le polyuréthane (PUR)</i> .....	55
<i>Figure 2-29: la mousse phénolique</i> .....	56
<i>Figure 2-30: peinture isolants extérieur</i> .....	56
<i>Figure 2-31: la peinture isolante en intérieur</i> .....	57
<i>Figure 2-32: béton cellulaire</i> .....	57
<i>Figure 2-33: les blocs bi-matières</i> .....	58
<i>Figure 2-34: les blocs mono-murs en pierre ex poncé</i> .....	59
<i>Figure 2-35: le bloc monomur en bille d'argile expansée</i> .....	59
<i>Figure 2-36: les blocs mono murs en terre cuite</i> .....	60
<i>Figure 2-37: les blocs de coffrage isolant</i> .....	60
<i>Figure 2-38 : un comparatif thermique entre les types de vitrage</i> .....	61
<i>Figure 2-39 : la menuiserie en bois</i> .....	62

Figure 2-40: menuiserie en acier .....	62
Figure 2-41: menuiserie en aluminuim.....	63
Figure 2-42: menuiserie en PVC.....	63
Figure 4-1 : bilan thermique élémentaire sur un mur simple .....	72
Figure 4-2 : Schéma électrique équivalent d'un mur simple .....	73
Figure 4-3 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouches.....	74
Figure 4-4: Schéma électrique équivalent d'un mur multicouche.....	74
Figure 4-5 Préférence thermique.....	75
Figure 4-6: emploi des éléments.....	76
Figure 4-7: affectations du conductivité thermique.....	76
Figure 4-8: maillage.....	77
Figure 4-9: chargement.....	78
Figure 4-10: conditions aux limites par lien convectifs .....	78
Figure 4-11 : conditions aux limites .....	79
Figure 4-12: résultats.....	80
Figure 4-13: élément graphe.....	81
Figure 4-14 : tableau climatique Tlemcen.....	82
Figure 4-15: géométrie des murs .....	82
Figure 4-16: champ de température d'un mur non isoler en été.....	83
Figure 4-17: conteur de température et profil du polyuréthane en été .....	85
Figure 4-18 : conteur de température et profil de la laine du chanvre en été .....	86
Figure 4-19 : conteur de température et profil de la laine de chanvre en été .....	87
Figure 4-20 : mur simple et composé période été.....	88
Figure 4-21: conteur de température et profil d'hiver .....	90
Figure 4-22: conteur de température et profil de la laine de verre en hiver.....	92
Figure 4-23: conteur de température et profil de la laine de verre en hiver.....	93
Figure 4-24: conteur de température et profil de la laine de chanvre en hiver .....	94
Figure 4-25 mur simple et composé période hiver.....	95

## Liste des tableaux :

<i>Tableau 1 : valeurs de référence de température .....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 2 : la température ambiante minimale par rapport au travail effectué. ....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 3 : résultats en été.....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 4 résultats en hiver.....</i>	<i>96</i>

# Introduction générale :

Le développement de techniques d'isolation permet de répondre aux exigences liées au confort thermique.

Il s'agit, désormais d'une mission où l'ingénieur ne se limite plus à concevoir et à réaliser des structures neuves, mais aussi à présenter un modèle respectable et efficace en matière de consommation d'énergie.

Dans ce travail les deux premiers chapitres sont consacrés à approfondir les connaissances en matière de confort thermique dans le bâtiment à savoir les paramètres de confort, les approches, l'enveloppe thermique et les types d'isolation de la construction.

– Le troisième chapitre donne une description détaillée sur la réglementation thermique en Algérie, ainsi l'état de l'art du confort thermique en général.

– Le quatrième chapitre est dédié à l'analyse des résultats obtenus à l'issue de la phase de modélisation et leur comparaison avec ceux obtenus avec un mur témoin

# Chapitre 1 : Confort thermique Dans Le Bâtiment

## Introduction

L'homme a été et est encore aujourd'hui dans un processus continu de recherche d'amélioration de ses conditions de vie en général, et le confort thermique n'est qu'une condition préalable dans un environnement qui aide la créature à affronter les défis extérieurs, ce qui nécessite de la concentration et de donner la plus haute priorité à ce domaine sensible directement lié à la vie humaine.

## 1. Définition

Donner une définition au confort thermique est primordiale afin de maîtriser la manière d'évaluer ce dernier pour l'augmenter si nécessaire.

Suite à la recherche bibliographique, plusieurs définitions sont données pour le confort thermique selon la considération de l'être humain soit comme un objet physique, une machine thermique autorégulée, ou une personne active affectée par ses sensations (Moujalled.B, 2007), Pour Claude-Alain Roulet, le confort thermique est un état de bien être général et stable (Roulet, 2004), alors qu'il est défini : «*comme la satisfaction exprimée à l'égard de l'ambiance thermique du milieu environnant.* » par Jean-Yves Charbonneau. (Charbonneau, J. Y, 2004), Quant à B. Givoni, il le considère (le confort thermique) comme un état d'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement. (Givoni.B, 1978)

La différence entre ces définitions est selon l'aspect pris en considération. Il s'agit des aspects physiologique, sensoriel et psychologique.

La notion de confort thermique dépend du contexte et des caractéristiques individuelles. Il s'agit d'un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques (Moujalled.B, 2007) ,Alors qu'elle est une notion évolutive dans le temps et varie selon les géographies et les sociétés. (Mazouz.S, 2012).

Une autre approche, définie par Slater consiste à considérer le confort comme « *un état plaisant d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et son environnement* ». Cette définition permet d'introduire le critère psychologique qui est, selon l'auteur, des critères indispensables pour se différencier de l'état de neutralité. (Gallissot, 2012).

### 1.1 Les paramètres du confort thermique :

« *L'homme est un être homéotherme et dispose d'une stratégie métabolique efficace lui permettant de déclencher tout un processus de régulation qui facilite son*



*adaptation au milieu.* » (Deval.J-C, 1984), Il s'agit d'un noyau central homéotherme et une écorce poikilotherme, (Teller.J), Les critères les plus importants pour déterminer un bilan thermique en participant au confort thermique sont des paramètres liés soit à l'environnement thermique ou à l'individu. La température de l'air, sa vitesse relative, la température moyenne radiante et le degré hygrométrique de l'air sont des paramètres liés à l'environnement thermique. Bien que l'activité métabolique et la résistance des vêtements sont des paramètres liés à l'individu. (liébard.A & herde.A, 2005) (Deval.J-C, 1984).

### 1.1.1 La température de l'air (Ta) :

La température de l'air, ou température ambiante (Ta), est un paramètre essentiel du confort thermique. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires. Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe. (Annabi M. Mokhtari A. Hafrad T.A., 2007)

Ainsi ,par exemple la réglementation générale française pour la protection du travail (RGPT) (Baker, 2002), impose des valeurs de référence pour les températures de l'air, données par le tableau 1 et 2 ci-dessous (Belakhowsky.S, 1978) :

**Tableau 1 : valeurs de référence de température**

Type de local	Température de l'air
Locaux ou des gens habillés normalement sont au repos ou exercent une activité physique très légère. Par exemple : bureaux, salles de cours, salles d'attente, salles de réunion ou de conférence.	21°C
Locaux ou des gens peu ou pas habillés sont au repos ou exercent une activité physique très légère. Par exemple salles d'examens ou soins médicaux, vestiaires.	23 à 25°C
Locaux ou des gens habillés normalement exercent une activité physique très légère. Par exemple ateliers, laboratoires, cuisines.	17°C
Locaux ou des gens peu habillés exercent une grande activité physique Par exemple salles de gymnastique, salle de sport.	17°C
Locaux qui ne servent que de passage pour les gens habillés normalement. Par exemple corridors, cages d'escalier, vestiaires, sanitaire.	17°C
Locaux uniquement gardés à l'abri du gel. Par exemple garages, archives.	5°C

**Tableau 2 : la température ambiante minimale par rapport au travail effectué.**

<b>Nature du travail exécuté</b>	<b>Température minimale obligatoire</b>
Travail léger en position assise, notamment tout travail cérébral, travail de précision ou qui consiste à lire ou à écrire.	20 °C
Travail physique léger en position assise, notamment travail de couture avec machines électriques et travail sur petites machines outils	19°C
Travail léger en position debout, notamment sur machine	17°C
Travail moyen en position debout, notamment montage et ébarbage.	16°C
Travail pénible en position debout, notamment forage et travail manuel avec outils lourds	12°C

Ces températures sont calculées pour une valeur moyenne de surface des parois inférieure de 2°C à la température de l'air, elles sont acceptées dans certains cas comme température de confort dans le cadre d'une politique d'utilisation rationnelle de l'énergie.

### **1.1.2 La vitesse de l'air :**

La vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires, elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s (Bertolo.L & bourgas.B, 1992). Toutefois, à l'intérieur des bâtiments, ces vitesses demeurent limitées, ne dépassant pas généralement cette vitesse, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Elle peut, en revanche, être tenue pour responsable de l'apparition d'inconforts locaux, liés à la présence de courants d'air froids ou chauds localisés.

### **1.1.3 La température moyenne radiante (Tp) :**

C'est la température des parois environnantes, son influence sur les échanges thermiques se fait par rayonnement. (liébard.A & herde.A, 2005). Il s'agit d'un indicateur important pour le confort intérieur qui peut donner une idée sur la nature d'isolation et l'inertie thermique. (Mazouz.S, 2012).

Pour contrôler la température radiante d'une paroi, il suffit d'augmenter l'inertie thermique des parois en assurant un coefficient de conductivité thermique (k) égale ou inférieure de 1,2. Avec une différence entre la température d'air ambiant et celle des parois qui ne dépasse pas 5°C. (Mazouz.S, 2012).

#### **1.1.4 Le Degré hygrométrique de l'air :**

Il s'agit d'un rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température  $T_a$  et la quantité maximale qu'il peut contenir à cette même température. (Belmaaziz.M, 2011- 2012)). De 30% à 70% d'humidité relative dans l'air est dans la plage de confort et ne présente que peu d'influence sur la sensation de confort thermique. (liébard.A & herde.A, 2005) L'air ne peut absorber qu'une quantité limitée de vapeur d'eau. Lors d'une ambiance chaude et dans une situation de saturation de l'air, le corps sera en état d'inconfort dû à une difficulté de transpiration de la peau. (liébard.A & herde.A, 2005)

#### **1.1.5 L'activité métabolique :**

C'est la transformation de la nourriture consommée en éléments corporels (protéine et tissu) et en énergie avec de l'eau, du gaz carbonique et des déchets divers. Cette énergie produite va permettre à l'individu de faire l'effort physique ainsi que la production de la chaleur à l'intérieur du corps humain pour le maintenir autour de 36,7 °C. (Roulet, C. A. 2004). L'intensité du travail musculaire provoque une production importante de la chaleur. (Le Guay, M. sans date).

Le métabolisme est représenté par l'effort physique dépensé dans une activité et rapporté à l'unité de surface de corps de l'individu ( $w/m^2$ ). (Benlatreche.T, 2006)

Un équilibre entre le métabolisme intérieur, le travail physique et les pertes vers l'environnement extérieur provoque une stabilité de la température intérieure du corps humain. (Belmaaziz.M, 2011- 2012)

#### **1.1.6 La résistance des vêtements :**

L'habillement (H) est une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la peau et l'environnement. ( (Belmaaziz.M, 2011- 2012). Sous la couche des vêtements se crée une zone tampon avec son propre microclimat par une température, humidité et vitesse de l'air spécifiques. Ces derniers restent dépendants de la ventilation naturelle sous cette couche (effet de pompage). ( (Boutaba, 2007)

L'isolation des vêtements, leur pouvoir réfléchissant des rayonnements incidents et leur capacité d'absorption de vapeur d'eau produite par la peau favorisent ou gênent la thermorégulation. (Boutaba, 2007).

Pour faciliter l'estimation des échanges de chaleur qui se produisent au travers des différentes couches d'air que contiennent les habits. Chaque type des vêtements est mesuré par une valeur relative exprimée en clo<sup>1</sup>. (Benlatreche.T, 2006).

## **1.2 Les approches du confort thermique :**

Deux approches principales pour le confort thermique, selon les voies de recherche dans ce domaine :

### **1.2.1 Approches analytiques (statiques) :**

Cette première approche est basée, selon Cantin et al, sur le calcul du bilan thermique du corps humain, par des modèles physiques et physiologiques essentiellement. L'objectif est de prédéfinir la sensation thermique des individus pour déterminer les conditions du confort thermique (castin.R et al, 2005)

#### **1.2.1.1 Aspect physiologique du confort thermique :**

L'être humain est homéotherme. Il dispose d'un système de régulation interne pour préserver sa température entre 36.8 C° et 37.2 C° pour un individu au repos et entre 37.0 C° et 37.5 C° pour un individu en action (Mazari,M, 2012)

Pour déterminer les grandeurs physiologiques de l'individu (température cutanée, température interne et mouillure cutanée), des modèles physiologiques du système de thermorégulation ont été développés. Ces derniers utilisent comme variables d'entrée les caractéristiques de l'ambiance thermique (température de l'air, température radiante des parois, vitesse de l'air et l'humidité relative) et celles des individus (l'âge, le sexe, le poids, la taille, les vêtements, l'activité...etc.). Les résultats sont des indices pour prévoir le confort thermique des donnés proposés. (Cantin, R. et al 2005).

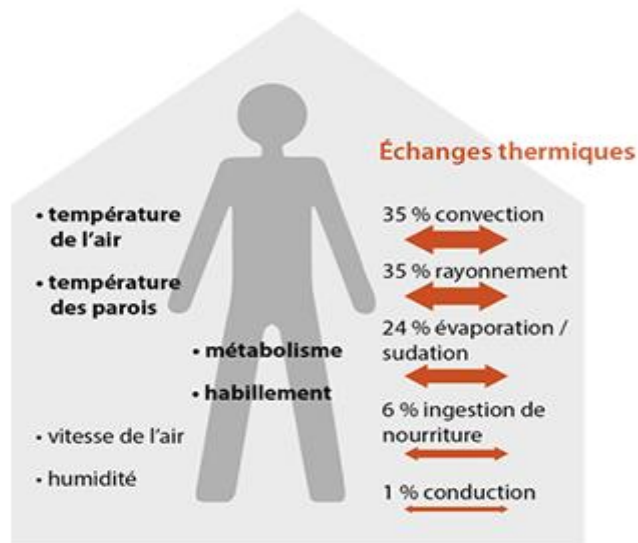
#### **1.2.1.2 Aspect physique du confort thermique :**

Il s'agit de gérer les fluctuations de la température par les échanges thermiques avec l'ambiance extérieure. Par conduction, convection, rayonnement et évaporation le corps humain peut maintenir sa température interne vers 37°C en assurant l'équilibre thermique du corps avec son environnement (Moujalled.B, 2007)

L'augmentation de la chaleur produite à l'intérieur du corps par rapport à celle perdue dans l'environnement va provoquer l'élévation de la température interne du corps et son réchauffement. Dans le cas inverse, cela va créer le refroidissement du corps avec un abaissement de sa température interne. (Moujalled.B, 2007)

---

<sup>1</sup> Clo : Unité d'isolement vestimentaire, 1 Clo = 0.155 m<sup>2</sup> °C.W-1)



**Figure 1-1 :aspect physique du confort thermique<sup>2</sup>**

L'augmentation de la chaleur interne du corps est aussi par le métabolisme.

#### **1.2.1.3 Le métabolisme :**

Selon Pierre Fernandez on peut distinguer trois niveaux de métabolisme (Chabi Mohammed, juin 2009)

*Métabolisme de base* : nécessaire à la vie, il concerne la position couchée a jeun (la digestion consomme de l'énergie). Pour une personne « normalisée », ce métabolisme est de l'ordre de 75W

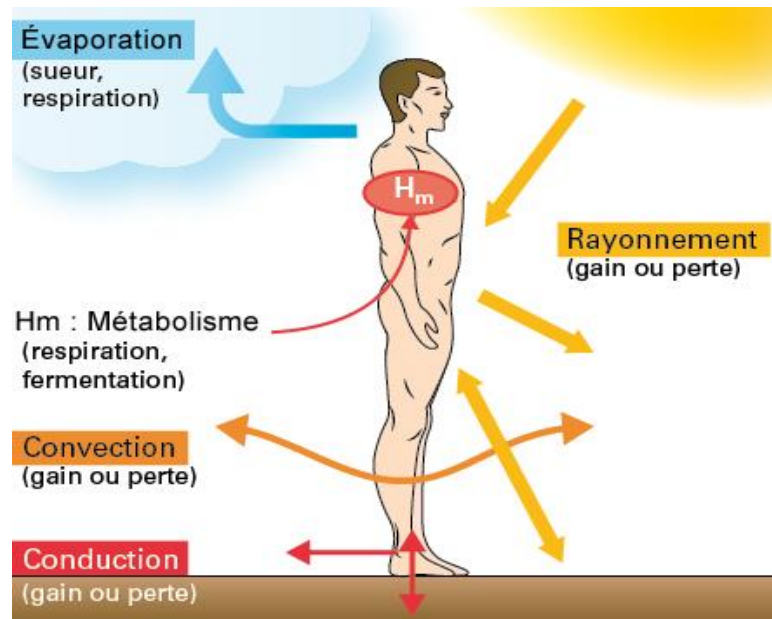
- Métabolisme de repos : c'est la chaleur minimale produite dans des conditions pratiques de repos du corps, par exemple en position assise, ce métabolisme est de l'ordre de 105W
- Métabolisme de travail : qui dépend de l'activité physique, comme exemple le travail de bureau, ce métabolisme est de l'ordre de 105 à 140 W

#### **1.2.1.4 Les échanges thermiques du corps humain :**

Le corps humain en tant que système ouvert, est en interaction permanente avec son environnement via des échanges cutanés et respiratoires. La production de chaleur métabolique produite dans le corps peut être mise à profit d'une élévation de la température interne, ou bien être dissipée à l'extérieur.

Ces échanges thermiques suivent cinq modes différents qui sont; la conduction, la convection, le rayonnement, l'évaporation et la respiration, comme nous l'illustrons sur la Figure suivant. (Moujalled.B, 2007)

<sup>2</sup> (<https://www.renovermonecole.be/fr/objectifs-bien-etre/confort-thermique-enfants>)



**Figure 1-2 : les échanges thermiques avec le corps humain<sup>3</sup>**

### *Les échanges de chaleur par conduction*

La conduction concerne l'échange de chaleur par contact direct entre certaines parties du corps et une surface de température différente (le sol, les parois ou le mobilier).

Par exemple un matériau effusif plus froid que la peau, par contact « pompe » de la chaleur au corps humain en donnant une sensation de froid. (Fernandez ,P, et Lavigne,P, 2010)

### *Les échanges de chaleur par convection*

La convection est le transfert de chaleur entre la peau et l'air qui l'entoure. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement. Si la température de la peau est supérieure à la température de l'air, la peau va se refroidir. Dans le cas contraire, elle va se réchauffer.

### *Les échanges de chaleur par rayonnement*

L'échange par rayonnement est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques. Il s'agit principalement d'échanges, entre la surface du corps et les surfaces de la pièce Ainsi, des inconforts froids peuvent être perçus par rayonnement à proximité des parois froides (exemple: mur mal isolé, fenêtre simple vitrage).

### *Les échanges de chaleur par évaporation*

Nous distinguons deux types d'évaporation cutanée, à savoir perspiration et transpiration.

<sup>3</sup> (<https://www.qcm-svt.fr/>)

- *La perspiration* est un phénomène d'évaporation diffusive continue liée à la présence permanente d'eau sur la peau. La quantité d'eau évaporée par perspiration est fonction des conditions hygrométriques de l'air ambiant, mais avoisine 11 g/h par m<sup>2</sup> de peau (Cordier, N, 2007)
- *La transpiration* (sudation) est un processus de régulation qui se déclenche dès lors que le corps n'est plus en équilibre thermique. (Cordier, N, 2007)

#### **1.2.1.5 Aspect psychologique du confort thermique :**

La sensation du confort thermique par les individus est différente par rapport à la façon dont l'occupant perçoit et évalue son milieu et la situation dans laquelle se trouve.

« Le bien être ne se réduit pas aux données mesurables mais qualifie des sensations individuelles ressenties lorsque les conditions d'environnement semblent confortable ». (Hegger, 2011) Plusieurs modèles ont été développés pour ce genre de calcul. Le modèle de Fanger est le plus utilisé par le PMV (vote moyen prévisible). (castin.R et al, 2005).

Ces expériences se déroulent dans des chambres climatiques en contrôlant les conditions de confort environnementales (températures, vitesse et humidité d'air, éclairage ou niveau sonore) et celles spécifique aux sujets expérimentés (activité, vêture, températures cutanées ou internes, réponses perceptives et affectives). Malgré la maîtrise des aspects physiques et physiologiques du confort thermique, les chambres climatiques présentent certains manques, sans introduire les composantes psychologiques des mécanismes de régulation qui peut améliorer le confort thermique. (Moujalled.B, 2007).

#### **1.2.2 Approche adaptative :**

Cette approche introduit l'utilisation des bâtiments in situ pour les investigations. Cela va donner aux occupants plus de liberté pour intervenir lors de l'expérience par l'ouverture des fenêtres s'il fait chaud, l'utilisation des ventilateurs... etc.

Cette approche attire l'attention des chercheurs par son efficacité à correspondre le confort perçu par les occupants. (castin.R et al, 2005)

Dans le contexte ou se déroulent les études, l'occupant réagit dans son ambiance en s'adaptant par deux manières :

##### **1.2.2.1 Une adaptation personnelle :**

C'est une adaptation liée aux changements en relation directe avec les occupants par modification des paramètres du confort, les vêtements et l'activité. Alors que d'autres comportement comme le changement du lieu. (Mazari,M, 2012).

### **1.2.2.2 Une adaptation environnementale et technologique :**

cette adaptation est en relation directe avec le bâtiment et l'environnement des occupants par le contrôle manuel des installations en ouvrant ou en fermant une fenêtre...etc. (Mazari,M, 2012).

## **1.3 Les causes d'inconfort :**

Pour bien maîtriser la situation du confort thermique, il est important de connaître les causes d'inconfort pour les éviter. L'insatisfaction thermique peut être le résultat d'une zone d'inconfort dans l'environnement des occupants.

### **1.3.1 Les courants d'air :**

La sensation d'un courant d'air, surtout en hiver, peut provoquer la diminution de la température intérieure par convection. Les occupants vont augmenter la chaleur intérieure. Donc ce facteur d'inconfort agit directement sur la consommation énergétique. (Hegger, 2011)

Cette perception du courant d'air dépend de la température de l'air, la vitesse de l'air et les parties du corps concernés. Par exemple, la nuque et le visage sont plus concernés par la sensation d'inconfort thermique. (Mazari,M, 2012)

### **1.3.2 L'asymétrie d'un rayonnement thermique :**

La grande différence entre la température des parois provoque à l'organisme un inconfort lié au transfert de chaleur. La paroi chaude réchauffe la partie du corps qui est du son côté. Alors que la paroi froide refroidit la partie du corps en exposition. L'occupant va sentir mal à cause de cette différence.

Selon B. Moujalled, la différence de température entre les différentes parois asymétriques ne doit pas dépasser 10°C s'il s'agit d'une paroi froide comme une baie vitrée et 5°C s'il s'agit d'un plafond chaud. (Moujalled.B, 2007)

Bien que C. A. Roulet considère que 4°C de différence entre la tête et les pieds résulte 10% d'insatisfaits (la limite maximale du confort) et un plafond chaud est moins supporté qu'un plafond froid alors qu'une paroi chaude est préférée à une paroi froide. (Roulet, 2004)

### **1.3.3 Le gradient thermique vertical de l'air :**

Généralement, la température augmente en montant. La norme exige une différence de 3°C entre le niveau de 0.1m et 1.1m (la hauteur d'une position assise) pour éviter l'augmentation de la chaleur au niveau de la tête par rapport aux pieds. (Mazari,M, 2012)

### **1.3.4 La température du sol :**

La température trop basse ou trop élevée représente un autre facteur d'inconfort. Hoffman est un des chercheurs qui ont précisé cette notion, alors qu'Olsen BW propose 23°C comme température du sol pour une personne debout et 25°C pour une personne assise. (Mazari,M, 2012)

La garantie d'une ambiance intérieure confortable nécessite la prise en considération des facteurs d'inconfort en les éliminant. Ces facteurs d'inconfort sont causés par des défauts de conception, d'isolation ou d'enveloppe. La température ressentie est très influencée par les courants d'air inconfortable, l'asymétrie des rayonnements



thermiques, le gradient thermique des températures et la température du sol. L'homogénéité entre la température de l'air sec et celle des parois de l'espace assure le confort thermique intérieur.

### **Conclusion :**

L'influence des degrés de confort thermique sur l'occupant de l'espace exigent aux spécialistes de prendre des décisions à un stade précoce de la construction (phase maturation de projet). Il faut donc prendre en considération l'intervention de plusieurs paramètres à savoir la température de l'air ambiant, l'humidité relative, la vitesse de l'air, la température radiante moyenne, l'habillement et le métabolisme.

# Chapitre 2 : L'enveloppe thermique du bâtiment et l'isolation

## Introduction

L'enveloppe d'un bâtiment est une protection efficace contre les conditions défavorables de l'extérieur. Par sa forme, son épaisseur, sa nature et même sa couleur, elle participe aussi à l'optimisation énergétique.

L'inflation des prix de l'énergie a inévitablement causé de grands dommages à de nombreuses personnes et à leurs intérêts d'où l'obligation de prendre des mesures, notamment d'isolation thermique, qui auront un impact positif sur l'obtention du même niveau de confort thermique en utilisant moins d'énergie et donc en réduisant les effets néfastes sur l'environnement.

## 2 L'évolution historique d'une construction :

*"C'est une sorte de peau séparant l'extérieur de l'intérieur d'un bâtiment».*  
(Bernstein, 1997)

L'enveloppe exprime l'apparence d'un ouvrage et communique avec son environnement. Elle filtre et organise les sons, la lumière et les couleurs, l'ensoleillement et l'ombre, les vues et le chaud et le froid (Bernstein, 1997)

Pour l'architecte, l'enveloppe est une surface de contact entre le bâtiment et la ville. (Guignard,S, 2010). Alors que pour l'occupant, les parois de l'enveloppe qui l'entourent sont des éléments du confort thermique et visuel et constituent un facteur d'esthétique de son bâtiment. (Guignard,S, 2010).

Le rôle de l'enveloppe d'une construction est d'assurer l'intimité des habitants en offrant un climat intérieur sain et confortable avec une optimisation de la consommation énergétique.

Une conception adéquate d'enveloppe du bâtiment permet d'assurer le confort tout au long de l'année en minimisant le recours aux grandes installations de chauffage et de climatisation.

### 2.1.1 L'évolution historique de l'enveloppe :

#### 2.1.1.1 Durant l'âge moderne :

A partir du XV<sup>e</sup> siècle, l'architecture vernaculaire commence à marquer son fin ou l'enveloppe devient plus en plus maigre par l'agrandissement des baies vitrées. Cela a provoqué l'accélération des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. (Alexandroff, G. et J. M., 1982).

L'arrivée de l'âge industriel était marquée par l'extraction d'une nouvelle source d'énergie considérée comme inépuisable qui est le charbon. L'enveloppe devient plus légère par les verrières métalliques en XIX<sup>e</sup> siècle pour répondre au problème d'éclairage, Le soleil n'est plus considéré comme une source énergétique mais exprimé sous l'angle lumineux.

