

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

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

*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

*Faculté du génie de la construction*

*Département du Génie Mécanique*

# Mémoire de fin d'études



**Spécialité : *Energétique.***

**Option : *Académique***

***Thème***

## **Conception et réalisation d'un dispositif de mesure de la conductivité thermique des matériaux**

*Proposé et dirigé par:*

***M. Nechiche Mustapha***

***Mlle. Hannachi Manel***

*Réalisé par:*

***Aichoun Souad***

***Amour Karim***

***Kaouane Karim***

***Année universitaire : 2018/2019***

## REMERCIEMENT

Nous remercions **Dieu** le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

Nous adressons notre vif remerciement à notre promoteur **Mr NECHICHE Mustapha** et notre Co promotrice **Mme HANACHI Manel** pour leur compréhension, conseil, aide et orientation efficace au cours de la recherche.

Nous tenons à remercier **les membres du jury** pour avoir accepté d'examiner ce travail et participer a cette soutenance.

Nous remercions tout **les membres du Laboratoire et le service maintenance** que nous avons pu côtoyer durant toute cette réalisation.

Nous adressons également notre profonde gratitude à tout les **professeurs de génie mécanique** en particulier **Mr AZZAM**.

Enfin, nous remercions aussi les trois familles **AICHOUN, AMOUR et KAOUANE**, et plus particulièrement le technicien du froid **Mr NECHICHE Cherif** qui nous a donner un coup de main ainsi son avis au cours de la conception, et toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

## Liste des figures :

Fig. 1.1 : isotherme et gradient thermique

Fig. 1.2 : système et bilan énergétique

Fig. 1.3 : illustration du transfert de chaleur conductif

Fig. 1.4 : illustration du transfert de chaleur convectif

Fig. 1.5 : illustration transfert de chaleur radiatif

Fig. 1.6 : bilan thermique sur un système élémentaire

Fig. 1.7: schématisation des flux et des températures dans un mur multicouches

Fig. 1.8: schéma électrique équivalent

Fig. 2.1 : Laine de roche

Fig. 2.2: Laine de verre

Fig. 2.3: Laine de mouton

Fig. 2.4: Fibre de bois

Fig. 2.5: Fibre de textile

Fig. 2.6: Laine de lin

Fig. 2.7: Polystyrène expansé

Fig. 2.8: Polyuréthane

Fig. 2.9 : Polystyrène extrudé

Fig.3.1: la densité de flux traversant un corp.

Fig. 3.2: coupe du dispositif des boites

Fig. 3.3: schéma représentent le flux dans la boite

Fig. 3.4 : principe de la plaque chaude gardé

Fig. 3.5 : principe de la méthode fluxmètre

Fig. 3.6 : schéma du montage du fil chaud

Fig. 3.7 : sonde de type hot disk

Fig. 4.1 : Vues en perspective et de face de l'armoire

Fig. 4.2 : Schéma d'une installation frigorifique

Fig. 4.3 : Assemblage des parois de la boîte

Fig. 4.4 : Boîte du dispositif fabriqué

Fig. 4.5 : Boîte du dispositif fabriqué

Fig. 4.6 : Installation du condenseur sur la face arrière de la boîte

Fig. 4.7 : Réalisation du circuit fermé par soudage au chalumeau

Fig. 4.8 : Opération de mise sous vide du circuit de froid

Fig. 4.9 : Injection du fréon dans le circuit de froid

Fig. 4.10 : Installation de la résistance chauffante

Fig. 4.11 : Installation de l'isolation thermique des deux compartiments : le chaud (à gauche de l'image) et le froid (à droite).

Fig. 4.12 : Fabrication de la porte du compartiment froid.

Fig. 4.13 : Fabrication de la porte du compartiment chaud.

