**République Algérienne Démocratique et Populaire**

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

**Université de Médéa**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Mécanique**

# Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Génie civil

Option : Equipement de l'habitat

## THÈME

# Évaluation thermique et économique de l'impact des nouveaux isolants thermiques sur l'économie d'énergie dans des bâtiments

**Présenté par**

IHADDADENE Sarah

KERROUCHE Razika

**Dirigé par**

Dr. TRIKI Zakaria

**Promotion 2018**

# REMERCEMENTS

*Nos remerciements ALLAH le tout puissant qui nous donnons le courage, la force et la volonté pour réaliser modeste travail.*

*Sincère remerciements à notre promoteur Docteur TRIKI Zakaria pour nous avoir conseillé et dirigé pendant la réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements vont également aux enseignants du département de Génie Mécanique pour avoir contribué à nos formations.*

*Nos remerciements vont ensuite aux membres du jury, qui ont accepté de lire, et d'examiner ce mémoire.*

*Pour terminer, nous remercions le lecteur qui se prépare à lire ce mémoire et pour l'intérêt qu'il prêtera à son contenu.*

# *DÉDICACE*

*Avant tout, je tiens à remercier DIEU le tout puissant de m'avoir aidé à réaliser se modeste travail*

*J'ai l'immense plaisir de dédier se travail à:*

*Ceux que j'aime le plus au monde, mes très chers et affectueux parents qui m'encouragent et me poussent toujours vers la réussite, que DIEU les garde et les protège*

*A mes sœurs : Amel, Zineb et Nourelhouda*

*Mes chers frères : Mohamed, Mustapha, Achour, Nourelddine et Azzeddine*

*Et spéciale dédicace a mon marie Hichem*

*Et a toute la famille Kerrouche*

*Ma binôme Sarah*

*A mon promoteur Dr .Triki .Z*

*Je remercie également tous mes ami(e)s, les camarades les étudiant(e)s que je n'ai pas citée et tous ceux qui, de prés ou de loin ont contribue à l'élaboration de ce travaille*

*J'espère que notre mémoire servira de support pour les années à venir.*

*Razika*

# *DÉDICACE*

*Avant tout, je tiens à remercier DIEU le tout puissant de m'avoir aidé à réaliser se modeste travail*

*J'ai l'immense plaisir de dédier se travail à:*

*Ceux que j'aime le plus au monde, mes très chers et affectueux parents qui m'encouragent et me poussent toujours vers la réussite, que DIEU les garde et les protège*

*A ma sœur Siham*

*Mes chers frères : Mourad et Mohamed*

*Et a toute la famille ihaddadene*

*Ma binôme Razika*

*Spécial dédicace a mes chers amies Ratiba, Chaima , Rachida et Soumia*

*A mon promoteur Dr .TRIKI Zakaria*

*Je remercie également tous mes ami(e)s, les camarades les étudiant(e)s que je n'ai pas citée et tous ceux qui, de prés ou de loin ont contribue à l'élaboration de ce travaille*

*J'espère que notre mémoire servira de support pour les années à venir.*

*Sarah*

# SOMMAIRE

Introduction générale……... **1**

**Chapitre I : Généralité sur l'isolation thermique**

I .1. Introduction ……..... **3**
I .2.Définition de l'isolation thermique……..…….. **3**
I .3.le rôle d'isolation thermique……..... **3**
I .4.L'historique de l'isolation thermique…….……... **4**
I .5. Caractéristiques pour un isolant thermique……...……... **5**
I .5.1. Conductivité thermiques …… **5**
I .5.2.Resistance techniques…….……..…….. **5**
I .5.3. La transmission thermique ……..……. **5**
I .6.les parties à isoler……...…… **6**
I .7.Les différents types d'isolants……... **8**
I .7.1. Les isolants traditionnels ……. **8**
I .7.1.1. Les isolants végétaux……... **8**
a. La cellulose ……. **8**
b. La laine de coton ……. **9**
c. Le chanvre ……. **10**
d. Le lin de bois……...…… **11**
e. Le lin ……. **11**
f. Le liège expansé ……..... **12**
I .7.1.2. Les isolants d'origine animale……..... **13**
a. La laine de mouton…….. **13**
b. Laine de plumes de canards …….. **14**
I .7. 1.3. Les isolants minéraux……. **16**

a. La laine de roche ……. **16**

b. La laine de verre …… **16**

I .7.1.4. Les isolants synthétiques……. **17**

a. Le polystyrène expansé ……..... **17**

b. Polystyrène extrudé ……. **18**

c. Le polyuréthane…… **19**

I .7.2. Les nouveaux isolants……... **20**

a. Isolant sous vide (PIV) …… **20**

b. L'aérogel de silice……..... **21**

c. Matériaux à Changement de Phase (MCP)……... **22**

I .8.Conclusion …… **24**

**Chapitre II : Présentation du projet**

II.1.introduction ……..... **25**

II.2.Description du local choisi…… **25**

II.2.1.Situation géographique…….. **25**

II.2.2.Les conditions climatiques de base……..……..... **25**

a. Les conditions extérieures de base …….. **25**

b. Les conditions intérieures de base…… **26**

II.3. Description du local étudié …… **26**

II.4. L'isolation thermique en Algérie……. **27**

II.5. Caractéristiques des isolants choisis ……..... **28**

II.5.1.Le polystyrène expansé …… **28**

II.5.2. liège expansé ……... **29**

II.5.3. Les panneaux de fibres de bois …… **29**

II.5.4. Isolant sous vide …….. **30**

II.5.5. L'aérogel de silice ……..... **31**

II.5.6. L'aérogel de polyuréthane ……..... **31**

II.6.les composants des parois ……. **32**

II.6.1. Mur extérieur avec isolant ……..... **32**

II.6.2. Mur intérieur avec isolant ……..... **33**

II.6.3. Planchers sur terre-plein …….. **34**

II.6.4. Planchers entre l'étage …… **35**

**Chapitre III : Calcul thermique et économique**

III.1.Introduction ……. **36**

III.2.Calcul thermique ……..…… **36**

III.2.1.Calcul de coefficient K…… **36**

III.2.2. Calcul l'épaisseur minimale de l'isolation thermique …… **37**

III.2.3. calcule la déperdition thermique……. **38**

III.3. calcule économique …… **38**

III.3.1.calcule le cout totale …… **38**

III.3.2.Calcule le cout d'isolant thermique …… **39**

III.3.3.Calcule Le cout de la chaleur …….. **40**

III.3.4.exemple de calcule …….. **41**

a) calcule l'épaisseur minimale d'isolation ……..... **41**

b) calcule le cout total et l'épaisseur optimale d'isolation ……..… **43**

III.4. Résultat et discussions ……...… **45**

III.5.Etude comparative des isolants thermiques……. **49**

III.6.Conclusion …….. **50**

Conclusion Générale…… **51**

Références Bibliographiques …….. **52**

# Liste des tableaux

## Chapitre I

Tableaux I.1. Les avantages et les Inconvénients d'Isolation intérieure et extérieure…….. **7**

## Chapitre II

Tableau. II.1. données géographique de la région de Médéa…… **25**
Tableau II.2: Conditions extérieures de base…… **25**
Tableau II.3: Les conditions intérieur de base…….. **26**
Tableau II.4: Cahier de charge de séjour…….. **27**
Tableau II.5: Caractéristiques Techniques de polystyrène expansé……. **28**
Tableau II.6: Caractéristiques Techniques de liège expansé…… **29**
Tableau II.7. Caractéristiques Techniques de panneaux de fibres de bois…… **30**
Tableau II.8. Caractéristiques Techniques d'Isolant sous vide……. **30**
Tableau II.9. Caractéristiques Techniques de L'aérogel de silice……. **31**
Tableau II.10. Caractéristiques Techniques de L'aérogel de polyuréthane…….. **32**
Tableau II. 11. Résistance des différentes couches de Mur extérieur……... **32**
Tableau II. 12. Résistance des différentes couches de Mur intérieur…… **33**
Tableau II. 13. Résistance des différentes couches de Planchers sur terre-plein…….. **34**
Tableau II. 14. Résistance des différentes couches de Planchers entre l'étage……. **35**

## Chapitre III

Tableaux III.1. L'épaisseur minimale de différents types d'isolants pour la paroi extérieure.... **41**
Tableaux III.2. L'épaisseur minimale de différents types d'isolants pour la paroi intérieure…. **41**
Tableaux III.3. L'épaisseur minimale de différents types d'isolants pour planche haut……. **42**
Tableaux III.4. L'épaisseur minimale de différents types d'isolants pour planche bas……... **42**
Tableau III.5. Calcul technico-économique (isolants classiques)…… **43**
Tableau III.6. Calcul technico-économique (nouveaux isolants)…… **44**
Tableaux III.7. Comparaison des différents types d'isolants thermiques…… **49**

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure I.1. Postes de déperditions dans un bâtiment…… **4**
Figure I.2. Transmission de chaleur à travers une paroi…….. **6**
Figure I.3. La cellulose ……... **8**
Figure I.4. La laine de coton…… **9**
Figure I.5. Le chanvre ……. **10**
Figure I.6. le lin de bois……..…….. **11**
Figure I.7. Le lin…….. **12**
Figure I.8. Le liège expansé …… **13**
Figure I.9. La laine de mouton……. **14**
Figure I.10. Laine de plumes de canards …….. **15**
Figure I.11. La laine de roche……. **16**
Figure I.12. La laine de verre …….. **17**
Figure I.13. Le polystyrène expansé ……... **17**
Figure I.14. Polystyrène extrudé ……. **18**
Figure I.15. Le polyuréthane…… **19**
Figure I.16. Isolant sous vide (PIV) …… **20**
Figure I.17. L'aérogel de silice ……... **21**
Figure I.18. Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau ……. **22**

## Chapitre II

Figure II.1.vue sur le séjour de 1 er étage …….. **26**
Figure II.2. Mur extérieur avec isolant…… **32**
Figure II.3. Mur intérieur avec isolant……. **33**
Figure II.4. Planchers sur terre-plein …….. **34**
Figure II.5. Planchers entre l'étage…….. **35**

## Chapitre III

Figure III.1.La variation des déperditions thermique en fonction de l'épaisseur d'isolation … **45**
Figure III.2.variation du cout de polystyrène expansé en fonction de l'épaisseur……..… **46**

# Liste des Figures

Figure III.3. variation du cout de liège expansé en fonction de l'épaisseur……..... **46**
Figure III.4. variation du cout de panneaux de fibres de bois en fonction de l'épaisseur…..…. **47**
Figure III.5. variation du cout d'Isolant sous vide en fonction de l'épaisseur…… **47**
Figure III.6. variation du cout de L'aérogel de silice en fonction de l'épaisseur……..…. **48**
Figure III.7. variation du cout de L'aérogel de polyuréthane en fonction de l'épaisseur……..... **48**

# Nomenclature

| Symboles | Signification | Unité |
|---|---|---|
| **K** | Coefficient de transmission surfacique | W/m². °C |
| **R** | Résistance thermique d'une couche de matériau | $m^2$. °C/W |
| $e_i$ | l'épaisseur de la couche de matériau | m |
| $\lambda_i$ | la conductivité thermique de matériau | W/m. °C |
| $e_{is}$ | l'épaisseur d'isolation thermique | m |
| $\lambda_{is}$ | la conductivité thermique d'isolants. | W/m. °C |
| $e_{op}$ | l'épaisseur optimale d'isolation thermique | m |
| $h_e$ | Coefficient extérieur d'échanges superficiels | W/m². °C |
| $h_i$ | Coefficient intérieur d'échanges superficiels | W/m². °C |
| **ρ** | La masse volumique | $kg/m^3$ |
| $Q$ | la déperdition thermique | W |
| **S** | Surface d'une paroi | $m^2$ |
| **ΔT** | la déférence de température entre l'intérieure est l'extérieure | °C |
| $\mathbf{T_{be}}$ | Température extérieures de bas | °C |
| $\mathbf{T_{bi}}$ | Température intérieures de bas | °C |
| **φ** | Humidité relative | % |
| $C_T$ | Le cout total | DA |
| $\mathbf{C_{is}}$ | Le cout d'isolation thermique | DA |
| $\mathbf{C_c}$ | Le cout de la chaleur | DA |
| $C_s$ | Le cout spécifique de la chaleur | / |
| **P** | Prix d'achat d'isolant thermique | $DA/m^2$ |
| **a** | Facteur d'amortissement | / |

**Résumé:**

L'objectif de ce travail et d'étudier la faisabilité technique et économique de l'utilisation des nouveaux isolants thermique ultra-performantes dans l'habitat dans un objectif d'économie d'énergie.

Une étude comparative sera ainsi menée avec d'autres isolants classiques largement utilisé dans le domaine de la construction des batiments.enfin, une analyse de sensibilité sera effectuée pour étudier l'influence de quelques paramètres sur l'épaisseur et le cout de l'isolation thermiques.

**Mots clés :**

Isolation thermique, nouveaux matériaux, économie d'énergie, étude comparative, étude économique, étude paramétrique.

**ABSTRACT:**

The aim of this work is to study the techno-economic feasibility of using new ultra-efficient thermal insulators in the builing in order to save energy.

A comparative study will be them conducted with other conventional insulants widely used in the field of building construction. Finally a sensitivity analysis will be carried out to study the influence of some parameters on the thickness and cost of thermal insulation.

**Keyword:**

Thermal insulation, new materials, energy saving, comparative analysis, economic study, parametric study.

**الملخص:**

الهدف من هذا العمل هو دراسة الجدوى التقنية و الاقتصادية لاستخدام عوازل حرارية جديدة عالية الاداء في المباني من اجل اقتصاد الطاقة.

من أجل ذالك سيتم اجراء مقارنة مع المواد العازلة التقليدية المستخدمة على نطاق واسع في مجال البناء , و في النهاية سيتم اجراء تحليل الحساسية لدراسة تأثير بعض العوامل على سماكة و تكلفة العزل الحراري .

**الكلمات المفتاحية :**

العزل الحراري , المواد الجديد , اقتصاد الطاقة , دراسة مقارنه , دراسة اقتصادية , دراسة العوامل .

# Introduction Générale

# Introduction générale

Un bâtiment est conçu pour protéger les usagers des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie. Le secteur du bâtiment réputé grand consommateur d'énergie (presque la moitié de la consommation globale) La réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des bâtisseurs qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale.

L'atteinte de ces objectifs conduit a l'apparition de solutions passives, qui ont été développées en augmentant fortement l'isolation des différentes composantes de l'enveloppe pour empêcher au maximum les déperditions de chaleur vers l'extérieur. Ceci explique l'évolution des techniques de construction et le développement de nouveaux matériaux servant a l'isolation thermique et qui peuvent réduire le coût de la construction, d'une part et baisser la facture énergétique, d'autre part.

L'isolation est indispensable au confort thermique des personnes, elle permet également de réalisé d'importantes économie d'énergie. Suite aux crises pétrolière (1973,1979 et 2008) et l'augmentation du prêt de pétrole, on se dirige de plus en plus vers une amélioration de l'isolation des bâtiments existants, avec une diminution des échanges thermique entre l'intérieur et l'extérieure. En plus, refaire une installation de chauffage ne sert a rien si l'isolation de l'enveloppe n'est pas assurée sachant que les déperdition d'un maison non isolée sont assez importantes (25 à 30% par le toit, 15 à 20 % par le sol, 15 à 20% par les murs, 15% par les portes et les fenêtres, 10 à 15% par les ponts thermiques, sans oublier 15 à 20% à cause de renouvellement d'air). L'intérêt d'une bonne isolation est donc de diminuer les déperditions et les besoins énergétiques [1].

Dans ce mémoire, on s'intéressera aux isolants thermiques les plus utilisés de nos jours, à savoir : les isolants minéraux, les isolants synthétiques, les isolants à base végétale, les isolants d'origine animale et les isolants de nouvelle génération. L'objectif de notre étude est de comparer les performances thermiques et économiques de ces isolants (classiques et nouveaux) dans le bâtiment afin de choisir le meilleur isolant thermique du point de vue confort thermique et économie d'énergie.

Ce mémoire se compose d’une introduction générale, et trois chapitres et une conclusion. Dans le premier chapitre, on présentera l’isolation thermique dans le bâtiment d'une manière générale. Le deuxième chapitre sera consacré à la description du local choisi pou l'étude ainsi que les matériaux de base pour le processus de construction.

Dans le troisième chapitre, un calcul thermique et économique sera effectué pour déterminer l'épaisseur optimale de chaque type d’isolant, et faire une comparaison entre les différents isolants afin de ressortir l’isolant thermique le plus performant.

# Chapitre I

# Généralité sur l'isolation thermique

## I .1. Introduction :

L'isolation thermique permet à la fois de réduire les consommations d'énergie de chauffage et/ou de climatisation et d'accroître le confort thermique. Elle est également bénéfique pour l'environnement car, en réduisant les consommations, elle permet de préserver les ressources énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes de protection de l'environnement, de confort et d'économies financières.

Dans ce chapitre, on va présenter des généralités sur l'isolation thermique des bâtiments, et quelques types d'isolants thermiques.

## I .2.Définition de l'isolation thermique :

L'isolation thermique est une « barrière à chaleur », elle vise à conserver la chaleur (ou la fraîcheur) a l'intérieur des espaces de vie. Elle empêche la chaleur de s'évacuer des logements chauffés en hiver et de pénétrer a l'intérieur en été. Une bonne isolation augmente le confort thermique et permet de faire des économies importantes en énergie, l'investissement dans domaine d'isolation très souvent amorti en quelque année mais en effet environ la moitié de la facture énergétique est le siège de déperdition dans toutes les surfaces en contact avec l'extérieur et des pièces non chauffées.

En général, l'isolation thermique des bâtiments désigne l'ensemble des moyens mis œuvre pour limité les transferts des calories et frigories entre le milieu intérieur et le milieu extérieur d'un bâtiment, ou en d'autres termes l'isolation et calorifuges sont définis comme les matériaux qui retardent transmission d'énergie calorifique [2].

## I .3.Rôle d'isolation thermique :

Un bâtiment mal isolé laisse s'échapper la chaleur en hiver et perd rapidement sa fraîcheur en été. Une mauvaise isolation thermique des murs peut faire perdre jusqu'à 25% de la chaleur du logement, ce chiffre atteignant 30% pour une isolation des combles faible ou inexistante. Grâce à une isolation performante, les factures de chauffage ou de climatisation liées à ces déperditions thermiques baissent drastiquement.

Ainsi, effectuer des travaux d'isolation thermique permet de réduire jusqu'à 80% les consommations d'énergie liées au chauffage. En limitant les besoins en énergie du logement, l'isolation thermique est l'accès principal aux économies d'énergie, bien avant le renouvellement des équipements de chauffage et/ou de refroidissement du logement [3].