Cette légère construction a posé le problème de la qualité thermique par des surchauffes en été et des dépenses exorbitante pour le chauffage en hiver. (Alexandroff, G. et J. M., 1982)

Dans son livre "Architecture et climat", Alexandroff a présenté Wright et le Corbusier comme des maîtres du mouvement moderne au XX<sup>e</sup> siècle. Le Corbusier a utilisé le béton armé comme un matériau à forte masse thermique mais son enveloppe était loin d'être climatique par les fortes déperditions liées à la grande surface des ouvertures. (Alexandroff, G. et J. M., 1982)

Pour Wright, l'utilisation de la grande masse thermique en pierre ou en brique pleine dans ses projets n'a pas résolu le problème de la consommation excessive d'énergie suite aux grandes surfaces des baies en simple vitrage qui provoquent des pertes thermiques énormes. (Alexandroff, G. et J. M., 1982)

#### **2.1.1.2 Le choc pétrolier de 1973 :**

Suite au choc pétrolier, l'Europe était très influencé par l'augmentation excessive des prix des énergies fossiles par un secteur résidentiel et tertiaire très consommateur. Cela a nécessité l'application des nouvelles réglementations pour l'utilisation des matériaux d'isolation thermique et l'apparition des nouvelles notions d'habitat passif, bioclimatique, écologique...etc. L'objectif de tous cela est l'amélioration thermique de l'enveloppe de la construction.

#### **2.1.2 Les matériaux de construction :**

La connaissance du comportement thermique des matériaux de construction est fondamentale pour l'architecte concepteur. Le choix de la structure, l'épaisseur des murs et la localisation de la masse thermique présentent des éléments nécessaires pour une conception bioclimatique. (Guignard,S, 2010).

Le choix des matériaux de construction est selon deux types des critères. Le premier est un critère objectif qui dépend des propriétés physiques ou chimiques, les dimensions ou le coût. Bien que l'autre critère est de type individuel et subjectif par le contact et l'aspect de sa surface. (Hegger, 2011)

Un matériau de construction doit répondre aux exigences de sécurité incendie, à l'acoustique, à la protection contre l'humidité, la chaleur et le froid et la résistance statique. Cela peut avoir l'influence sur la santé, le besoin en énergie et l'environnement.

#### **2.1.3 Propriété et performances thermiques des matériaux :**

Les matériaux reçoivent différemment les rayons solaires selon leur degré de transparence ou d'opacité, leur couleur et leur texture de surface. Ils ont aussi des caractéristiques thermiques particulières tenant à leur structure et à leur masse qui leur permettent de gérer différemment les apports calorifiques (couragey, S. et Oliva,J . P.,

2007). Ces caractéristiques seront prises en compte lors d'une conception bioclimatique des parois de la construction.

Leur rôle sera de capter les calories, les stocker et les transmettre ou les conserver.

Les caractéristiques thermiques sont de deux types :

Les caractéristiques statiques : c'est le comportement d'un matériau en présence d'un flux thermique indépendamment de temps de réaction. Ce sont la **conductivité** et la **capacité thermique**. (courgey, S. et Oliva, J . P., 2007).

Les caractéristiques dynamiques : ce sont la **diffusivité** et l'**effusivité**. Elles font intervenir le facteur temps (courgey, S. et Oliva, J . P., 2007).

#### **2.1.3.1 La conductivité thermique ( $\lambda$ )**

La conductivité thermique d'un matériau notée par  $\lambda$  indique la quantité de chaleur qui se propage par conduction thermique, sans déplacement de matière. Cette quantité de chaleur est transmise dans un corps solide à travers (**1 m<sup>2</sup>**) d'un matériau, sous l'effet d'une différence de température entre les deux faces est de **1 K** (1 K ou 1 °C).

On parle d'un matériau isolant lorsque sa conductivité thermique est inférieure à **0,06 W.m-1.K-1**.

Par contre, si sa conductivité thermique est supérieure à **10 W.m-1.K-1**, on parle d'un matériau qui est un bon conducteur.

#### **2.1.3.2 La résistance thermique [R] :**

La résistance thermique fait intervenir l'épaisseur de la paroi (ou du matériau) pour caractériser le passage du flux de chaleur. Le R de chaque matériau composant une paroi s'additionne afin de déterminer le R total.

Elle exprime le rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique en mètre carré degré Celsius par watt [m<sup>2</sup>. °C/W].

#### **2.1.3.3 Le coefficient de transmission calorifique [U] :**

En référence à la réglementation thermique, le coefficient de transmission surfacique

U, caractérise les déperditions thermiques d'un matériau ou d'une paroi.

C'est l'inverse de la résistance thermique (R). Plus U est faible plus la paroi est isolante.

Il est exprimé en watt par mètre carré degré Celsius [W/m<sup>2</sup>. °C] ou par Kelvin [W/m<sup>2</sup>. K].

#### **2.1.3.4 Déphasage :**

Il définit la capacité du matériau à réguler la température intérieure, c'est à dire à absorber la chaleur au moment où il fait le plus chaud (12h-14h) pour la restituer au moment le plus froid (la nuit). Il dépend de la capacité thermique de l'isolant. Il faut un déphasage de 10 à 12 h pour obtenir un bon confort d'été.

#### **2.1.3.5 La capacité thermique ( $\rho c$ ) :**

C'est la capacité d'un matériau d'emmagasiner la chaleur par rapport à son volume.

Elle dépend de trois paramètres : (courgey, S. et Oliva, J . P., 2007)

- La conductivité thermique du matériau ( $\lambda$ ).
- La chaleur spécifique du matériau.
- La densité ou masse volumique du matériau.

#### 2.1.3.6 La diffusivité thermique (a) :

La diffusivité thermique est la capacité d'un matériau de transmettre une variation de la température. Elle augmente avec la conductivité thermique et décroît avec l'augmentation de sa chaleur volumique. (liébard.A & herde.A, 2005). C'est aussi la vitesse de diffusion de la chaleur à l'intérieur d'un matériau.

#### 2.1.3.7 L'effusivité thermique (b) :

Il s'agit de la capacité d'un matériau d'absorber ou de restituer une puissance thermique. (liébard.A & herde.A, 2005). Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe l'énergie sans se réchauffer (courgey, S. et Oliva, J. P., 2007).

Pour réduire l'effet du flux thermique, il faut augmenter l'effusivité des parois et diminuer la diffusivité (liébard.A & herde.A, 2005).

### 2.1.4 Le vitrage et ses propriétés thermiques :

L'intégration d'une partie transparente dans l'enveloppe lors de la conception est primordiale pour assurer un confort visuel et thermique. Les vitrages laissent passer les rayons solaires pour garantir une luminance naturelle, un chauffage solaire passif et un contact avec l'extérieur

Lorsque le soleil frappe un vitrage, une partie des rayons solaires va traverser la partie transparente avec des rayons infrarouges de courte longueur. Cela va être absorbé par les parois où il va être transformé en chaleur. Ce rayonnement composé des longues ondes va pénétrer dans la pièce et sera emprisonné dans l'espace intérieur et va le chauffer. Donc c'est l'effet de serre très utile dans le cas du chauffage solaire passif (Hegger, 2011).

Les propriétés spécifiques de vitrage sont :

**Facteur solaire (g) :** le degré de transmission énergétique globale " facteur solaire" est le pourcentage d'énergie solaire incidente transmise à travers une vitre à l'intérieur d'un local (Mazari, M, 2012).

**Facteur lumineux ( $\tau$ ):** c'est le pourcentage de lumière solaire qui traverse une vitre. Cela permet au verre d'être plus transparent si ce facteur augmente.

**Facteur thermique (U) :** Ce coefficient de transmission thermique exprime la quantité de chaleur transmise par un mètre carré de vitre par un degré de différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. (Mazari, M, 2012).

Plus ce facteur diminue, plus augmente l'isolation de vitrage. Pour améliorer le coefficient de transmission, il faut un ou plusieurs des solutions suivantes :

- En doublant ou en triplant le vitrage.
- En augmentant les lames d'air qui séparent les vitres.
- En revêtant une des faces du verre intérieur d'une couche à faible émissivité.

- En remplaçant l'air entre les vitrages par un gaz plus lourd comme l'argon ou le krypton.

Ces facteurs vont changer selon la nature de vitrage :

- Le vitrage clair.
- Le vitrage absorbant.
- Le vitrage réfléchissant.



Figure 2-1: coefficient de la transmission lumineuse d'un simple vitrage et double vitrage<sup>4</sup>

### 2.1.5 L'inertie thermique :

L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de la chaleur et elle est caractérisée par la capacité thermique.

L'objectif de l'inertie thermique d'une paroi opaque est de restituer la chaleur ou la fraîcheur stockée en décalage avec les variations thermiques en dehors et dans le bâtiment. La vitesse de stockage ou déstockage de la chaleur est déterminée par deux autres grandeurs que sont la diffusivité et l'effusivité

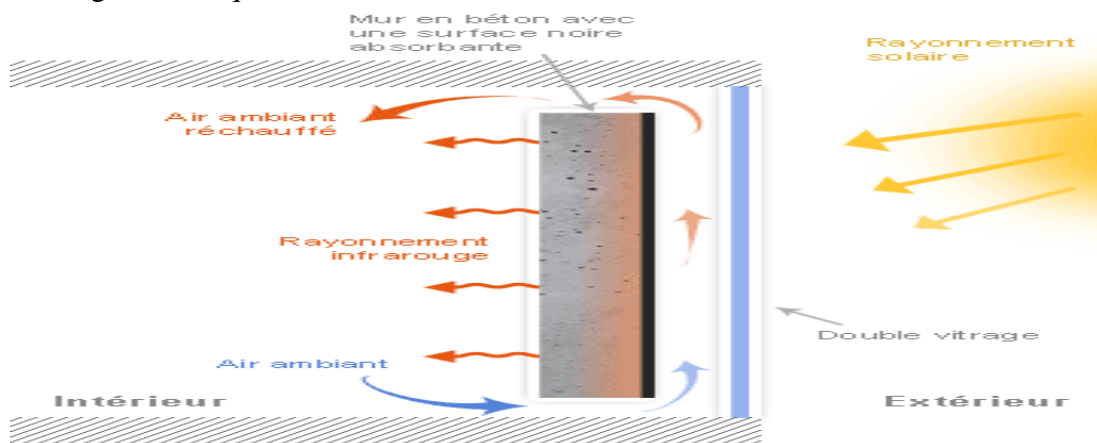


Figure 2-2: l'inertie thermique<sup>5</sup>

#### 2.1.5.1 Les types de l'inertie thermique :

L'inertie thermique dépend de la constitution de l'enveloppe et du poids des planchers et des parois.

<sup>4</sup> ([https://www.memoireonline.com/06/11/4570/m\\_Le-verre-dans-le-batiment45.html](https://www.memoireonline.com/06/11/4570/m_Le-verre-dans-le-batiment45.html))

<sup>5</sup> (<https://www.ecosources.org/inertie-thermique>)

***L'inertie de transmission*** : Elle décrit dans quelle mesure une paroi de l'enveloppe diminue l'amplitude d'une oscillation de la température extérieure et la retarde dans sa transmission vers l'intérieur. L'inertie de transmission augmente avec l'épaisseur et diminue avec la diffusivité de la paroi. (Bernstein, 1997).

***L'inertie d'absorption*** : Elle décrit comment la température de la face d'une paroi intérieure en contact avec l'air du local, réagit à une oscillation du flux de chaleur intérieur. L'inertie d'absorption augmente avec l'épaisseur et avec la diffusivité de la paroi. (Bernstein, 1997).

La différence entre l'inertie de transmission et celle d'absorption est importante car une grande partie des flux de chaleur affecte l'intérieur d'un bâtiment non pas par l'enveloppe opaque mais directement par les ouvertures ou les bouches de ventilation. (Bernstein, 1997).

#### ***2.1.5.2 Les effets de l'inertie :***

Une forte inertie thermique permet d'éviter les surchauffes journalières et de profiter de fraîcheur nocturne en été, donc de réduire le besoin de refroidir artificiellement. IL s'agit de profiter de la chaleur naturelle en hiver surtout dans le cas d'un usage continu. Cela permet de diminuer la facture énergétique dans tous les saisons à condition de bien orienter les vitrages et d'occuper le bâtiment fréquemment en améliorant le confort thermique à l'intérieur et en atténuant les fluctuations de température à l'extérieur.

### **2.1.6 Les défauts de l'enveloppe thermique**

La composition de l'enveloppe thermique, des différents matériaux et assemblages séparant l'intérieur de l'extérieur, risque d'avoir des défauts de réalisation qui peuvent provoquer des pertes calorifiques. Ces derniers sont des déperditions thermiques liés aux défauts d'étanchéité à l'air ou des ponts thermiques. (courgey, S. et Oliva, J . P., 2007).

#### ***2.1.6.1 Ponts thermiques***

Un pont thermique ou nœud constructif est un maillon faible dans la structure externe de l'habitation (au niveau de la façade, du toit ou du sol mur-fenêtre, poutres etc.). Est un défaut d'isolation où il existe une discontinuité de l'enveloppe isolante continue entraînant d'importantes pertes thermiques dans l'enveloppe d'un bâtiment. Les ponts thermiques provoquent non seulement des déperditions thermiques, mais aussi refroidissent plus rapidement à l'air chaud de la maison. (<https://docplayer.fr/18726433-L-isolation-thermique-du-batiment-mai-2016.html> (consulter juin 2021))

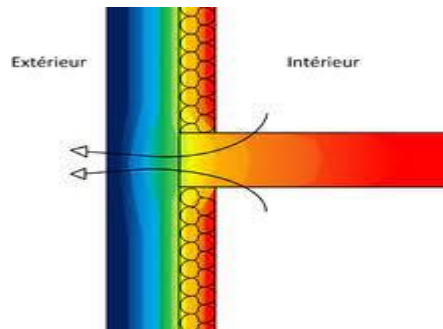


Figure 2-3: exemple des ponts thermique<sup>6</sup>

### 2.1.6.2 Les défauts d'étanchéité à l'air :

Les déperditions thermiques sont dues aux infiltrations d'air à travers l'enveloppe causés par des défauts de conception et / ou de réalisation. Ils sont considérés comme la première source de refroidissement des bâtiments (liébard.A & herde.A, 2005).

Cette perméabilité de l'enveloppe à l'air est suite à une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Cela est lié aux effets du tirage thermique, du vent et du système de ventilation (ADEME, 2003).

Les effets relatifs à la déperdition thermique sont à prendre en considération lors de la conception et de la réalisation d'une construction. Il s'agit de l'augmentation d'inconfort thermique et acoustique suite aux courants d'air avec la surconsommation énergétique pour chauffer ou climatiser l'intérieur. La pollution de l'air intérieur est due aux isolants, les moisissures ou à la poussière surtout avec la ventilation simple flux. La détérioration du bâtiment est suite à la condensation. (courgey, S. et Oliva,J . P., 2007).

Comme il est impossible de supprimer les déperditions thermiques totalement, il faut au moins les limiter par faire attention lors de la pose des isolants, la pose des menuiseries et la réalisation de l'installation électrique. (courgey, S. et Oliva,J . P., 2007)

---

<sup>6</sup> ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_thermique))



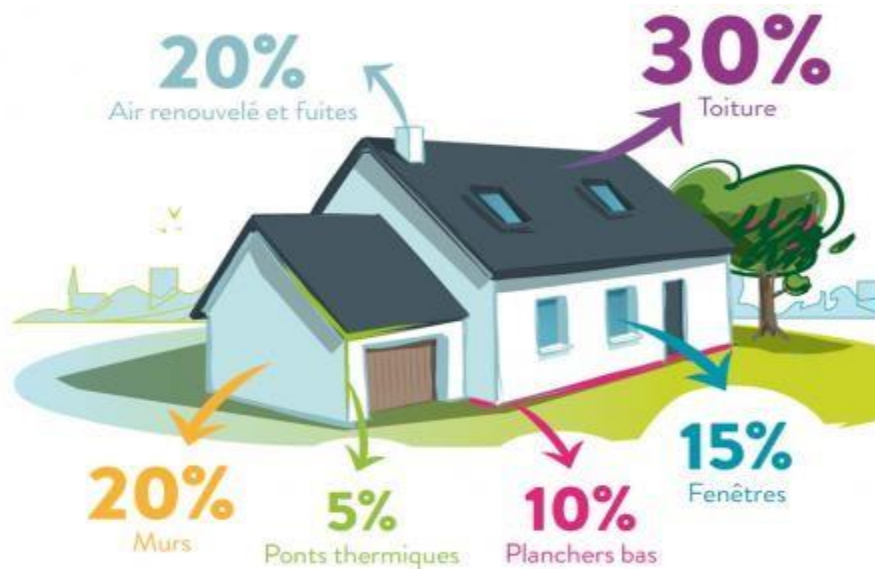


Figure 2-4: déperditions thermiques<sup>7</sup>

## 2.2 L'isolation thermique :

70% de l'énergie consommée dans les bâtiments est destinée au chauffage et à la climatisation. L'isolation est pour augmenter le confort en hiver comme en été. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

Lorsque l'enveloppe d'un bâtiment ne répond pas aux exigences de confort thermique en minimisant le recours aux énergies fossiles, c'est le moment d'appliquer une isolation thermique pour éviter les pertes calorifiques en hiver et protéger l'intérieur des rayons solaires intensifs en été.

L'isolation thermique d'un bâtiment est la conception et l'exécution de sa structure et de tous les éléments de l'enveloppe extérieure de manière qu'ils aient la résistance thermique avec une inertie thermique ainsi qu'il soit adéquats aux pertes et aux apports de la chaleur (Dumitriu – Valger, E., 1986).

Sur le plan architectural, l'utilisation de l'isolation thermique permet de minimiser le retour à la compacité et le besoin d'une grande inertie thermique.

L'isolation représente un outil essentiel afin d'améliorer le niveau de confort thermique. Il s'agit de penser le projet entièrement, y compris la pose de l'isolation, pour qu'il soit efficace énergétiquement. (Fragos, M. et Trouilleux, 2012).

L'isolation concerne les murs extérieurs, le sol, le comble, les murs intérieurs en relation directe avec les espaces tampons non chauffés (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

Selon le type d'isolant, les matériaux d'isolation se présentent sous forme de rouleau ou de panneaux, de plaques, de flacons ou granulats, des matériaux de construction ou de panneaux de doublage constitués d'une plaque de plâtre cartonnée sur laquelle est collé un isolant (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

<sup>7</sup> (<https://www.euradif.fr/conseils/quelles-solutions-contre-les-deperditions-de-chaaleur-de-votre-logement/>).

L'isolation thermique a trois fonctions principales dans un logement. La première consiste à augmenter le confort thermique en hiver comme en été. La deuxième est de minimiser la consommation énergétique pour le chauffage et / ou la climatisation. Alors que la troisième est de rendre l'habitat plus écologique en diminuant les pollutions liées au rejet des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. (Gacem, M, 2010-2011).

### 2.2.1 Les principes de l'isolation thermique

Pour isoler une enveloppe, trois manières d'isolation sont disponibles. Il s'agit de l'isolation intérieure, l'isolation extérieure et celle répartie.

#### 2.2.1.1 Isolation par l'intérieur :

Consiste à isoler un bâtiment de l'intérieur en apposant un isolant derrière une cloison maçonnée ou une ossature. Procédé le plus utilisé par les constructeurs à cause de sa facilité de mise en œuvre. On peut faire cette technique par plusieurs isolants comme la laine minérale qui est une solution performante et économique. Cette technique est utilisée pour des travaux de rénovation, renforcement de l'isolement, l'inconvénient est qu'il annule l'inertie thermique de la paroi isolée et n'évite pas les ponts thermiques sur la maçonnerie, en plus il réduit l'espace de vie. (les différents types d'isolation)



Figure 2-5: isolation intérieur<sup>8</sup>

#### 2.2.1.2 Isolation thermique par l'extérieur :

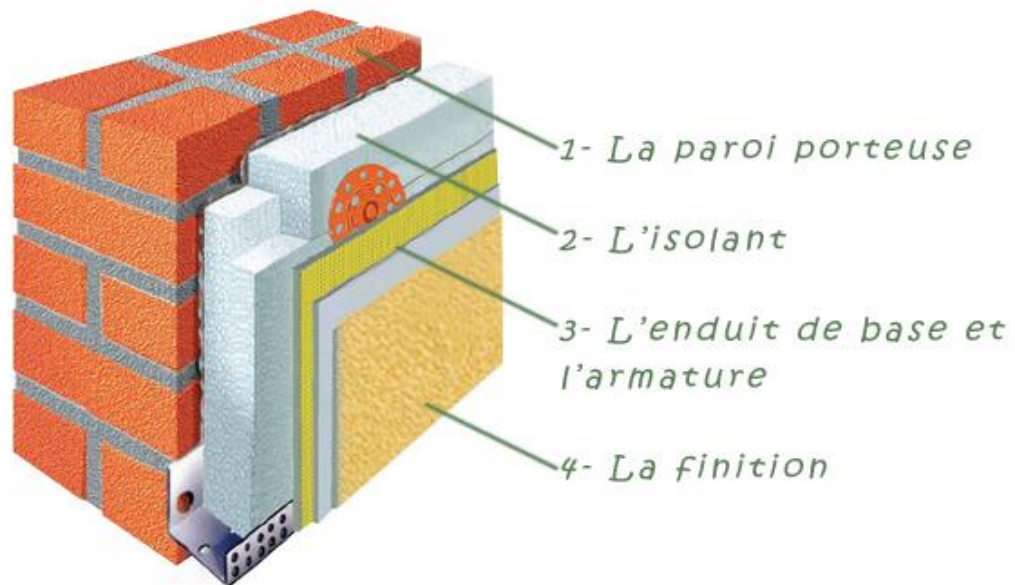
Consiste à installer l'isolant sur la surface extérieure des toits, les combles et les murs. C'est souvent la solution la plus coûteuse mais aussi la plus performante. Elle constitue la meilleure isolation pour le confort d'été et

---

<sup>8</sup> (<https://homenergie.maison-travaux.fr/homenergie/materiaux-et-equipements-home-energie/isoler-murs-linterieur-fp-247653.html>)

d'hiver car elle permet de conserver l'inertie thermique forte des murs intérieurs et supprime les ponts thermiques.

Un bon isolant est évidemment un mauvais conducteur de la chaleur, les matériaux les moins chers sont la laine de verre et la laine de roche, par contre, les matériaux sous forme de panneaux isolants sous vide (PIV) et le verre cellulaire sont plus onéreux. En générale les matériaux les plus légers sont de meilleurs isolants plus le matériau est dense, plus les atomes sont proches les uns des autres, ce qui signifie que le transfert d'énergie d'un atome à un autre est plus facile. (Isolation\_thermique\_guide\_isover)



**Figure 2-6: isolation extérieur<sup>9</sup>**

### **2.2.1.3 Isolation intégré :**

L'isolation des murs intégrés c'est dans leur épaisseur est la meilleure solution pour réaliser des travaux d'isolation au moyen d'un seul produit. C'est pour cette raison que la technique des murs dans leur épaisseur est la seule idée consacrée aux nouvelles constructions. Et comme cette solution est facile et plus rapide à mettre en place, elle fait gagner du temps à la pose et permet d'économiser sur la main d'œuvre. Comme elle ne nécessite pas d'un doublage de mur, elle permet d'économiser en matériaux isolants et reste une solution de construction durable puisque l'isolant n'est pas exposé aux agressions externes, Parmi ses autres avantages, elle permet de limiter les risques de ponts thermiques. (les différents types d'isolation)

<sup>9</sup> (<https://homenergie.maison-travaux.fr/homenergie/materiaux-et-equipements-home-energie/isoler-murs-linterieur-fp-247653.html>)

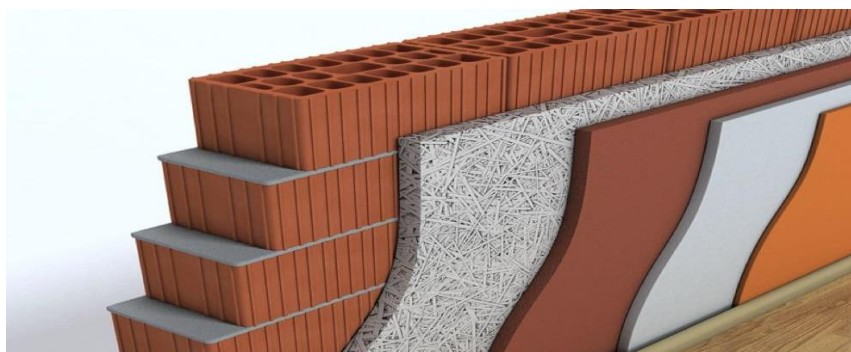


Figure 2-7:isolation répartie<sup>10</sup>

## 2.2.2 Les types d'isolant

### 2.2.2.1 Les isolants synthétiques :

Ce sont les matériaux de synthèse produits par la chimie industrielle. (Taleb,O, 2020-2021).

#### *Le polystyrène expansé (PSE):*

Le polystyrène expansé est issu d'un dérivé de raffinage du pétrole : le naphta. Ce déchet permet d'obtenir les monomères de styrène qui après polymérisation aboutissent au polystyrène expansible sous forme de bille de petits diamètres (0,2 à 3 mm).

La polymérisation est une réaction chimique par lesquelles des petites molécules réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées. La polymérisation s'obtient au moyen d'un mélange de gaz pentane, d'eau et de styrène. Le polystyrène est ensuite expansé et moulé grâce à de la vapeur d'eau qui a la propriété de dilater les billes jusqu'à 50 fois leur volume initial.

Le polystyrène expansé est donc un matériau composé principalement d'air (à 98%). Il est très léger avec une masse volumique comprise entre 10 et 30 Kg/m<sup>3</sup>. Le PSE est recyclable. Après son broyage, il peut produire de nouveau le polystyrène expansé.

---

<sup>10</sup> (<https://www.acpresse.fr/lisolation-repartie/>)



Figure 2-8: polystyrène expansé<sup>11</sup>

**Remarque :**

En cas d'incendie, le PSE libère du gaz carbonique, de la vapeur d'eau et du monoxyde de carbone.

Lorsqu'il est utilisé comme isolant, il est généralement associé à un autre matériau incombustible comme le plâtre.

Le PSE peut être utilisé pour l'isolation des murs par l'intérieur ou l'extérieur, les sols et de la toiture.

Ses capacités thermiques sont bonnes, les performances acoustiques sont médiocres.

Recyclage : Le polystyrène est dissout avec de l'acétone et devient comme une pâte à modeler. (Taleb,O, 2020-2021)

***Le polystyrène extrudé (XPS) :***

Il est aussi issu du naphta. Après la polymérisation du styrène, une extrusion sous pression est effectuée.

Elle consiste à faire fondre ensemble le polystyrène, les additifs et l'agent d'expansion et à extruder le liquide chaud dans une matrice. Il se produit alors une mousse couverte d'une peau étanche à l'air, plus homogène et plus dense que par le procédé d'expansion.

En gros, le polystyrène expansé et le polystyrène extrudé sont tous deux fabriqués à partir de polystyrène, mais le PSE est composé de petites billes de plastique qui sont fusionnées ensemble et le XPS commence comme un matériau fondu qui est pressé à partir d'un moule en feuilles. Le XPS est le plus souvent utilisé comme isolant en carton mousse.

La principale différence entre le PSE et le XPS réside dans leur densité. Le polystyrène extrudé est beaucoup plus dense que le polystyrène expansé.