Fig. 4.14: schéma de la régulation

Fig. 5.1 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique

Fig. 5.2 : Boîte de mesure de la conductivité thermique

Fig. 5.3 : Evolution de la température au niveau des surfaces d'un échantillon de polyuréthane exposé à une température constante de 50 °C

Fig. 5.4 : Evolution de la température au niveau des surfaces d'un échantillon de polyuréthane exposé à une température constante de -5 °C

Fig. 5.5 : Pyromètre utilisé pour les mesures de température en continu grâce à la détection par infrarouge et thermocouple K.

Fig. 5.6 : Polyuréthane expansé

Fig. 5.7: courbe du courant  $I=f(t)$

Fig. 5.8 : courbe du courant et du courant moyen  $I$  ;  $I_m = f(t)$

Fig. 5.9 : afficheurs des thermocouples placés dans les différentes zones concernées. La température de la salle (ambiante) est affichée sur le pyromètre infrarouge (Fig. 5.5).

#### **Liste des tableaux :**

Tableau 1: condition simplificatrice des équations de chaleur

Tableau 2: analogie entre la loi d'Ohm et la loi de Fourier

## Sommaire

Introduction générale..... 1

### Chapitre 1 :Généralités sur les transferts thermiques

1 Introduction..... 3

2 Définition :..... 3

3 Formulation d'un problème de transfert de chaleur..... 5

3.1 Bilan d'énergie ..... 5

3.2 Expression des flux d'énergie..... 5

4 Transfert de chaleur par conduction en régime permanent..... 9

4.1 L'équation de la chaleur ..... 9

4.2 Transfert unidirectionnel : ..... 11

5 Conclusion : ..... 15

### Chapitre 2 : Caractéristiques de l'isolation thermique dans le bâtiment

1. Introduction..... 16

2. Définition :..... 16

4. Les caractéristiques des matériaux isolants : ..... 17

5. Les familles d'isolants : ..... 17

5.1. Les isolants d'origine minérale : ..... 17

5.2 Isolants d'origine animale : ..... 19

5.3 Les éco-matériaux : ..... 21

5.4 Isolant synthétique :..... 24

8 Conclusion : ..... 27

### Chapitre 3 : Méthodes de mesure de la conductivité thermique

1. Introduction :..... 28

2. Définition :..... 29