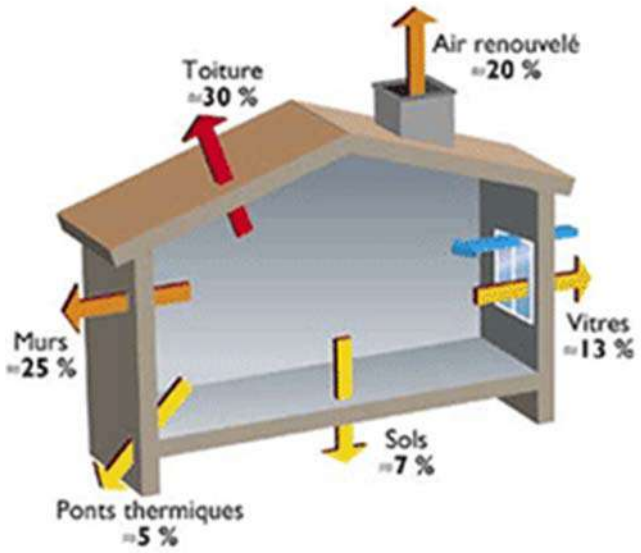



**Figure I.1. Postes de déperditions dans un bâtiment [4].**

## I .4. Historique de l'isolation thermique

### 1.4.1. Cas des maisons anciennes

Pour les constructions antérieures à 1974, aucune obligation d'isoler n'était imposée. Il en résulte que ces maisons étaient rarement isolées à la construction. Pour réaliser l'isolation des maisons anciennes, un diagnostic au cas par cas est indispensable pour choisir la solution d'isolation la plus appropriée. Elle tiendra compte de la nature des parois (maison à ossature bois, colombages, murs à remplissage, toiture en chaume). L'isolation thermique ne doit pas entraîner de désordres ni de dégradation des parois, dus à un choix d'isolation inadaptée. Une bonne isolation va de pair avec une bonne ventilation.

### 1.4.2. Règlementation thermique des bâtiments neufs (RT 2005)

Depuis 1974, une réglementation thermique est applicable à tous les bâtiments neufs. Une nouvelle réglementation est applicable depuis le 1 septembre 2006 : la RT 2005. Ces réglementations successives visent à réduire au-delà de 50 % les consommations d'énergie des logements neufs.

### 1.4.3. Règlementation thermique des bâtiments existants (RT dans l'existant)

Depuis novembre 2007, la réglementation thermique encadre les travaux que les particuliers entreprennent dans leur logement. Elle n'oblige pas à les réaliser mais fixe des performances à respecter, en particulier pour diminuer les besoins en énergie d'un logement en l'isolant [4].

## I .5. Caractéristiques pour un isolant thermique

Les trois modes de transfert de chaleur entrent en jeu dans la thermique du bâtiment. La conduction thermique est en revanche prépondérante dans le transfert de chaleur à travers une paroi. Trois paramètres permettent de caractériser un matériau et une paroi isolante [3]

### I .5.1.Conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique traduit la propriété qu'ont les corps a transmettre la chaleur par conduction. Elle correspond au flux de chaleur qui traverse en 1 seconde un matériau d'une surface de 1m² et de 1m d'épaisseur pour un écart de température de 1°C entre les 2 faces. Elle est désignée par le coefficient (λ) et exprimée en [W/m.K]. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant [5].

### I .5.2.Résistance thermique (R)

La résistance thermique d'un matériau traduit sa capacité a résister a la transmission de chaleur. Elle dépend de l'épaisseur du matériau en mètre et de sa conductivité thermique (λ):

$$R = e/\lambda \qquad \textbf{(I.1)}$$

Elle est désignée par le coefficient R et exprimée en [m². °C/W].

La résistance thermique totale d'une paroi est égale à la somme des résistances thermiques de chacune des couches de matériau qui la constitue [5].

$$R_{paroi} = Rmateriau1 + Rmateriau2 + \ldots \qquad \textbf{(I.2)}$$

Plus la résistance thermique est élevée, plus la paroi considérée est isolante.

### I .5.3.La transmission thermique (K) :

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

$$K = 1/\Sigma R + R_{si} + R_{se} \qquad \textbf{(I.3)}$$

Ce coefficient est exprimé en [W/m². °C] [5].

$R_{si}$ et $R_{se}$ est égal à la somme des résistances thermiques superficielles internes et externes. Plus le coefficient (K) d'un élément de construction est faible, meilleure est l'isolation thermique.

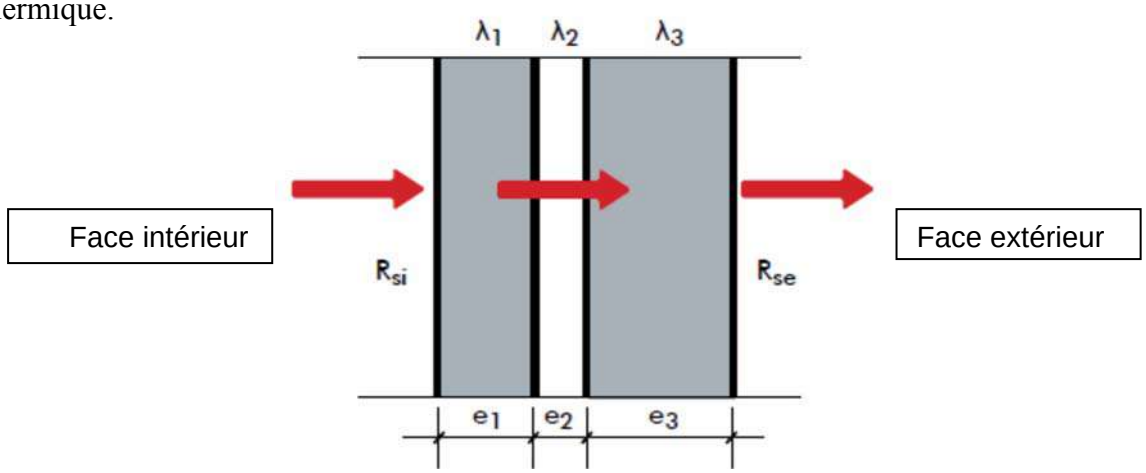



**Figure I.2. Transmission de chaleur à travers une paroi [6].**

## I.6. Parties à isoler

Chaque élément d'une habitation nécessite des aménagements spécifiques en termes d'isolation thermique. Sans une bonne isolation, l'air chaud monte, s'accumule en hauteur et s'échappe hors de la maison [7].

### a) Les combles et la toiture

On estime que 30 % des déperditions de chaleur se font par la toiture. Isoler les combles et le toit présente donc tous les avantages : l'isolation est plus facile à réaliser et plus rentable. Elle constitue également un bon investissement

. De plus, isoler une toiture est, sauf exception, plus facile que d'isoler les murs ou les sols. Il existe trois types de toiture : les toitures sur combles perdus, c'est-à-dire non habitables, les toitures sur combles habitables et les toitures de type « toit-terrasse ». Chacune demande une isolation spécifique [7].

### b) Les murs

On estime que 20 % à 25 % de la chaleur d'une habitation s'échappe par les murs. C'est la deuxième source de perte de chaleur après la toiture : leur isolation est donc une nécessité. Les façades nord sont à isoler en priorité, car elles sont moins exposées au soleil ; tandis que celles situées à l'ouest, davantage exposées aux pluies, méritent une protection supplémentaire contre l'humidité. Pour évaluer l'isolation des murs, il est nécessaire de faire réaliser un bilan thermique. Vous pouvez isoler vos murs par l'intérieur ou l'extérieur [7].

| | Isolation intérieure | Isolation extérieure |
|---|---|---|
| **Avantages** | • Préservation de l'aspect extérieur | • Continuité de l'isolation<br>Évitement de potentiels ponts thermiques<br>• Aucune perte de place à l'intérieur<br>• Préservation de l'inertie thermique |
| **Inconvénients** | • Diminution du volume Intérieur<br>• Diminution de l'inertie Thermique<br>• accentuation des ponts thermiques | • Modification de l'aspect extérieur<br>• Nécessité dans de nombreux cas d'un permis d'urbanisme |

**Tableaux I.1. Avantages et inconvénients de l'isolation thermique interne et externe [7].**

**c) Les fenêtres et les portes**

On estime que 13 % à 20 % de la perte totale de chaleur d'une habitation s'effectue par les fenêtres et les portes mal isolées. Leur rénovation est donc non seulement agréable d'un point de vue esthétique et acoustique, mais elle est également très efficace sur le plan thermique [7].

d) **Le sol et le plancher**

Le revêtement des sols (moquette, parquet) constitue déjà un isolant, mais il est possible de l'améliorer. Les solutions sont différentes selon que votre plancher se situe au-dessus d'une cave ou d'un local non chauffé, d'un vide sanitaire (circulation d'air) accessible, d'un vide sanitaire non accessible ou d'un terre-plein (aucun air ne circule sous le sol) [7].

e) **La cheminée et le feu**

Les matériaux isolants sont aussi évalués selon leur réaction et leur résistance au feu. Ces critères doivent être pris en compte lors de l'isolation d'un conduit de cheminée [7].

f) **Les ponts thermiques**

Les ponts thermiques sont responsables de 5 % à 25 % des déperditions de chaleur d'un bâtiment [7].

## .I .7. Différents types d'isolants:

Un isolant thermique se doit de répondre à toutes les exigences proposées par une architecture, un environnement donné et un confort de vie souhaité. Tous les isolants n'ont pas les mêmes propriétés, et certains sont mieux adaptés suivant les situations rencontrées [3].

### I .7.1. Les isolants traditionnels

#### 1.7.1.1 Les isolants végétaux :

**a) La cellulose :**

La cellulose provient du papier recyclé, qui lui même vient du bois. Ce recyclage demande peu d'énergie. Le papier est broyé afin d'être défibré, puis floconné et enfin il est mélangé à du sel de bore afin de l'ignifuger et de le rendre résistant aux insectes [8].



**Figure I.3. La cellulose [09].**

- **Domaines d'utilisation**

La ouate de cellulose sous forme de panneau ou en vrac, est utilisée comme isolant thermique des murs, planchers, combles perdus, rampants. Sa mise en œuvre est adaptée aussi bien pour des constructions traditionnelles que dans la construction neuve [8].

- **Avantages**

- Bonne étanchéité à l'air,
- Coût abordable,
- Durée de vie importante (30 ans),
- Respecte la RT 2012,
- Bonne stabilité si la mise en œuvre est adaptée,
- Bonne contribution au confort d'été selon la densité
- Provient de produit recyclé
- Sans effet négatif sur la santé [8].

- **Inconvénients**

- Produit qui dégage beaucoup de poussières et de fibres, de sel de bores et d'autres composants comme des résidus d'encre,
- Sensible aux tassements (pour la ouate de cellulose en vrac),
- Craint l'humidité [8].

**b) La laine de coton**

Le coton est la plus importante fibre Végétale naturelle produite dans le monde. Il représente la première fibre textile mondiale. Les vêtements usagés ont collectés par conteneurs, triés puis défibrés. Les fibres obtenues sont fixées par passage dans un four à 170°C. La laine de textile est généralement composée de 70 % de coton, de 15 % de laine et de 15 % de polyester. La laine de coton est lavée, effilochée puis ignifugée et traitée contre les rongeurs, insectes et moisissures.



**Figure I.4. La laine de coton [10].**

Elle peut être mélangée à de la laine de mouton ou du Polyester pour servir de liant entre les fibres. Sa densité en fait un isolant thermique très Performant. De plus, il reste très économe en consommation d'eau et d'énergie lors de sa fabrication [8].

- **Domaines d'utilisation**

Il est utilisé comme matériau d'isolation des combles, murs, rampants, des toitures et des planchers [8].

- **Avantages**

- Durée de vie : 100 ans
- Très bon isolant thermique
- Bon régulateur hygrothermique
- Matériau renouvelable
- Matériau sain qui ne pose pas de problème de santé à la pose,
- Ne contient pas de sel de bore
- Matériau réutilisable
- Pas de dégagement toxique en cas d'incendie et en cours d'utilisation [8].

- **Inconvénients**

- Découpage dans la longueur très difficile
- Coût relativement élevé
- Tassement en isolation verticale.
- Inflammable [8].

**c) Le chanvre**

Le chanvre est une plante annuelle d'origine végétale utilisée depuis près de1000 ans en France. Le chanvre est un matériau qui peut être mis en œuvre seul ou avec d'autres matériaux comme le lin, la chaux, le sable, la terre, le béton…

La laine de chanvre est issue de la fibre contenue dans la tige.



**Figure I.5. Le chanvre [10].**

La paille de chanvre est séchée et découpée, pour former des tranches de différentes tailles. Les fibres de chanvre sont ensuite défibrées mécaniquement, affinées, calibrées puis thermo liées avec d'autres fibres servant de liant. La cuisson en four à 1300°C permet aux fibres naturelles et synthétiques de se coller entre elles. Les fibres de faible densité seront utilisées pour la confection de rouleaux, et les plus fortes pour la confection de panneaux [8].

- **Domaines d'utilisation**

La laine de chanvre peut être utilisée comme isolant à part entière, en complément d'isolation ou bien pour l'isolation phonique uniquement. Dans la restauration des bâtiments anciens ou dans la construction neuve pour : l'isolation sous toiture, combles rampants et murs (rouleaux et panneaux), l'isolation des sols, cloisons et plafonds [8].

- **Avantages**

- Inertie naturelle correcte pour l'habitation
- Matière brute naturelle et sans danger pour la santé ou l'environnement
- Pas de dégagements toxiques en cas d'incendie ou au cours de son utilisation
- Matériaux stockeur de CO2,
- Energie grise faible,
- Recyclage et compostage [8].

- **Inconvénients**

- Inflammable sensible à l'humidité. Matériau hygroscopique
- Présence de fibres polyester,
- Découpage difficile dans la longueur [8].

**d) La laine de bois**

Le bois comme isolant se présente également sous différentes formes: laine de bois (panneau Semi-rigide, en vrac…), panneau de fibres de bois rigides ou encore des (fibres de bois avec enrobage de plâtre et ciment). Les déchets des scieries sont la matière première d u panneau de bois. Les fibres sont pressées et séchées pour donner des produits à fibres tendres ou dures. La fabrication se fait naturellement, produit ajouté. Ces panneaux peuvent être posés pour la toiture, les murs [8].



**Figure I.6. Les panneaux de fibres de bois [10].**

- **Domaines d'utilisation**

Les panneaux de laine de bois s'utilisent dans la restauration des bâtiments traditionnels et dans les constructions neuves : pour l'isolation des murs par l'intérieur ou l'extérieur, des plafonds, des combles et des planchers [8].

- **Avantages**

- Matériau sain
- Ne provoque pas d'irritations cutanées
- Matériau 100 % naturel et non polluant
- Durabilité dans le temps,
- Bon isolant thermique [8].

- **Inconvénients**

- Coût relativement élevé.
- Traitements préventifs [8].

**e) Le lin**

Le lin est une plante annuelle naturelle souple et fine cultivée traditionnellement en plaine. C'est une plante originaire d'Orient et facilement renouvelable. Le lin est semé de la mi-mars à la mi-avril et sa durée de végétation est de 100 jours. Durant la moisson, le lin n'est pas coupé mais arraché puis séché in situ pendant 3 à 8 semaines : le rouissage.

Les fibres de lin sont ensuite cardées, thermo liées puis aiguilletées afin de former des panneaux semi-rigides et souples composés de 60 % de fibres de lin et 40 % de fibres polyester [8].



**Figure I.7. Le lin [9].**

- **Domaines d'utilisation**

Il sert à la réalisation de cloisons, de doublages et de murs à ossature bois (application verticale) sous forme de panneaux, d'isolant toiture et combles, de laine, de murs porteurs, de béton [8].

- **Avantages**

- Matériau réutilisable,
- Matériau sain et 100 % naturel,
- Pas de dégagements toxiques lors de la mise en œuvre,
- Matériau facile à mettre en œuvre,
- Régule l'humidité, la chaleur et la fraîcheur,
- Bonne durabilité et bonne stabilité si mise en œuvre adaptée,
- Performance acoustique intéressante [8].

- **Inconvénients**

- Présence de fibres polyesters dans la laine de lin,
- Risque de tassement en isolation verticale.
- Matériau sans traitement [8].

**f) Le liège expansé :**

Le liège expansé ou « liège noir » est issu du chêne liège de méditerranée d'au moins 30 ans d'âge. Pour sa fabrication, seule l'écorce est utilisée. La récolte se fait tous les 7 ou 8 ans.

Une fois l'écorce du chêne liège récoltée, elle est réduite en granules. Ces dernières sont chauffées à 300°C avec de la vapeur d'eau pour qu'elles se dilatent et s'agglomèrent entre elles Les granules de l'écorce du liège se collent alors grâce à l'action de leur propre résine (la subérine). Il est utilisé depuis plus de 150 ans en isolation thermique [8].

- **Domaines d'utilisation :**

Le liège expansé s'utilise aussi bien dans la construction neuve que dans la restauration de bâtiments traditionnels. On l'utilise pour les murs et les combles ainsi que pour l'isolation des sols, sous dalles, des planchers, des doubles-cloisons. Pour les supports de couverture et pour les rampants, on utilisera le liège expansé sous forme de panneau rigide [8].



**Figure I.8. Le liège expansé [9].**

- **Avantage :**

- Très bon isolant phonique,
- Matériau 100 % naturel,
- Nécessite peu de consommation d'énergie liée à la fabrication,
- Découpe facile,
- Assure un confort d'été,
- Très grande durabilité,
- Bonne stabilité dimensionnelle et résistance à la compression traitée [8].

- **Inconvénients**

- Coût relativement élevé [8].
- Faible capacité hygroscopique
- Ressource renouvelable, mais d'assez faible disponibilité,
- Mise en œuvre entre chevrons à éviter, à cause des ponts thermiques difficiles à traiter

### I .7.1.2. Les isolants d'origine animale :

#### a) La laine de mouton

La laine de mouton est un matériau naturel, transformé. Elle possède des caractéristiques bénéfiques à l'isolation thermique et phonique des bâtiments. La laine de mouton est fabriquée à base de laine de moutons d'élevage. En effet, les moutons sauvages possèdent une laine de moindre qualité que les moutons d'élevage car celle-ci est plus courte. Après la tonte, la laine est lavée pour lui retirer toutes les impuretés. On procède ensuite au triage, au cardage (démêlage), puis on forme un matelas.

L'isolant en laine de mouton est composé de 80 % de fibres de laine, et de 20 % de fibres polyester thermo fusibles lorsqu'il est conditionné en panneaux ou en rouleaux [8].



**Figure I.9. La laine de mouton [10].**

- **Domaines d'utilisation**

La laine de mouton est utilisée dans la restauration de bâtiments anciens, ou dans les constructions neuves :

- Sous forme de panneaux semi rigides pour l'isolation acoustique des sous planchers,
- Sous forme de rouleaux pour l'isolation des combles perdus, des rampants des toitures, ou pour l'isolation des parois verticales,
- Sous forme de laine en vrac pour l'isolation des combles et des vides de construction grâce à une souffleuse-cardeuse [8].

- **Avantages**

- Matériau naturel
- Ne représente aucun danger pour la santé
- Ne se tasse pas
- Evite les ponts thermiques, grâce à un « gonflant » naturel
- Ne s'enflamme qu'à partir de 560 °C
- Générateur d'électricité statique [8].

- **Inconvénients**

- Dégage une légère odeur
- Ne convient pas en milieu humide [8].