---

<sup>11</sup> (<https://www.samse.fr/isolation-combles-amenageables/isolation-polystyrene-expanse>)

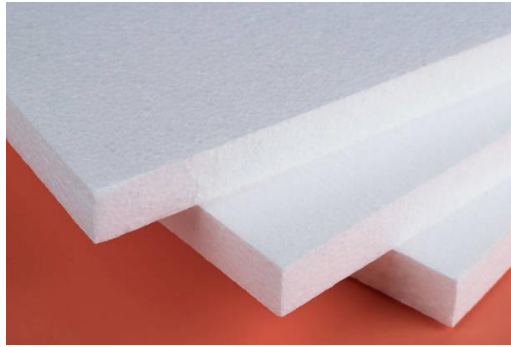


Figure 2-9 : polystyrène extrudé<sup>12</sup>

Les cellules sont très fines donc résistant à l'eau et à la compression.  
Les performances thermiques du XPS sont légèrement meilleures par rapport à celle du PSE (0,029 et 0,037 W/m K).  
La masse volumique est légèrement supérieure (30 à 40 Kg/m<sup>3</sup>).  
Propriétés médiocre à l'isolement acoustique.  
Étanche à l'eau et à la vapeur d'eau.  
Structure à alvéole fermée et il conserve son pouvoir isolant en présence d'eau étant donné que l'air ne peut le pénétrer (faible absorption) (contrairement au polystyrène expansé). (Taleb,O, 2020-2021)

### *Les polyuréthanes :*

Les polyuréthanes sont obtenus par le mélange de trois composants : un polyol, un isocyanate et un agent d'expansion (CO<sub>2</sub>) en présence de catalyseurs (Il influe uniquement sur la cinétique chimique, en accélérant une réaction).  
Il s'agit d'un matériau léger avec une masse volumique de 40 Kg/m<sup>3</sup>.  
Un retardateur de flammes est nécessaire pour les produits en polyuréthanes.  
De plus, des matériaux pare-feu sont nécessaires car en cas d'incendie, les polyuréthanes deviennent dangereux car ils dégagent des iso-cyanates et du monoxyde de carbone et de l'acide cyanhydrique.  
Les isolants en polyuréthane se présentent sous forme de panneaux moussés entre deux feuilles de divers matériaux (aluminium, voile de verre, ...) qui assurent l'étanchéité à l'air et à la pérennité des performances mécaniques.  
L'expansion de la mousse s'effectue jusqu'à l'obtention de l'épaisseur désirée.  
Les plaques obtenues après passage dans un tunnel chauffant sont stabilisées et usinées.

Ce matériau se porte bien à la compression. IL est insensible à l'eau et imperméable à la vapeur d'eau.

---

<sup>12</sup> (<https://isolation-thermique.org/choisir-isolant-thermique/polystyrene-extrude/>)

Son coefficient de conductivité thermique est  $\lambda = 0,022$  à  $0,025$  W/m K pour les panneaux et  $0,028$  à  $0,030$  W/m .K pour les mousses.

Les performances acoustiques du polyuréthane sont médiocres.

Les domaines d'emploi : les toitures et les toitures terrasse, les sols et les doublages de murs. Ces isolants sont recyclables par broyage ou traitement chimique. (Taleb,O, 2020-2021) .



**Figure 2-10: les polyuréthanes<sup>13</sup>**

### **2.2.2.2 Les isolants minéraux**

Les isolants minéraux sont d'origine naturelle. Ce sont les minéraux les plus couramment employés dans la construction. (Taleb,O, 2020-2021)

#### **La laine de verre :**

La laine de verre est élaborée à partir de silice (sable), de verre de récupération par fusion (au four ou au cubilot) par fibrage et polymérisation.

Le mélange initial est chauffé et fondu à  $1050^{\circ}\text{C}$ , puis étiré pour obtenir une structure de fibres très fines par procédé rotatif.

Après refroidissement, les fibres sont encollées par pulvérisation de liants (résines) pour former des matelas qui est ensuite stabilisé par chauffage en étuve. Les liants sont alors polymérisés.

Les fibres de laines de verre ont un diamètre compris entre  $2$  et  $8\ \mu\text{m}$  et se coupent transversalement.

**Remarque :** Les fibres  $>4\ \mu\text{m}$  en suspension dans l'air peuvent entraîner des irritations de la peau, des yeux ou des voies respiratoires.

Pour limiter les poussières, l'usage de la scie pour la découpe est conseillé.

Le comportement au feu est excellent (incombustible) ou peu combustible et non inflammable en présence d'un pare – vapeur.

La laine de verre résiste à une chaleur pouvant atteindre  $800^{\circ}\text{C}$  , cependant les liants qu'elle contient se dégradent à partir de  $200^{\circ}\text{C}$ .

---

<sup>13</sup> (<https://blog.synthesia.com/fr/tout-on-doit-savoir-polyurethane>)

La conductivité thermique de laine de verre est comprise entre 0,030 et 0,040 W/m.K. et de 0,032 à 0,042 W/m.K pour le rouleau.

Les performances acoustiques sont également élevées.

La perméabilité à la vapeur d'eau est grande, ce qui nécessite un pare – vapeur



**Figure 2-11: la laine de verre<sup>14</sup>**

La laine de verre est utilisée dans l'isolation des toitures inclinées, des cloisons, dalle Flottante. (Taleb,O, 2020-2021) .

#### ***La laine de roche :***

La laine de roche est fabriquée à partir du Basalte (roche volcanique), de fondant (abaisser la température de fusion et de Coke (Charbon : riche en carbone).

Elle est fondue à 1500°C dans un cubilot, puis traitée industriellement de façon analogue à la laine de verre

Sa masse volumique est de 40 Kg/m<sup>3</sup>.

Elle est incombustible, résistante à la chaleur et conserve ses performances mécaniques même à haute température.

Ses performances thermiques sont bonnes avec une conductivité thermique entre 0,032 et 0,040 W/m.K.

La laine de roche peut aussi être utilisée comme isolant acoustique de qualité contre les bruits aériens et les bruits d'impact.

---

<sup>14</sup> ([https://www.m-habitat.fr/isolation/materiaux-isolants/prix-de-la-laine-de-verre-4984\\_A](https://www.m-habitat.fr/isolation/materiaux-isolants/prix-de-la-laine-de-verre-4984_A))



Sa perméabilité à la vapeur d'eau est élevée.

La laine de verre est utilisée dans l'isolation des toitures inclinées, des cloisons, dalle flottante



Figure 2-12: la laine de roche<sup>15</sup>

**Remarque :**

- La laine de verre résiste aux insectes et aux termites.
- La laine de roche est quant à elle résistante aux rongeurs.
- Les deux matériaux s'avèrent peu inflammables.

La laine de roche est légèrement plus onéreuse car son processus de fabrication est plus complexe. Ses performances énergétiques sont aussi plus importantes.

La laine de verre s'impose par son rapport qualité/prix. (Taleb,O, 2020-2021) .

**Le verre cellulaire :**

Il est fabriqué à partir de sable ou de verre recyclé. Le verre est étiré sous forme de tubes qui sont refroidis, puis finement broyés.

Par ajout de poudre de carbone, on obtient un mélange que l'on dispose dans des bacs en inox qui passent ensuite au four de moussage où le mélange va gonfler sous l'effet de la chaleur (850 °C).

Aucun agent chimique n'est ajouté. Les pains ainsi formés passent ensuite dans un four de recuit afin d'être ramené progressivement à la température ambiante sans être dégonfler. Les pains sont rectifiés, puis découpés selon les dimensions adaptés à la construction.

Le verre cellulaire est un matériau assez léger avec une masse volumique de 120 à 175 Kg/m<sup>3</sup>. C'est un matériau inerte qui n'émet ni gaz, ni substances, no fibres. Il est en plus recyclable. C'est un matériau totalement incombustible et qui résiste à des

---

<sup>15</sup> (<https://www.isolation-expert.be/materiaux-isolants/laine-de-roche>)

températures pouvant atteindre 430°C et qui ramollit à partir de 730°C. Il ne dégage aucune fumée en présence du feu.

Il est résistant à la plupart des acides et à la vapeur, aux rongeurs et aux insectes.

Sa conductivité thermique varie entre 0,038 et 0,055 W/m.K.

Ses performances comme isolant acoustique sont bonnes.

Il est imputrescible (durable) et totalement étanche à l'eau et à la vapeur.

Tout type d'isolation est possible avec ce matériau : façades, toitures, sols, murs, ...

Du fait de son caractère inerte et imputrescible, son emploi le plus courant demeure

Dans l'isolation des toitures terrassement, sous radiers, sous dalles, ...



**Figure 2-13: le verre cellulaire** <sup>16</sup>

Son principal inconvénient réside dans son prix (matériau cher). (Taleb,O, 2020-2021) .

### ***La perlite :***

La perlite est une roche volcanique siliceuse (de couleur noire). Le minerai est concassé et chauffé à 1200°C dans des fours spéciaux fixes ou rotatifs et prend une couleur blanche. Elle est expansée grâce à la vapeur d'eau. Les grains produits renferment une multitude de cellules fermées d'air avec un fort pouvoir isolant. Elle améliore la capacité thermique des bâtiments.

Elle peut aussi être utilisée comme isolant acoustique.

---

<sup>16</sup> (<https://www.isolation-expert.be/materiaux-isolants/verre-cellulaire>)



**Figure 2-14: la perlite<sup>17</sup>**

Des fibres ou du bitume peuvent être incorporés aux granules pour constituer des panneaux (fibres de verre par exemple).

La perlite est hydrophile. Si elle n'est pas traitée, elle peut absorber jusqu'à 300% de sa masse.

Des hydrofuges (qui protègent de l'humidité et des infiltrations d'eau) sont souvent ajoutés au matériau de base et peut être enrobée de bitume ou de paraffine.

**Remarque :**

Elle est souvent utilisée dans le jardinage à cause de son efficacité dans le drainage. La masse volumique de la perlite varie de 90 à 165 kg/m<sup>3</sup> selon qu'elle se présente sous forme de granules ou de panneaux.

Son coefficient de conductivité est compris entre 0,05 et 0,06 W/m.K.

Elle est utilisée principalement en vrac pour le déversement dans les combles non aménagés, l'isolation sous chape ou sous dalle, en isolation thermo acoustique ou intégrée dans les mortiers allégés ou des enduits au plâtre.

Sous forme de panneaux, elle est généralement utilisée pour les toitures – terrasses. (Taleb,O, 2020-2021) .

**La vermiculite :**

La vermiculite est issue d'une ressource naturelle qui est le silicate de magnésie, ressemblant au mica) et présente la propriété de pouvoir s'expanser sous l'effet de la chaleur (1000°C) et de la vapeur d'eau. Elle peut alors augmenter son volume jusqu'à 15 fois. Dans la nature, elle est souvent associée dans la nature à l'amiante (donc exige des analyses). Sa masse volumique varie entre 65 et 160 kg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>17</sup> (<http://champignonscomestibles.com/perlite-maintenir-humidite>)



**Figure 2-15: la vermiculite<sup>18</sup>**

Elle n'est pas dangereuse quand elle est pure mais la poussière dégagée lors de sa mise en place nécessite une protection des yeux et des voies respiratoires.

Pure, elle est incombustible et offre une excellente résistance au feu. Sa température de fusion est de 1300°C.

Elle est hydrophile, c'est pourquoi elle est souvent enrobée de silicone ou de bitume.

Sa conductivité thermique est comprise entre 0,06 et 0,08 W/m.K (moyenne). Par contre l'isolation acoustique est bonne autant pour les bruits aériens que pour les bruits d'impact.

Le coût de la vermiculite est assez élevé à cause des traitements hydrofuges qu'elle doit subir.

Elle est utilisée pour l'isolation des combles, ou des vides de construction, pour la confection des bétons légers et la réalisation des sous couches pour les chapes. Elle est utilisée pour la protection des conduits de cheminées et dans les portes coupe feu. (Taleb,O, 2020-2021) .

### ***L'argile expansée (Laterlite) :***

L'argile expansée est fabriquée industriellement à partir d'argile naturelle brute, qui est séchée, réduite en farine, puis mélangée à l'eau. Le mélange est chauffé

---

<sup>18</sup> (<https://easyamiante.ch/la-vermiculite-positive-a-lamiante/>)

à 1200°C (gourmand en énergie grise) dans un four cylindrique tournant pouvant atteindre 100 m de longueur.

L'extraction du gaz des billes (de 1 à 10 mm de diamètre) produit leur expansion jusqu'à 5 fois leur taille originale.

C'est un isolant assez lourd de masse volumique comprise entre 350 et 700 kg/m<sup>3</sup>.

Elle est totalement incombustible et résistante au feu. La résistance à la compression est optimale grâce à la coque externe des billes qui les rend indéformables.

Ses performances thermiques sont plutôt faibles, avec un coefficient de conductivité thermique entre 0,10 et 0,16 W/m.K. Par ailleurs, les performances acoustiques sont correctes.

- Elle est perméable à l'eau et dans ce cas ses performances thermiques sont annulées.
- A cause de son prix, il est utilisée en vrac par épandage ou dans la réalisation des bétons allégés.
- Il est aisément gâchée avec du ciment pour obtenir un béton caverneux léger, isolant et drainant, qui permet d'atteindre des résistances mécaniques plus élevées que l'argile à sec.
- Dosage pour 1 m<sup>3</sup> de béton caverneux d'Argile Expansée Laterlite« standard »
- 1 m<sup>3</sup> (20 sacs) d'Argile Expansée Laterlite granulaire 3-8 ou 8-20
- 150 kg de ciment type 32,5
- 80 ÷ 90 litres d'eau (moins si les granulats sont déjà mouillés). (Taleb,O, 2020-2021).



Figure 2-16: l'argile expansée<sup>19</sup>

### 2.2.2.3 Les isolants d'origine végétale :

**Le chanvre :** Le chanvre présente de nombreuses qualités. D'abord, cette plante est capable de produire plus de 10 tonnes de matières sèches par hectare en 3 à 4 mois.

La graine de chènevis est récoltée à la moissonneuse – batteuse. Les pailles sont fauchées, conditionnées et stockées. On procède ensuite au défibrage qui consiste à séparer les fibres (écorce de la plante) de la chènevotte (cœur de cellulose). La tige qui donne la fibre et chènevotte sert à la fabrication de cordes, de filasse pour la

<sup>19</sup> ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile\\_expans%C3%A9e](https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile_expans%C3%A9e))

plomberie, de papier et entre dans la fabrication de la laine de chanvre. Les laines de chanvre légères ont une masse volumique comprise entre 30 et 40 Kg/m<sup>3</sup>.

Le chanvre est inflammable et sensible à l'humidité. Il est perméable à la vapeur d'eau et constitue un bon régulateur hygrométrique (il absorbe l'humidité et la rejette lorsque le temps est sec).

La laine de chanvre a un  $\lambda = 0,039$  à  $0,042$  W/m.K. Elle est disponible en panneaux, matelas ou en vrac et concernent les mêmes domaines d'emploi que la laine minérale.



**Figure 2-17: le chanvre et la laine du chanvre<sup>20</sup>**

La chènevotte est le cœur de la tige de chanvre sous forme de particule de cellulose. Elle peut être utilisée comme isolant en vrac ou être mélangée avec de la chaux naturelle pour former un conglomérat de construction léger et isolant. Non traitée et associée à la de la chaux, elle est utilisée pour la fabrication de mortiers, de bétons ou de blocs de construction allégés isolants. Toutefois, la chènevotte est très hydrophile (400 à 500%). Cela peut poser problème pour la réalisation des mortiers, c'est pourquoi on utilise uniquement de la chaux aérienne dont l'une des caractéristiques est de durcir grâce au carbone de l'air au lieu de l'eau. Selon les dosages, les mortiers de chaux ont un coefficient de conductivité thermique compris entre 0,09 et 0,13 W/m.K. Ils ne présentent pas assez de résistance mécanique pour être porteurs et ils sont donc utilisés pour le remplissage dans la construction ou par la réalisation de chapes isolantes sur planchers légers ou lourds et pour l'isolation des toitures inclinées pour augmenter l'inertie thermique.

Les bétons de chanvre possèdent de bonnes performances thermiques et acoustiques, ont une faible masse volumique, sont perméables à la vapeur d'eau et conservent une bonne élasticité. (Taleb,O, 2020-2021).

---

<sup>20</sup> (<https://materiaux-namur.com/magazine/447/la-laine-de-chanvre-un-isolant-polyvalent>)

**Le lin :** Le lin est une petite plante annuelle



**Figure 2-18: le lin**<sup>21</sup>

Pour la fabrication de produits d'isolation, on utilise les fibres courtes du bas de la tige. Les fibres sont superposées ensuite thermolisées avec du polyester pour constituer un matelas. Les laines de lin ont une masse volumique comprise entre 20 et 60 Kg/m<sup>3</sup>. La conductivité thermique de la laine de lin varie entre 0,037 et 0,040 W/m.K. Les propriétés acoustiques sont aussi bonnes. Le lin est disponible en vrac, en panneaux, en rouleaux, en feutres (pour l'acoustique)

Il convient pour tous types d'isolation (murs, toitures, planchers, combles, ...). (Taleb,O, 2020-2021).

**Le kenaf:** c'est une plante cousine de coton. Sa conductivité thermique est de 0.043 w/m.k. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

**Les fibres de coco et le corkoco :** Les fibres de coco sont des fibres multicellulaires dures issues de la bourre entourant la coque des noix de cocotier composé de majeure partie de cellulose.

---

<sup>21</sup> (<https://www.plantes-et-sante.fr/articles/on-en-parle/2816-le-lin-une-plante-qui-a-la-fibre>)



**Figure 2-19: les fibres de coco et le corkoco<sup>22</sup>**

Le processus de fabrication des isolants à base de fibres de coco est totalement naturel. Le coir est extrait, séché puis cardé et tissé pour former un matelas. Après pressage, on atteint la rigidité nécessaire pour la confection des panneaux et de plaques.

La masse volumique des fibres des fibres de coco est comprise entre 20 et 125 kg/m<sup>3</sup> selon qu'elle se présente sous forme de laine ou de panneaux. Les performances thermiques sont bonnes comprises entre 0,037 et 0,045 W/mK. Les panneaux de coco offrent des performances acoustiques excellentes. Ils permettent de réduire considérablement les bruits d'impact et aériens. (Taleb,O, 2020-2021).

**Le liège :** Le liège Le chêne de liège est présent en méditerranée depuis plus de 60 millions d'années. Le développement de l'industrie du verre et la fabrication des bouteilles développent la filière du liège surtout la fabrication des bouchons de bouteilles.



**Figure 2-20: le liège<sup>23</sup>**

---

<sup>22</sup> (<https://sweetseeds.es/blog/fr/como-cultivar-en-fibra-coco/>)

<sup>23</sup> ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Li%C3%A8ge\\_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Li%C3%A8ge_(mat%C3%A9riau)))



Aujourd'hui quatre pays assurent plus de 90% de la production mondiale : le Portugal (54%), l'Espagne, le Maroc et l'Algérie. Le reste est produit par la France, l'Italie et la Tunisie. Le chêne de liège est une essence exigeante en chaleur et en humidité. Il y a deux sortes de liège : le liège mâle et le liège femelle. Le liège mâle est la première écorce récoltée. Elle apparaît après 30 à 40 ans. Il est de mauvaise qualité car il est compact, siliceux et dépourvu d'élasticité.

Après cette période, une nouvelle écorce liégeuse plus homogène et moins crevassée et plus élastique se développe : c'est le liège femelle le plus recherchée. (30 cm sur un délai de 9 à 15 ans). Le liège femelle est aussi utilisé pour l'industrie : bouchons, jouets. Le liège mâle est suffisant pour fabriquer des isolants thermo-acoustiques, ou bien on utilise les déchets du liège femelle qu'il faut expansés.

Le liège cuit à haute température se dilate, se dilate, s'expansé et s'agglomère avec sa propre résine : la subérine. Il est chauffé à 300°C avec la vapeur d'eau pour faciliter l'expansion. Le liège expansé en plaque possède une masse volumique de 65 à 75 Kg/m<sup>3</sup>, alors que le liège en granulé à une masse volumique de 70 à 160 Kg/m<sup>3</sup>. Pour le liège aggloméré sans être expansé, sa masse volumique est de 200 à 210 Kg/m<sup>3</sup>. Le liège est facilement combustible et ne provoque pas de fumées nocives en cas d'incendie. Il peut résister à des températures de 120°C. Pour obtenir le liège aggloméré, le liège naturel est broyé et tamisé pour le classer par taille. Ensuite les grains sont mélangés avec une résine thermodurcissable (polyuréthane). Il est ensuite compressé uni axialement en un bloc

Il résiste à l'eau grâce à la subérine qui imprègne ses cellules.



**Figure 2-21: bouchons liège<sup>24</sup>**

Il n'est pas attaqué par les insectes et les rongeurs. Grâce à sa structure formée de millions de cellules microscopiques remplies d'air immobile, le liège expansé est un bon isolant thermique

---

<sup>24</sup> (<https://www.qualite.bzh/actualites/pourquoi-le-liege-est-le-meilleur-isolant-ecologique-sur-le-marche-03-12-2017-27>)

- $\lambda=0,035\div 0,045$  W/mK pour les panneaux.
- $\lambda=0,043\div 0,055$  W/Mk pour les granulés.
- $\lambda=0,044\div 0,049$  W/Mk pour le liège aggloméré.

Le liège offre également de bonnes capacités d'isolation acoustique (Affaiblissement acoustique : 20dB en bruit d'impact). Le liège aggloméré est utilisé pour l'isolation acoustique sous parquet flottant.

Traitement appliqué en cas d'application dans le béton :

- Horrification : Cycle d'immersion / séchage (16h/8h).
- Ebullition : bouilli pendant 2h et refroidi à l'air libre 30 min / séché au four pendant 24h à 60°C.
- Ethanol : 95% eau distillé + 5% Ethanol (6h) + séchage pendant 24h à 60°C.
- La chaux Ca(OH) 2 à 0,15%
- La soude NaOH à 1%. (Taleb,O, 2020-2021).

**La laine de coton :** Le cotonnier est un arbuste à croissance rapide. Après floraison, il produit des capsules qui une fois mures s'ouvrent laissant apparaître des graines et des fibres blanches

La plupart des laines de coton sont fabriquées avec des mélanges de coton naturel et de cotons recyclés issus de déchets de coupes ou de vêtements. Le coton recyclé est lavé, découpé, haché, défibré, puis mélangé avec des fibres thermo fusibles (fusion sous température) afin de constituer des panneaux ou des rouleaux de différentes épaisseurs

La densité de la laine de coton est comprise entre 20 et 25 Kg/m<sup>3</sup>, cependant il faut utiliser des laines plus denses et plus compactes dont la masse volumique est comprise entre 50 et 75 Kg/m<sup>3</sup>. Le coefficient de conductivité thermique de la laine de coton en rouleau varie entre 0,037 et 0,040 W/mK et entre 0,037 et 0,042 W/mK pour la laine de coton en vrac.

Les performances acoustiques sont bonnes pour l'isolation contre les bruits aériens. Elle est très perméable à la vapeur d'eau et hygroscopique, c'est-à-dire un bon régulateur de l'hygrométrie de l'air. La laine de coton est utilisée pour l'isolation des murs, toitures, planchers et cloisons. (Taleb,O, 2020-2021).



**Figure 2-22: la laine de coton<sup>25</sup>**

**La ouate de cellulose** : elle est issue du recyclage du papier. Elle est broyée, défibrée, malaxée, puis traitée pour résister aux agressions du feu, des insectes et des rongeurs. C'est un matériau écologique et performant avec une grande inertie thermique. Son conductivité thermique est de 0.038 à 0.043 w/m.k (Fragos, M. et Trouilleux, 2012)



**Figure 2-23: la ouate de la cellulose<sup>26</sup>**

#### **2.2.2.4 Les isolants d'origine animale :**

---

<sup>25</sup> (<https://gaz-tarif-reglemente.fr/maitriser-sa-consommation/travaux/isolation/materiaux-isolants/isolation-laine-coton.html>)

<sup>26</sup> (<https://www.habitatpresto.com/mag/isolation/isolation-ouate-cellulose>)

Différents types de poils, laines et plumes seraient utilisables pour répondre aux besoins d'isolation thermique ou acoustique. Toutefois, la rentabilité, la disponibilité et les nécessités économiques restreignent l'usage des produits animaux dans le bâtiment essentiellement la laine de mouton.

### *La laine de mouton :*

La laine de mouton nécessite un lavage complet en plusieurs étapes : trempage, dégraissage, lavage, rinçage, traitements et séchage. Ensuite, elle est triée et cardée pour retirer les impuretés puis nappée pour former un matelas. Ce matelas constitue le matériau de base qui ne possède pas encore les caractéristiques d'un isolant thermique.

La laine peut subir ensuite deux types de traitements : l'aiguilletage ou la thermolisation.

L'aiguilletage consiste à faire passer la laine entre deux rampes d'aiguilles qui vont enchevêtrer les fibres.

Dans la fabrication par thermolisation, la laine est mélangée avec des fibres thermofusibles comme du polyester ou du polypropylène qui serviront à donner de la tenue au produit. Le mélange est chauffé dans un four à 130°C environ. Les fibres fondent et agglomèrent la laine. Le matelas passe ensuite entre deux rouleaux pour acquérir l'épaisseur désirée puis on le laisse refroidir pour figer sa structure.

La laine de mouton est traitée par les sels de bore pour la rendre inflammable. Elle est aussi traitée pour résister aux moisissures et contre les mites. La masse de la laine de mouton varie entre 12 et 35 kg/m<sup>3</sup>. Elle permet d'assurer une bonne isolation pendant l'hiver mais reste inadaptée pour le confort d'été.

Le coefficient de conductivité thermique de la laine de mouton se situe entre 0,035 et 0,044 W/m.K, ce qui fait un bon isolant thermique. Elle est très perméable à la vapeur d'eau et peut absorber jusqu'à 33% de son poids en eau, ce qui est défavorable pour son caractère isolant. Cet isolant n'est donc pas recommandé pour les pièces à forte hygrométrie, comme les parois humides et sur les planchers en contact avec le sol. La pose d'un freine ou d'un pare vapeur et donc recommandée pour éviter la dégradation des structures dues à la migration de la vapeur d'eau.

La laine de mouton est commercialisée sous forme de rouleaux pour l'isolation des combles perdus sur les plancher ou entre les solives et pour la pose en parois verticales avec agrafage ou pour remplissage de caissons. Elle est aussi commercialisée sous forme de feutres pour l'isolation acoustique sous plancher ou en vrac pour l'isolation des combles et des vides de construction. Elle doit être posée au moyen d'une souffleuse cardeuse afin de lui restituer son gonflant.



**Figure 2-24: la laine du mouton<sup>27</sup>**

### *La plume de canard :*

La plume est reconnue depuis longtemps pour ses performances thermiques. L'isolant pour le bâtiment à base de plumes est une innovation qui permet de valoriser des déchets d'abattoirs surtout dans le cas des plumes longues qui ne sont pas utilisées pour la literie.

Les isolants à base de plumes de canard sont fabriqués avec un taux de 70% (de plumes) avec 10% de laine de mouton hygiénisée pour apporter une meilleure élasticité, en plus de 20% de fibres textiles thermo fusibles (polyester). (Taleb,O, 2020-2021).



**Figure 2-2-25: la plume du canard<sup>28</sup>**

---

<sup>27</sup> (<https://www.toutsurlisolation.com/laine-de-mouton>)

<sup>28</sup> (<https://www.artapissierie.fr/plume-d-oie-plume-de-canard/3039-plumes-de-canard-et-d-oie-melangees-1kg.html>)

### 2.2.2.5 Les isolantes nouvelles générations :

Par plus d'amélioration, la nouvelle génération d'isolant par une épaisseur raisonnable, a une performance bien meilleure que celle classique.