3. Méthode de la mesure de la conductivité thermique d'un solide :..... 30

3.1. Méthode en régime permanent : ..... 31

3.1.1. Méthode des boîtes :..... 31

3.1.2. Méthode de la plaque chaude gardée: ..... 33

3.1.3. Méthode de fluxmètre : ..... 34

3.2. Régime transitoire : ..... 36

3.2.1. Méthode du fil chaud : ..... 36

3.2.2. Méthode du Hot Disk : .....	37
4. Conclusion : .....	38

#### **Chapitre 4 : Conception de la boîte**

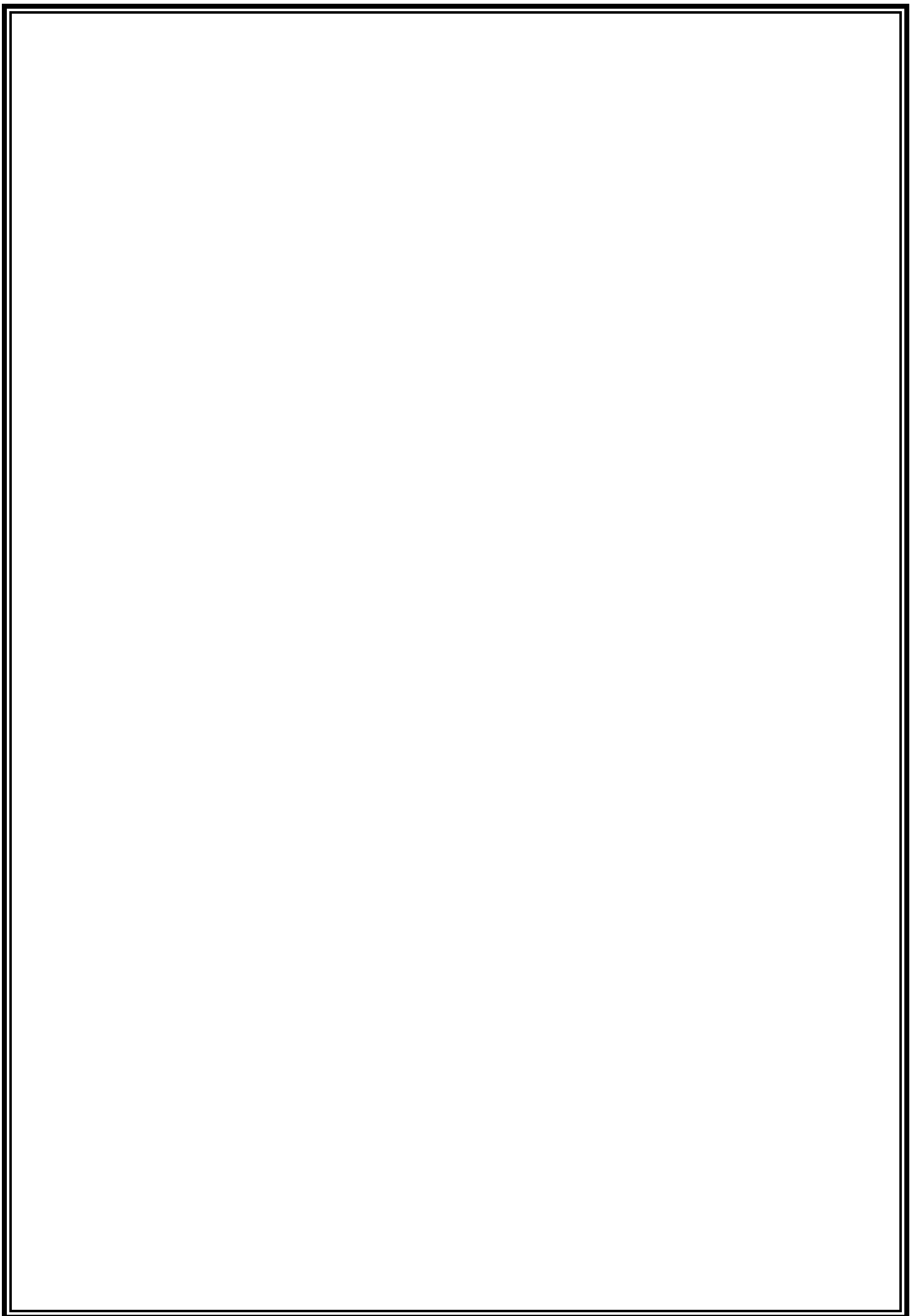
1 Problématique : .....	39
2 Objet : .....	39
3 Cahier de charge fonctionnelle : .....	40
4 Condition de fonctionnement : .....	40
5 Le choix des solutions : .....	41
6 Conception .....	43
6.1 Conception de la boîte : .....	43
6.2 Conception de la partie frigorifique .....	44
6.3 Conception de la partie chaude : .....	44
7 Construction de la boîte : .....	45
8 installation de la régulation électronique : .....	51

#### **Chapitre 5 : Etude expérimentale de la conductivité thermique**

1. Description de l'installation : .....	52
2. essais préliminaire sur l'appareil : .....	54
3. Essais sur un échantillon de polyuréthane expansé utilisé dans les enceintes frigorifiques	54
4. Evaluation de la conductivité thermique .....	56
4.1. Principe de mesure : .....	56
4.2. Détermination de la conductivité thermique : .....	56
Manipulation : .....	57
4. Conclusion : .....	62
Conclusion générale : .....	63

Annexes

Références bibliographiques



# Introduction générale

À l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment représente 30 à 40 % de la consommation totale d'énergie et une forte part des impacts environnementaux d'origine anthropique. De ce fait, il présente un fort potentiel d'amélioration à la fois sur les plans énergétiques et environnementaux. Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, plusieurs éléments de solution peuvent être mis en œuvre de manière complémentaire. Des solutions, appliquées au bâtiment, amènent à travailler simultanément sur la consommation du bâtiment, sa structure et ses divers équipements, dès la phase de conception [1].