**b) Laine de plumes de canards**

D'origine animale, la laine à base de plumes de canards peut être identifiée comme un produit isolant. La laine est composée de 70 % de plumes, reconnues pour leurs performances thermiques. À ces 70 % de plumes animales, sont ajoutées d'autres matières :

- 20 % de polyester thermo fusible,
- 10 % de laine de mouton.

Les plumes sont tout d'abord lavées et dégraissées, puis traitées antifongiques et antimites. On incorpore ensuite la laine de mouton, traitée elle aussi antimites, dégraissée et éliminée de ses composants organiques. On lave et on sèche enfin l'ensemble. Grâce à la présence des fibres de polyester Thermo fusible, le liage entre chaque composant va pouvoir être effectué. Le chauffage permettra alors de lier les fibres.



**Figure I.10. Laine de plumes de canards [10].**

La laine de plumes de canards est revêtue d'une face par un voile en polyester micro perforé, perméable à la vapeur d'eau [8].

- **Domaines d'utilisation**

La laine de plumes de canards est utilisée dans les constructions neuves comme dans la restauration de bâtiments plus anciens :

Combles non-habitables en pose sur plancher, Dalles ou entre les solives, Plafonds, Murs, Sols, Habitations à ossature bois [8].

- **Avantages**

- Pas de danger pour la santé,
- Valorise les déchets d'abattoirs,
- Grande perméabilité,
- Diffuse la vapeur d'eau,
- Pas de dégagements toxiques en cours d'utilisation, ou en cas d'incendies [8].

- **Inconvénients**

- Découpage dans la longueur très difficile,
- Coût relativement élevé,
- Tassement en isolation verticale [8].

**I .7.1.3. Les isolants minéraux :**

**a) La laine de roche** :

Les fibres de la laine de roche sont obtenues par la fonte de la roche diabase. Elles sont liées à l'aide de résines synthétiques polymérisées pour former des rouleaux et des panneaux. Ceux-ci peuvent présenter différentes rigidités et finitions de surface. La laine de roche a une composition non uniforme [8].



**Figure I.11. La laine de roche [9].**

- **Domaines d'utilisation**

Elle sert à la réalisation des murs, des cloisons, des toitures, des combles perdus ou aménagés, Des planchers, des cheminées, des bardages, des gaines techniques [8].

- **Avantages**

- Durée de vie de 50 ans,
- Matériau certifié,
- Conserve sa rigidité dans le temps,
- Facile à découper,
- Bonne isolation thermique et phonique pour un coût abordable [8].

- **Inconvénients**

- Provoque des démangeaisons et irritations de la peau lors de la pose. Il est nécessaire de porter un masque, des gants et lunettes hermétiques
- Recouvrir les surfaces isolées par des panneaux hermétiques
- Difficilement recyclable du fait de la présence de résines phénoplastes,
- Faible inertie [8].

**b) La laine de verre :**

Les fibres de la laine de verre sont obtenues par la fonte de verre et de sable quartzeux. Elles sont traitées par un produit hydrofuge. Elles sont liées à l'aide d'un produit thermo durcissant pour former des rouleaux et des panneaux.

Ceux-ci peuvent présenter différentes rigidités et finitions de surface. La laine de verre a une composition uniforme [8].

- **Domaines d'utilisation**

Elle sert à la réalisation des murs, des cloisons pour les toitures, combles perdus ou aménagés et les planchers [8].



**Figure I.12. La laine de verre [9].**

- **Avantages**

- Bon isolant thermique et acoustique
- Bonne résistance au feu,
- Imputrescible [8].

- **Inconvénients**

- Toxicité
- Durée de vie de 10 ans
- Faible densité et faible inertie,
- Difficilement recyclable,
- Nécessite des précautions lors de la mise en œuvre [8].

**I .7.1.4. Les isolants synthétiques**

**a) Le polystyrène expansé :**

Le polystyrène expansé est fabriqué au moyen d'hydrocarbure (styrène) expansé à la vapeur d'eau et présente donc une structure à pores ouverts. Le polystyrène extrudé est soumis à un agent gonflant sous pression qui lui confère une structure à pores fermés. Il se présente sous différentes formes : en vrac, en panneaux ou élément préfabriqués [11].



**Figure I.13. Le polystyrène expansé [10].**

- **Domaines d'utilisation**

Les panneaux de polystyrène destinés aux toitures plates sont surfacés d'un revêtement synthétique ou d'un voile de verre bitumé sur les deux faces, destinés à faciliter les liaisons avec les couches inférieures et supérieures [5].

- **Avantages**

- Bonne capacité d'isolation
- Perméabilité a la vapeur d'eau
- Matériau très léger
- Résistance mécanique élevée
- Facile a travailler
- Économique [10].

- **Inconvénients**

- Isolation acoustique médiocre
- Longévité faible
- Mode de Fabrication polluant
- Dégagement de gaz toxiques en cas d'incendie [10].

**b) Polystyrène extrudé :**

Il est fabriqué comme le polystyrène expansé. C'est un matériau assez léger.

Le Polystyrène extrudé peut être utilisé comme support faïence avec une armature en fibre de verre. Le polystyrène extrudé possède un haut pouvoir isolant thermique [11].



**Figure I.14. Le polystyrène expansé [10].**

- **Domaines d'utilisation**

Se forme de panneaux de couleur bleu, le polystyrène extrudé est utilisé pour l'isolation de la toiture (plate) et des sols [5].

- **Avantages**

- Meilleure performance d'isolation que le polystyrène expansé
- plus résistant a la compression et a l'humidité que le polystyrène expansé
- matériau très léger
- résistance mécanique élevée
- facile à travailler [10].

- **Inconvénients**

- Isolation acoustique médiocre
- Plus cher que le polystyrène expansé
- Mode de fabrication polluant
- Dégagement de gaz toxiques en cas d'incendie [10].

**c) Le polyuréthane**

Le polyuréthane est un isolant synthétique. Il est composé de cellules alvéolaires résultant d'une réaction chimique. Son application rigide est utilisée sous forme de panneaux nus ou recouverts de bitume ou d'aluminium isolants pour le bâtiment. Il est également placé sous forme de mousse en remplissage ou injection directe. De par sa polyvalence, cette texture est particulièrement indiquée dans la rénovation de bâtiments anciens [11].



**Figure I.15. Le polyuréthane [7].**

- **Domaines d'utilisation**

En panneaux, il est utilise en isolation de chapes et en isolation extérieure. Il peut également s'utiliser sous la forme d'une mousse pour les joints de calfeutrement ou en manchons pour isoler les tuyaux [5].

- **Avantages**

- Bonne capacités d'isolations thermique et acoustique
- Résistance mécanique élevée
- Bonne résistance a l'humidité
- Cout assez faible [10].

- **Inconvénients**

- Longévité faible
- Irritations possibles par contact
- Dégagement de gaz toxiques en cas d'incendie

- Non recyclable [10].

### I .7.2. Les nouveaux isolants :

Développés depuis quelques années, ce sont des isolants possédant d'excellentes propriétés thermiques très en-deçà de la conductivité thermique de l'air immobile. On retrouve ici les panneaux isolants sous vide, dits PIV, et l'aérogel de silice, un matériau de changement de phase [3].

#### a) Isolant sous vide (PIV) :

Nouvelle génération d'isolants et de haute qualité, le panneau isolant sous vide (PIV) possède une très faible conductivité thermique alliée à une performance surpassant certains isolants classiques. Caractéristiques, prix ou encore contraintes de pose, vous en saurez plus sur ce matériau de plus en plus utilisé lors des travaux d'isolation.

Le panneau isolant sous vide (PIV) est reconnu pour être un matériau très performant aux propriétés thermiques assez exceptionnelles.

Ce matériau isolant est 5 fois plus performant qu'un isolant classique grâce à sa finesse et sa faible conductivité thermique.

Pour 5 fois moins d'épaisseur nécessaire lors de sa pause, le panneau isolant sous vide aura la même performance. Une finesse qui fait aussi gagner entre 5 à 10 % de superficie habitable lors de travaux d'isolation des murs par l'intérieur. Certains produits offrent des lambdas situés entre 0,0042 à 0,0050W/m.K. Mais la performance a un prix : il est difficile de jouer la carte des économies car ce matériau isolant reste coûteux : entre 50 € et plus de 100 € par m² en moyenne [12].



**Figure I.16. Isolant sous vide (PIV) [12].**

- **Domaines d'utilisation**

Les PIV peuvent être utilises dans le bâtiment, et plus précisément pour l'isolation de sols, toits et lucarnes, terrasses, des éléments de façades, des portes, Les PIV sont également

recommandes dans les composants de façades et les doublages isolants pour équiper les hôpitaux, hôtels, école…….. [12].

- **Avantages**

- Le principal avantage des panneaux isolants sous vide réside dans leur conductivité thermique très faible
- Ces panneaux peuvent ainsi être appliqués dans de plus petits espaces à l'intérieur des bâtiments (par ex. dans des toitures) ou sans trop réduire l'espace dans la pièce concernée (par ex. isolation intérieure ou extérieure de murs).
- Les autres avantages de ce type de matériau isolant sont, outre ses nombreuses
- possibilités d'application,
- son faible poids,
- recyclable
- l'absence de substances dangereuses
- Barrières très étanches aux transferts de vapeur d'eau [12].

- **Inconvénients**

- Les PIV sont toujours beaucoup plus chers que les matériaux isolants traditionnels, principalement en raison de la production longue et difficile des matériaux de base.
- Le transport, l'installation et l'utilisation de ce genre de panneaux comportent de plus grands risques.
- L'enveloppe étanche à l'air est très sensible à l'impact mécanique et au percement. Il est parfois recommandé de prévoir une protection supplémentaire du panneau isolant par le biais d'une isolation traditionnelle ou d'autres matériaux de protection [7].

**b) L'aérogel de silice :**

L'aérogel de silice est un matériau qui se présente sous la forme de granules légères et translucides. Ces granules ont une dimension comprise entre 1 et 3,5 mm, et sont composées à 95% d'air et à 5% de silice, un dérivé du sable. L'une des particularités de ce matériau est sa très faible conductivité thermique [3].




**Figure I.17. L'aérogel de silice [13].**

À l'échelle du grain, les valeurs descendent jusqu'à 0,012 W/m.K, soit la plus faible conductivité thermique pour un matériau solide. Cette faible conductivité thermique est due à sa structure poreuse, un des éléments centraux de la technologie. En effet, ces petites structures vont emprisonner les molécules présentes dans l'air afin de réduire fortement le mouvement de ces dernières au sein du matériau. La vibration des molécules présentes dans l'air et les cavités est alors restreinte, ce qui par conséquence limite fortement la transmission de chaleur. Si on regarde à l'échelle d'un pore, tous les pores crées au sein de cette structure sont interconnectés, on dit qu'ils sont à structure ouverte. Ils permettent ainsi aux molécules de petite taille - comme la vapeur d'eau - de traverser le réseau, ce qui lui confère des propriétés d'isolation et de perméabilité à la vapeur d'eau. On dit que le matériau respire [3].

**d) Matériaux à Changement de Phase (MCP)**

Les MCP, appelés matériaux à changement de phase, sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante .Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification [14].

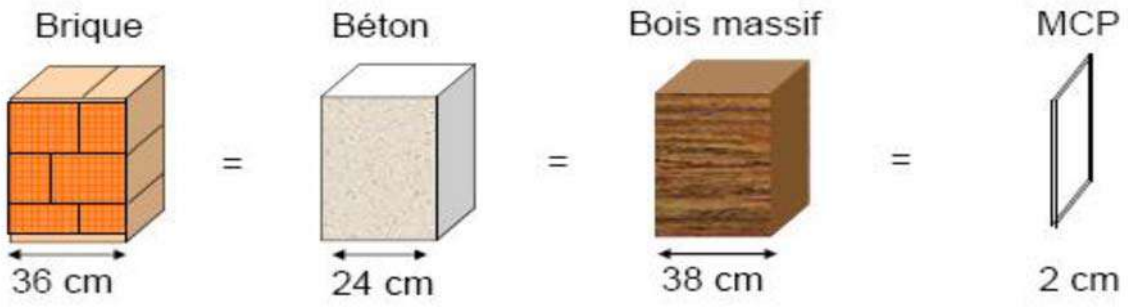



**Figure I.18: Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau [14].**

Cet intérêt s'est développé dans le domaine de la gestion thermique et des systèmes d'énergie solaire des bâtiments et des serres. Les matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments ont pour but de stocker et de déstocker de l'énergie en fonction des besoins de chauffage et/ou de refroidissement. Par exemple, l'utilisation de MCP par intégration de ceux-ci dans les enveloppes légères permet d'attribuer à celles-ci une inertie identique à celle des parois lourdes.

D'après le fabricant de MCP, BASF micronal, une paroi contenant 2 cm de MCP fabriqué par BASF a la même performance en termes d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm ou un mur en béton d'épaisseur de 24 cm ou du bois massif d'épaisseur 38 cm. Il existe quatre types de transformations de MCP [12]: gaz/liquide, gaz/solide, solide/solide et solide/liquide. Dans les systèmes de stockage d'énergie pour les bâtiments, on utilise en général les transformations solide/liquide parce qu'elles ont des enthalpies de changement de phase élevées (quoi qu'en générale inférieures à celles des transformations gaz/solide et gaz/liquide) et des expansions volumiques réduites (<10%) lors de la fusion.

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : Les inorganiques, les organiques et les eutectiques [14].

- **Les MCP inorganiques**

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre −100°C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150°C) [14].

- **Avantages**

Ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles [14].

- **Inconvénients**

Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables [14].

- **Les MCP organiques**

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0°C et 150°C. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre [14].

- **Avantages**

Ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables [14].

- **Inconvénients**

Ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables [14].

- **Les MCP eutectiques**

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique) [14].

- **Avantages**

Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs [14].

- **Inconvénients**

Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [14].

## I .8.Conclusion

Une bonne isolation permet d'éviter les déperditions thermiques et donc de diminuer considérablement la facture énergétique. Isoler les parois en contact avec l'extérieur est la priorité lors de travaux de rénovation énergétique d'un bâtiment. Le choix de l'isolant est aussi très important avec un panel de possibilités variées, allant des isolants classiques (laine de verre, laine de roche, ouate de cellulose,……) à des isolants plus performants (isolants sous vide, aérogels de silice, matériaux à changement de phase,...).

# Chapitre II
# Présentation et description du projet

## II.1.Introduction :

Malgré le développement dans le tissu urbain et l'augmentation du nombre d'habitats. Dans notre pays que se soit individuelle ou collective, mais en thermes d'isolation thermique Les exigences de la réglementation ne sont pas respectées. Le gain thermique devient un paramètre important dans le critère de choix des bâtiments selon le confort thermique, surtout l'exigence progressive sur l'économie d'énergie en cas de froid ou chaud comme un besoin permanant pour toutes les saisons d'année.

## II.2. Description du projet :

### II.2.1.Situation géographique:

Pour commencer l'étude d'un projet, il faut de connaître toutes les informations concernant la situation géographique de ce projet qui est dans notre cas la région de Médéa. Cette ville dispose d'un climat méditerranéen semi continental, froid et humide en hiver, tempéré au printemps et chaud et sec en été. La température moyenne mesurée est de 1°C en hiver et 35°C en été avec pluviométrie annuelle de 850 mm. La ville de Médéa est classifiée dans la zone climatique "B".

| Zone Climatique | Latitude | Longitude | Altitude |
|---|---|---|---|
| B | (Degrés, Minute) | (Degrés, Minute) | M |
| | 36.27°N | 2.75°N | 950 |

**Tableau. II.1. Données géographiques de la région de Médéa [15].**

### II.2.2.Conditions climatiques de base :

Les conditions de base est détermine la différence de température et d'humidité absolue entre l'air extérieur et l'air intérieur. Selon la saison et l'environnement, on distingue les deux types de conditions suivantes :

- conditions extérieures de base (en hiver).
- conditions intérieures de base (en hiver).

#### a- Les conditions extérieures de base :

| Température de base $T_{be}$ (°C) | Humidité relative $\varphi_e$ (%) |
|---|---|
| 1 | 50 |

**Tableau II.2: Conditions extérieures de base [15].**

**b- Les conditions intérieures de base:**

| Température de base $T_{bi}$ (°C) | Humidité relative $\varphi_i$ (%) |
|---|---|
| 21 | 50 |

**Tableau II.3: Conditions intérieures de base [15].**

## II.3. Description du local étudié :

Le local choisi dans cette étude est le séjour d'un logement (Annexe A1), situé en 1er étage (Figure I.1). Il comporte deux murs extérieurs (double cloison): un mur orienté vers le Sud avec une surface de 14,08 $m^2$ et deux fenêtres de1,68 $m^2$, et un mur orienté vers l'Est ayant une surface de 15,60 $m^2$. Les deux murs intérieurs (simple cloison), supposés en contact avec des locaux non conditionnés, sont orientés ont des surfaces de 17,44 $m^2$ (Nord) et 13,40 $m^2$ (Ouest) avec porte simple de 2,2 $m^2$ de surface. Le plancher bas du local est une dalle entre étage situé au dessus d'un garage d'une surface totale de 29,07 $m^2$ tandis que le plancher haut (plafond) est en contact avec un local conditionné (séjour) ayant la même surface. Le tableau (I.4) montre les dimensions du local étudié.