**Les aérogels :** des matériaux nano-poreux aux caractéristiques futuristes conçues par Steven Kistler en 1931. C'est une matière solide la plus légère qui contient 99.8% d'air. Les principaux gaz utilisés dans ces matières sont l'azote et l'oxygène et un gel de silice en phase aqueuse. Les performances exceptionnelles des aérogels peuvent encore être améliorées par l'ajout du carbone à la silice. Son conductivité thermique est de 0.011 à 0.013 w/m.k. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

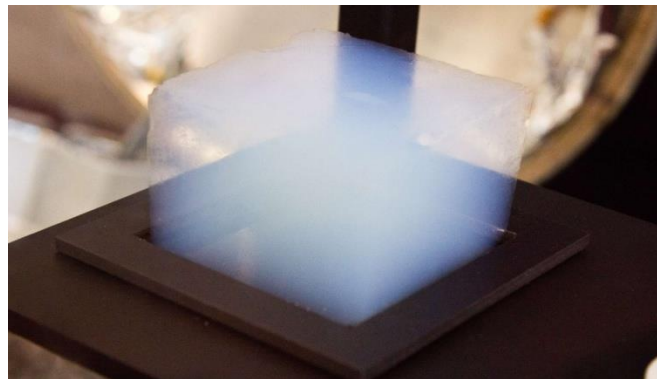
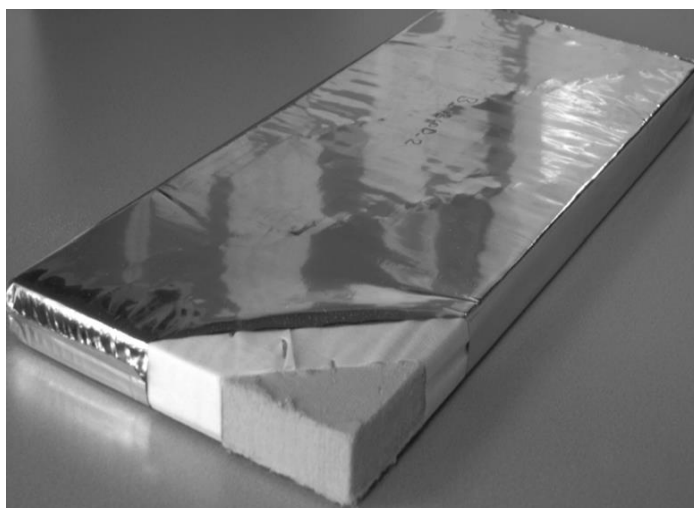


Figure 2-26: les aérogels<sup>29</sup>

**Les panneaux isolant sous vide :** les premières applications sont apparues dans les années 1950. Ils constituent une amélioration de la technique des aérogels. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010). C'est un isolant mince, il est composé d'un matériau « âme » confiné dans un film étanche et mis en dépression. Leur conductivité thermique est de 0.042 à 0.050 w/m.k. Ils présentent une performance exceptionnelle. (Fragos, M. et Trouilleux, 2012).

---

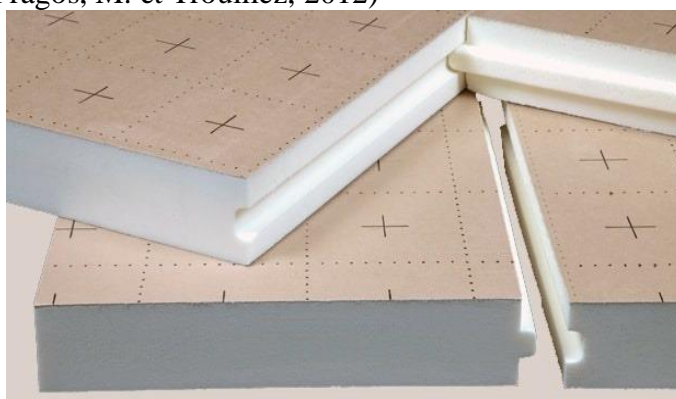
<sup>29</sup> (<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/aerogel-aerogel-15326/>)



**Figure 2-27: les panneaux sous vide<sup>30</sup>**

***Le polyuréthane (PUR) ou polyisocyanurate :***

C'est un matériau généralement utilisé pour corriger les défauts d'isolation. Il s'agit d'un produit léger, efficace et adaptable. Mais, il est dangereux en cas d'incendie, car il dégage des gaz toxiques. Son conductivité thermique est de 0,022 à 0,030 W/m.K. (Fragos, M. et Trouilleux, 2012)



**Figure 2-28: le polyuréthane (PUR)<sup>31</sup>**

***La mousse phénolique*** : c'est une résine de phénol-formaldéhyde, elle est utilisée généralement comme isolant. Son conductivité thermique est de 0,018 à 0,035 W/m.K. (Fragos, M. et Trouilleux, 2012).

---

<sup>30</sup> (<https://www.lisolation.fr/panneaux-isolants-sous-vide-piv/>)

<sup>31</sup> (<https://www.isolation-info.fr/panneaux-isolants/panneaux-isolants-pur>)

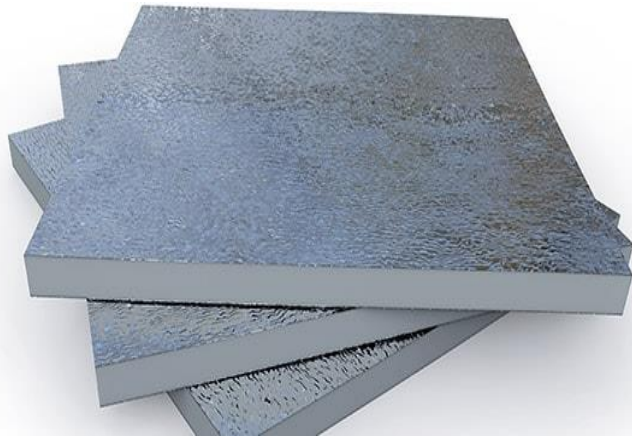


Figure 2-29: la mousse phénolique<sup>32</sup>

**La peinture isolante réfléchissante** : c'est une peinture acrylique à base d'eau, composée de quatre éléments céramiques liés par différentes résines. Elle permet l'isolation des murs intérieurs, des façades et même des toitures. W/m.K (Fragos, M. et Trouilleux, 2012).

**Peinture isolante en extérieur** : Elle convient pour l'isolation thermique des façades et des toitures. Elle permet la conservation de chaleur en hiver et évite les surchauffes en été en réfléchissant les rayons solaires. Cette peinture résiste bien aux intempéries, aux moisissures et aux salissures. Il s'agit d'un crépi blanc. (Fragos, M. et Trouilleux, 2012)



Figure 2-30: peinture isolants extérieur<sup>33</sup>

**Peinture isolante en intérieur** : La peinture isolante est utilisable pour l'intérieur. Dans ce cas, elle évite les déperditions de chaleur et régule le taux d'humidité. Elle répond aux raisons esthétiques par une large gamme des couleurs (Fragos, M. et Trouilleux, 2012)

---

<sup>32</sup> (<https://gaz-tarif-reglemente.fr/maitriser-sa-consommation/travaux/isolation/materiaux-isolants/mousse-phenolique.html>)

<sup>33</sup> (<https://peinture.ooreka.fr/astuce/voir/637649/peinture-isolante-exterieure>)





Figure 2-31: la peinture isolante en intérieur<sup>34</sup>

#### 2.2.2.6 L'isolation répartie :

C'est l'utilisation d'un matériau de construction pour la structure, le remplissage et l'isolation thermique.

**Le béton cellulaire** : c'est un matériau fabriqué à partir des ressources naturelles, 64% de sable blanc très pure, 15% de chaux, 20% de ciment, 1% de gypse et 1% - 0.05% des agents d'expansion comme la poudre d'aluminium. La conductivité thermique est entre 0.09 et 0.13 w/m.k. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

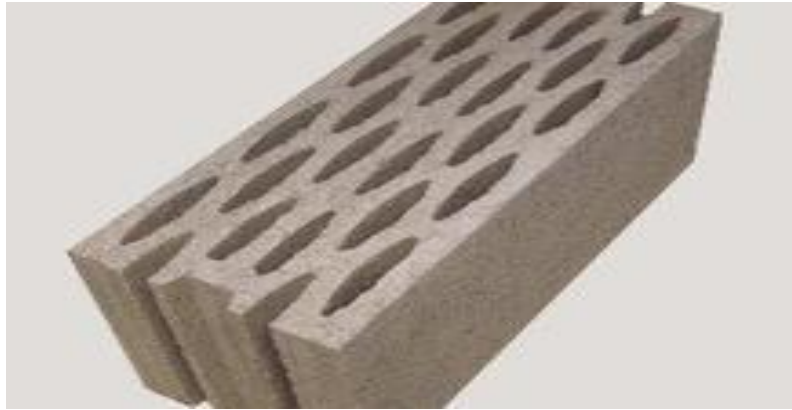


Figure 2-32: béton cellulaire<sup>35</sup>

<sup>34</sup> (<http://www.bienchoisir.fr/peinture/isoler-ses-murs-avec-de-la-peinture-isolante>)

<sup>35</sup> (<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2286-beton-cellulaire.html>)

*Les blocs bi-matières* : il s'agit des blocs de construction monolithique composée de deux matériaux collés. La partie intérieure est en silico-calcaire. Ou en béton cellulaire pour supporter les charges. la partie extérieure est composée des blocs en béton cellulaire allégé pour assurer plus d'isolation. La conductivité thermique est de 0.064 w/m.k. Pour un mur de 36.5 cm de largeur. U mur est de 0.18 w/m<sup>2</sup>.k. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).



**Figure 2-33: les blocs bi-matières<sup>36</sup>**

*Les blocs mono-murs en pierre poncé* : il s'agit d'une roche volcanique connue depuis des milliers d'années. Elle contient 85% d'air emprisonné dans des nombreux pores et cellules fermées. D'où elle obtient son pouvoir isolant élevé. Son conductivité thermique est de 0.099 à 0.11 w/m.k. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

---

<sup>36</sup> (<https://isolation.ooreka.fr/comprendre/bloc-bi-matiere>)



Figure 2-34: les blocs mono-murs en pierre ex poncé<sup>37</sup>

*Les blocs mono murs en billes d'argile expansée* : un mur de 30cm a un U de 0.038 à 0.47w/m<sup>2</sup>.k.



Figure 2-35: le bloc monomur en bille d'argile expansée<sup>38</sup>

*Les blocs mono murs en terre cuite* : les briques à alvéoles horizontales, les briques à alvéoles verticales ou les mono murs en terre cuite sont très intéressants grâce à la performance thermique qui les caractérise.

L'argile est collectée et entreposée à l'extérieur environ pour un an, puis en ajoutant de l'eau, le sable et la sciure de bois, le mélange sera broyé en granulés des petites

---

<sup>37</sup> <https://www.constructioncayola.com/batiment/article/2009/09/21/32422/des-blocs-monomurs-pierre-ponce-100-naturelle-naturellement-isolante>

<sup>38</sup> (<https://www.mon-isolation.pro/bloc-monomur-billes-dargile-expandee/>)

dimensions et humidifié à la vapeur. Il sera passé à travers une filière ou une matrice pour créer les alvéoles intérieures. Enfin, c'est le séchage et la cuisson. Sa conductivité thermique est de 0.12 à 0.18 w/m.k. Pour 30cm de largeur U est de 0.37w/m<sup>2</sup>.k. Si les blocs mono murs son remplies par un autre isolant, la conductivité va chuter vers (0.08 à0.09) w/m.k (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).



Figure 2-36: les blocs mono murs en terre cuite<sup>39</sup>

*Les blocs de coffrage isolant* : ils sont des blocs préfabriqués à isolation intégrée. Le principe est l'intégration de la structure porteuse entre deux isolants intérieur et extérieur. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).



Figure 2-37: les blocs de coffrage isolant<sup>40</sup>

<sup>39</sup> (<https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/tout-sur-la-brique-monomur-en-terre-cuite/>)

<sup>40</sup> <https://www.batiproduits.com/fiche/produits/bloc-coffrant-isolant-pour-les-murs-des-batis-bbc-p69074778.html>

Toute cette variété des isolants donne à l'utilisateur l'occasion de choisir suivant plein des caractères tel que la capacité thermique, le coût et l'impact sur la santé des occupants et sur l'environnement.

Un cycle de production courte, les matériaux les moins énergivores et les moins polluants possibles avec une bonne efficacité thermique présente toujours le meilleur choix. (couragey, S. et Oliva, J. P., 2007).

## 2.2.3 L'isolation du vitrage et de menuiserie extérieure

L'isolation de la partie compacte de projet ne signifie pas l'arrivée à la performance thermique souhaitée s'il ne soit pas complété par une prise en considération de la partie vitrée de l'enveloppe.

### 2.2.3.1 Les vitrages :

Le simple vitrage est caractérisé par une performance thermique ( $U_g$ ) très faible de 5.7 à 6  $w/m^2.k$ . A la fin des années 70, l'apparition du double vitrage afin d'emprisonner l'air entre deux vitres. La performance thermique d'un complexe de 4-12-4 est un  $U_g$  de 2.9  $w/m^2.k$ . Si les verres sont de 6 mm  $U_g$  deviendra 2.8  $w/m^2.k$ . (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010) .

Pour plus d'amélioration du vitrage, le double vitrage à faible émissivité donne un  $U_g$  de 1.7 à 1.9  $w/m^2.k$ . Le remplacement de l'air entre les deux vitrages par un gaz plus isolant donne un  $U_g$  de 1.7  $w/m^2.k$ . Le triple vitrage est caractérisé par très bonne performance thermique avec un  $U_g$  0.5 à 0.8  $w/m^2.k$ . (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

L'ajout d'un film de polyester enduit de fines couches métalliques entre les deux verres,  $U_g$  devient 0.9 à 1.3  $w/m^2.k$  avec un remplissage d'air. Si le remplissage est par un gaz rare  $U_g$  sera de 0.6 à 1.1  $w/m^2.k$  (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).



Figure 2-38 : un comparatif thermique entre les types de vitrage<sup>41</sup>

**Les menuiseries :** la performance globale d'une ouverture dépend aussi des châssis qu'ils soient de bonnes qualités isolantes, étanches à l'air et aux intempéries. Les différents matériaux utilisés pour la réalisation des châssis sont :

<sup>41</sup> (<https://housekeeping.tn/comment-savoir-si-ce-sont-de-bons-double-vitrage-2/>)

**Le bois** : est le matériau le plus anciennement utilisé dont il est caractérisé par sa grande isolation thermique et résistance mécanique. Mais son inconvénient principal est sa fragilité vis à vis les intempéries. Il a besoins d'un entretien fréquent. La solution est d'utiliser un châssis mixte le bois du côté intérieur et l'aluminium vers l'extérieur. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).



Figure 2-39 : la menuiserie en bois<sup>42</sup>

**L'acier** : le châssis en acier présente une résistance mécanique excellente mais son inconvénient est sa mauvaise isolation thermique. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).



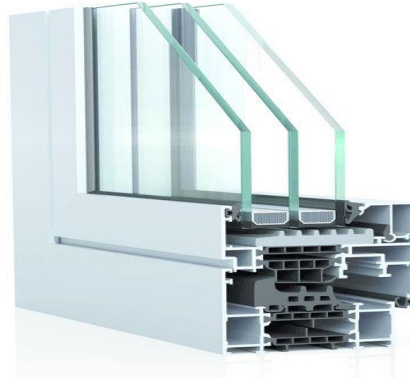
Figure 2-40: menuiserie en acier<sup>43</sup>

**L'aluminium** : il est un grand conducteur de la chaleur mais cela peut être corrigé par une rupture des ponts thermiques. L'isolation est assurée par les vides d'air des alvéoles à l'intérieur des profilés. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

---

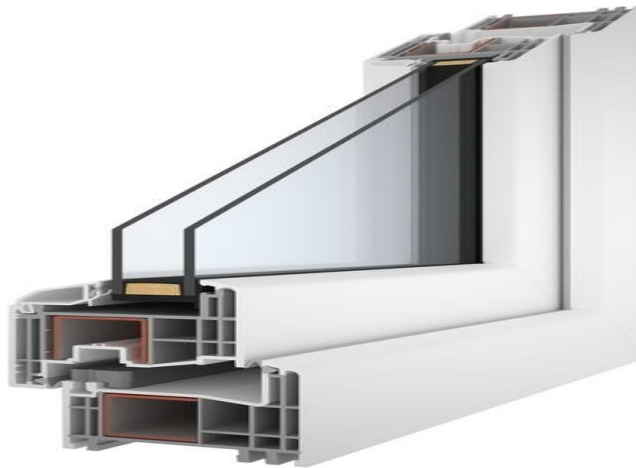
<sup>42</sup> (<https://www.batiproduits.com/fiche/produits/menuiseries-bois-aluminium-a-aretes-vives-tonu-p68916308.html>)

<sup>43</sup><https://www.atmosfer.fr/menuiseries-acier-toulouse-metallique-finline-verriere-industrielle-atelier-artiste-exterieure/>



**Figure 2-41: menuiserie en aluminium<sup>44</sup>**

**PVC** : un matériau très utilisé actuellement dont il présente une bonne propriété isolante. (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010)



**Figure 2-42: menuiserie en PVC<sup>45</sup>**

**Les portes en bois** :  $U_w$  est de 1.2 à 2.9  $w/m^2.k$  (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

**Les portes en aluminium** : en ajoutant des ruptures de ponts thermiques  $U_w$  est de 1.8 à 2.2  $w/m^2 .k$ . (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

**Les portes en fibre de verre** : 0.64 à 1.4  $w/m^2 .k$  (Gallauziaux, T. et Fedullo D., 2010).

---

<sup>44</sup> (<https://www.batiproduits.com/fiche/produits/menuiserie-aluminium-pour-murs-rideaux-wicline-7-p68889858.html>)

<sup>45</sup> <https://portech-fr.com/menuiserie-exterieure/menuiserie-pvc/>

## Conclusion :

La conception de l'enveloppe thermique est une phase très importante pour assurer la sensation de confort en économisant la consommation énergétique. Alors que l'ignorance de cette phase peut favoriser l'inconfort intérieur. L'augmentation de l'inertie thermique va diminuer les fluctuations des températures de l'extérieur.

Le rôle des matériaux de construction dans une enveloppe d'un bâtiment est primordial. Selon les critères objectifs ou individuels, leur choix a un impact direct sur la qualité de l'enveloppe thermique. Les caractéristiques thermiques des matériaux de construction vont permettre d'augmenter ou de diminuer la performance énergétique.

La relation entre la partie opaque et celle vitrée est complémentaire dans un enveloppe thermique. Le vitrage est nécessaire pour emprisonner l'énergie solaire pour le chauffage en hiver et protéger l'intérieur des déperditions thermiques ou des chaleurs intensifs. L'amélioration de la qualité des vitres peut contribuer à augmenter le confort thermique.

Pour plus de performance, une isolation thermique peut corriger les défauts d'étanchéité d'une enveloppe thermique. L'isolation va créer une barrière contre les fuites de la chaleur ou de la fraîcheur.

La grande variété des types d'isolants donne à l'utilisateur à choisir selon certain critères. Le respect de la santé de l'occupant, le coût convenable et l'efficacité sont des éléments à prendre en considération lors du choix.

L'isolation thermique en Algérie reste à évaluer à cause de l'ignorance presque totale de l'application de la réglementation.



# Chapitre 3 : Isolation thermique en Algérie

## Introduction :

La maîtrise de l'énergie constitue une des options stratégiques de la politique énergétique nationale. Elle est dictée par le souci de la préservation des ressources énergétiques nationales, le respect des engagements internationaux en matière de protection de l'environnement (réduction des gaz à effet de serre) et la sauvegarde de la santé des citoyens.

Le programme national pour la maîtrise de l'énergie regroupe l'ensemble des projets, des mesures et des actions dans plusieurs domaines. Dans ce chapitre nous présentons les différentes lois, décrites, ayant un rapport avec la maîtrise de l'énergie dans le cadre national et aussi les organisations institutionnels

## 3.1 L'isolation thermique en Algérie:

En Algérie qu'il est apparu la nécessité de développer l'isolation thermique dans les préoccupations des constructeurs, l'utilisation de parois lourdes dans le domaine de la construction est l'une des solutions classiques pour se protéger des agressions climatiques cette solution ne permet pas d'atteindre un niveau de confort satisfaisant surtout dans les régions chaudes où l'inertie des parois doit être associée à une isolation thermique. L'évolution thermique des méthodes de construction, le besoin d'un confort thermique plus approprié et le souci d'économie d'énergie ont suscité un intérêt pour une amélioration de l'isolation, c'est-à-dire la recherche des matériaux et des techniques de mise en œuvre susceptibles de réduire le flux de chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments.

Les techniques ont pour rôle principal la conservation des calories par un ensemble de dispositions réduisant l'échange de chaleur entre deux espaces de températures différentes (l'intérieur et l'extérieur d'une construction), mais elle procure également un certain nombre d'avantages supplémentaires dont les principaux sont:

- l'amélioration du confort en élevant les températures superficielles des parois.
- la diminution du coût global de construction en associant l'isolation à des structures légères.
- l'économie d'énergie en diminuant la puissance des installations de chauffage et de climatisation.
- la durabilité des constructions en protégeant les éléments du bâtiment contre les effets de variation de température. (Coulomb Philippe)

### 3.1.1 L'état de lieu :

Généralement, l'isolation thermique en Algérie représente un domaine ignoré lors de l'édification des constructions de tous types. Une vue rapide sur le cadre bâti permet de montrer ce dernier.

### 3.1.2 Les logements collectifs :

En Algérie, l'édification des projets à caractère public est suite au cahier de charge qui exige la réalisation des murs extérieurs par double parois en briques creuses avec une lame d'air. Cette lame d'air peut être inefficace suite aux nombre important des ponts thermiques et/ou les malfaçons des ouvriers qui annulent l'isolation thermique. La disposition de la brique transversale provoque une liaison directe entre l'intérieur et l'extérieur en créant des infiltrations d'eau et des ponts thermiques avec des risques de condensation. (Mazouz.S, 2012).

Dernièrement, l'isolation par le liège aggloméré expansé ou par le polystyrène des toitures terrasse est devenue obligatoire dans l'habitat collectif.

Concernant la partie vitrée de la construction, le simple vitrage est le plus utilisé en Algérie. La menuiserie est peu étanche et participe à augmenter la perméabilité de l'enveloppe à l'air.

### 3.1.3 Les logements individuels :

Concernant l'habitat individuel, la grande majorité des constructeurs à caractère privé réalisent la paroi extérieure avec un mur unique sans prendre en considération ni la lame d'air ni un isolant thermique. Cette situation des logements provoque des déperditions thermiques importantes et augmente la consommation énergétique par les énergies fossiles afin de chauffer ou de climatiser l'intérieur.

## 3.2 La réglementation en isolation thermique:

Les Lois et les législations algériennes organisant le domaine d'efficacité énergétique prend en considération l'isolation thermique comme moyen essentiel pour régulariser la facture énergétique dans le pays.

## 3.3 Document techniques réglementaires:

En deca, des lois concernant la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, la réglementation algérienne s'est enrichie de document technique réglementaire, les DTRC initiés par le ministère de l'habitat et mis en œuvre par le CNERIB. Ces documents qui sont destinés uniquement aux bâtiments à usage d'habitation, mentionnent entre autre les exigences réglementaires que doivent satisfaire leurs enveloppes à savoir :

### *Les lois règlementaires :*

Les lois relatives à la maîtrise d'énergie sont :

- **La loi 09 - 99 du 28 juillet 1999 :**

Elle est considéré comme une loi cadre relative à la maîtrise d'énergie, son rôle est d'assurer un des objectifs fondamentaux de la politique énergétique en Algérie. Par la gestion rationnelle de la demande d'énergie et fixe des nombreux aspects liés à la maîtrise d'énergie dans le domaine de la construction. (MEM et APRUE, 2010).

- **Le décret exécutif n° 2000-90 du 24 Avril 2000 :**

Il porte la réglementation thermique dans les bâtiments neufs à usage d'habitation. (JORA, 2000).

- **La loi 04 – 09 du 14 Août 2004 :**  
Elle est relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable. (JORA, 2004).
- **Le décret exécutif 04- 149 du 19 Mai 2004 :**  
Il fixe les modalités d'élaboration du programme national de la maîtrise d'énergie (JORA, 2004).
- **Décret exécutif n° 05-16 du 11 janvier 2005 :**  
Il fixe les règles spécifiques d'efficacité énergétique applicables aux appareils fonctionnant à l'électricité, au gaz et aux produits pétroliers.
- **Arrêté interministériel du 29 Novembre 2008 :**  
Il définit la classification d'efficacité énergétique des appareils à usage domestique soumis aux règles spécifiques d'efficacité énergétique pour ceux qui fonctionnent à l'énergie électrique. (JORA, 2009).  
A partir de cette réglementation, le CNERIB<sup>46</sup> a enrichi ce domaine par des documents techniques réglementaires. Ces DTR<sup>47</sup> sont initiés par le ministère de l'habitat et mis en œuvre par le CNERIB.  
Ils sont destinés aux bâtiments à usage d'habitation, spécifiquement à la nature d'enveloppe des constructions.
  
- **DTR C 3-2 « Règles de calcul des déperditions calorifiques »** pour le problème d'hiver pour les bâtiments à usage d'habitation, il vise la limitation de la consommation énergétique relative au chauffage des locaux à travers le calcul des déperditions thermiques.
- **DTR C 3-4** intitulé « Règles de calcul des apports calorifiques » pour le problème d'été, Il vise la limitation de la consommation énergétique relative à la climatisation des locaux
- **DTR C 3.31 "Ventilation naturelle - Locaux à usage d'habitation"** élaboré en 2005, il fournit les principes généraux qu'il y a lieu d'adopter lors de la conception des installations de ventilation naturelle. (M.A. Boukli Hacène, N.E. Chabane Sari et B. Benyoucef, 2010)
- En effet, la maîtrise d'énergie couvre l'ensemble des mesures et des actions mises en œuvre en point de vue utilisation rationnelle de l'énergie et du développement des énergies renouvelables. Elle répond aux soucis suivants :
  - La préservation des ressources nationales d'hydrocarbures.
  - La préservation des capacités de financement de pays utilisables dans d'autres domaines que le secteur énergétique.

---

<sup>46</sup> CNERIB : Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment

<sup>47</sup> DTR : Documents Techniques Réglementaires

- La protection de l'environnement.

### 3.4 En voie de la recherche:

A fin d'intégrer l'isolation thermique dans le modèle de la construction algérienne, plusieurs recherches s'effectuent au niveau du CNERIB et CDER<sup>48</sup>. L'objectif de ces recherches est d'améliorer la qualité des isolants et de choisir les plus efficaces. Des prototypes sont réalisés à fin de répondre aux objectifs cités déjà.

### 3.5 Les types d'isolants disponibles en Algérie:

L'isolant le plus disponible dans le marché algérien est le polystyrène. Mais son utilisation est très limitée dans le domaine du bâtiment. La laine de verre, le liège et la perlite sont aussi présentes avec des petites quantités.

L'introduction de l'isolation thermique aux bâtiments peut réduire vers 40% de la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation des logements. (MEM, 2011). L'isolation thermique en Algérie reste encore à évoluer et à développer par plus d'application de la réglementation et plus du contrôle.

### 3.6 Différents matériaux d'isolation usuels

Les matériaux isolants les plus utilisés sont :

#### 3.6.1 Le liège :

C'est un produit agricole et matériau épais, imperméable et léger, fourni par l'écorce de certains arbres et particulièrement du chêne-liège. (Dictionnaire Larousse) La subéraie (la forêt du chêne liège) dans le monde couvre environ 2 687 000 ha comme suit :

- ✓ Portugal 32%
- ✓ Espagne 27%
- ✓ **Algérie 17 %**
- ✓ Maroc 14%
- ✓ Tunisie 5%
- ✓ Italie 3,4%
- ✓ France 1,6%

Quant à la production mondiale du liège, elle est concentrée sur la méditerranée occidentale (84% au niveau de l'Europe et 16% pour l'Afrique du Nord), avec :

- ✓ Portugal 170 000 tonnes soit 55%
- ✓ **Algérie 16 000** 5%
- ✓ Pays du Maghreb 50 000 16%

Panneau d'isolation en liège aggloméré noir expansé a les meilleures propriétés d'isolation phonique et thermique. Il est efficace contre les basses températures et les fortes chaleurs, contre les vibrations et il ne pourrit pas sous l'effet de l'âge. Il fait économiser 30% de la consommation énergétique. (Himrane Mohamed)

Il est connu pour (Caractéristiques et propriétés du liège):

---

<sup>48</sup> CDER : Centre du Développement des Energies Renouvelable, Alger, Algérie.

- Légèreté.
- Imperméabilité aux liquides et aux gaz.
- Produit naturel et recyclable.
- Résistance à la corrosion biologique.
- Résistance au feu.
- Durabilité.
- Facilité d'usinage

#### **Utilisation du liège :**

- L'isolation thermique et phonique (terrasses, sols, murs ...).
- Doublage de murs intérieurs.
- Isolation extérieure.
- Isolation des combles.
- Chambres froides  
(Guide des matériaux isolants) .

#### **Fabrication d'un panneau isolant en liège :**

Les écorces de liège sont broyées en petits granulés de 4/16mm de diamètre. Ils sont ensuite chauffés à la vapeur d'eau dans des autoclaves à très haute température (300°) qui permet d'extraire la subérine (résine naturelle contenue dans le liège), cette résine sera utilisée pour fabriquer des agglomérés de liège.

La température en autoclave est responsable de sa teinte noire, il sort des autoclaves après cuisson en forme de cubes, ils seront coupés en épaisseurs allant de 20mm à 120mm et plus, pour des dimensions standard de 100cm/50cm d'un panneau.

### **3.6.2 Le polystyrène expansé (PSE)**

Le PSE est un matériau isolant d'origine synthétique obtenu à partir d'un mélange de polystyrène et de gaz qui donne un matériau léger de couleur blanche. (Définition /polystyrène expansé/futura maison)

#### **Avantage :**

- Très bon isolant thermique.
- Très bonne durabilité et très bonne stabilité.
- Résistance à la compression.
- Matériau non capillaire (Définition /polystyrène expansé/futura maison)
- Il est réutilisable
- Il supporte l'humidité et l'eau et ralentit le feu.
- Non altérable en présence d'eau (Guide des matériaux isolants)

#### **Inconvénients :**

- Pollution de l'ozone.
- Difficilement recyclable.
- Mauvaise performance phonique.
- Sensible au feu. (Guide des matériaux isolants)

#### **Utilisation :**

- protection des appareils fragiles.
- Emballage alimentaire.
- Flottabilité : en peut l'utiliser comme un flotteur.
- Isolation thermique et phonique. (htt43)

### 3.6.3 Polystyrène extrudé

C'est un isolant synthétique composé de pétrole brut et d'une mousse uniforme. Il est obtenu à partir d'un mélange de polystyrène et de gaz, qui donne un matériau léger de couleur bleue. [ (htt44)

#### **Avantage :**

- Très bon isolant.
- Très bonne stabilité dimensionnelle et très bonne durabilité.
- Résistance à la compression et à l'humidité.
- Non altérable en présence d'eau. (Guide des matériaux isolants)

#### **Inconvénients :**

- Difficilement recyclable.
- Sensible au feu.
- Mauvaise performance phonique.
- Il est cher. (Guide des matériaux isolants)

### 3.6.4 Le polyuréthane

Les polyuréthanes sont des polymères dont la chaîne principale est composée de sections aliphatiques ou aromatiques, reliées par des groupements uréthanes et qui diffèrent de la plupart des autres types de plastiques (Amel, November 2016).

#### **Avantage :**

- Matériau insensible à l'eau.
- Matériau non hygroscopique et non capillaire.
- Utilisable noyé sous chape liquide ou en parties enterrés.

#### **Inconvénients :**

- Energie grise très élevée.
- Difficilement recyclable.
- Mauvaise performance phonique.
- Dégradable par les rongeurs.
- Dégagement de gaz hautement toxique en cas d'incidence

### 3.6.5 La laine de mouton

La laine de mouton est un produit isolant issu de matières premières de nature et de qualité variables selon les régions puisqu'elle est d'origine naturelle animale. Elle est utilisée pour l'isolation thermique comme pour l'isolation acoustique du bâtiment. La laine de mouton est lavée pour éliminer le suint et les impuretés, puis y sont ajoutés des additifs antimites et des fibres de texturation pour constituer les produits finis d'isolation. On peut la trouver en rouleau ou en panneau ou encore en vrac (Laine de mouton : isolant en laine animale - Tout sur l'isolation/).

La région d'Oum El Bouaghi est une région pastorale où l'élevage des ovins est importante, la laine de mouton est en abondance mais sans aucune utilisation autre pour les usages traditionnels de literies et ameublement et tapisserie.

#### **Avantage :**

- Bon pouvoir hygroscopique.
- La laine peut absorber 33% de son poids en eau.
- Très bon isolant thermique.
- Ne dégage pas de flamme ni des gaz toxiques en cas d'incendie.
- N'est pas dangereux pour la santé.

**Inconvénients :**

- Faible contribution au confort d'été.
- Sensible au feu.
- Nécessite un traitement antimite.

### 3.7 Le prix des matériaux isolants:

Les prix des isolants diffèrent d'un matériau à un autre, l'outil traite le prix de matériau par mètre carré (m<sup>2</sup>) pour **le liège (840 DA)**, **le polystyrène (700 DA)**, **le polyuréthane (500 DA)**, **la laine de verre (450 DA)**, **la laine de chanvre (2600)**, **la laine de roche (320 DA)**, **la laine de mouton (160 DA)**. ([www.prix-construction.info](http://www.prix-construction.info)).

### Conclusion :

En fin l'Algérie ne fait pas l'exception des pays en voie de développement, dont la croissance continue de la population et de la construction est le principal facteur de la demande accrue en énergie dans le secteur des bâtiments. Des modèles de construction étrangers se sont généralisés sur tout le territoire algérien, inappropriée au contexte culturel, social et climatique du pays. En conséquence, le secteur bâtiments a été classé le plus énergivore avec une consommation qui représente environ de 44 % de la consommation finale (MEA2, 2017), pour cela, l'Algérie met en œuvre un programme national d'efficacité énergétique (PNEE) à l'horizon 2030 (APRUE3, 2015a). Ce programme vise globalement la réduction de la consommation de 9 % à travers la substitution inter énergétique et l'introduction des équipements et des technologies performantes dans l'ensemble des secteurs ; le bâtiment, le transport et l'industrie.

# Chapitre 4 : Simulation thermique du confort

## Introduction :

Dans ce chapitre, on présente la simulation numérique sur le transfert de chaleur avec et sans matériau isolant.

La simulation numérique est exécutée à l'aide du LOGICIEL ANSYS 2022 student, plusieurs simulations sont réalisées pour différentes configurations étudiés. Les résultats obtenus sont présentés sous formes de courbe de température.

## 4.1 Transfert unidirectionnel

### Mur simple

On se placera dans le cas où le transfert de chaleur est unidirectionnel et où il n'y a pas de génération ni de stockage d'énergie.

On considère un mur d'épaisseur  $e$ , de conductivité thermique  $\lambda$  et de grandes dimensions transversales dont les faces extrêmes sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$  :

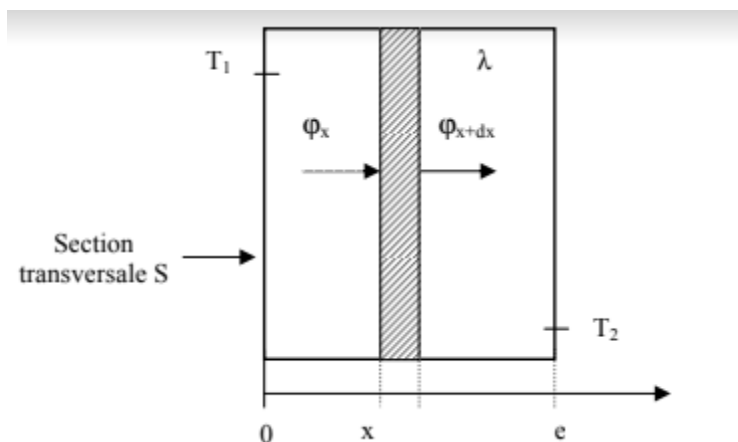


Figure 4-1 : bilan thermique élémentaire sur un mur simple

En effectuant un bilan thermique sur le système (S) constitué par la tranche de mur comprise entre les

Abcisses  $x$  et  $x + dx$ , il vient :

$$\phi_x = \phi_{x+dx} \rightarrow -\lambda S \left( \frac{dT}{dX} \right)_x = -\lambda S \left( \frac{dT}{dX} \right)_{x+dx}$$

D'où  $\frac{dT}{dX} = A$  et  $T(x) = Ax + B$

Avec les conditions aux limites :  $T(x=0) = T_1$  et  $T(x=e) = T_2$

$$T = T_1 - \frac{x}{e} (T_1 - T_2)$$



D'où :

Le profil de température est donc linéaire. La densité de flux de chaleur traversant le mur s'en déduit par la relation :

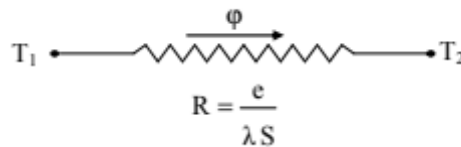
$$\phi = -\lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)$$

D'où :

$$\phi = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{e}$$

La relation précédente peut également se mettre sous la forme :  $\phi = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{\lambda S}}$

cette relation est analogue à la loi d'Ohm en électricité qui définit l'intensité du courant comme le rapport de la différence de potentiel électrique sur la résistance électrique. La température apparaît ainsi comme un potentiel thermique et le terme  $\frac{e}{\lambda S}$  apparaît comme la résistance thermique d'un mur plan d'épaisseur e, de conductivité thermique  $\lambda$  et de surface latérale S. On se ramène donc au schéma équivalent représenté sur la figure suivant :



**Figure 4-2 : Schéma électrique équivalent d'un mur simple**

**Mur multicouches :**

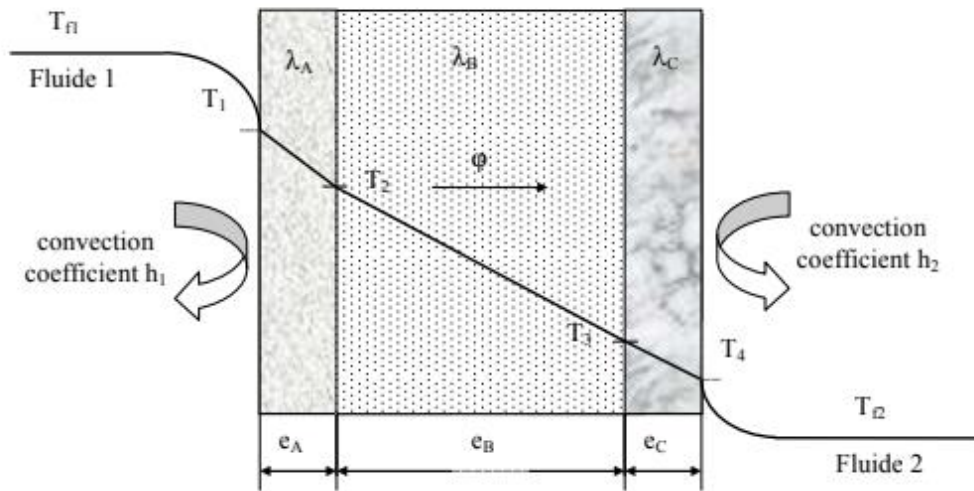
C'est le cas des murs réels constitués de plusieurs couches de matériaux différents et où on ne connaît que les températures Tf1 et Tf2 des fluides en contact avec les deux faces du mur de surface latérale S.

En régime permanent, le flux de chaleur se conserve lors de la traversée du mur et s'écrit :

$$\phi = h_1 S (T_{f1} - T_1) = \frac{\lambda_A (T_1 - T_2)}{e_A} = \frac{\lambda_B (T_2 - T_3)}{e_B} = \frac{\lambda_C (T_3 - T_4)}{e_C} = h_2 S (T_4 - T_{f2})$$

D'où :

$$\frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}}$$

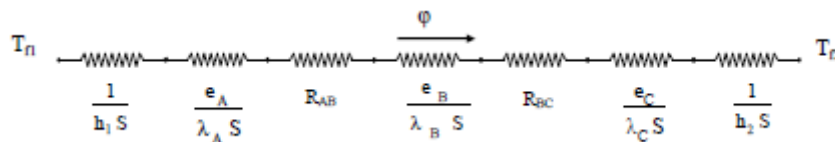


**Figure 4-3 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouche**

On a considéré que les contacts entre les couches de différentes natures étaient parfaits et qu'il n'existait pas de discontinuité de température aux interfaces. En réalité, compte-tenu de la rugosité des surfaces, une microcouche d'air existe entre les creux des surfaces en regard qui contribue à la création d'une résistance thermique (l'air est un isolant) appelée résistance thermique de contact. La formule précédente s'écrit alors :

$$\frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}}$$

Le schéma électrique équivalent est représenté sur la figure suivante :



**Figure 4-4: Schéma électrique équivalent d'un mur multicouche<sup>49</sup>**

<sup>49</sup> Source auteur

## Remarque :

- Une résistance thermique ne peut être définie en l'absence de sources que sur un tube de flux.
- Cette résistance thermique de contact est négligée si le mur comporte une paroi isolante ou si les parois sont jointes par soudure.

## 4.2 TECHNIQUES DE MODÉLISATION SOUS ANSYS

A fin de réussir une bonne modélisation sous ANSYS il faut passer par :

### 4.1.2 Choix du domaine d'application D'ANSYS :

Thermal ou structural.

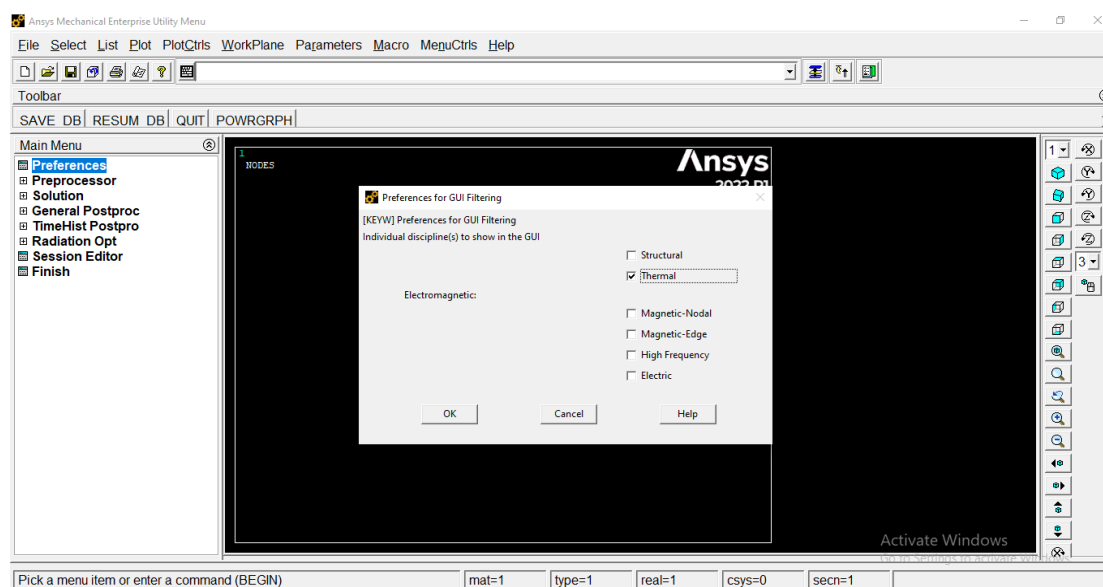


Figure 4-5 Préférence thermique<sup>50</sup>

### 4.1.1 Définition des propriétés des matériaux en régime permanent :

- Conduction isotrope

### 4.1.2 Modélisation des solides conductifs :

- Emploi, précision et limitations des éléments LINK32 et 33, PLANE55, 35 et 77, SHELL57, SHELL131, SHELL132, SOLID70, 87et 90

<sup>50</sup> Source auteur

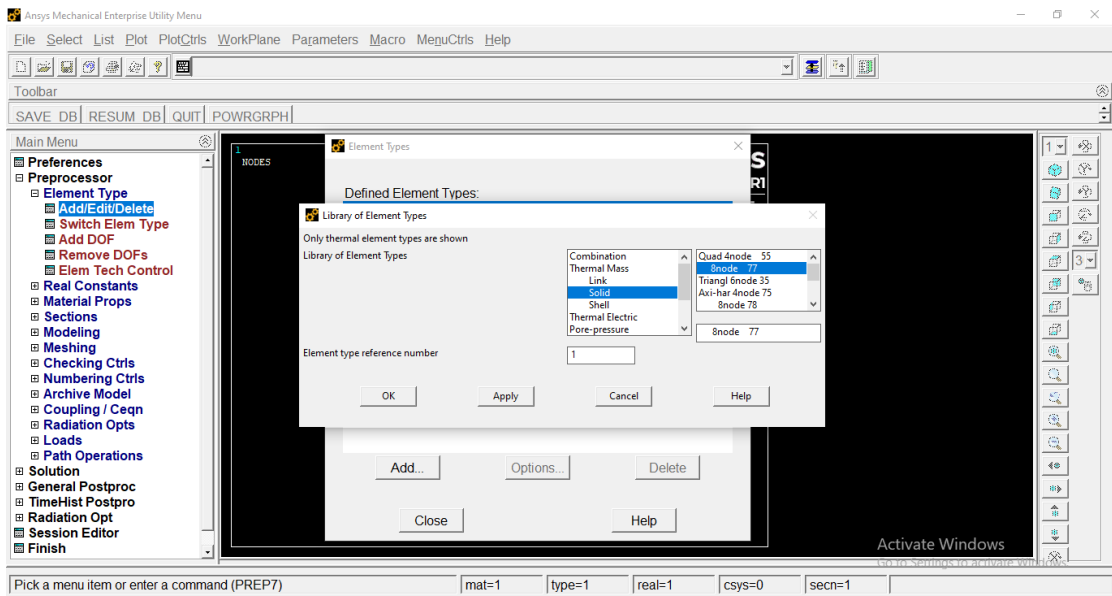


Figure 4-6: emploi des éléments<sup>51</sup>

## - Critères de maillage

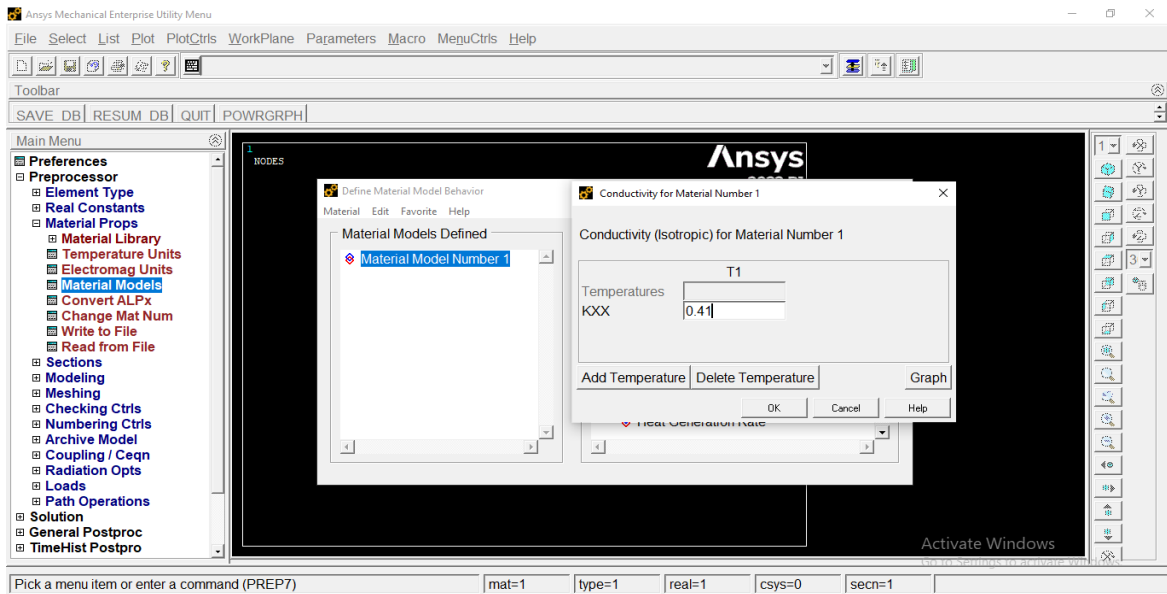


Figure 4-7: affectations de la conductivité thermique

<sup>51</sup> Source auteur

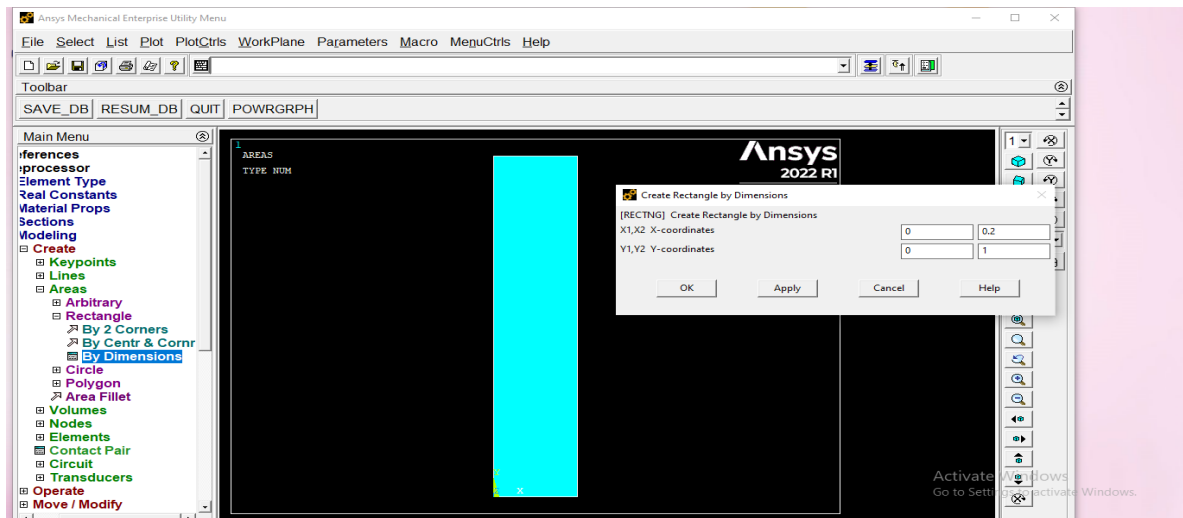


Figure 4-8 : géométrie

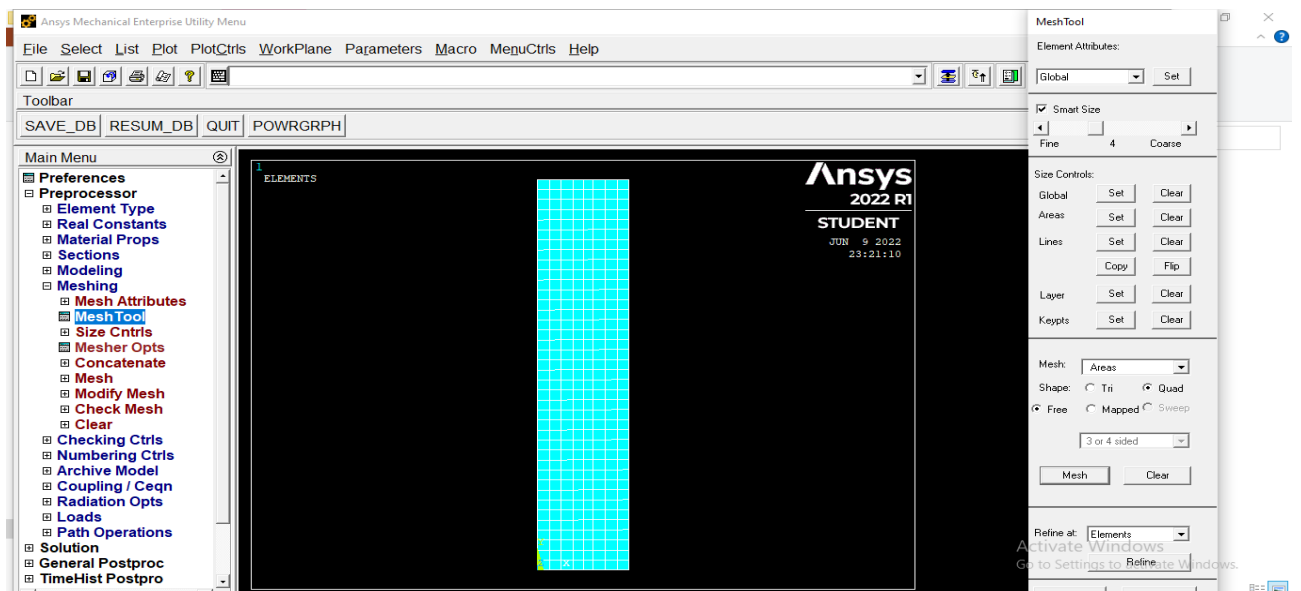


Figure 4-8: maillage<sup>52</sup>

#### 4.1.3 Modélisation de la convection :

- Par le biais de conditions aux limites : commandes SF, SFE, etc.
- Par des liens convectifs (LINK34) - Par les éléments "surface effects";