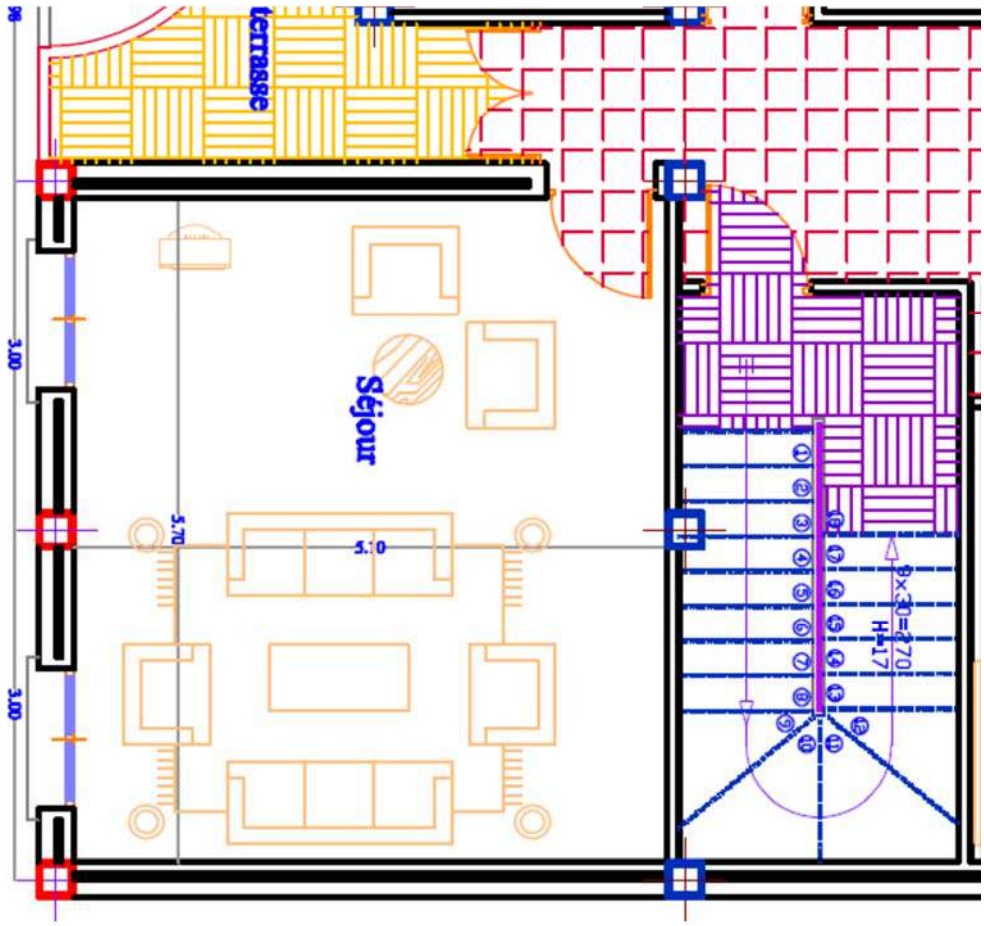



**Figure II.1 : Vue sur le séjour (niveau du 1er étage) [16].**

| Repère | Longueur (m) | Largeur (m) | Hauteur (m) | Surface ($m^2$) | Volume ($m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Séjour | 5,70 | 5,10 | 3,06 | 29,07 | 88,95 |

**Tableau II.4: Cahier de charge du séjour**

## II.4. L'isolation thermique en Algérie :

En Algérie, qu'il est apparu la nécessite 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'indifférence dont l'isolation thermique était l'objet auparavant s'explique par:

- Le mode de construction : on construisait de façon massive et les matériaux employés avaient une bonne inertie thermique, les parois réagissait donc moins vite aux variations de températures extérieures.
- La notion de confort thermique : on disposait des sources de chaleur (ou des climatiseurs) et on se contentait de leur rayonnement afin d'assurer un certain confort thermique.
- Les faibles coûts énergétiques : on se permettait une consommation excessive d'énergie afin de compenser les déperditions à travers les parois.

Dans ces trois domaines, des changements très importants sont intervenus au cours de ces demeures années, dont les principaux sont :

- L'évolution des méthodes de construction : les constructions actuelles sont moins lourdes et les matériaux utilises ont une faible inertie thermique, les parois réagissent donc plus vite aux variations de températures extérieures.
- L'exigence d'un meilleur confort thermique : l'obtention d'un meilleure confort thermique n'est plus résolu uniquement par le chauffage ou la climatisation, il nécessite une répartition plus homogène de la température dans les constructions.
- L'économie d'énergie: le poids croissant des dépenses en chauffage et climatisation préoccupe actuellement les gestionnaires et les usagers, ce qui conduit à étudié des dispositions de construction visant à réduire les déperditions à travers les parois.

L'évolution des méthodes de construction, le besoin d'un confort thermique plus approprie et le souci d'économie d'énergie ont suscite 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 certains 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 (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 [17,18].

## II.5. Caractéristiques des isolants choisis :

### II.5.1.Le polystyrène expansé :

**a) Propriétés :**

- Sa faible masse volumique située généralement, suivant les applications,

Entre 10 et 30 kg/m$^3$

- Son pouvoir isolant thermique,
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs),
- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, …). [2].

**b) Caractéristiques Techniques :**

| | |
|---|---|
| **Masse volumique ρ** | **10 à 30 kg/m$^3$** |
| **Conductivité thermique λ** | **0,032 à 0,038 (W/m.K)** |
| **Prix moyen public TTC** | **5,6 €/m² (ép. 6 cm) soit: 781,11 DA** |

**Tableau II.5: Caractéristiques Techniques de polystyrène expansé [19].**

### II.5.2. Liège expansé :

**a) Propriétés :**

- Isolation thermique, phonique et anti vibratile
- Imputrescible
- Matériau sain
- Adapté aux pièces humides,
- Hydrofuge,
- Ininflammable
- Etanche
- Résistance mécanique (compression, dilatation, flexion),
- 100 % recyclable,
- Biodégradable,
- Durabilité dans le temps,
- Bonne résistance aux parasites, aux rongeurs et aux acides. [8]

**b) Caractéristiques Techniques :**

| | |
|---|---|
| **Masse volumique ρ** | **65 à 180 kg/ $m^3$** |
| **Conductivité thermique λ** | **0.036 à0.042 (W/m.K)** |
| **Prix moyen public TTC** | **25 €/m² (ép. 10 cm) soit: 3507,24 DA** |

**Tableau II.6: Caractéristiques Techniques de liège expansé [19].**

### I.5.3. Les panneaux de fibres de bois :

**a) Propriétés :**

- Produit 100% naturel, recyclable et biodégradable
- Ouvert à la diffusion de la vapeur d'eau
- Forte inertie thermique
- Isolant thermique et phonique
- Bonne régulation hygrométrique
- Matériau souple et résistant
- Résiste aux rongeurs et aux champignons
- Rupture des ponts thermiques

- Matériau durable
- Bonne protection en cas d'incendie
- Stabilité dans le temps [8]

**b) Les Caractéristiques Techniques :**

| | |
|---|---|
| **Masse volumique ρ** | **160 à 270 kg/ m$^3$** |
| **Conductivité thermique λ** | **0.045 (W/m.K)** |
| **Prix moyen public TTC** | **26 a 37 €/m² (ép. 10 cm) soit: 3647,53 à 5190,72 DA** |

**Tableau II.7. Caractéristiques Techniques de panneaux de fibres de bois [19].**

**II.5.4. Isolant sous vide :**

**a) Propriétés :**

- capacités thermiques exceptionnelles
- il possède une bonne capacité de réduction des nuisances sonores.
- Ils présentent une bonne résistance à la compression.
- Très performant, il demande une faible épaisseur
- Il est fragile
- les panneaux ne doivent pas non plus être recoupés [7].

**b) Caractéristiques techniques :**

| | |
|---|---|
| **Masse volumique ρ** | **Environ 180 kg/ m$^3$** |
| **Conductivité thermique λ** | **0,0042 à 0,0050 (W/m.K)** |
| **Prix moyen public TTC** | **40 et plus de 60 €/m² (30 mm) soit: 5793,6 à 8369,04 DA** |

**Tableau II.8. Caractéristiques Techniques d'Isolant sous vide [7,12].**

### II.5.5. Aérogel de silice

**a) Propriétés :**

- Performance thermique
- Conductivité thermique extrêmement basse
- La flexibilité
- La résistance à la compression
- La résistance à l'eau
- La facilité de mise en œuvre
- peut être coupé à l'aide des outils traditionnels de découpe des textiles, notamment les ciseaux à main ou électriques
- Le matériau peut libérer de la poussière [13].

**b) Caractéristiques techniques :**

| | |
|---|---|
| **Masse volumique ρ** | **150 kg/ $m^3$** |
| **Conductivité thermique λ** | **0,012 a 0.020 (W/m.K)** |
| **Prix moyen public TTC** | **1 800 €/kg soit : 252521.62 DA** |

**Tableau II.9. Caractéristiques Techniques de L'aérogel de silice [7, 13, 20].**

### II.5.6. Aérogel de polyuréthane

**a) Propriétés :**

- La conductivité thermique d'aérogels de polyuréthane peut descendre jusqu'à 0,015 W/m.K
- ils peuvent s'avérer à la fois flexibles
- résistants à une contrainte en compression
- Contrairement aux aérogels de silice, ils présentent un comportement mécanique de type élastomérique, avec une déformation plastique importante
- et une densification du matériau sans rupture fragile [20].

**b) Caractéristiques techniques**

| | |
|---|---|
| **Masse volumique ρ** | **210 kg/m$^3$** |
| **Conductivité thermique λ** | **0.015 a 0.030 (W/m.K)** |
| **Prix moyen public TTC** | **1 800 €/kg soit : 252521,62 DA** |

**Tableau II.10. Caractéristiques Techniques de L'aérogel de polyuréthane [20].**

## II.6. Composition des parois

### II.6.1. Mur extérieur isolé

1. brique
2. isolant
3. points de vissage
4. enduit ciment
5. enduit plâtre.

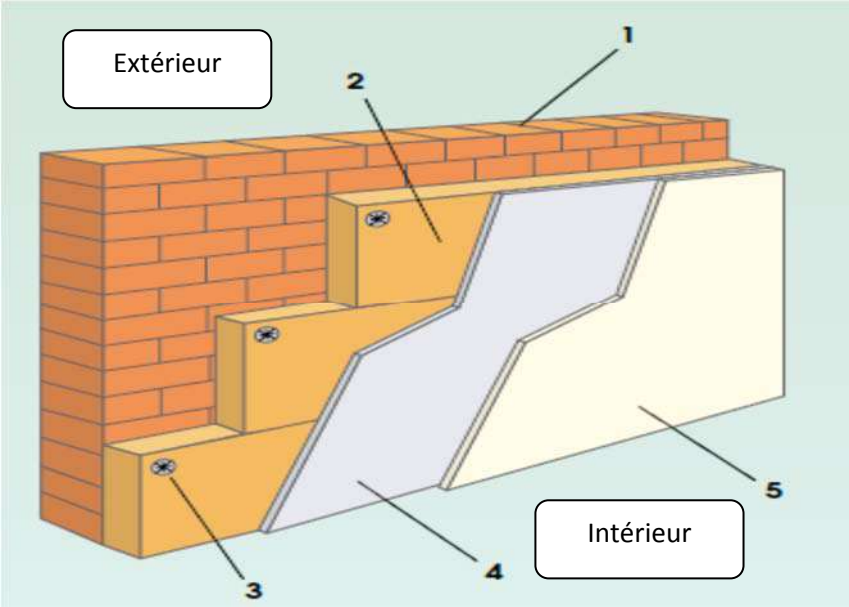



**Figure II.2. Mur extérieur isolé [11].**

| Matériau de construction | e (m) | λ W/(m ·K) | R (m².°C/W) | ΣR (m².°C/W) |
|---|---|---|---|---|
| **Enduit ciment** | 0,015 | 1,4 | 0,01 | **0,36** |
| **Brique** | 0,15 | 0,5 | 0,3 | |
| **Isolant** | Selon le type d'isolant | | | |
| **Enduit ciment** | 0,015 | 1,4 | 0,01 | |
| **Enduit plâtre** | 0,015 | 0,35 | 0,04 | |

**Tableau II. 11. Résistance des différentes couches du mur extérieur isolé [21].**

### II.6.2. Mur intérieur isolé

1. brique
2. isolant
3. points de vissage
4. enduit ciment
5. enduit plâtre

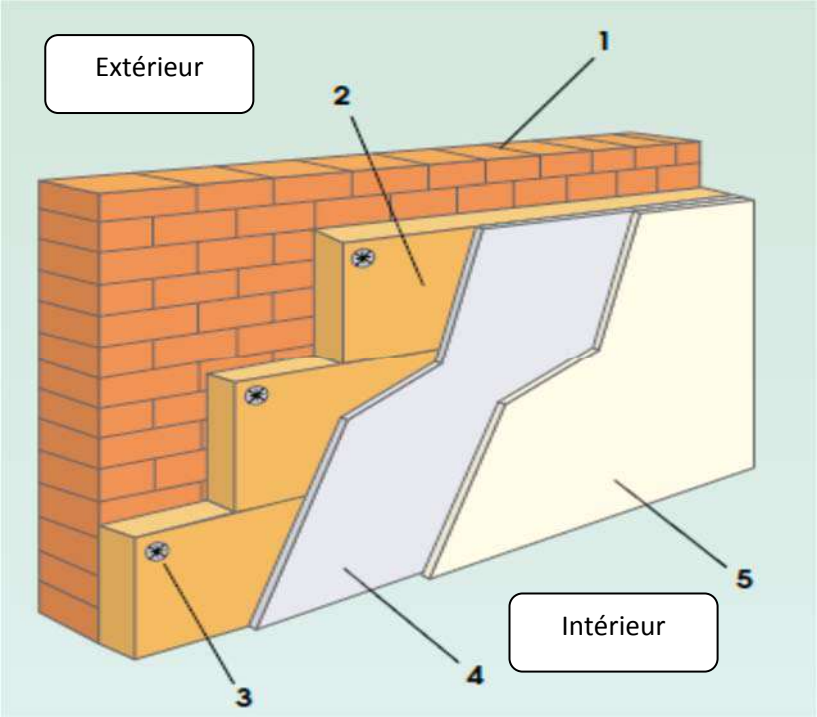



**Figure II.3. Mur intérieur isolé [11].**

| Matériau de construction | e (m) | λ W/(m ·K) | R (m².°C/W) | ΣR (m².°C/W) |
|---|---|---|---|---|
| **Enduit ciment** | 0,015 | 1,4 | 0,01 | **0,26** |
| **Brique** | 0,1 | 0,5 | 0,2 | |
| **Isolant** | Selon le type d'isolant | | | |
| **Enduit ciment** | 0,015 | 1,4 | 0,01 | |
| **Enduit plâtre** | 0,015 | 0,35 | 0,04 | |

**Tableau II.12. Résistance des différentes couches du mur intérieur isolé [21].**

### II.6.3. Plancher sur terre-plein :

1. Dalle de béton
2. Isolant
3. Gravier
4. Ciment
5. Carrelage

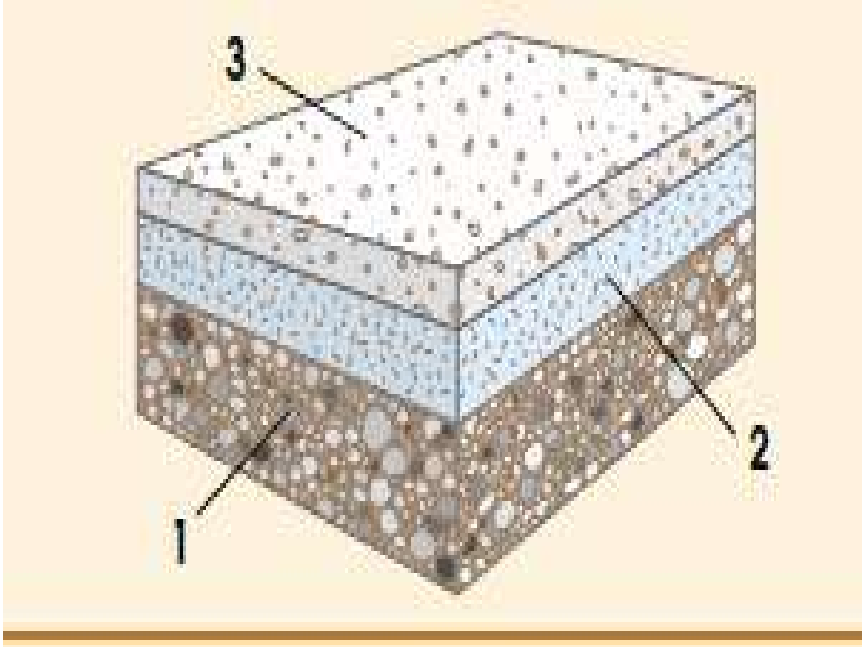



**Figure II.4. Plancher sur terre-plein [11].**

| Matériau de construction | e (m) | λ W/(m ·K) | R (m².°C/W) | ΣR (m².°C/W) |
|---|---|---|---|---|
| **Dalle de béton** | 0,15 | 1,75 | 0,085 | **0,267** |
| **Isolant** | Selon le type d'isolant | | | |
| **Gravier** | 0,33 | 2,67 | 0,12 | |
| **Ciment** | 0,025 | 1,4 | 0,017 | |
| **Carrelage** | 0,025 | 0,55 | 0,045 | |

**Tableau II.13. Résistance des différentes couches du plancher sur terre-plein [21].**

### II.6.4. Plancher entre l'étage

1. Plâtre (plafond)
2. Dalle de béton
3. Isolant
4. Ciment
5. Carrelage

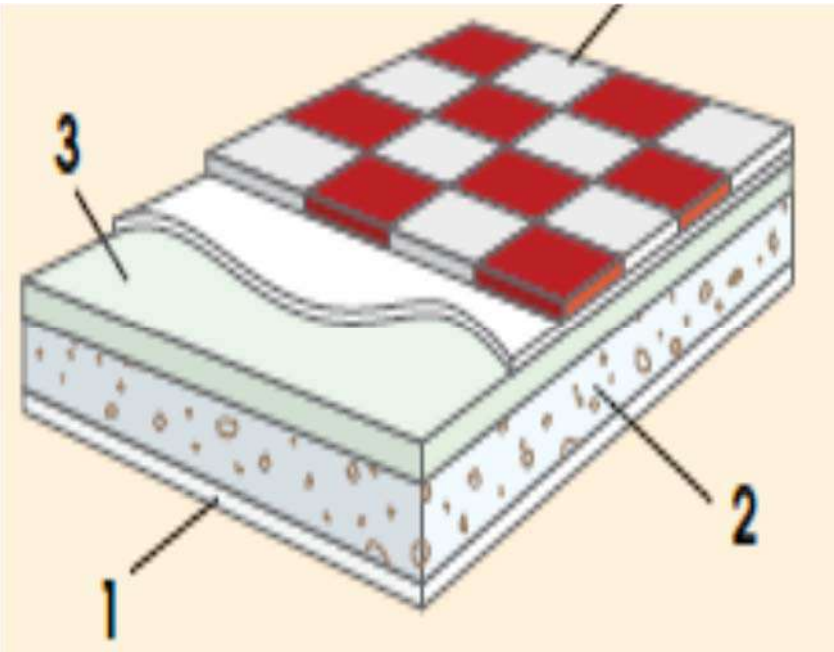



**Figure II.5. Plancher entre l'étage [11].**

| Matériau de construction | e (m) | λ W/(m ·K) | R (m².°C/W) | ΣR (m².°C/W) |
|---|---|---|---|---|
| **Plâtre** | 0,015 | 0,35 | 0,04 | **0,159** |
| **Dalle de béton** | 0,1 | 1,75 | 0,057 | |
| **Isolant** | Selon le type d'isolant | | | |
| **Ciment** | 0,025 | 1,4 | 0,017 | |
| **Carrelage** | 0,025 | 0,55 | 0,045 | |

**Tableau II.14. Résistance des différentes couches du plancher entre l'étage [21].**

# Chapitre III
# Calcul thermique et économique

### III.1. Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter un calcul thermique et économique afin d'évaluer l'avantage technique et économique de l'utilisation des nouveaux matériaux dans l'isolation thermique. Ainsi, une étude comparative technico-économique entre les nouveaux isolants et d'autres isolants classiques de diverses origines est présentée dans ce chapitre.

### III.2. Calcul thermique :

La chaleur est une forme d'énergie, son flux est toujours dirigé des températures les plus élevées vers les températures les plus basses. Des éléments tels que planchers, parois, dalles, toits, fenêtres et portes opposent une certaine résistance aux échanges thermiques [15].