2D ou 3D

#### 4.1.4 Chargements et conditions aux limites :

- Température imposée

<sup>52</sup> Source auteur

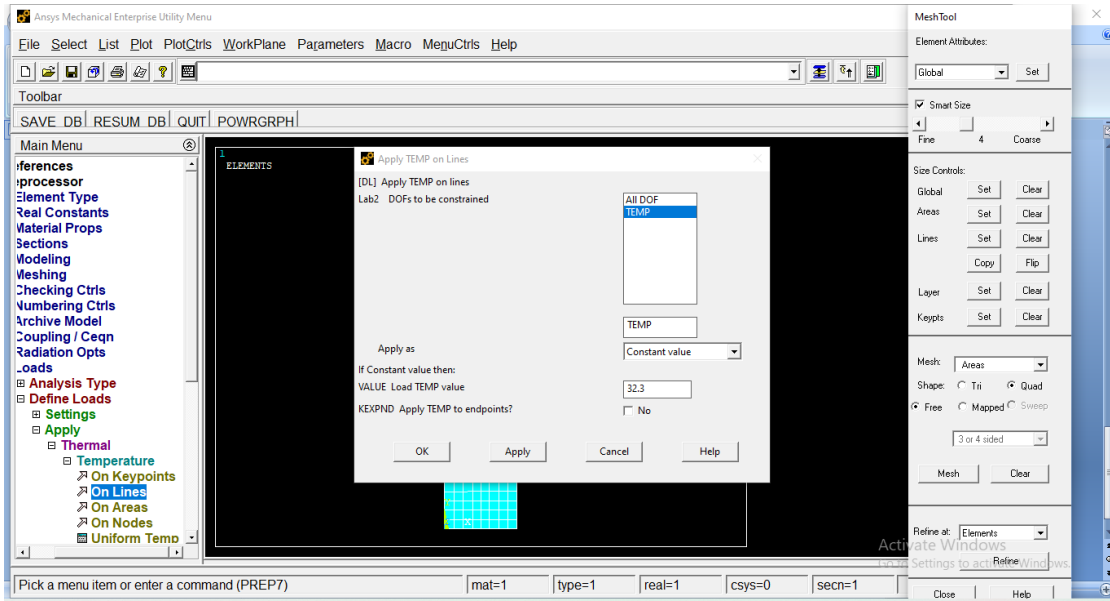


Figure 4-9: chargement

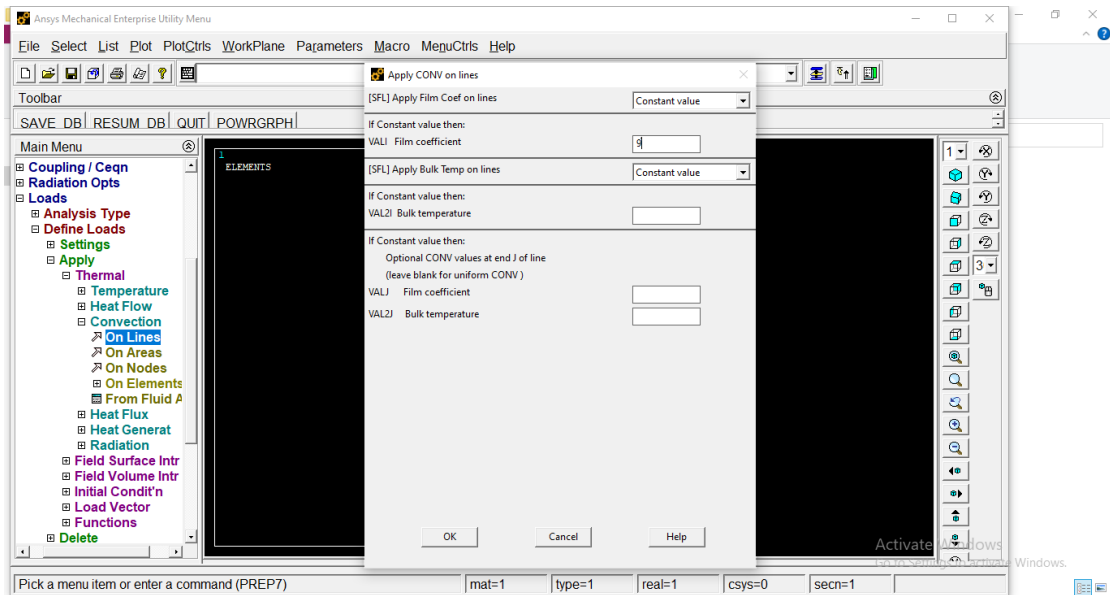
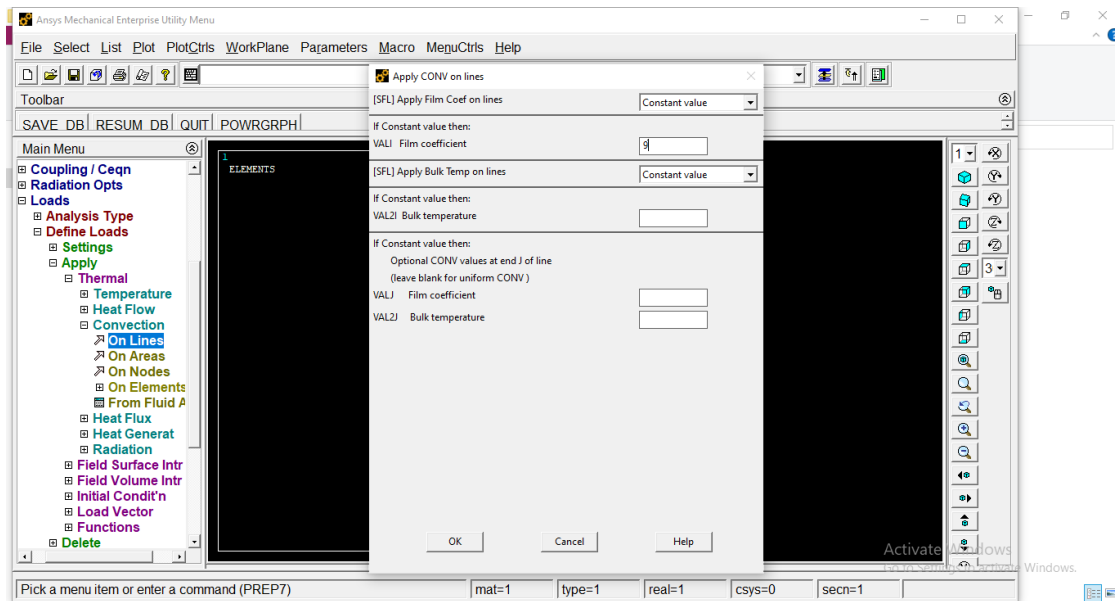


Figure 4-10: conditions aux limites par lien convectifs<sup>53</sup>

<sup>53</sup> Source auteur



**Figure 4-11 : conditions aux limites<sup>54</sup>**

- Paroi adiabatique et condition de symétrie
- Flux et flux unitaires de chaleur

Modélisation de la convection Par le biais de conditions aux limites : commandes SF, SFE, etc. ou Par

Les éléments "surface effects" 2D

- Choix des températures initiales

#### 4.1.5 Méthodes de résolution et algorithmes en régime stationnaire :

- Méthodes directes (sparse solver) et itératives (gradients conjugués)
- Méthode de Newton-Raphson en thermique
- Critères de convergence
- Outils numériques : prédicteurs, line-search

<sup>54</sup> Source auteur

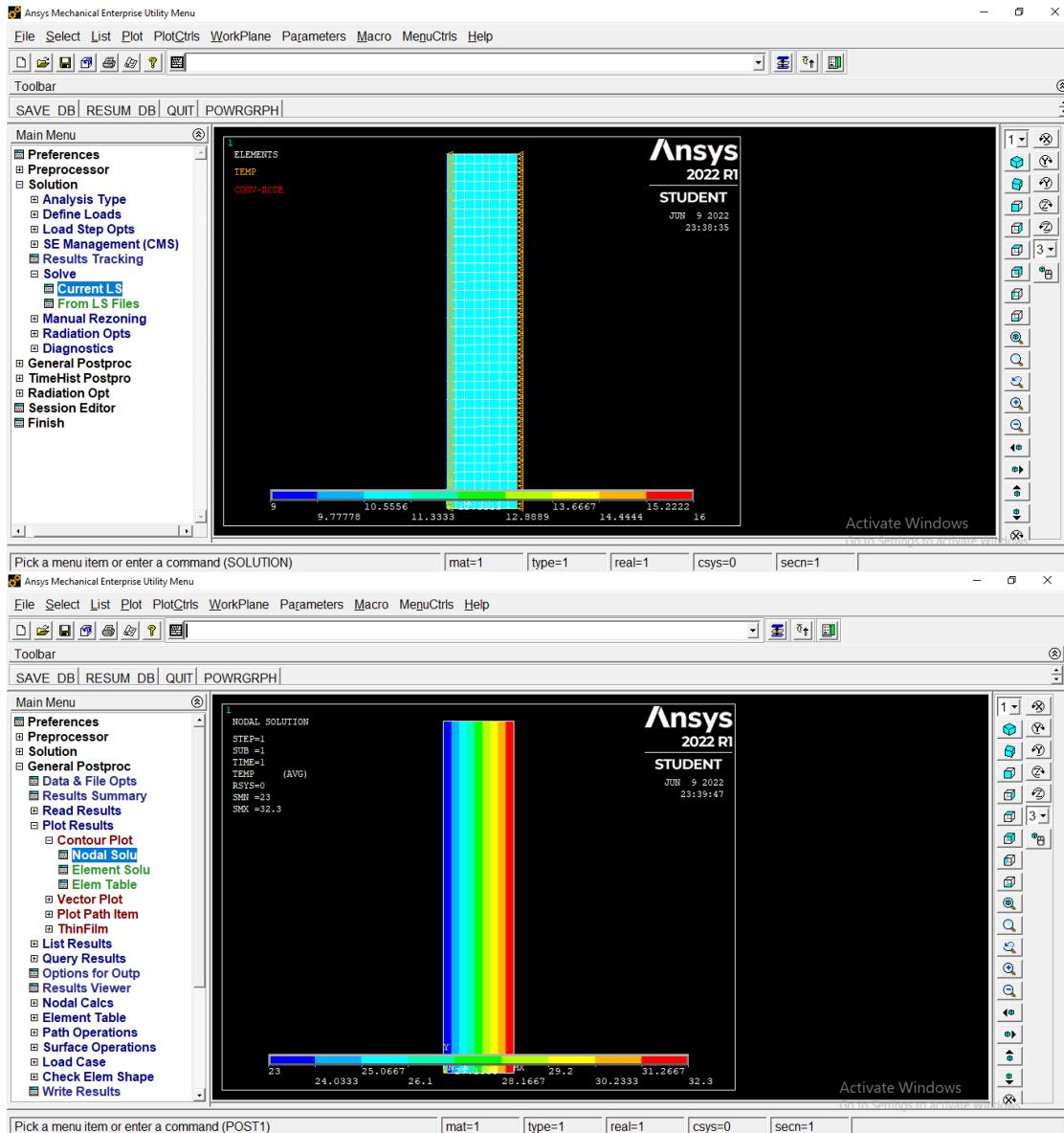


Figure 4-12: résultats<sup>55</sup>

#### 4.1.6 Post-traitement et validation des résultats :

- Établissement de bilans énergétiques globaux - conservation
- Contrôle de la discrétisation par les normes d'erreur - limitations
- Tracé de ligne et de surface isothermes
- Tracé de vecteur gradient thermique et flux thermique
- Manipulation des items

<sup>55</sup> Source auteur



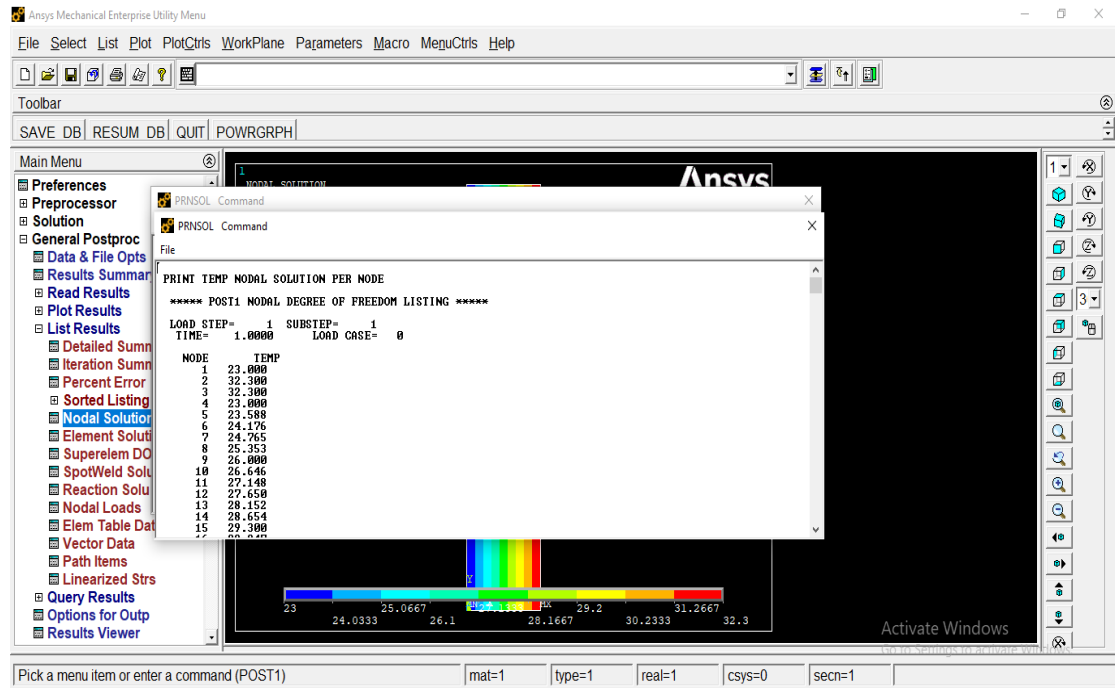


Figure 4-13: élément graphe<sup>56</sup>

#### 4.1.7 Méthode de travail :

### 4.3 Résultat et interprétations :

Afin d'établir une simulation proche de la réalité deux (02) cas pendant deux périodes:

#### a-1er cas : *un mur en brique creuse sans isolation.*

la paroi externe est en contact avec l'air extérieur, une température imposée variable réelle tirée du tableau climatique de la ville de Tlemcen (max =32.3°C, min =2.5°C) et dans l'autre coté de l'air intérieur à la température constante de confort de 23°C avec une convection de coefficient règlementé de  $h_i = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### b-2eme cas : *un mur composé. (Multicouches) avec des différents types d'isolant (laine de verre, Polyuréthane, laine de chanvre)*

Les mêmes conditions aux limites sus visés

<sup>56</sup> Source auteur

## TABLEAU CLIMATIQUE TLEMCCEN

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	7.1	7.9	10.6	13.2	16.8	21.5	25.2	25.3	21	17.1	11	8.2
Température minimale moyenne (°C)	2.5	2.9	5.2	7.4	10.6	14.8	18.3	18.7	15.2	11.7	6.5	3.9
Température maximale (°C)	13	13.7	16.8	19.5	23.2	28.1	32.2	32.3	27.5	23.5	16.5	13.9
Précipitations (mm)	62	52	59	55	38	11	2	5	23	41	61	45
Humidité(%)	69%	69%	67%	65%	61%	55%	48%	50%	59%	63%	67%	70%
Jours de pluie (jrs)	7	6	5	6	4	1	0	1	3	5	6	6
Heures de soleil (h)	7.0	7.6	8.5	9.5	10.6	11.9	12.3	11.5	10.0	9.0	7.4	7.0

Figure 4-14 : tableau climatique Tlemccen

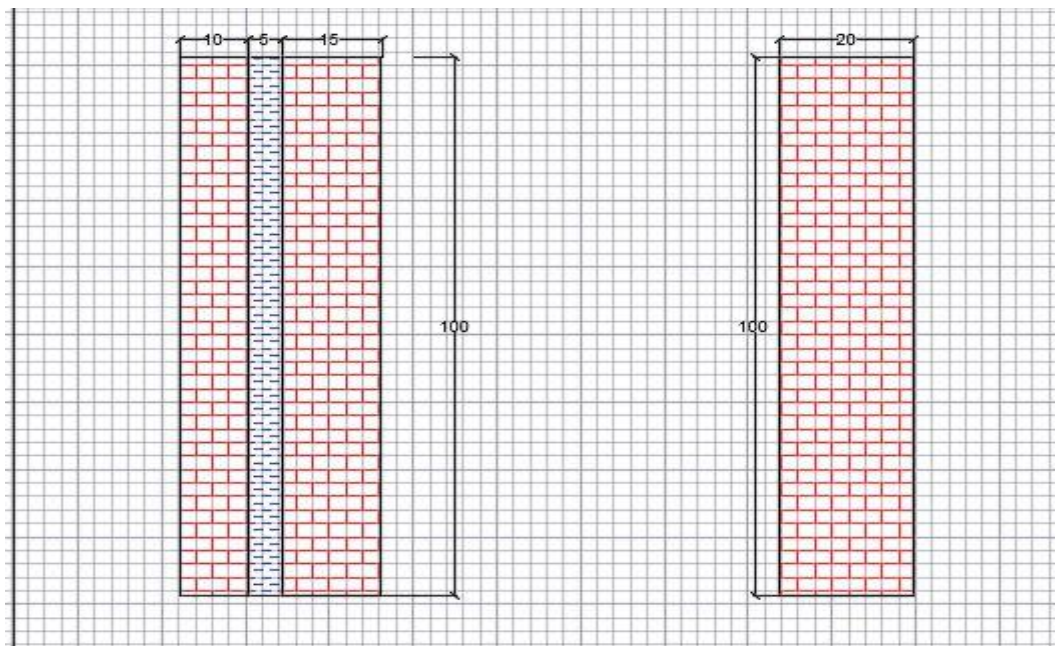


Figure 4-15: géométrie des murs<sup>57</sup>

### c- Période Hiver :

La quantité de chaleur perdue à travers les parois.

La température intérieure est supérieure à la température extérieure.  $T^{\circ} \text{int} > T^{\circ} \text{ext}$

### d- Période ETE :

La quantité de chaleur absorbée à travers les parois.

La température intérieure est inférieure à la température extérieure.  $T^{\circ} \text{int} < T^{\circ} \text{ext}$

<sup>57</sup> Source Auteur

#### 4.1.8 Modèle mathématique :

Il est nécessaire avant de traiter le problème thermique de supposer certain nombre d'hypothèses et conditions aux limites à savoir :

1. Le transfert de chaleur à travers la paroi est unidimensionnel et est réalisé par conduction.
2. Toutes les couches du système de paroi sont homogènes et isotropes.
3. les capacités thermiques et les conductivités thermiques restent Constantes avec le temps
6. Les parois horizontales sont supposées adiabatiques.
7. Les résistances de contact sont négligeables.
8. La convection est naturelle non forcée.
- 9-les transferts de chaleur par rayonnement dans les matériaux sont ignorés.

### Résultats et discussion:

#### 4.4 Période D'ETE :

**1<sup>er</sup> cas le mur sans isolation :** Après avoir terminé le processus d'analyse à l'aide du programme ANSYS, les résultats suivants ont été obtenus :

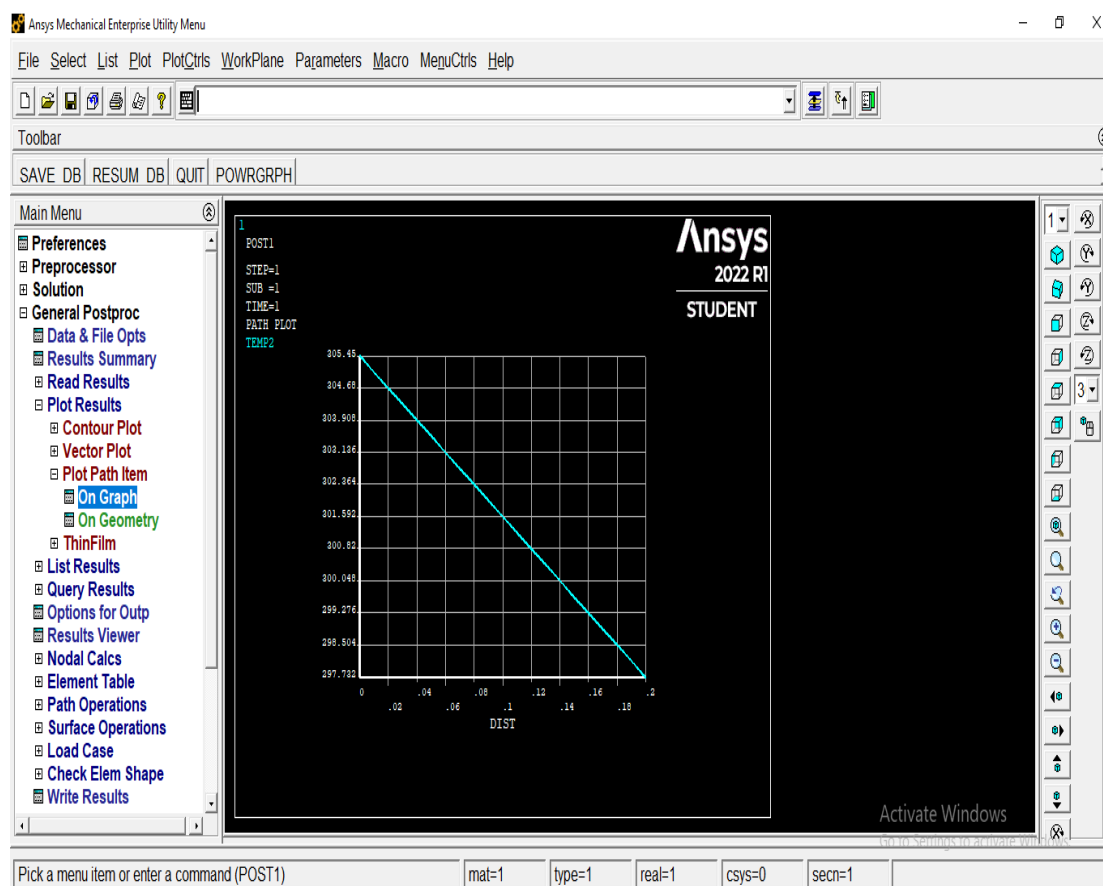


Figure 4-16: champ de température d'un mur non isoler en été<sup>58</sup>

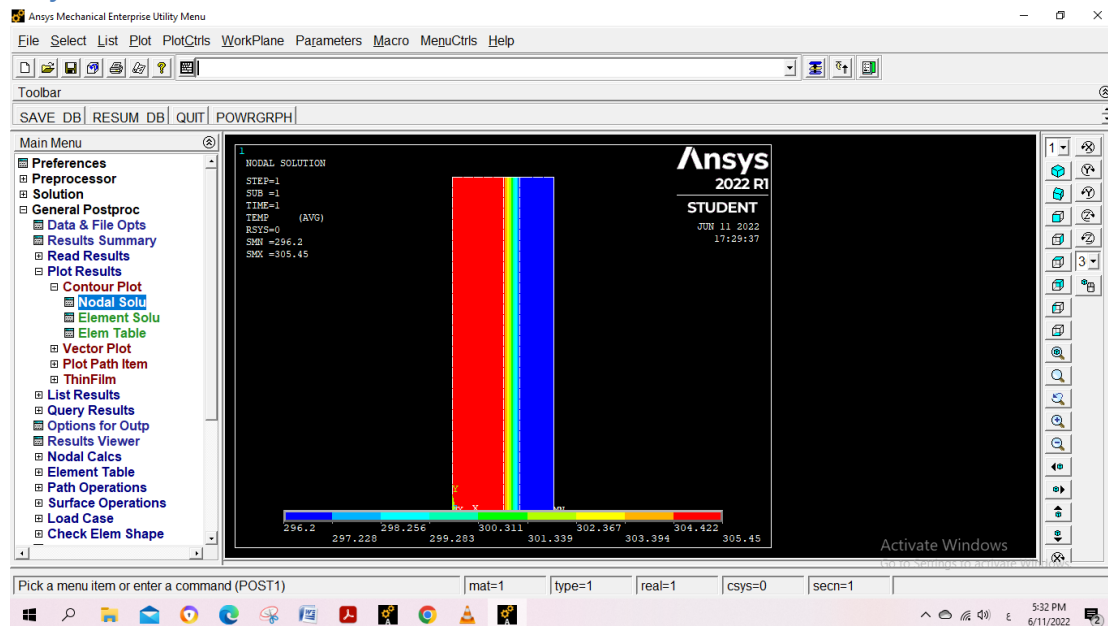
<sup>58</sup> Source auteur

La figure 4-16 montre l'évolution des champs de température de la paroi à l'instant, la température extérieure imposée de façon constante a 32.3°C.

Il est à noter la présence d'un gradient de température entre l'extérieur et l'intérieure de la paroi, Par conséquent, il y a une influence significative de la conductivité thermique  $\lambda$  sur la température intérieure.

**2eme cas : un mur composé. (Multicouches) avec des différents types**

## Polyuréthane



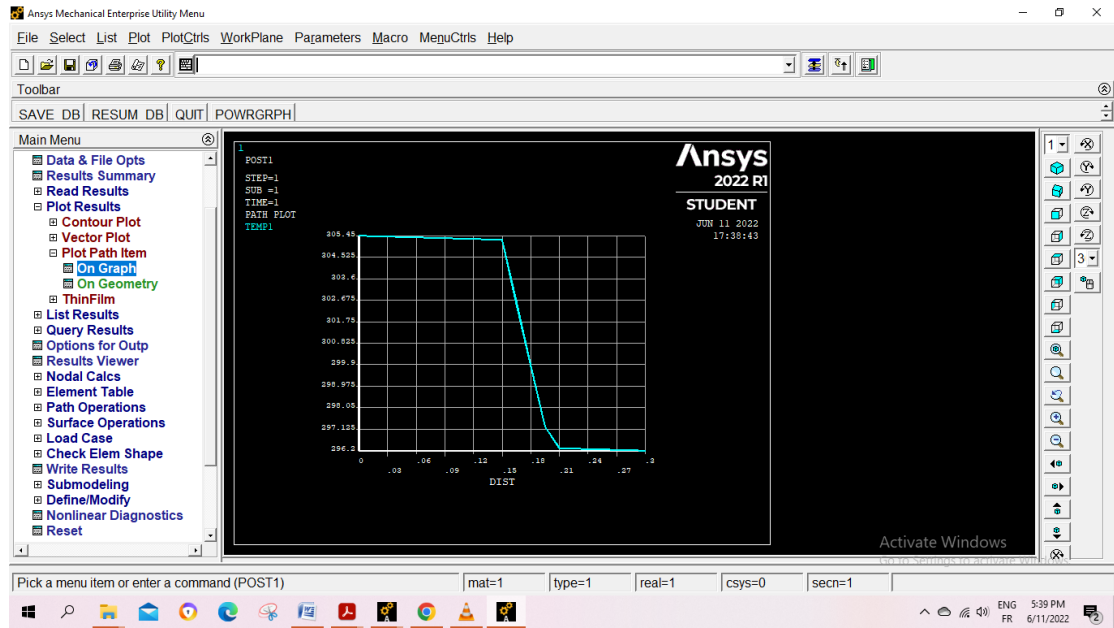
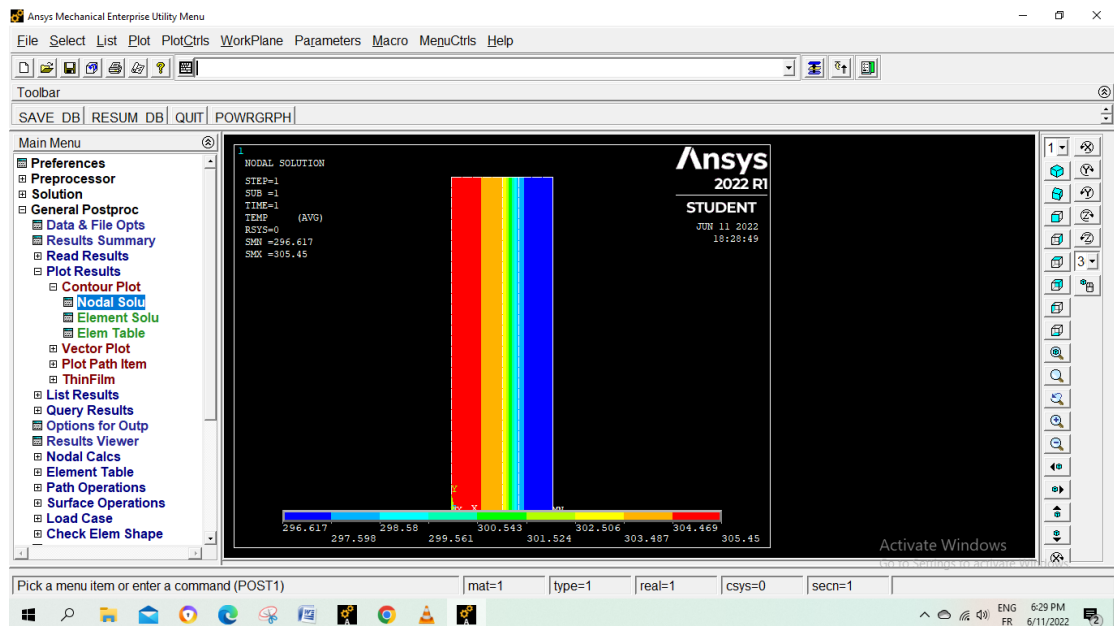


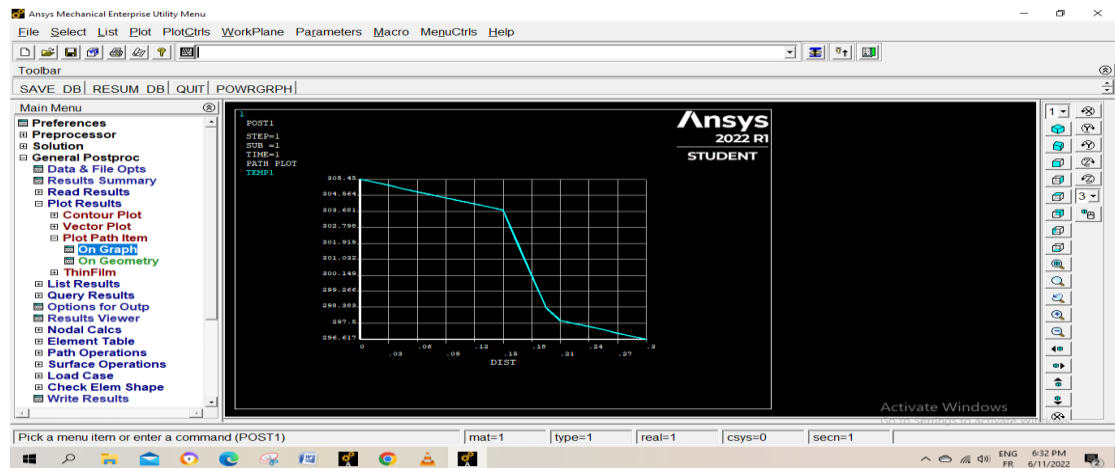
Figure 4-17: contour de température et profil du polyuréthane en été<sup>59</sup>

Le Polyuréthane diminue les échanges de chaleur entre l'intérieur du paroi et l'environnement extérieur avec une différence de 1.5° par rapport au mur sans isolation d'où vient l'importance de l'isolation thermique.