#### III.2.1. Calcul de coefficient K :

Pour des parois à plusieurs couches le coefficient de chaleur global se calcul par la formule suivante:

$$\frac{1}{K} = \Sigma R + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} \qquad \text{(III.1)}$$

$\sum$ **R** en [ $m^2$ °C/W] : représente la somme des résistances thermiques des différentes couches de matériaux constituant la paroi. La détermination de la résistance thermique d'une couche de matériau.

$$R = \frac{e_i}{\lambda_i} \qquad \text{(III.2)}$$

**R** : En [$m^2$. °C/W] représente la résistance thermique de la couche i

$\boldsymbol{e_i}$: En [m] représente l'épaisseur de la couche de matériau

$\boldsymbol{\lambda_i}$ : En [W/m. °C] représente la conductivité thermique de matériau

$\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{h_e}} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{h_i}}$ [en $m^2$.°C/W] : représente la somme des résistances d'échange superficiel prise conformément aux valeurs données dans le tableau (annexe A.2).

Donc :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \Sigma \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_e}} \quad \text{(III.3)}$$

$\boldsymbol{e_{is}}$: représente l'épaisseur d'isolation thermique [m]

$\boldsymbol{\lambda_{is}}$: représente la conductivité thermique d'isolants [W/m .C°]

### III.2.2. Calcul l'épaisseur minimale de l'isolation thermique :

Il existe plusieurs formules et méthodes proposées par beaucoup d'auteurs pour estimer l'épaisseur de l'isolant [22]. Certaines méthodes sont en fonction de quelques paramètres alors que d'autres utilisent un grand nombre de paramètres. Dans notre étude, nous nous limiterons à aborder la méthode de calcul qui découle directement de la loi de Fourier.

Ainsi, d'après le DTR, une paroi est dite isolée si K ≤ 1,2.

Donc :

$$\frac{1}{R} \geq 1{,}2$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\frac{1}{\text{hi}} + \sum \frac{\text{e}_\text{i}}{\lambda_\text{i}} + \frac{\text{eis}}{\lambda\text{iso}} + \frac{1}{\text{he}}} \leq 1{,}2 \quad \text{(III.4)}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\frac{1}{\text{hi}} + \sum \frac{\text{e}_\text{i}}{\lambda_\text{i}} + 1{,}2 + \frac{1}{\text{he}}} \leq \frac{\text{e}_\text{is}}{\lambda_\text{is}} \quad \text{(III.5)}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{1}{\frac{1}{hi} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + 1{,}2 + \frac{1}{he}} \right) . \lambda_\text{is} \leq \text{e}_\text{is} \quad \text{(III.6)}$$

D'où:

$$\text{e}_\text{is} \geq \left( \frac{1}{\frac{1}{\text{hi}} + \sum \frac{\text{e}_\text{i}}{\lambda_\text{i}} + 1{,}2 + \frac{1}{\text{he}}} \right) . \lambda\text{is} \quad \text{(III.7)}$$

A partir de la relation (III.7), on note que l'épaisseur de l'isolant dépend essentiellement de la conductivité thermique du type d'isolant choisi, de la résistance thermique de la paroi ainsi que la résistance thermique par convection interne et externe.

### III.2.3. Calcul des déperditions thermiques :

La loi de Fourier met en relief une relation entre la déperdition, l'écart de températures entre les deux côtés de la paroi considérée, de la somme des résistances thermiques des différentes couches constituant la paroi et des résistances thermiques superficielles des deux milieux séparés par la paroi.

$$Q = K.S.\Delta T \qquad \text{(III.8)}$$

K : coefficient de transmission de chaleur [W/m$^2$. °C]

S : la surface de la paroi [m$^2$]

ΔT : la déférence de température entre l'intérieure est l'extérieure [°C]

## III.3. Calcul économique :

### III.3.1. Calcul du coût total ($C_T$)

Afin de choisir la déperdition à admettre aux parois isolantes, il faut prendre en compte le prix de l'énergie (chaleur) et le prix des isolants. Si la déperdition admise est faible, l'épaisseur de l'isolant à mettre en œuvre est grande.

$$C_T = C_{is} + C_c \qquad \text{(III.9)}$$

$C_T$ : Le coût totale [DA]

$C_{is}$ : Le coût d'isolant thermique [DA]

$C_c$ : Le coût de la chaleur [DA]

### III.3.2. Calcul du coût d'isolant thermique ($C_{is}$) :

Il est évident que le prix de l'isolant est un facteur important qui entre en jeu dans l'investissement et le calcul économique d'un projet d'études d'isolation thermique. En dehors de toutes considérations techniques, on a tendance à s'intéresser aux prix des isolants dans le but d'économiser les dépenses occasionnées par l'isolation. Généralement, le coût de l'isolant est calculé pour le prix du $m^2$. Pour une paroi considérée, le coût de l'isolant est donc donné par la relation suivante:

$$C_{is} = \mathrm{P.S.a} \qquad \text{(III.10)}$$

P : le prix d'achat d'isolant thermique [ $\mathrm{DA/m^2}$]

S : la surface de paroi [ $m^2$]

a : le facteur (taux) d'amortissement. Il s'agit là d'une notion plus financière que technique tout à fait conventionnelle. Dans le cas de notre étude d'isolation, il peut être en fonction de la durée de vie de l'isolant et de la construction entière.

Le facteur d'amortissement est calculé par la relation suivante:

$$\mathrm{a} = \frac{\mathrm{i}}{(\mathrm{i}+1).(\mathrm{n}-1)} \qquad \text{(III.11)}$$

*i* : est le taux d'intérêt annuel. C'est un pourcentage qui, appliqué au capital, donne l'intérêt annuel. Il est généralement compris entre 5% et 10%.

*n* : est la durée de vie de l'isolant (années).

La durée de vie de l'isolant constitue un facteur principal pour estimer l'amortissement de l'isolation ainsi que la construction entière. La durée de vie est variable suivant l'isolant; elle peut variée en fonction des défauts de fabrication, des imperfections de pose, des conditions d'utilisation (compatibilité des matériaux, températures d'utilisations, etc.), et des matières premières de fabrication. Dans de bonnes conditions d'utilisation, un bon isolant garde son pouvoir isolant, son efficacité thermique et ses performances techniques jusqu'à quinze (15) ans d'utilisation [22].

**Remarque:**

Dans cette étude, le taux d'intérêt annuel est fixé à 8% et la durée de vie de l'isolant est estimée à 5 ans, d'où un facteur d'amortissement égal à 0,02.

### III.3.3. Calcul du coût de la chaleur :

L'adoption d'une épaisseur importante de l'isolant a pour but d'économiser l'énergie. Le prix de l'énergie intervient d'ailleurs par la valeur des déperditions dans l'approche de l'épaisseur économique. Il faut donc faire une analyse soignée sur le prix de l'énergie et celui de l'isolant.

$$C_c = Q.C_s \qquad \text{(III.12)}$$

Q : Les déperditions thermiques [KWh]

$C_s$ : Le coût spécifique de la chaleur [DA/kWh]

**Remarque:**

Le prix spécifique de la chaleur est fourni par les services de SONELGAZ (Annexe A.3). Pour les clients ménages, le prix de l'énergie thermique consommé est: $C_s = 0.38$ [DA/kWh].

### III.3.4. Exemple de calcul :

#### a) Calcul de l'épaisseur minimale d'isolation :

| Paroi extérieure | 1/ $h_i$ | 1/$h_e$ | ∑e/λ | $\lambda_{is}$ | $e_{is}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| polystyrène expansé | **0,11** | **0,06** | **0,36** | **0,032** | **0,018** |
| liège expansé | **0,11** | **0,06** | **0,36** | **0,037** | **0,021** |
| Les panneaux de fibres de bois | **0,11** | **0,06** | **0,36** | **0,045** | **0,026** |
| isolant sous vide | **0,11** | **0,06** | **0,36** | **0,0042** | **0,002** |
| l'aérogel de silice | **0,11** | **0,06** | **0,36** | **0,012** | **0,006** |
| L'aérogel de polyuréthane | **0,11** | **0,06** | **0,36** | **0,015** | **0,008** |

**Tableau III.1. Epaisseur minimale de différents types d'isolants pour les parois extérieures**

| Paroi intérieure | 1/ $h_i$ | 1/$h_e$ | ∑e/λ | $\lambda_{is}$ | $e_{is}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| polystyrène expansé | **0,11** | **0,11** | **0,26** | **0,032** | **0,019** |
| liège expansé | **0,11** | **0,11** | **0,26** | **0,037** | **0,022** |
| Les panneaux de fibres de bois | **0,11** | **0,11** | **0,26** | **0,045** | **0,026** |
| isolant sous vide | **0,11** | **0,11** | **0,26** | **0,0042** | **0,0025** |
| l'aérogel de silice | **0,11** | **0,11** | **0,26** | **0,012** | **0,0071** |
| L'aérogel de polyuréthane | **0,11** | **0,11** | **0,26** | **0,015** | **0,0089** |

**Tableau III.2. Epaisseur minimale de différents types d'isolants pour les parois intérieures**

| Plancher haut | 1/ $h_i$ | 1/$h_e$ | ∑e/λ | $\lambda_{is}$ | $e_{is}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| polystyrène expansé | **0,17** | **0,05** | **0,267** | **0,032** | **0,018** |
| liège expansé | **0,17** | **0,05** | **0,267** | **0,037** | **0,021** |
| Les panneaux de fibres de bois | **0,17** | **0,05** | **0,267** | **0,045** | **0,026** |
| isolant sous vide | **0,17** | **0,05** | **0,267** | **0,0042** | **0,002** |
| l'aérogel de silice | **0,17** | **0,05** | **0,267** | **0,012** | **0,007** |
| L'aérogel de polyuréthane | **0,17** | **0,05** | **0,267** | **0,015** | **0,008** |

**Tableau III.3. Epaisseur minimale de différents types d'isolants pour le plancher haut**

| Plancher bas | 1/ $h_i$ | 1/$h_e$ | ∑e/λ | $\lambda_{is}$ | $e_{is}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| polystyrène expansé | **0,17** | **0,17** | **0,159** | **0,032** | **0,018** |
| liège expansé | **0,17** | **0,17** | **0,159** | **0,037** | **0,021** |
| Les panneaux de fibres de bois | **0,17** | **0,17** | **0,159** | **0,045** | **0,026** |
| isolant sous vide | **0,17** | **0,17** | **0,159** | **0,0042** | **0,002** |
| l'aérogel de silice | **0,17** | **0,17** | **0,159** | **0,012** | **0,007** |
| L'aérogel de polyuréthane | **0,17** | **0,17** | **0,159** | **0,015** | **0,008** |

**Tableau III.4. Epaisseur minimale de différents types d'isolants pour le plancher bas**

**b) Calcul du coût total et de l'épaisseur optimale d'isolation :**

| | | $e_{opt}$ (mm) | S ($m^2$) | K ($W.m^2.°C$) | Q (kWh) | $C_c$ (DA) | $C_{is}$ (DA) | $C_T$ (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| polystyrène expansé | Mur 1 | 200 | 15,60 | 0,147 | 2015,57 | 765,91 | 817,00 | 1582,92 |
| | Mur 2 | 120 | 20,52 | 0,236 | 1444,67 | 548,97 | 547,92 | 1096,89 |
| | Mur 3 | 200 | 13,326 | 0,147 | 1721,76 | 654,27 | 697,91 | 1352,18 |
| | Mur 4 | 200 | 14,082 | 0,147 | 1819,44 | 691,38 | 737,50 | 1428,89 |
| | Planche bas | 120 | 29,07 | 0,235 | 2397,30 | 910,97 | 913,30 | 1824,28 |
| liège expansé | Mur 1 | 120 | 15,60 | 0,285 | 3537,25 | 1344,15 | 1312,80 | 2656,96 |
| | Mur 2 | 75 | 20,52 | 0,390 | 2805,02 | 1065,90 | 1085,62 | 2151,53 |
| | Mur 3 | 120 | 13,326 | 0,285 | 3021,63 | 1148,22 | 1121,44 | 2269,66 |
| | Mur 4 | 120 | 14,082 | 0,285 | 3193,05 | 1213,36 | 1185,06 | 2398,42 |
| | Planche bas | 75 | 29,07 | 0,387 | 3944,54 | 1498,92 | 1537,96 | 3036,89 |
| Les panneaux de fibres de bois | Mur 1 | 140 | 15,60 | 0,274 | 3753,14 | 1426,19 | 1592,87 | 3019,06 |
| | Mur 2 | 80 | 20,52 | 0,442 | 3184,63 | 1210,16 | 1197,28 | 2407,44 |
| | Mur 3 | 140 | 13,326 | 0,274 | 3206,04 | 1218,29 | 1360,68 | 2578,98 |
| | Mur 4 | 140 | 14,082 | 0,274 | 3387,93 | 1287,41 | 1437,87 | 2725,29 |
| | Planche bas | 80 | 29,07 | 0,439 | 4473,92 | 1700,09 | 1696,15 | 3396,24 |

**Tableau III.5. Calcul technico-économique (isolants classiques)**

| | | $e_{opt}$ (mm) | S ($m^2$) | K ($W.m^2.°C$) | Q (kWh) | $C_c$ (DA) | $C_{is}$ (DA) | $C_T$ (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Isolant sous vide | Mur 1 | 14 | 15,60 | 0,258 | 3537,25 | 1344,15 | 1225,28 | 2569,44 |
| | Mur 2 | 09 | 20,52 | 0,381 | 2741,36 | 1041,71 | 1036,10 | 2077,82 |
| | Mur 3 | 14 | 13,326 | 0,258 | 3021,63 | 1148,22 | 1046,68 | 2194,90 |
| | Mur 4 | 14 | 14,082 | 0,258 | 3193,05 | 1213,36 | 1106,05 | 2319,41 |
| | Planche bas | 09 | 29,07 | 0,378 | 3855,66 | 1465,15 | 1467,81 | 2932,97 |
| L'aérogel de silice | Mur 1 | 15 | 15,60 | 0,561 | 7677,30 | 2917,37 | 2953,82 | 5871,19 |
| | Mur 2 | 11 | 20,52 | 0,715 | 5148,12 | 1956,28 | 2089,48 | 4045,77 |
| | Mur 3 | 15 | 13,326 | 0,561 | 6558,18 | 2492,11 | 2523,24 | 5015,35 |
| | Mur 4 | 15 | 14,082 | 0,561 | 6930,24 | 2633,49 | 2666,39 | 5299,88 |
| | Planche bas | 11 | 29,07 | 0,706 | 7195,28 | 2734,20 | 2960,10 | 5694,31 |
| L'aérogel de polyuréthane | Mur 1 | 14 | 15,60 | 0,683 | 9338,67 | 3548,69 | 3284,81 | 6833,51 |
| | Mur 2 | 10 | 20,52 | 0,872 | 6270,53 | 2382,80 | 2204,49 | 4587,29 |
| | Mur 3 | 14 | 13,326 | 0,683 | 7977,38 | 3031,40 | 2805,99 | 5837,39 |
| | Mur 4 | 14 | 14,082 | 0,683 | 8429,95 | 3203,38 | 2965,17 | 6168,56 |
| | Planche bas | 10 | 29,07 | 0,857 | 8738,45 | 3548,69 | 3284,81 | 6833,51 |

**Tableau III.6. Calcul technico-économique (nouveaux isolants)**

### III.4. Résultats et discussions

Lorsque l'on augmente l'isolation d'une paroi, soit en augmentant l'épaisseur de l'isolant, soit en utilisant un matériau dont le coefficient de conductibilité thermique est moindre, il en résulte d'une part une diminution des déperditions thermiques à travers la paroi concernée (figure III.1), mais aussi d'autre part un supplément de coût lié à l'augmentation de l'épaisseur de la paroi (figures III.2, III.3, III.4, III.5, III.6 et III.7). En effet, l'augmentation de l'épaisseur fait augmenter le volume du matériau à acheter et à mettre en œuvre ; la diminution du coefficient de conductibilité fait employer un matériau dont le pouvoir d'isolation est plus élevé et qui est généralement plus cher. Les figures suivantes illustrent les incidences conjointes dues à l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant : une augmentation des coûts ou de la charge financière afférente à la mise en œuvre d'un m² de paroi (coûts de l'isolation dans le graphique), une diminution des dépenses des coûts de la chaleur calculées sur une période considérée (diminution appelée économies dans le graphique). L'épaisseur optimale est déterminée par l'intersection des deux courbes prises en compte : ainsi, dans les cas étudiés, l'épaisseur optimale est de 20 cm pour le polystyrène expansé, 12 cm pour le liège expansé, 14 cm pour les panneaux de fibres de bois, 15 mm pour l'isolant sous vide, 25 mm pour l'aérogel de silice et 28 mm pour l'aérogel de polyuréthane.

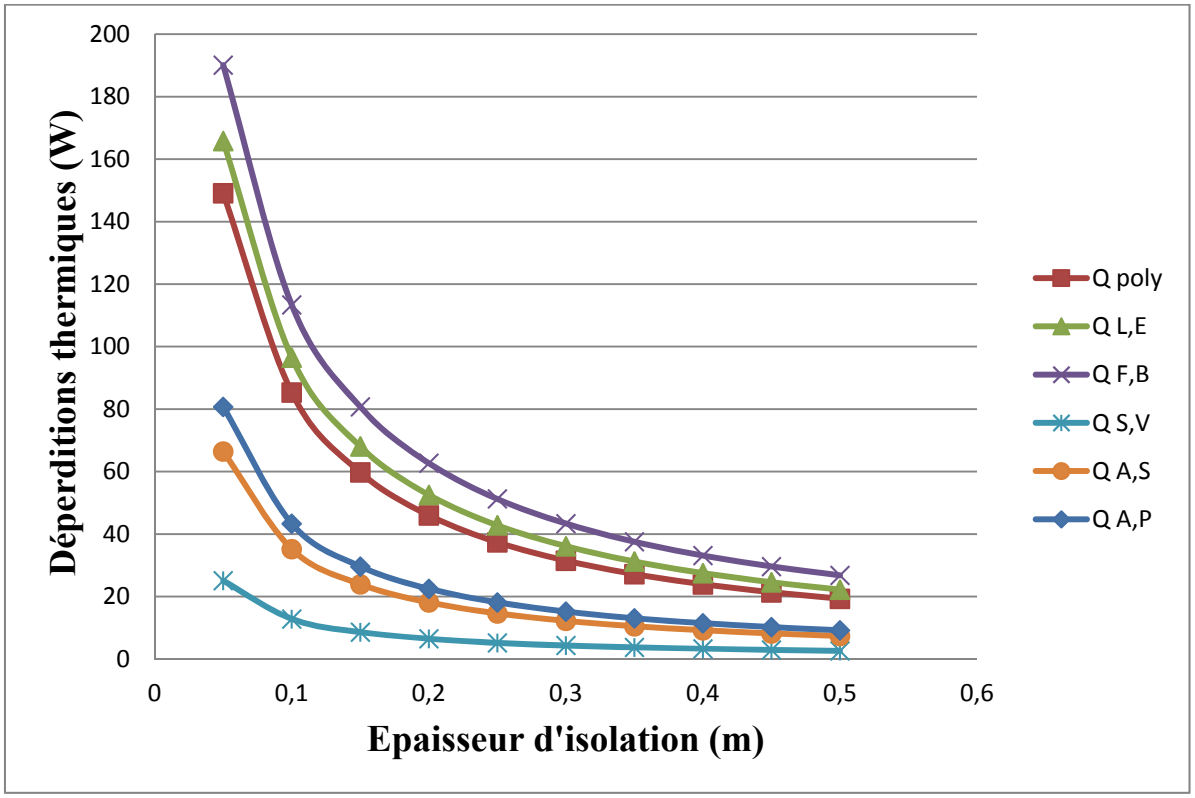



**Figure III.1. Variations des déperditions thermiques en fonction de l'épaisseur d'isolation**

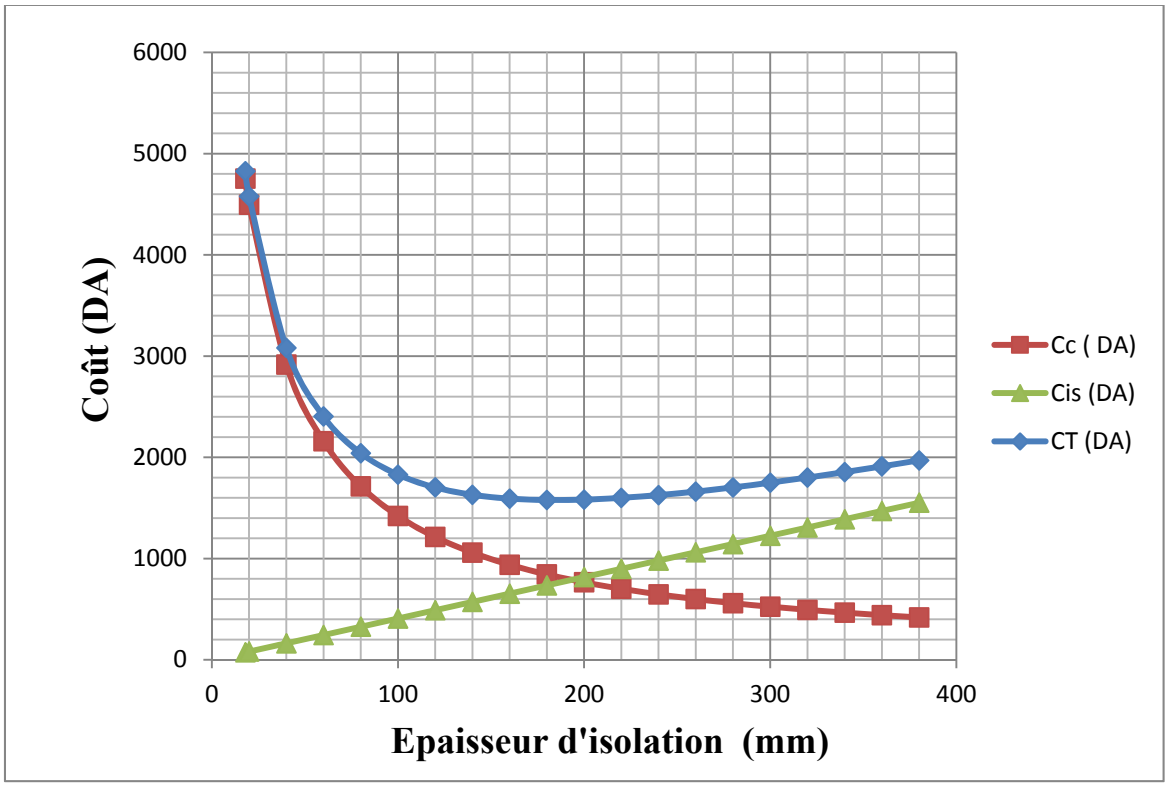



**Figure III.2. Variation du coût de polystyrène expansé en fonction de l'épaisseur d'isolation**

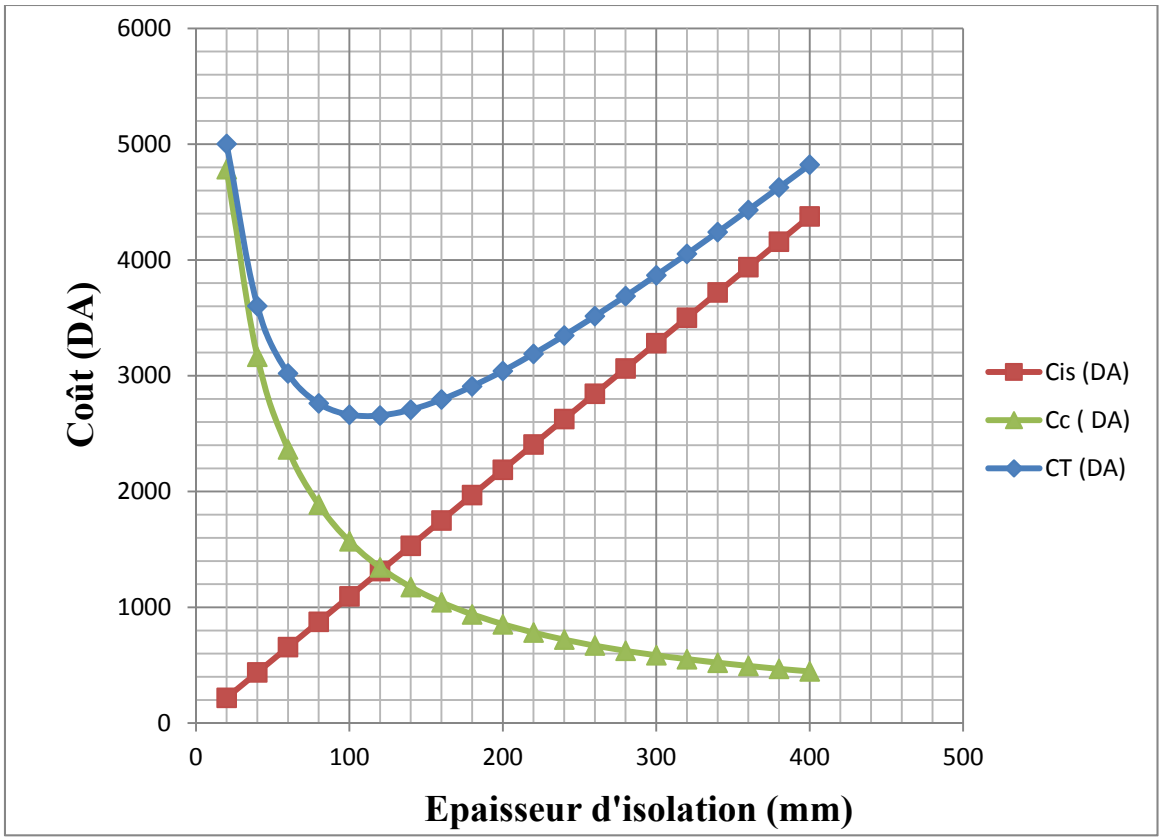



**Figure III.3. Variation du coût de liège expansé en fonction de l'épaisseur d'isolation**

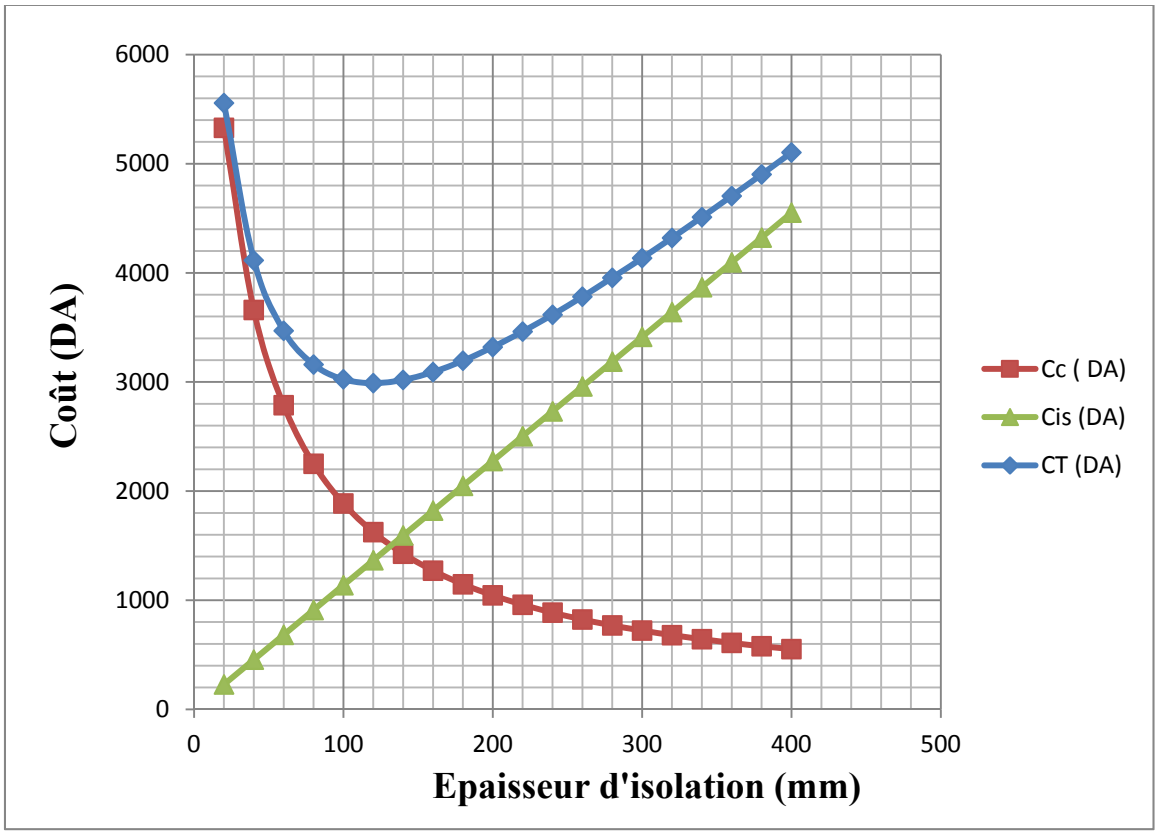



**Figure III.4. Variation du coût de panneaux de fibres de bois en fonction de l'épaisseur d'isolation**

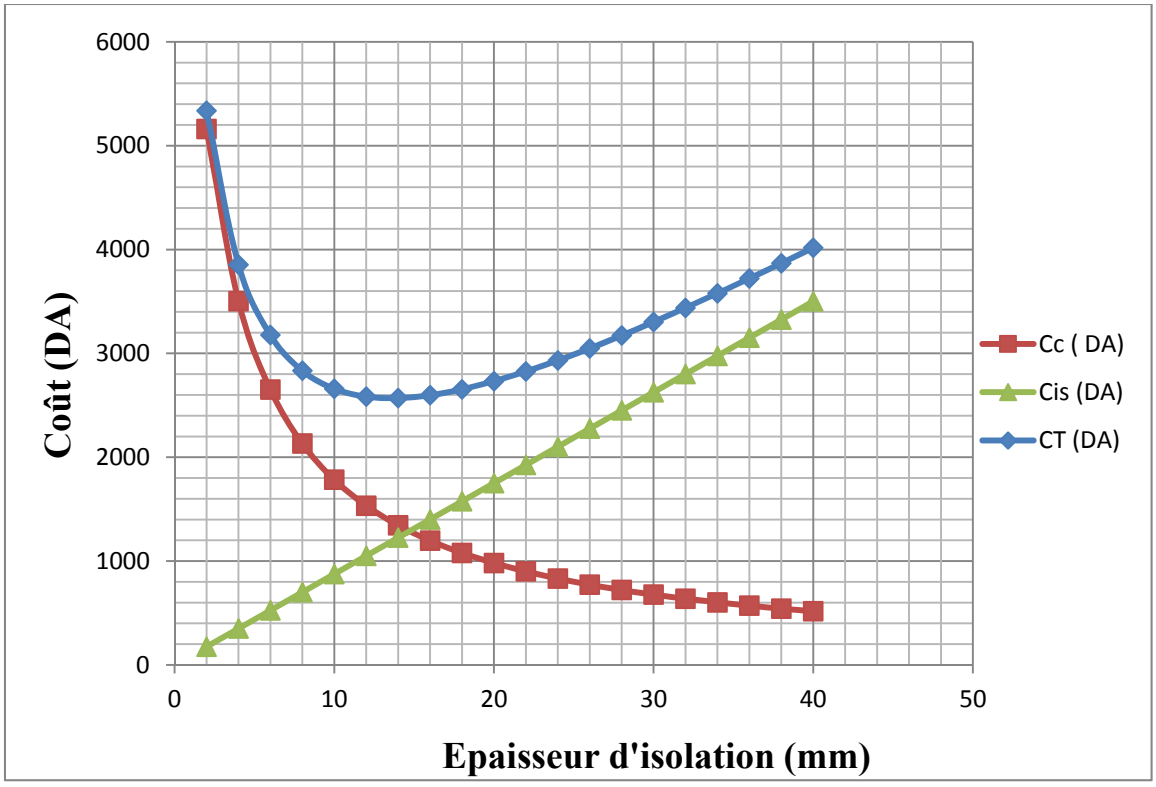



**Figure III.5. Variation du coût de l'isolant sous vide en fonction de l'épaisseur d'isolation**

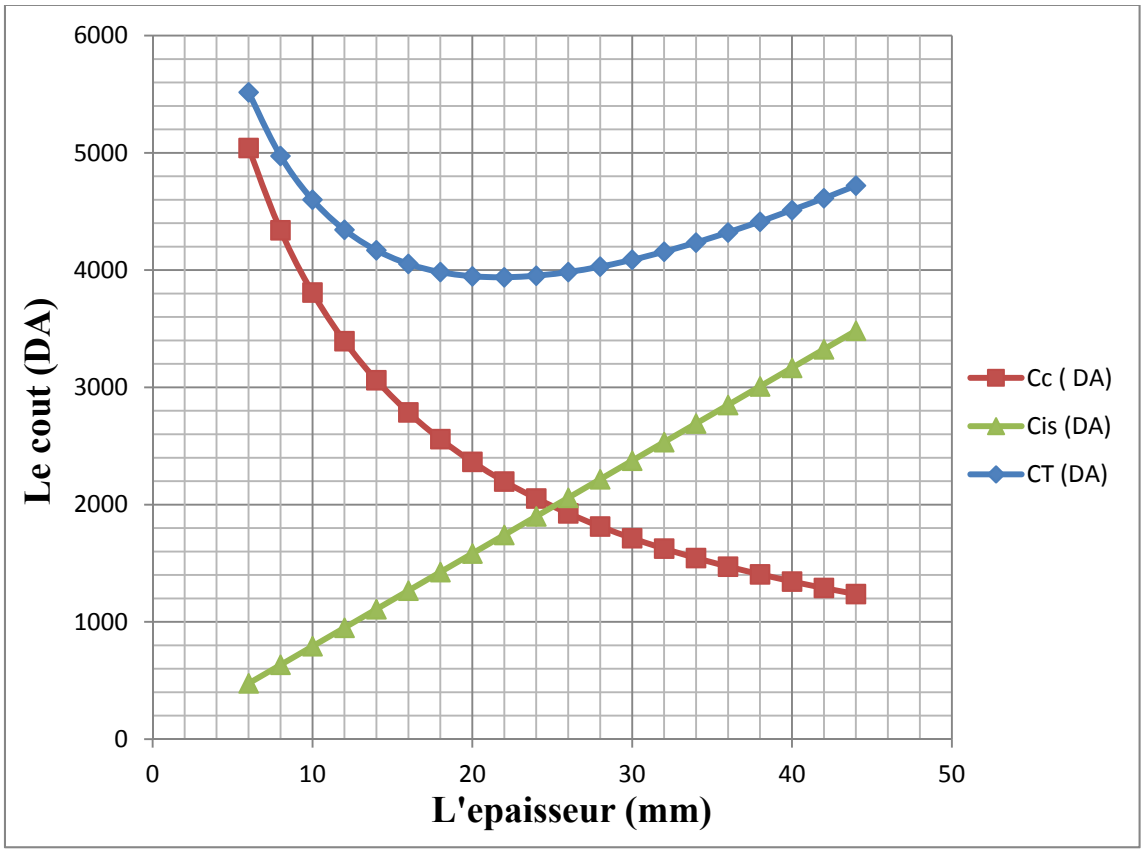



**Figure III.6. Variation du coût de l'aérogel de silice en fonction de l'épaisseur d'isolation**

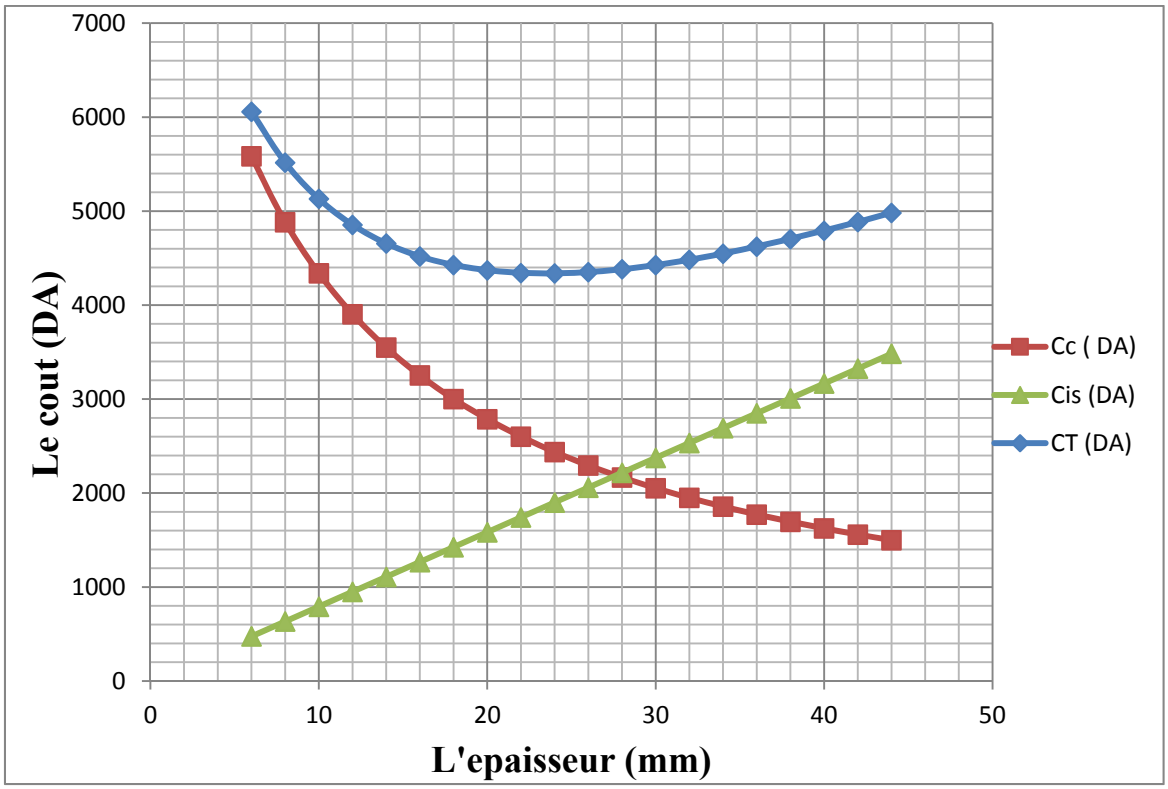



**Figure III.7. Variation du coût de l'aérogel de polyuréthane en fonction de l'épaisseur d'isolation**

### III.5.Etude comparative des isolants thermiques

Le choix de l'isolant thermique doit prendre en considération la minimisation des pertes de chaleur (déperditions). Néanmoins, d'autres critères interviennent dans le choix de l'isolant. Ces critères sont aussi bien liés à la technologie qu'à la mise en œuvre. Dans cette partie, on va comparer les performances de trois isolants classiques (liège, polystyrène, panneaux de fibres de bois) et trois isolants de nouvelle génération (isolant sous vide, aérogel de silice, aérogel de polyuréthane) afin d'identifier le meilleur isolant en termes de confort thermique et économie d'énergie.