### LAINE DE CHANVRE :



<sup>59</sup> Source auteur

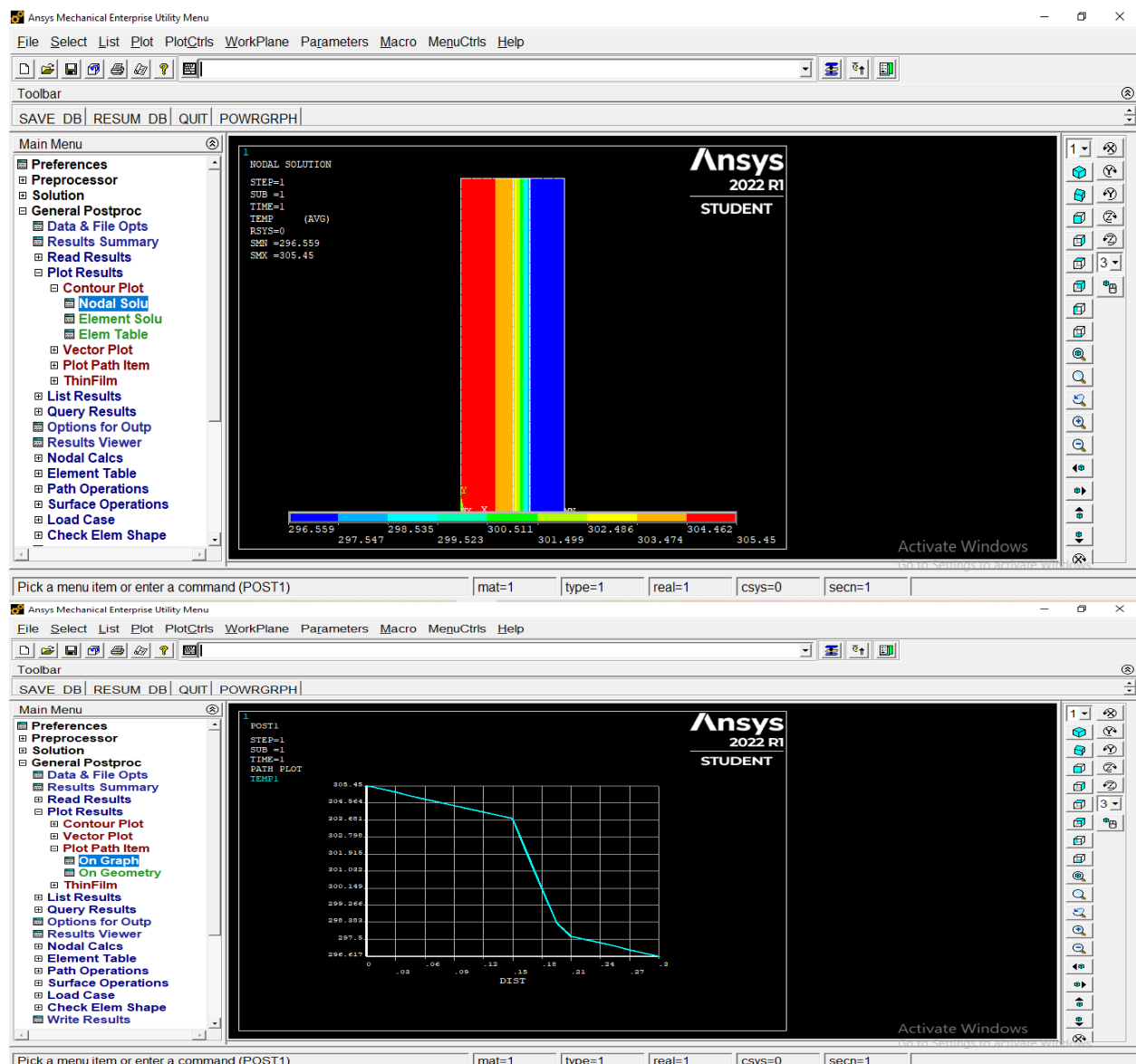


**Figure 4-18 : contour de température et profil de la laine du chanvre en été<sup>60</sup>**

La laine de Chanvre permet de limiter les échanges de chaleur entre l'intérieur du paroi et l'environnement extérieur avec une différence de  $0.4^{\circ}$  par rapport au Polyuréthane, une différence acceptable en raison de l'impact négatif sur l'environnement causé par l'utilisation de Polyuréthane.

<sup>60</sup> Source auteur

## LAINE DE VERRE :



**Figure 4-19 : contour de température et profil de la laine de verre en été<sup>61</sup>**

La LAINE DE VERRE permet aussi de limiter les échanges de chaleur entre l'intérieur du paroi et l'environnement extérieur avec une différence de  $0.1^{\circ}$  par rapport à la laine de chanvre, Faible évolution qui peut être ignorée, et cela ouvre la voie au facteur prix, puisque les deux matériaux sont d'origine naturelle et n'affectent pas l'environnement .

Les figures ci-dessus montrent l'évolution des champs de température de la paroi aux instant t. La température extérieure imposée de façon constante à  $32.3^{\circ}\text{C}$  .

<sup>61</sup> Source auteur

Il est à noter la présence d'un gradient de température entre l'extérieur et l'intérieure de la paroi, Par conséquent, il y a une influence significative de la conductivité thermique  $\lambda$  des isolants sur la température intérieure.

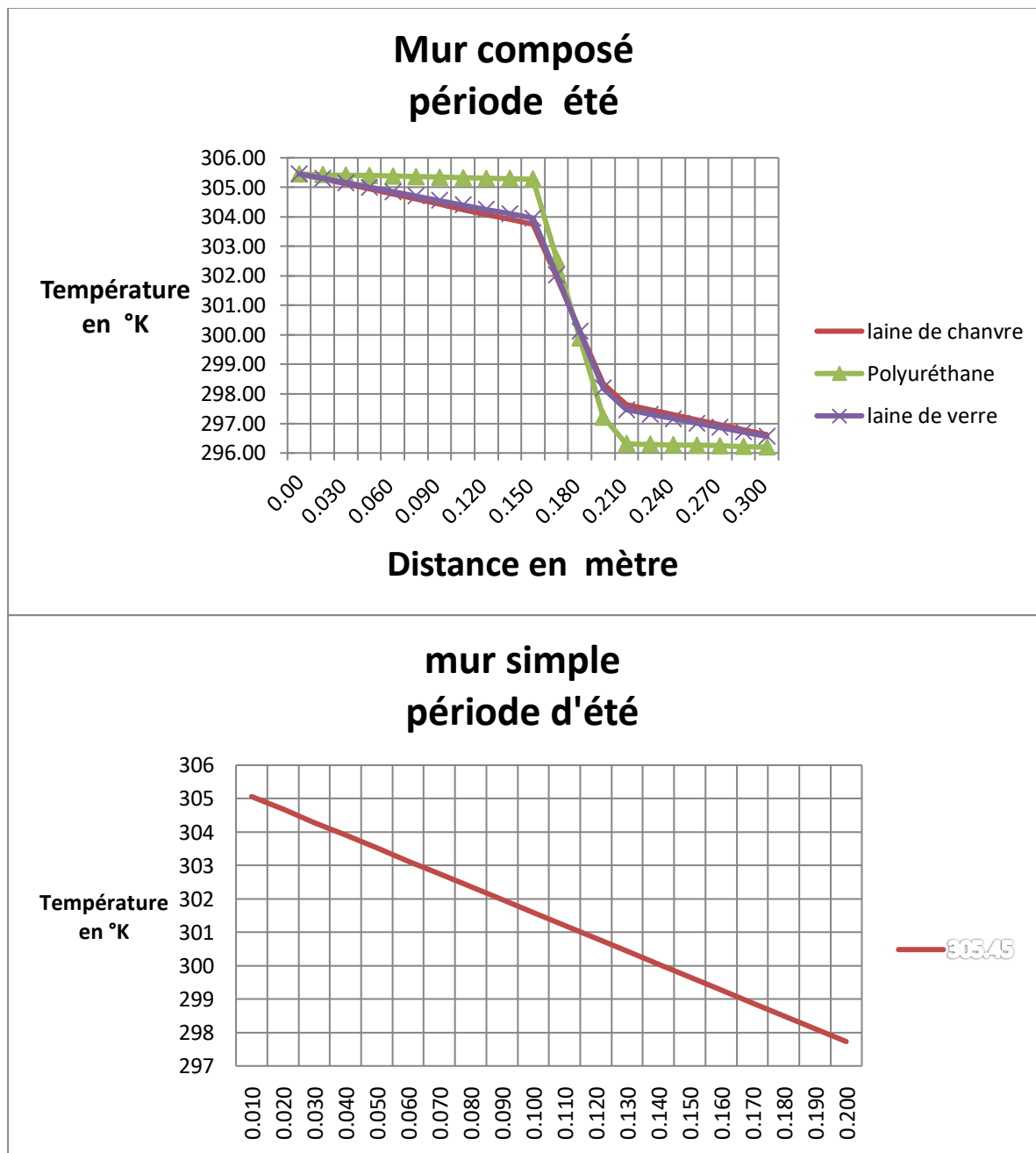


Figure 4-20 : mur simple et composé période été<sup>62</sup>

<sup>62</sup> Source auteur



**Tableau 3 : résultats en été**

MUR COMPOSE		laine de chanvre	Polyuréthane	laine de verre	MUR SIMPLE	
distance	temp (kelvin)	temp (kelvin)	temp (kelvin)	temp (kelvin)	DISTANCE	TEMP(kelvin)
0.00	305.45	305.45	305.45	305.45	0.00	305.45
0.015	305.28	305.43	305.30	305.30	0.010	305.06
0.030	305.11	305.41	305.15	305.15	0.020	304.68
0.045	304.94	305.40	305.00	305.00	0.030	304.29
0.060	304.77	305.38	304.85	304.85	0.040	303.91
0.075	304.60	305.36	304.70	304.70	0.050	303.52
0.090	304.43	305.34	304.55	304.55	0.060	303.13
0.105	304.25	305.32	304.40	304.40	0.070	302.75
0.120	304.08	305.30	304.25	304.25	0.080	302.36
0.135	303.91	305.29	304.10	304.10	0.090	301.98
0.150	303.74	305.27	303.95	303.95	0.100	301.59
0.165	301.95	302.58	302.03	302.03	0.110	301.21
0.180	300.15	299.90	300.12	300.12	0.120	300.82
0.195	298.35	297.22	298.20	298.20	0.130	300.43
0.210	297.64	296.31	297.46	297.46	0.140	300.05
0.225	297.47	296.29	297.31	297.31	0.150	299.66
0.240	297.30	296.27	297.16	297.16	0.160	299.28
0.255	297.13	296.26	297.01	297.01	0.170	298.89
0.270	296.96	296.24	296.86	296.86	0.180	298.5
0.285	296.79	296.22	296.71	296.71	0.190	298.12
0.300	296.62	296.20	296.56	296.56	0.200	297.73

Récapitulation du 1er cas :

En analysant le tableau et les graphes au dessus il est clair de voir le rôle des isolants d'une manier quasi pareil dans l'amélioration du confort thermique en période d'été c.à.d. empêcher la chaleur à pénétrer dans l'intérieur efficacement, il reste le choix de l'isolant qui est relatif à d'autre critères tels que le prix et l'impact environnemental.

Après avoir observé et analysé les résultats obtenus, il est évident que l'utilisation de matériaux isolants fait une différence tangible, et cela a été démontré à travers les résultats obtenus.

Le type de matériau isolant thermique ne doit pas non plus être négligé, car il a été noté qu'il existe des différences plutôt mineures entre l'efficacité de chaque matériau isolant.

En fin La bonne utilisation des matériaux d'isolation thermique conduit inévitablement à réduire la facture de chauffage en hiver et le coût de la climatisation

en été, tout en conservant le même niveau de confort thermique, qui est l'une des bases d'une vie décente et adéquate.

#### 4.5 Période D'HIVER : 1<sup>er</sup> cas le mur sans isolation :

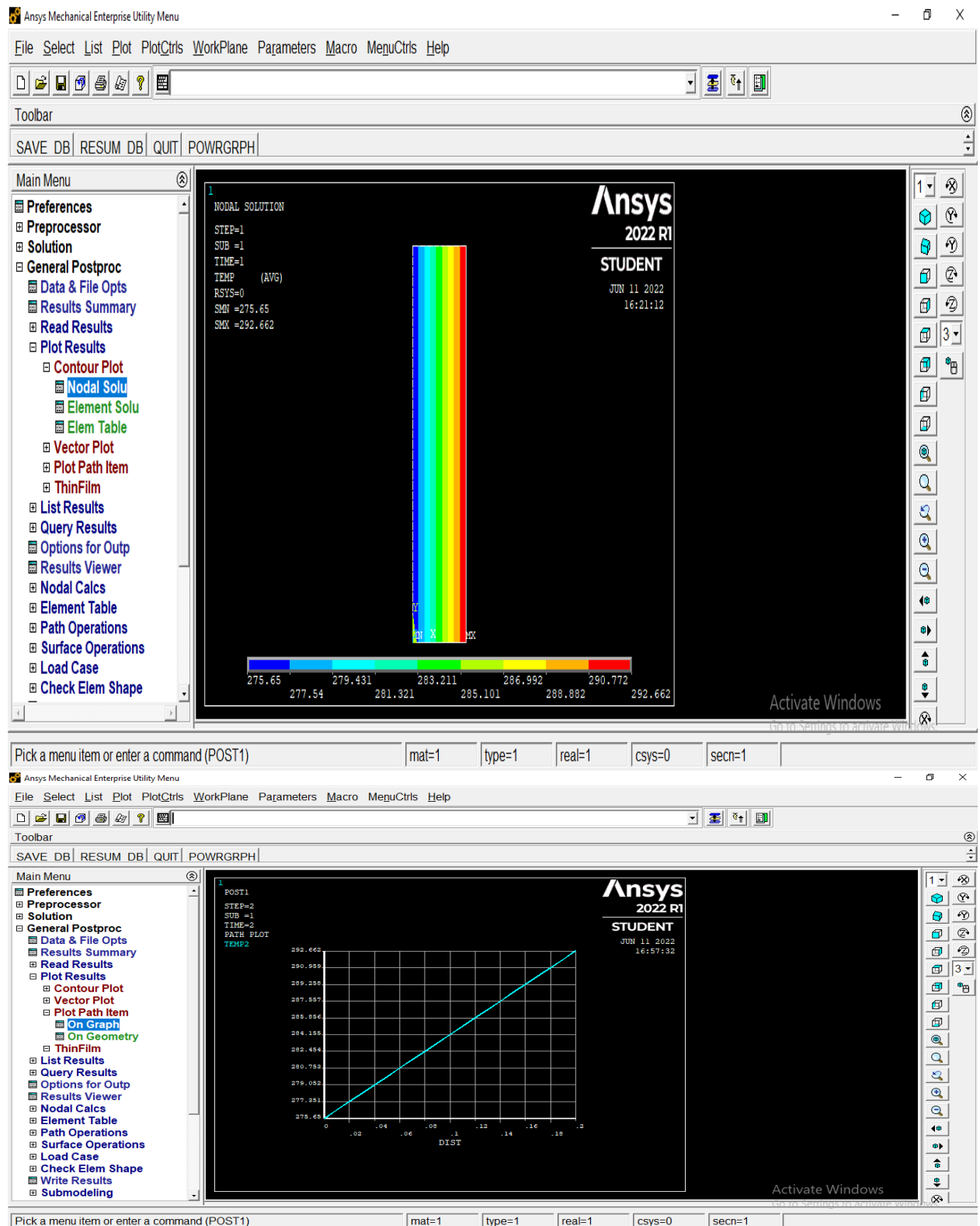
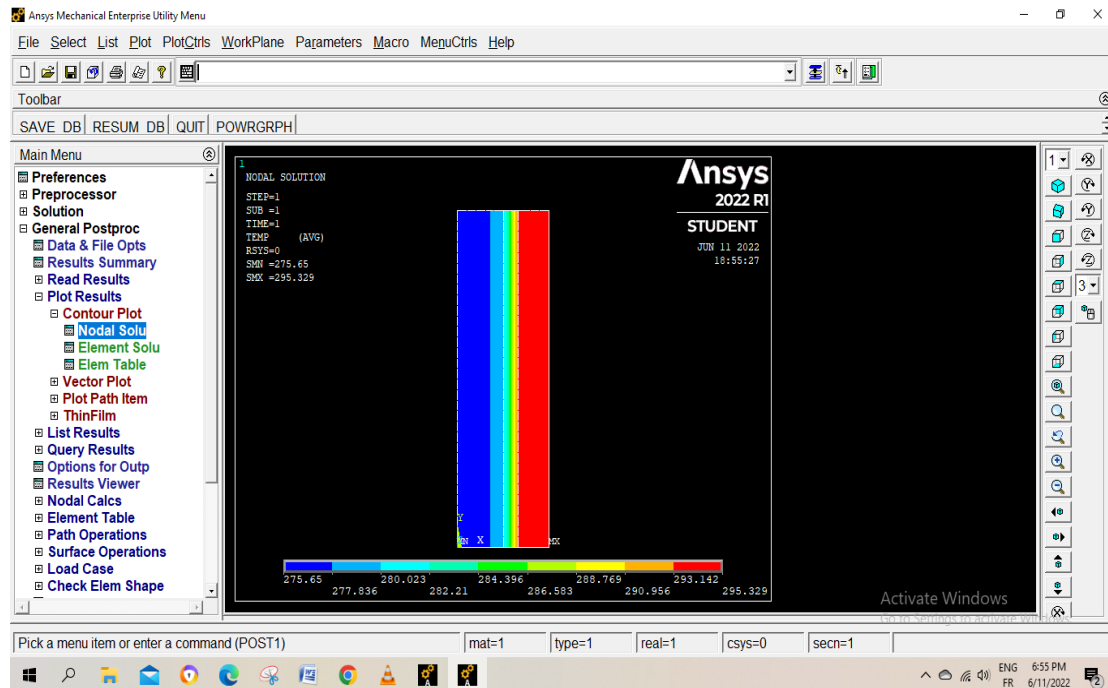


Figure 4-21: contour de température et profil d'hiver

Pour Le mur sans isolation, on remarque toujours que Le flux de chaleur quitte la paroi en brique creuse de 20 centimètre d'épaisseur avec une manière inversée à la période d'été se qui engendre une diminution dans la température ambiante à l'intérieur.

**2eme cas :** un mur composé. (Multicouches) avec des différents types

### Polyuréthane :



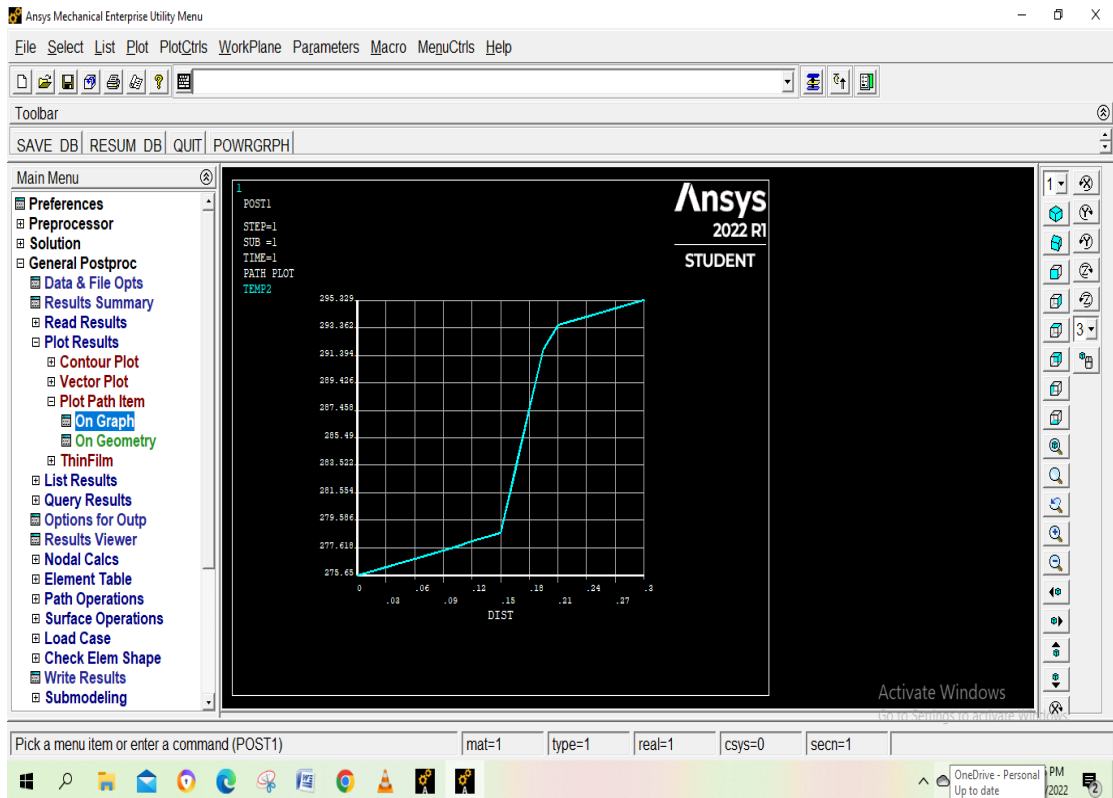
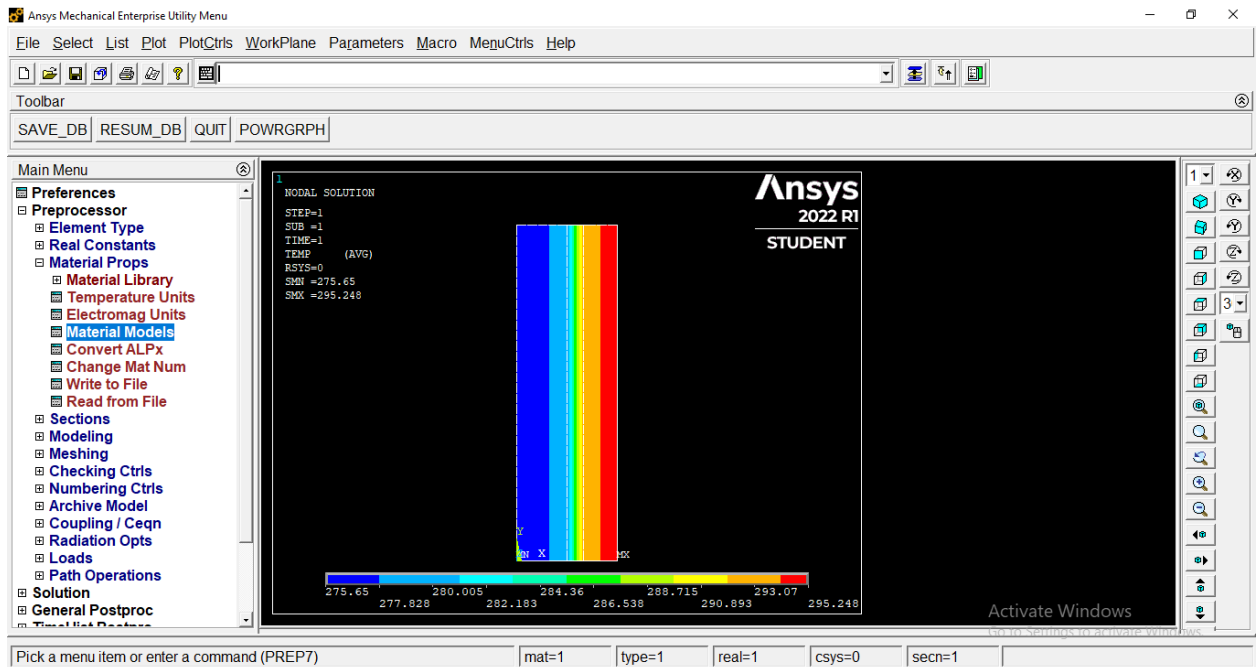
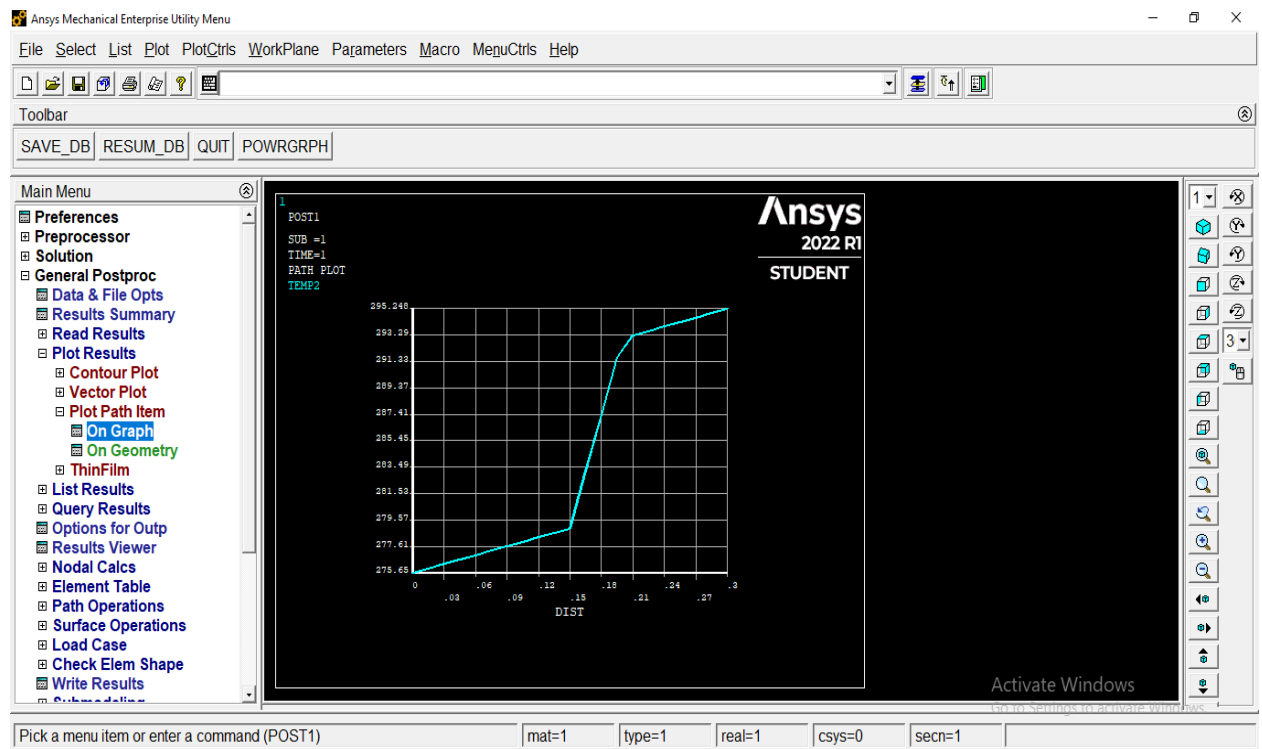


Figure 4-22: contour de température et profil de la laine de verre en hiver<sup>63</sup>

### LAINE DE VERRE :



<sup>63</sup> Source auteur



**Figure 4-23: contour de température et profil de la laine de verre en hiver<sup>64</sup>**

La laine de verre permet de garder la chaleur à l'intérieur avec une différence de 0.2°C par rapport au isolant synthétique polyuréthane, Faible évolution qui favorise sans doute le produit origine naturelle.