Le tableau III.6. Présente une comparaison entre les isolants classiques et les isolants de nouvelle génération.

| Paramètres | Les isolants classiques | | | Les nouveaux isolants | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | polystyrène expansé | liège expansé | Les panneaux de fibres de bois | isolant sous vide | l'aérogel de silice | L'aérogel de polyuréthane |
| **Conductivité thermique ($W/m^2.°C$)** | 0,032 | 0,037 | 0,045 | 0,0042 | 0,012 | 0,015 |
| **Epaisseur optimale (mm)** | 200 | 120 | 140 | 15 | 25 | 28 |
| **Déperditions (kWh)** | 2015,57 | 3537,25 | 3753,14 | 3537,25 | 5229,18 | 5701,91 |
| **Coût de la chaleur (DA)** | 765,91 | 1344,15 | 1426,19 | 1344,15 | 1987,08 | 2166,72 |
| **Coût de l'isolant (DA)** | 817,00 | 1312,80 | 1592,87 | 1225,28 | 1978,81 | 2216,27 |
| **Coût total (DA)** | 1582,92 | 2656,96 | 3019,06 | 2569,44 | 3965,90 | 4383,00 |

**Tableaux III.7. Comparaison des différents types d'isolants thermiques**

D'après ce tableau, parmi les trois isolants classiques étudiés, le polystyrène expansé est le plus performant puisqu'il offre le meilleur rapport qualité-prix. En ce qui concerne les nouveaux isolants, c'est l'isolant sous vide qui l'emporte sur les autres isolants car il possède la conductivité thermique la plus faible ce qui signifie une meilleure performance thermique pour une plus faible épaisseur.

Il est aussi remarqué que les épaisseurs utilisées pour les isolants de nouvelle génération sont très faibles par rapport aux isolants classiques dues à leurs faibles conductivités thermiques. On peut ainsi obtenir une très bonne valeur isolante avec une faible épaisseur d'isolation et donc un gain d'espace. Néanmoins, ces isolants, nettement plus efficaces que les isolants classiques, présentent l'inconvénient d'un prix d'achat relativement élevé. Cependant, vu que ces matériaux sont relativement récents, diverses techniques destinées à réduire ces coûts sont à l'étude.

### III.6. Conclusion

A partir de cette analyse comparative, et vu nos critères de choix qui sont : les performances thermiques, le coût de l'isolation et le coût de la chaleur, le polystyrène expansé et l'isolation sous vide sont les plus favoris pour être appliqués dans le bâtiment car ils présentent le meilleur rapport qualité-prix. Cependant, il faut tenir compte de la faible isolation acoustique du polystyrène expansé et la fragilité du panneau sous vide.

# Conclusion Générale

# Conclusion générale

Le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe représente un enjeu considérable pour la réduction des consommations énergétiques et le confort thermique dans le secteur du bâtiment. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui est caractérisation thermique et économique des matériaux utilisés pour la construction des parois composants l'enveloppe du bâtiment dans le but d'améliorer son isolation thermique en en offrant un confort thermique tout en réduisant la consommation d'énergie et la valeur de facture.

Pour atteindre cet objectif, nous avons comparés trois isolants thermiques classiques (liège, polystyrène, fibre de bois) et trois isolants de nouvelle génération (isolant sous vide, aérogel de silice, aérogel de polyuréthane) pour identifier le meilleur isolant qui nous donnera plus d'avantages en termes de confort thermique et diminution de consommation d'énergie.

D'après le calcul thermique et économique, on déduit que le polystyrène expansé est le plus performant des isolants classiques étudiés puisqu'il offre le meilleur rapport qualité-prix. En ce qui concerne les nouveaux isolants, c'est l'isolant sous vide qui l'emporte sur les autres isolants car il possède la conductivité thermique la plus faible ce qui signifie une meilleure performance thermique pour une plus faible épaisseur.

Néanmoins, il est difficile de proposer des recommandations générales en ce qui concerne le matériau idéal et son épaisseur à mettre en œuvre. En effet, les différents isolants analysés ont chacun leurs qualités et inconvénients propres, et, de ce fait, ils sont difficilement comparables entre eux.

# Références Bibliographiques

## Références Bibliographiques

**[1]** GINA Penu, « la thermique du bâtiment », 2 éme édition, DUNOD, paris 2013,2015

**[2]** Association Canadienne de l'isolation thermique, « Guide des meilleures pratiques d'isolation mécanique » ,1485.

**[3]** l'isolation thermique du bâtiment, Enersens SAS, France ,mai 2016.

**[4]** Améliorez le confort de votre maison -l'isolation thermique, ADEME ,2008

**[5]** info-énergie, Guide des matériaux isolants pour une isolation efficace et durable, Edition ADEME

**[6]** MAZARI Mohammed, «Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public ; Cas du département d'Architecture de Tamda (Tizi-Ouzou)», Thèse de Magister, 2012.

**[7]** MM. Fragos et Trouillez « le guide de l'isolation » ,Ooreka ,2012

**[8]** Fiche technique sur les matériaux isolant. Pole éco construction timousin

**[9]** Malek Jedidi et Omrane Benjeddou « La thermique du bâtiment », DUNOD, Paris 2016

**[10]** Louisa Praszezynki et Flora Penot « L'isolation des pavillons ».

**[11]** ADIL DU LOIRET Guide isolation thermique. espace info énergie

**[12]** Claire VILASI -Ville et Aménagement Durable, Juillet 2009

**[13]** Aspen Aérogels, Inc.2010

**[14]** Serge Blaise EKOMY ANGO, « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase », Thèse pour obtenir le grade de docteur, 2011.

**[15]** Document Technique Réglementaire (D.T.R C3-2), règle de calcul des déperditions calorifiques. Fascicule 1.

**[16]** N.cherfaoui, bureau d'étude d'architecture et d'urbanisme .

**[17]** Khelfa brahim et Rabahi habib, « É tude de l'efficacité énergétique des bàtiment à usage d'habitation en Algérie », MEMOIRE DE MASTER ,2017

**[18]** Eugene dumitriu-valcea , « Isolation thermique des constructions en Algerie », Achever d'imprimer sur les presses de l'Entreprise Nationale des Arts Graphiques Unité Ahmed zabana Alger, 1986

**[19]** COMPARATIF GLOBAL DES ISOLANTS-Parc Eco Habitat Mise à jour 17 mai 2011

**[20]** Noémie DIASCORN « Elaboration et caractérisation d'aérogels super isolants Thermiques hybrides à base de silice et de polyuréthane », Thèse pour obtenir le grade de docteur, le 18 décembre 2014

**[21]** N. Kadri et A. Mokhtari, « Contribution à l'étude de réhabilitation thermique de l'enveloppe du bâtiment », Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°2 (2011) 301 – 311

**[22]** L'isolation Responsable, Groupe Saint-Gobain, Copyright 2008 Isover, http://www.toutsurlisolation.com/Choisir-son-isolant/Comparer-les-isolants/Le-prixde- l-isolation.

## ANNEXE A1

## PLAN ARCHITECTURAL DU LOGMENT

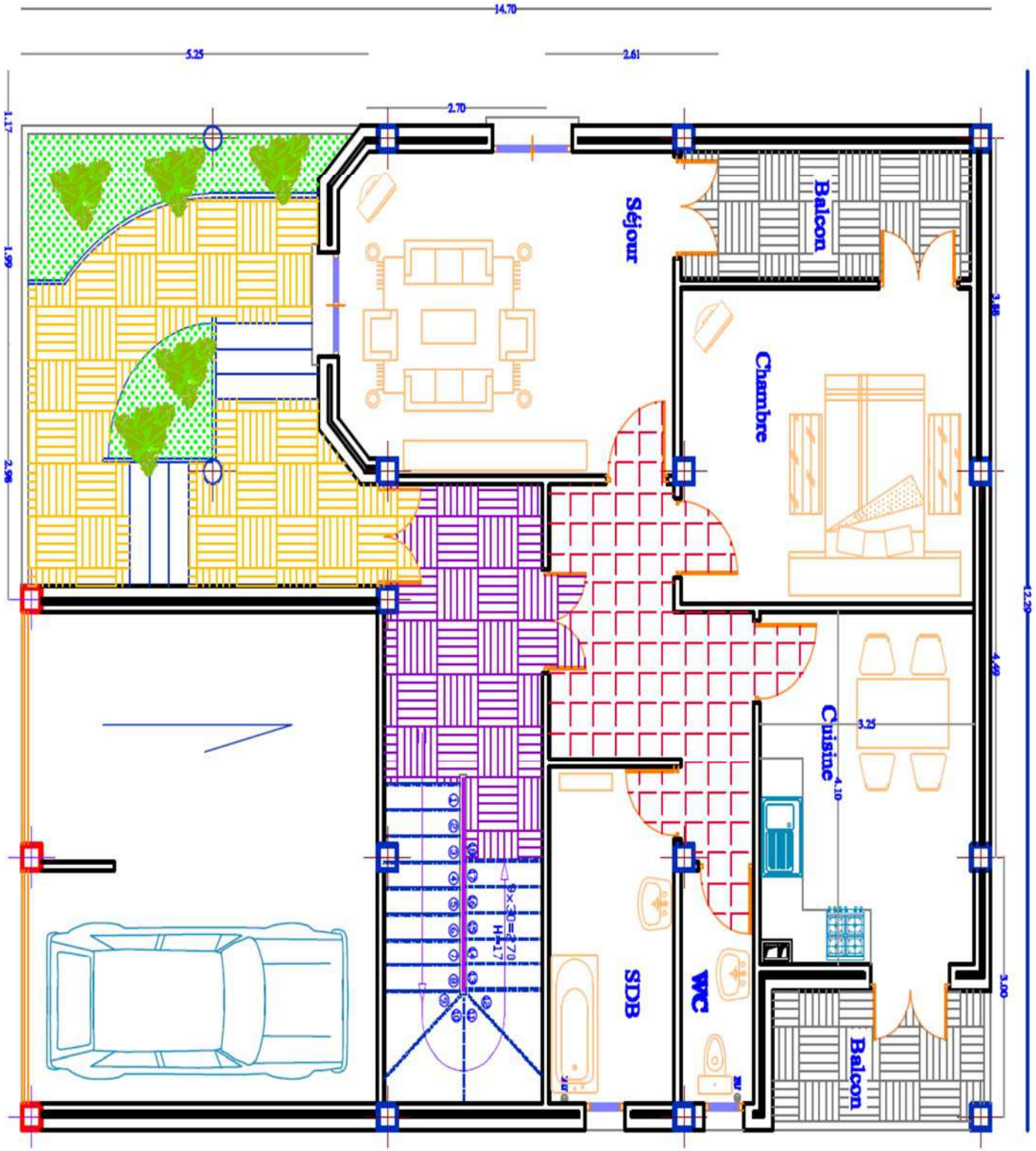



**Figure A.1.1: Plan du RDC**

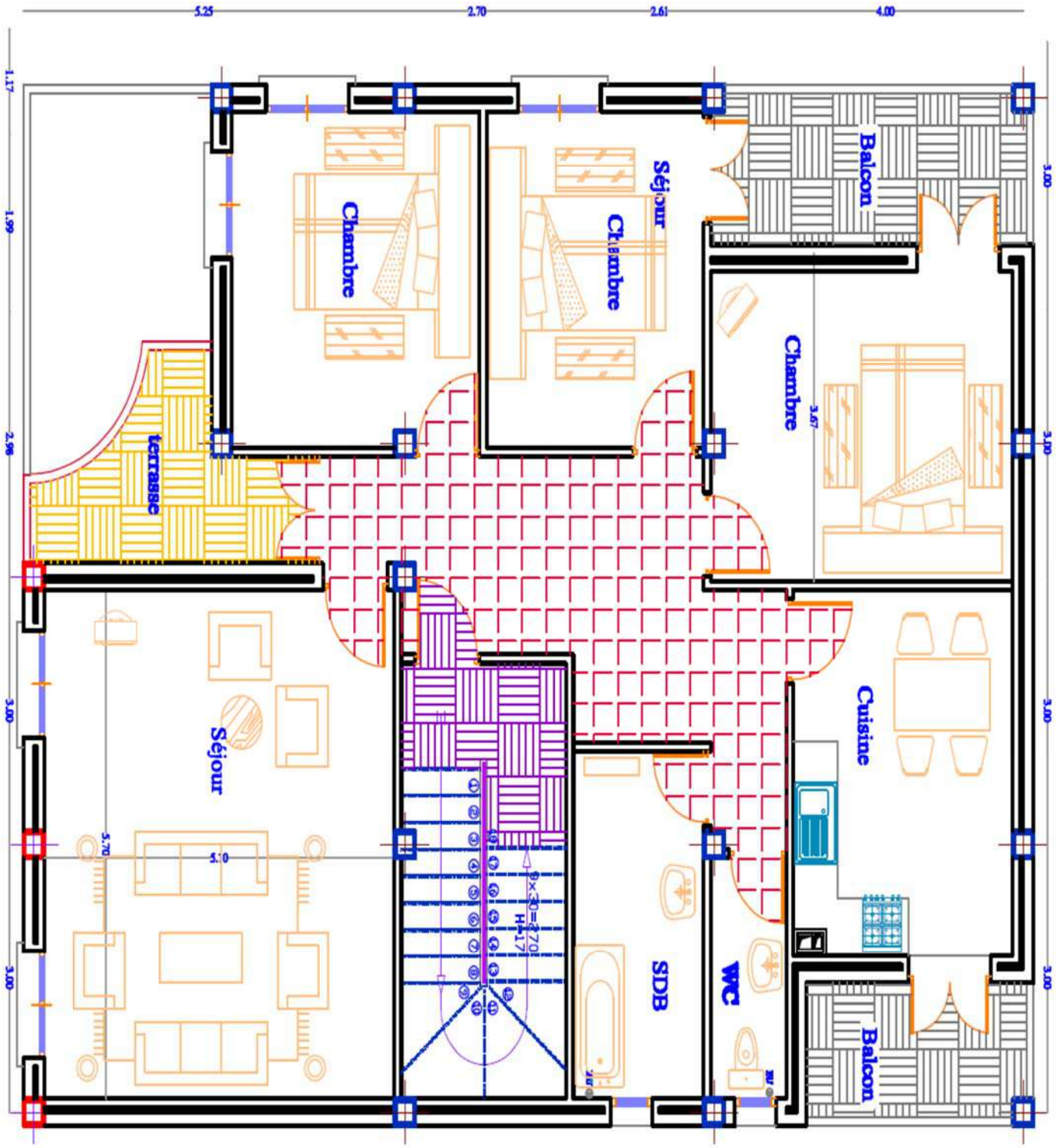



**Figure A1.2: Plan du 1er étage**

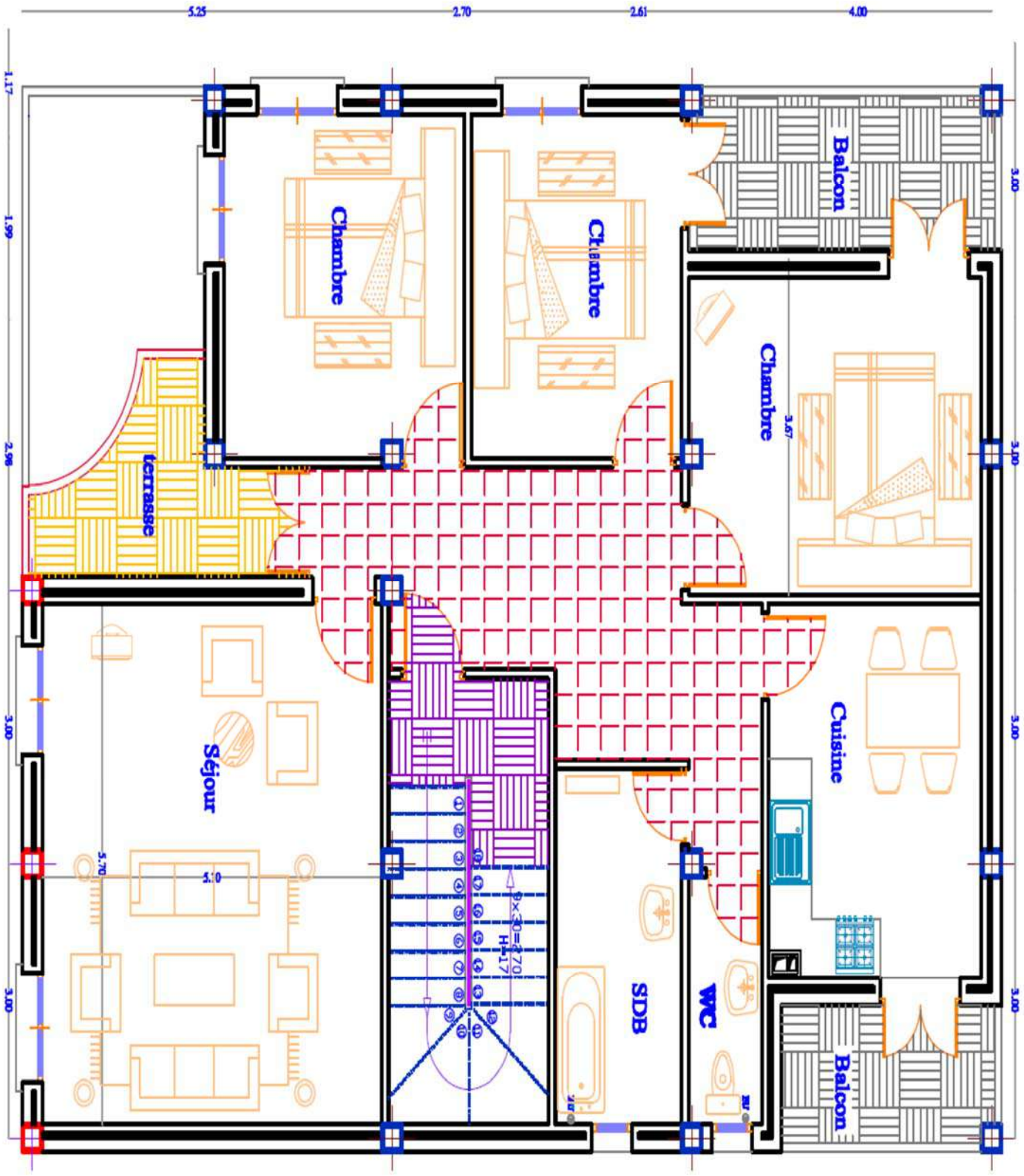
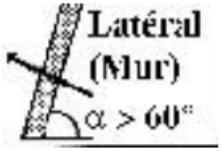
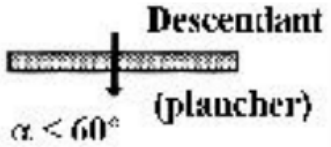