<sup>64</sup> Source auteur

## LAINE DE CHANVRE :

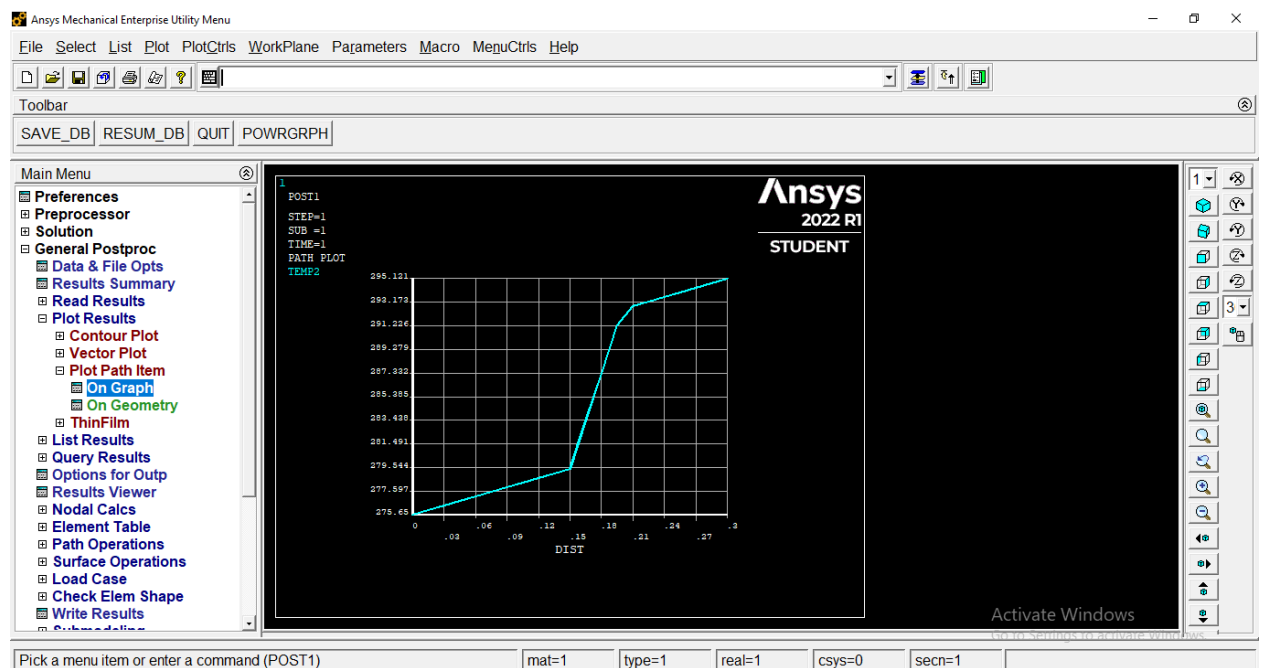
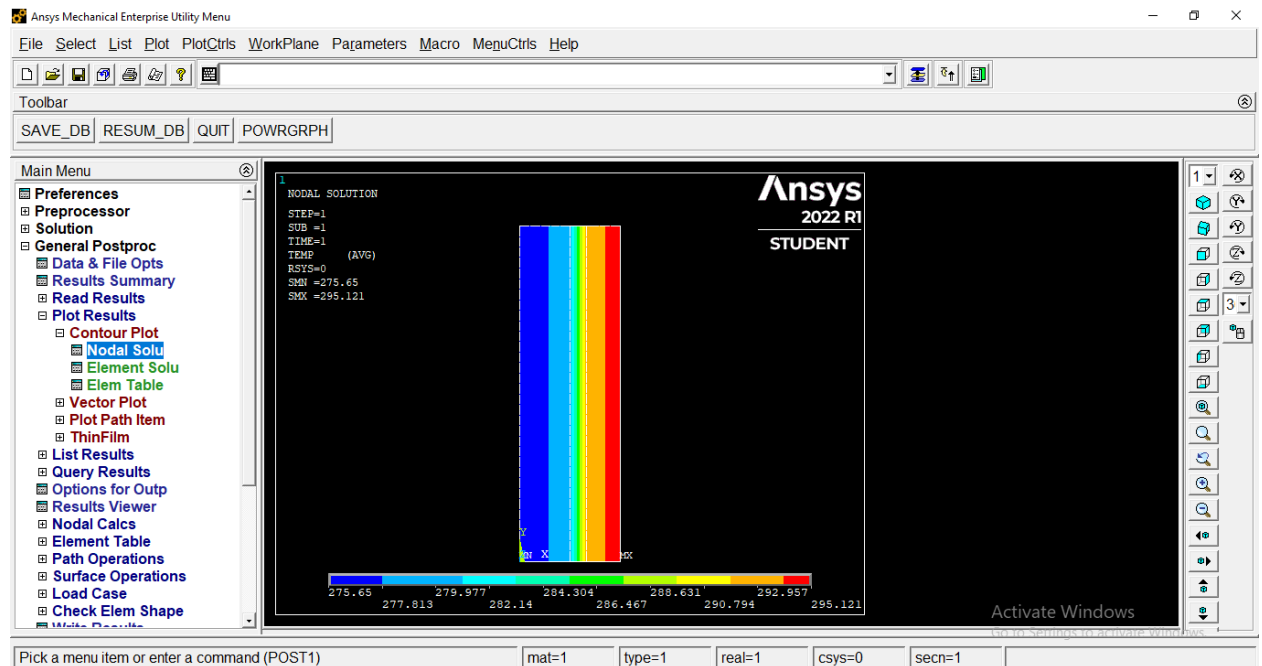


Figure 4-24: contour de température et profil de la laine de chanvre en hiver<sup>65</sup>

La laine de Chanvre présente un obstacle devant la fuite de la chaleur vers l'environnement extérieur avec une différence négligeable par rapport au Polyuréthane, une différence qui ne peut être prise en considération, donc c'est aux autres critères d'influencer sur le choix.

<sup>65</sup> Source auteur

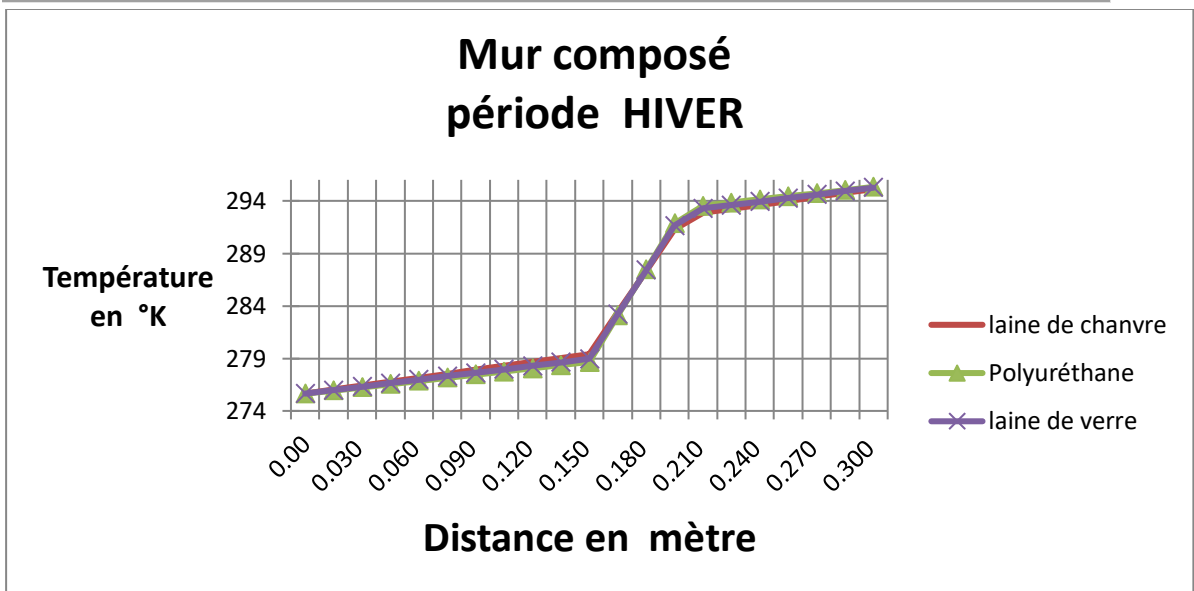
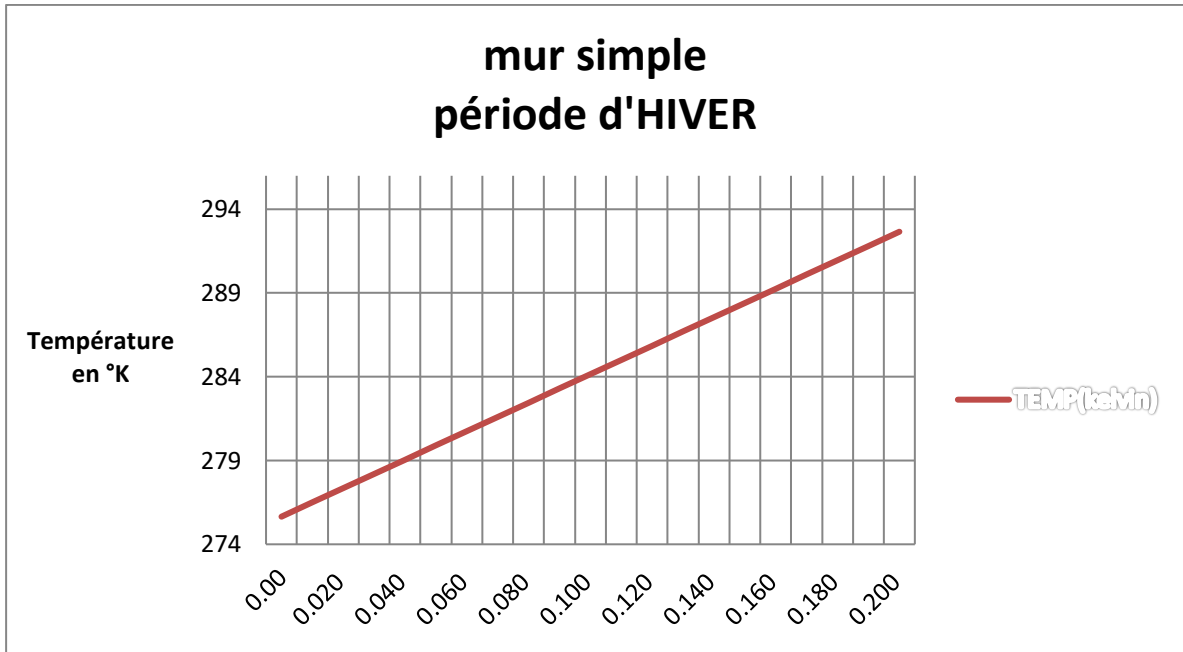


Figure 4-25 mur simple et composé période hiver<sup>66</sup>

<sup>66</sup> Source auteur

**Tableau 4 résultats en hiver**

MUR COMPOSE	laine de chanvre	Polyuréthane	laine de verre	MUR SIMPLE	
distance	temp (kelvin)	temp (kelvin)	temp (kelvin)	DISTANCE	TEMP(kelvin)
0.00	275.65	275.65	275.65	0.00	275.65
0.015	276.03	275.95	275.98	0.010	276.5
0.030	276.4	276.25	276.31	0.020	277.35
0.045	276.78	276.55	276.64	0.030	278.2
0.060	277.16	276.85	276.97	0.040	279.05
0.075	277.53	277.15	277.3	0.050	279.9
0.090	277.91	277.45	277.63	0.060	280.75
0.105	278.29	277.75	277.96	0.070	281.6
0.120	278.66	278.05	278.29	0.080	282.45
0.135	279.04	278.35	278.62	0.090	283.31
0.150	279.42	278.66	278.95	0.100	284.16
0.165	283.37	283.06	283.18	0.110	285.01
0.180	287.33	287.46	287.41	0.120	285.86
0.195	291.29	291.86	291.64	0.130	286.71
0.210	292.86	293.53	293.27	0.140	287.56
0.225	293.24	293.83	293.6	0.150	288.41
0.240	293.61	294.13	293.93	0.160	289.26
0.255	293.99	294.43	294.26	0.170	290.11
0.270	294.37	294.73	294.59	0.180	290.96
0.285	294.74	295.03	294.92	0.190	291.81
0.300	295.12	295.33	295.25	0.200	292.66



Récapitulation du 2eme cas :

En analysant le tableau et les graphes au dessus il est clair de voir le rôle des isolants d'une manier quasi pareil dans l'amélioration du confort thermique en période d'hiver c.à.d. capable d'opposer au flux thermique qui le traverse en quittant l'intérieur, les résultats sont presque identiques alors d'autres critère vont intervenir pour le choix idéal de type d'isolant.

Dans un premier temps, l'énergie thermique est transférée par conduction à travers la paroi du mur en raison de la différence de température entre  $T_{ext}$  et  $T_{int}$ , par conséquent, des valeurs élevées du flux de chaleur sont observés au début du processus du chauffage. Aussi on peut apercevoir que l'amplitude des températures de mur sans isolant est plus importante (+2°C) par rapport aux températures de mur avec isolant.

La présence des matériaux isolant influent sur de la température de la paroi dû à **la résistance thermique**, qui est la capacité du matériau à résister à la transmission de chaleur par agitation de la matière. Ceci montre que l'isolation apporte un autre grand avantage trop souvent ignoré: la température intérieure est plus confortable en toute saison.

## Conclusion :

Les résultats obtenus de comportement thermique de mur avec et sans isolant sont comparés a l'aide de l'outil ANSYS.

Dans cette simulation, les résultats obtenus confirment que la présence de matériau d'isolation permet de jouer un rôle remarquable sur le confort thermique car il est évident que la présence des isolants dans de telle épaisseur mince joue son rôle d'amortisseur thermique et permet d'atténuer les variations de température.

Dans les huit cas testés, avec et sans isolation et suivant les importances relatives données au confort, nous avons montré que l'utilisation des isolants en hiver permet de garder l'intérieur de trois degrés Celsius de plus ce qui reflète une influence a la baisse visible sur le cout et la pollution due au chauffage.

Et même en été la différence de l'ordre d'environ deux degrés procure une diminution dans les frais de climatisation.

En fin La bonne utilisation des matériaux d'isolation thermique conduit inévitablement à réduire la facture thermique, tout en conservant le même niveau de confort thermique, qui est l'une des bases d'une vie décente et adéquate.

## Conclusion générale :

En conclusion, notre étude s'est faite sur deux bases distinctes :

- La comparaison entre la présence et l'absence des isolants dans une paroi.
- La comparaison pendant deux climats différents.

A travers toutes les simulations réalisées il est évident que l'utilisation de matériaux isolants fait une différence tangible en terme de gain en degrés de température en faveur de confort thermique, et cela été démontré par ce travail élaboré.

Le type de matériau isolant thermique ne doit pas être négligé, car il a été noté que le résultat est quasiment le même malgré l'écart de prix évident.

Enfin L'amélioration du confort thermique par intégration des matériaux isolants dans les murs est inévitable, En conséquence, en plus de nombreuses autres méthodes liées à l'amélioration du confort thermique dans les bâtiments, les efforts doivent être concentrés et les visions doit être unifiées pour tenter de transformer la mentalité de la société algérienne quant à l'importance de l'isolation thermique et les orienter vers l'adoption des méthodes utilisées dans les pays développés.

## Bibliographie

ADEME. (2003).

(8996). Dans AFNOR.ISO, « *Détermination de la production de chaleur métabolique* ». Paris.

Alexandroff, G. et J. M. (1982). Dans *Architectures et climats ; Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*. Paris: édition Berger-Levrault.

Amel, B. (November 2016).

(2007). Annabi M. Mokhtari A. Hafrad T.A. Dans *Estimation des performances énergétiques du bâtiment dans le contexte maghrébin*. Alger: revue des Énergies Renouvelables Vol. 9 n° 2.

APRUE et MEM. (2014). Dans *Consommation énergétique finale de l'Algérie*. Alger: APRUE.

Baker, F. (2002). Dans *Haute qualité environnementale du ministère de l'équipement*.

Bekkouche, S.M.A.et al. (2009).

Belakhowsky.S. (1978). Dans *Déperditions calorifiques et isolation thermique des habitations*. Paris: Editions Techniques et vulgarisation.

Belmaaziz.M. (2011- 2012). Dans *Le confort thermique et stratégie thermiques des êtres humains*.

Benlatreche.T. (2006). Dans *Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics*. Constantine: mémoire du magister, université Mentouri.

Bernstein, D. C. (1997).

Bertolo.L, & bourgas.B. (1992). Dans *Données climatiques utilisées dans le bâtiment* (p. 29). Techniques de l'ingénieur, traité génie énergétique, document B 2 015.

Boutaba. (2007).

Capderou, M. (1987). Dans *Atlas solaire de l'Algérie, aspect géométrique, synthèse géographique*. Alger: Editions Office des Publications Universitaires (.).

castin.R et al. (2005). Dans *Complexité du confort thermique dans les bâtiments*. Paris: 6ème congrès Européen de science des systèmes.

Chabane Imane J. (2006). Dans *Évaluation de la qualité vécue des environnements hermétiques*. alger: Mémoire de.

Chabi Mohammed. (juin 2009). Dans *étude bioclimatique du logement social-participatif de la vallée du M'zab : cas du ksar de Tafilelt*. Mémoire de magistère, université de Tizi-Ouzou.

Dans J. Y. Charbonneau, 2004.

Cordier, N. (2007). Dans *développement et évaluation de stratégies de locaux de grandes dimensions* (p. 321). hèse de doctorat.

Cordier, N. (2007).

Coulomb Philippe, H. G. Dans *L'isolation thermique dans la conception et la réalisation des locaux de travail*.

courgey, S. et Oliva, J. P. (2007). Dans *La conception bioclimatique des maisons confortables et économes*. Paris: Edition Terre vivante.

*Définition / polystyrène expansé / futura maison*. (s.d.). Récupéré sur <https://www.futurasciences.com/maison/definitions/maison-polystyrene-expanse-10104/>

Deval, J.-C. (1984). Dans *Le confort thermique en climat tempéré*. France: revue phys. Appl N° 19. laboratoire d'Eco thermique solaire CNRS.

Dumitriu – Valger, E. (1986). Dans *Isolation thermique des constructions en Algérie*. Alger: Entreprise national du livre (ENAL),.

Fernandez, P, et Lavigne, P. (2010). Dans *Changement d'attitude pour concevoir un cadre bâti bioclimatique : une contribution au développement durable, Techniques de construction*. éditions du moniteur.

Fragos, M. et Trouillez. (2012). Dans *Le guide de l'isolation ; Mieux comprendre pour bien choisir*. Paris: Edition Comprendre choisir.com.

Gacem, M. (2010-2011). Dans *Comparaison entre l'isolation thermique extérieure et intérieure d'une pièce d'un habitat situé dans le site de Ghardaia*. mémoire de magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen.

Gallauziaux, T. et Fedullo D. (2010). Dans *Le grand livre d'isolation*. Paris: Edition Eyrolles.

(2012). Dans Gallissot, *Modéliser le concept du confort dans l'habitat intelligent*. France: l'université de grenoble.

Givoni, B. (1978). *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris: Edition le moniteur.

Guignard, S. (2010).

Hegger, M. T. (2011). Dans *Construction et énergie*. Lausanne: Editions Presses polytechniques et universitaires Romandes,.

Himrane Mohamed. Dans *L'isolation thermique c'est l'efficacité énergétique*. PDG de l'EPE Bejaia Liège SPA.

<http://championnonscomestibles.com/perlite-maintenir-humidite>. (s.d.).

<http://www.bienchoisir.fr/peinture/isoler-ses-murs-avec-de-la-peinture-isolante>. (s.d.).

<https://blog.synthesia.com/fr/tout-on-doit-savoir-polyurethane>. (s.d.).

<https://easyamiante.ch/la-vermiculite-positive-a-lamiante/>. (s.d.).

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile\\_expans%C3%A9e](https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile_expans%C3%A9e). (s.d.).

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Li%C3%A8ge\\_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Li%C3%A8ge_(mat%C3%A9riau)). (s.d.).

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_thermique). (s.d.).

<https://gaz-tarif-reglemente.fr/maitriser-sa-consommation/travaux/isolation/materiaux-isolants/isolation-laine-coton.html>. (s.d.).

<https://homenergie.maison-travaux.fr/homenergie/materiaux-et-equipements-home-energie/isoler-murs-linterieur-fp-247653.html>. (s.d.).

<https://homenergie.maison-travaux.fr/homenergie/materiaux-et-equipements-home-energie/isoler-murs-linterieur-fp-247653.html>. (s.d.).

<https://housekeeping.tn/comment-savoir-si-ce-sont-de-bons-double-vitrage-2/>. (s.d.).

<https://isolation.ooreka.fr/comprendre/bloc-bi-matiere>. (s.d.).

<https://isolation-thermique.org/choisir-isolant-thermique/polystyrene-extrude/>. (s.d.).

<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2286-beton-cellulaire.html>. (s.d.).

<https://materiaux-namur.com/magazine/447/la-laine-de-chanvre-un-isolant-polyvalent>. (s.d.).

<https://peinture.ooreka.fr/astuce/voir/637649/peinture-isolante-exterieure>. (s.d.).

<https://sweetseeds.es/blog/fr/como-cultivar-en-fibra-coco/>. (s.d.).

<https://www.acpresse.fr/lisolation-repartie/>. (s.d.).

<https://www.artapisserie.fr/plume-d-oie-plume-de-canard/3039-plumes-de-canard-et-d-oie-melangees-1kg.html>. (s.d.).

<https://www.batiproduits.com/fiche/produits/menuiserie-aluminium-pour-murs-rideaux-wicline-7-p68889858.html>. (s.d.).

<https://www.batiproduits.com/fiche/produits/menuiseries-bois-aluminium-a-aretes-vives-tonu-p68916308.html>. (s.d.).

<https://www.ecosources.org/inertie-thermique>. (s.d.).

<https://www.euradif.fr/conseils/quelles-solutions-contre-les-deperditions-de-chaleur-de-votre-logement/>. (s.d.).

<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/aerogel-aerogel-15326/>. (s.d.).

<https://www.habitatpresto.com/mag/isolation/isolation-ouate-cellulose>. (s.d.).

<https://www.isolation-expert.be/materiaux-isolants/laine-de-roche>. (s.d.).

<https://www.isolation-expert.be/materiaux-isolants/verre-cellulaire>. (s.d.).

<https://www.isolation-info.fr/panneaux-isolants/panneaux-isolants-pur>. (s.d.).

<https://www.lisolation.fr/panneaux-isolants-sous-vide-piv/>. (s.d.).

[https://www.memoireonline.com/06/11/4570/m\\_Le-verre-dans-le-batiment45.html](https://www.memoireonline.com/06/11/4570/m_Le-verre-dans-le-batiment45.html). (s.d.).

[https://www.m-habitat.fr/isolation/materiaux-isolants/prix-de-la-laine-de-verre-4984\\_A](https://www.m-habitat.fr/isolation/materiaux-isolants/prix-de-la-laine-de-verre-4984_A). (s.d.).

<https://www.mon-isolation.pro/bloc-monomur-billes-dargile-expandee/>. (s.d.).

<https://www.plantes-et-sante.fr/articles/on-en-parle/2816-le-lin-une-plante-qui-a-la-fibre>. (s.d.).

<https://www.qcm-svt.fr/>. (s.d.).

<https://www.qcm-svt.fr/>. (s.d.).

<https://www.qualite.bzh/actualites/pourquoi-le-liege-est-le-meilleur-isolant-ecologique-sur-le-marche-03-12-2017-27>. (s.d.).

<https://www.renovermonecole.be/fr/objectifs-bien-etre/confort-thermique-enfants>. (s.d.).

<https://www.samse.fr/isolation-combles-amenageables/isolation-polystyrene-expande>. (s.d.).

<https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/tout-sur-la-brique-monomur-en-terre-cuite/>. (s.d.).

<https://www.toutsurlisolation.com/laine-de-mouton>. (s.d.).

*Isolation\_thermique\_guide\_isover*. (s.d.).

*Laine de mouton : isolant en laine animale - Tout sur l'isolation/*. (s.d.). Récupéré sur <https://www.toutsurlisolation.com/Choisir-son-isolant/Les-isolants/Isolants-en-laines-animales/Laine-de-mouton>.

liébard.A, & herde.A. (2005). Dans I. moniteur (Éd.), *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique* (p. Paris). concevoir,édifieret aménager avec le développement durable.

M.A. Boukli Hacène, N.E. Chabane Sari et B. Benyoucef. (2010). L'Impact Environnemental d'une Habitation Écologique. *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 13, N°4, pp. 545 – 559.

Mazari,M. (2012). Dans *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public, cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou)*. Université Tizi-Ouzou.

Mazouz.S. (2012). Confort thermique.

MEM et APRUE. (2010). Dans *Recueil de textes législatifs et réglementaires sur la maîtrise de l'énergie*.

MEM, M. d. (2011). Dans *Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique*.

Moujalled.B. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique. France: thèse du doctorat, l'institut des sciences appliquées de Lyon.

Roulet, A. C. (2004). Eco-confort pour une maison saine et à basse consommation d'énergie. Suisse: presses polytechniques et universitaires romandes.

Taleb,O. (2020-2021). Dans *Les choix des isolants*. Cours master 1, université abou bekr belkaid Tlemcen.

Teller.J. Notions de confort thermique. université de Liège.

[www.prix-construction.info](http://www.prix-construction.info). (s.d.). Récupéré sur [www.prix-construction.info](http://www.prix-construction.info)