**Figure A1.3: Plan du 2ème étage**

## ANNEXE A.2

## RESISTANCES THERMIQUES D'ECHANGES SUPERFICIELLES

| $\frac{1}{h}$ en m².°C/W | Paroi en contact avec :<br>- l'extérieur,<br>- un passage ouvert,<br>- un local ouvert. | | | Paroi en contact avec :<br>- un autre local, chauffé ou non chauffé,<br>- un comble,<br>- un vide sanitaire. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $1/h_i$ | $1/h_e$ | $1/h_i + 1/h_e$ | $1/h_i$ | $1/h_e$ | $1/h_i + 1/h_e$ |
|  | 0,11 | 0,06 | 0,17 | 0,11 | 0,11 | 0,22 |
|  | 0,09 | 0,05 | 0,14 | 0,09 | 0,09 | 0,18 |
|  | 0,17 | 0,05 | 0,22 | 0,17 | 0,17 | 0,34 |

## ANNEXE A.3

## TARIFS DE L'ENERGIE THERMIQUE (SONELGAZ)

| Prix moyen 2017 | Gaz | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | AO | FSM | BP | MP | BP+MP |
| Janvier | 0,40 | 0,45 | 0,40 | 0,44 | 0,40 |
| Féverier | 0,40 | 0,45 | 0,41 | 0,43 | 0,41 |
| Mars | 0,41 | 0,45 | 0,41 | 0,43 | 0,41 |
| Avril | 0,40 | 0,45 | 0,40 | 0,53 | 0,41 |
| Mai | 0,37 | 0,44 | 0,38 | 0,55 | 0,39 |
| Juin | 0,35 | 0,43 | 0,36 | 0,76 | 0,38 |
| Jeuillet | 0,33 | 0,43 | 0,34 | 1,34 | 0,36 |
| Aout | 0,32 | 0,45 | 0,32 | 1,25 | 0,37 |
| September | 0,21 | 0,51 | 0,33 | 1,55 | 0,40 |
| October | 0,33 | 0,43 | 0,33 | 1,45 | 0,36 |
| Novembre | 0,33 | 0,42 | 0,33 | 0,77 | 0,36 |
| Decembre | 0,38 | 0,44 | 0,39 | 0,48 | 0,40 |
| Total année | 0,38 | 0,45 | 0,39 | 0,55 | 0,40 |

AO : Abonnées Ordinaire

FSM :Facturation Sur mémoire

BP :Bass Tension

MP :Moyen Tontion

## ANNEXE A4

## CALCUL TECHNICO-ECONOMIQUE

| Polystyrène expansé | e (mm) | S ($m^2$) | Q (kWh) | Cc (DA) | Prix (DA/$m^2$) | $C_{is}$ (DA) | $C_T$ (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18 | 15,6 | 12508,55 | 4753,25 | 235,63 | 73,51 | 4826,76 |
| 2 | 20 | 15,6 | 11831,68 | 4496,04 | 262,28 | 81,83 | 4577,87 |
| 3 | 40 | 15,6 | 7677,30 | 2917,38 | 523,16 | 163,22 | 3080,60 |
| 4 | 60 | 15,6 | 5682,16 | 2159,22 | 785,44 | 245,05 | 2404,27 |
| 5 | 80 | 15,6 | 4510,09 | 1713,84 | 1047,7 | 326,88 | 2040,72 |
| 6 | 100 | 15,6 | 3738,87 | 1420,77 | 1308,6 | 408,28 | 1829,05 |
| 7 | 120 | 15,6 | 3192,89 | 1213,3 | 1570,9 | 490,11 | 1703,41 |
| 8 | 140 | 15,6 | 2786,05 | 1058,7 | 1831,8 | 571,50 | 1630,21 |
| 9 | 160 | 15,6 | 2471,17 | 939,047 | 2094 | 653,34 | 1592,38 |
| 10 | 180 | 15,6 | 2220,24 | 843,693 | 2356,3 | 735,17 | 1578,86 |
| 11 | 200 | 15,6 | 2015,57 | 765,919 | 2618,6 | 817,01 | 1582,92 |
| 12 | 220 | 15,6 | 1845,45 | 701,273 | 2879,5 | 898,40 | 1599,67 |
| 13 | 240 | 15,6 | 1701,81 | 646,691 | 3141,8 | 980,23 | 1626,92 |
| 14 | 260 | 15,6 | 1578,92 | 599,992 | 3402,7 | 1061,63 | 1661,61 |
| 15 | 280 | 15,6 | 1472,58 | 559,583 | 3664,9 | 1143,46 | 1703,04 |
| 16 | 300 | 15,6 | 1379,66 | 524,273 | 3927,2 | 1225,29 | 1749,56 |
| 17 | 320 | 15,6 | 1297,77 | 493,156 | 4188,1 | 1306,68 | 1799,83 |
| 18 | 340 | 15,6 | 1225,06 | 465,525 | 4450,4 | 1388,52 | 1854,04 |
| 19 | 360 | 15,6 | 1160,06 | 440,826 | 4712,7 | 1470,35 | 1911,17 |
| 20 | 380 | 15,6 | 1101,62 | 418,616 | 4973,5 | 1551,74 | 1970,35 |

**Tableau A.4.1: Cas du polystyrène expansé**

| Liège expansé | e (mm) | S ($m^2$) | Q (kWh) | Cc (DA) | Prix (DA/$m^2$) | $C_{is}$ (DA) | $C_T$ (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 15,6 | 12588,57 | 4783,65 | 701,29 | 218,80 | 5002,46 |
| 2 | 40 | 15,6 | 8327,04 | 3164,27 | 1402,57 | 437,60 | 3601,87 |
| 3 | 60 | 15,6 | 6221,06 | 2364,00 | 2103,86 | 656,40 | 3020,40 |
| 4 | 80 | 15,6 | 4965,29 | 1886,81 | 2805,15 | 875,20 | 2762,02 |
| 5 | 100 | 15,6 | 4131,35 | 1569,91 | 3506,44 | 1094,00 | 2663,92 |
| 6 | 120 | 15,6 | 3537,25 | 1344,15 | 4207,72 | 1312,80 | 2656,96 |
| 7 | 140 | 15,6 | 3092,54 | 1175,16 | 4909,01 | 1531,61 | 2706,77 |
| 8 | 160 | 15,6 | 2747,16 | 1043,92 | 5610,3 | 1750,41 | 2794,33 |
| 9 | 180 | 15,6 | 2471,17 | 939,04 | 6311,59 | 1969,216 | 2908,26 |
| 10 | 200 | 15,6 | 2245,57 | 853,32 | 7012,87 | 2188,01 | 3041,33 |
| 11 | 220 | 15,6 | 2057,72 | 781,93 | 7714,16 | 2406,81 | 3188,75 |
| 12 | 240 | 15,6 | 1898,87 | 721,57 | 8415,45 | 2625,62 | 3347,19 |
| 13 | 260 | 15,6 | 1762,79 | 669,86 | 9116,74 | 2844,42 | 3514,28 |
| 14 | 280 | 15,6 | 1644,91 | 625,06 | 9818,02 | 3063,22 | 3688,29 |
| 15 | 300 | 15,6 | 1541,81 | 585,8883 | 10519,31 | 3282,02 | 3867,91 |
| 16 | 320 | 15,6 | 1450,87 | 551,33 | 11220,6 | 3500,82 | 4052,15 |
| 17 | 340 | 15,6 | 1370,06 | 520,62 | 11921,89 | 3719,62 | 4240,25 |
| 18 | 360 | 15,6 | 1297,77 | 493,15 | 12623,17 | 3938,42 | 4431,58 |
| 19 | 380 | 15,6 | 1232,73 | 468,44 | 13324,46 | 4157,23 | 4625,67 |
| 20 | 400 | 15,6 | 1173,90 | 446,08 | 14025,75 | 4376,03 | 4822,11 |

**Tableau A.4.2: Cas du liège expansé**

| Panneaux de fibres de bois | e (mm) | S ($m^2$) | Q (kWh) | Cc (DA) | Prix (DA/$m^2$) | $C_{is}$ (DA) | $C_T$ (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 15,6 | 14023,99 | 5329,11 | 729,34 | 227,55 | 5556,67 |
| 2 | 40 | 15,6 | 9631,19 | 3659,85 | 1458,68 | 455,10 | 4114,96 |
| 3 | 60 | 15,6 | 7333,95 | 2786,90 | 2188,02 | 682,66 | 3469,56 |
| 4 | 80 | 15,6 | 5921,54 | 2250,18 | 2917,36 | 910,21 | 3160,40 |
| 5 | 100 | 15,6 | 4965,29 | 1886,81 | 3646,69 | 1137,76 | 3024,58 |
| 6 | 120 | 15,6 | 4274,95 | 1624,48 | 4376,03 | 1365,32 | 2989,80 |
| 7 | 140 | 15,6 | 3753,14 | 1426,19 | 5105,37 | 1592,87 | 3019,06 |
| 8 | 160 | 15,6 | 3344,85 | 1271,04 | 5834,71 | 1820,42 | 3091,47 |
| 9 | 180 | 15,6 | 3016,68 | 1146,34 | 6564,05 | 2047,98 | 3194,32 |
| 10 | 200 | 15,6 | 2747,16 | 1043,92 | 7293,39 | 2275,53 | 3319,45 |
| 11 | 220 | 15,6 | 2521,84 | 958,30 | 8022,73 | 2503,09 | 3461,39 |
| 12 | 240 | 15,6 | 2330,68 | 885,66 | 8752,07 | 2730,64 | 3616,30 |
| 13 | 260 | 15,6 | 2166,46 | 823,25 | 9481,41 | 2958,19 | 3781,45 |
| 14 | 280 | 15,6 | 2023,86 | 769,06 | 10210,74 | 3185,75 | 3954,82 |
| 15 | 300 | 15,6 | 1898,87 | 721,57 | 10940,08 | 3413,30 | 4134,87 |
| 16 | 320 | 15,6 | 1788,43 | 679,60 | 11669,42 | 3640,85 | 4320,46 |
| 17 | 340 | 15,6 | 1690,12 | 642,24 | 12398,76 | 3868,41 | 4510,66 |
| 18 | 360 | 15,6 | 1602,06 | 608,78 | 13128,1 | 4095,96 | 4704,75 |
| 19 | 380 | 15,6 | 1522,72 | 578,63 | 13857,44 | 4323,52 | 4902,15 |
| 20 | 400 | 15,6 | 1450,87 | 551,33 | 14586,78 | 4551,07 | 5102,40 |

**Tableau A.4.3: Cas des panneaux de fibres de bois**

| Isolant sous vide | e (mm) | S ($m^2$) | Q (kWh) | Cc (DA) | Prix (DA/$m^2$) | $C_{is}$ (DA) | $C_T$ (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 15,6 | 13581,52 | 5160,97 | 561,03 | 175,04 | 5336,02 |
| 2 | 4 | 15,6 | 9218,68 | 3503,09 | 1122,06 | 350,08 | 3853,18 |
| 3 | 6 | 15,6 | 6977,33 | 2651,38 | 1683,09 | 525,12 | 3176,50 |
| 4 | 8 | 15,6 | 5612,70 | 2132,82 | 2244,12 | 700,16 | 2832,99 |
| 5 | 10 | 15,6 | 4694,54 | 1783,92 | 2805,15 | 875,20 | 2659,13 |
| 6 | 12 | 15,6 | 4034,55 | 1533,12 | 3366,18 | 1050,24 | 2583,37 |
| 7 | 14 | 15,6 | 3537,25 | 1344,15 | 3927,21 | 1225,28 | 2569,44 |
| 8 | 16 | 15,6 | 3149,10 | 1196,65 | 4488,24 | 1400,33 | 2596,98 |
| 9 | 18 | 15,6 | 2837,70 | 1078,32 | 5049,27 | 1575,37 | 2653,70 |
| 10 | 20 | 15,6 | 2582,35 | 981,29 | 5610,3 | 1750,41 | 2731,71 |
| 11 | 22 | 15,6 | 2369,17 | 900,28 | 6171,33 | 1925,45 | 2825,73 |
| 12 | 24 | 15,6 | 2188,49 | 831,62 | 6732,36 | 2100,49 | 2932,12 |
| 13 | 26 | 15,6 | 2033,42 | 772,70 | 7293,39 | 2275,53 | 3048,24 |
| 14 | 28 | 15,6 | 1898,87 | 721,57 | 7854,42 | 2450,57 | 3172,15 |
| 15 | 30 | 15,6 | 1781,03 | 676,79 | 8415,45 | 2625,62 | 3302,41 |
| 16 | 32 | 15,6 | 1676,95 | 637,24 | 8976,48 | 2800,66 | 3437,90 |
| 17 | 34 | 15,6 | 1584,37 | 602,06 | 9537,51 | 2975,70 | 3577,76 |
| 18 | 36 | 15,6 | 1501,47 | 570,56 | 10098,54 | 3150,74 | 3721,30 |
| 19 | 38 | 15,6 | 1426,82 | 542,19 | 10659,57 | 3325,78 | 3867,97 |
| 20 | 40 | 15,6 | 1359,24 | 516,51 | 11220,6 | 3500,82 | 4017,34 |

**Tableau A.4.4: Cas de l'isolant sous vide**

| L'aérogel de silice | e (mm) | S ($m^2$) | Q (KWh) | Cc (DA) | prix (DA/$m^3$) | Cis (DA) | CT (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6 | 15,6 | 13267,57 | 5041,67 | 253694,72 | 474,91 | 5516,59 |
| 2 | 8 | 15,6 | 11419,72 | 4339,49 | 253694,72 | 633,22 | 4972,71 |
| 3 | 10 | 15,6 | 10023,66 | 3808,99 | 253694,72 | 791,52 | 4600,52 |
| 4 | 12 | 15,6 | 8931,76 | 3394,07 | 253694,72 | 949,83 | 4343,90 |
| 5 | 14 | 15,6 | 8054,38 | 3060,66 | 253694,72 | 1108,13 | 4168,80 |
| 6 | 16 | 15,6 | 7333,95 | 2786,90 | 253694,72 | 1266,44 | 4053,34 |
| 7 | 18 | 15,6 | 6731,82 | 2558,09 | 253694,72 | 1424,74 | 3982,84 |
| 8 | 20 | 15,6 | 6221,062 | 2364,00 | 253694,72 | 1583,05 | 3947,05 |
| 9 | 22 | 15,6 | 5782,34 | 2197,28 | 253694,72 | 1741,36 | 3938,65 |
| 10 | 24 | 15,6 | 5401,42 | 2052,54 | 253694,72 | 1899,66 | 3952,20 |
| 11 | 26 | 15,6 | 5067,58 | 1925,68 | 253694,72 | 2057,97 | 3983,65 |
| 12 | 28 | 15,6 | 4772,61 | 1813,59 | 253694,72 | 2216,27 | 4029,87 |
| 13 | 30 | 15,6 | 4510,09 | 1713,83 | 253694,72 | 2374,58 | 4088,42 |
| 14 | 32 | 15,6 | 4274,95 | 1624,48 | 253694,72 | 2532,88 | 4157,37 |
| 15 | 34 | 15,6 | 4063,11 | 1543,98 | 253694,72 | 2691,19 | 4235,17 |
| 16 | 36 | 15,6 | 3871,27 | 1471,08 | 253694,72 | 2849,49 | 4320,58 |
| 17 | 38 | 15,6 | 3696,73 | 1404,75 | 253694,72 | 3007,80 | 4412,56 |
| 18 | 40 | 15,6 | 3537,25 | 1344,15 | 253694,72 | 3166,11 | 4510,26 |
| 19 | 42 | 15,6 | 3390,96 | 1288,56 | 253694,72 | 3324,41 | 4612,98 |
| 20 | 44 | 15,6 | 3256,29 | 1237,39 | 253694,72 | 3482,72 | 4720,11 |

**Tableau A.4.5: Cas de l'aérogel de silice**

| L'aérogel de polyurthane | e (mm) | S ($m^2$) | Q (KWh) | Cc (DA) | prix ($DA/m^3$) | Cis (DA) | CT (DA) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6 | 15,6 | 14694,19 | 5583,79 | 253694,72 | 474,91 | 6058,71 |
| 2 | 8 | 15,6 | 12851,66 | 4883,63 | 253694,72 | 633,22 | 5516,85 |
| 3 | 10 | 15,6 | 11419,72 | 4339,49 | 253694,72 | 791,52 | 5131,02 |
| 4 | 12 | 15,6 | 10274,88 | 3904,45 | 253694,72 | 949,83 | 4854,29 |
| 5 | 14 | 15,6 | 9338,67 | 3548,69 | 253694,72 | 1108,13 | 4656,83 |
| 6 | 16 | 15,6 | 8558,83 | 3252,35 | 253694,72 | 1266,44 | 4518,79 |
| 7 | 18 | 15,6 | 7899,19 | 3001,69 | 253694,72 | 1424,74 | 4426,44 |
| 8 | 20 | 15,6 | 7333,95 | 2786,90 | 253694,72 | 1583,05 | 4369,95 |
| 9 | 22 | 15,6 | 6844,20 | 2600,79 | 253694,72 | 1741,36 | 4342,15 |
| 10 | 24 | 15,6 | 6415,77 | 2437,99 | 253694,72 | 1899,66 | 4337,66 |
| 11 | 26 | 15,6 | 6037,82 | 2294,37 | 253694,72 | 2057,97 | 4352,34 |
| 12 | 28 | 15,6 | 5701,91 | 2166,72 | 253694,72 | 2216,27 | 4383,00 |
| 13 | 30 | 15,6 | 5401,42 | 2052,54 | 253694,72 | 2374,58 | 4427,12 |
| 14 | 32 | 15,6 | 5131,01 | 1949,78 | 253694,72 | 2532,88 | 4482,67 |
| 15 | 34 | 15,6 | 4886,38 | 1856,82 | 253694,72 | 2691,19 | 4548,02 |
| 16 | 36 | 15,6 | 4664,02 | 1772,33 | 253694,72 | 2849,49 | 4621,82 |
| 17 | 38 | 15,6 | 4461,02 | 1695,18 | 253694,72 | 3007,80 | 4702,99 |
| 18 | 40 | 15,6 | 4274,95 | 1624,48 | 253694,72 | 3166,11 | 4790,59 |
| 19 | 42 | 15,6 | 4103,78 | 1559,43 | 253694,72 | 3324,41 | 4883,85 |
| 20 | 44 | 15,6 | 3945,79 | 1499,40 | 253694,72 | 3482,72 | 4982,12 |

**Tableau A.4.6: Cas de l'aérogel de polyuréthane**