L'un des buts principaux de la construction des bâtiments est de mettre les occupants à l'abri des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités. L'isolation thermique doit répondre à ce but. Il s'agit de protéger les occupants de manière automatique et passive des facteurs climatiques: pluie, vent, rayonnement solaire direct. Le concepteur doit aussi faire en sorte que la consommation d'énergie (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par les règlements et les possibilités financières, des occupants. L'évolution des techniques et le développement de nouveaux matériaux de construction contribuent à l'amélioration du confort thermique des usagers des bâtiments.

Certains matériaux naturels encore mal connus peuvent entraîner une diminution des dépenses énergétiques des bâtiments par une meilleure qualité d'isolation et contribuer ainsi à la protection de l'environnement [2].

Ainsi, dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous nous proposons de concevoir et de fabriquer un dispositif permettant à la fois la mesure de la conductivité thermique et le suivi, au cours du temps, de l'échange thermique qui s'effectue à travers un matériau placé entre deux zones, l'une chaude et l'autre froide. Ce dispositif est une boîte qui contient deux compartiments dont les températures peuvent être régulées : le premier compartiment est chauffé au moyen d'une résistance électrique et le deuxième refroidi grâce à une installation frigorifique. Les deux compartiments sont séparés par une paroi la plus isolante possible et dans laquelle un emplacement pour l'échantillon est prévu.

## **Introduction générale**

---

Ce mémoire est subdivisé en deux parties, l'une consacrée à l'étude bibliographique et l'autre dédiée à la conception, la fabrication et la mise en fonctionnement du dispositif.

Dans le premier chapitre, nous exposons quelques généralités sur les transferts thermiques ainsi que les lois mathématiques qui régissent les différents modes de transfert de la chaleur. Le second chapitre est consacré à une étude sur les caractéristiques des matériaux isolants utilisés dans le bâtiment, les différentes sources de déperdition et les méthodes utilisées pour l'optimisation de l'isolation thermique. Le troisième et le dernier chapitre bibliographique aborde les différentes méthodes de mesure de la conductivité thermique pour les deux régimes : permanent (boite, plaque chaude gardée, fluxmètre) et transitoire (fil chaud, hot disk).

Dans le quatrième chapitre nous décrivons la conception du dispositif en y détaillant les pièces constitutives, leurs dimensions ainsi que leurs rôles et aussi toutes les étapes de la fabrication, l'assemblage et la mise en fonctionnement de notre dispositif.

Ensuite, il est question d'essais effectués sur différents échantillons. Nous rapportons les résultats expérimentaux et les calculs numériques accompagnés d'une discussion dans le cinquième et dernier chapitre. Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

# Chapitre 1

## Généralités sur les transferts thermiques

### 1 Introduction

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industriels. Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents, la conduction, la convection et le rayonnement. Les connaissances de base dans ce domaine, sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation pratique de ces phénomènes.

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre, une fois la différence de température entre elles est établie. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques. Dans la littérature relative à cette discipline.

### 2 Définitions

#### 2.1 Champ de température

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température :  $T = f(x, y, z, t)$ . La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas:

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

#### 2.2 Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme (Figure 1.1). La variation de température par unité de

longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température

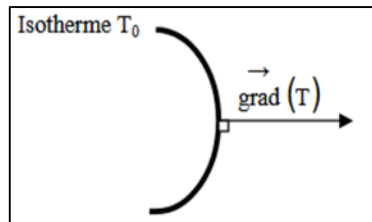


Fig 1.1 : isotherme et gradient thermique

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.1)$$

Avec :  $\vec{n}$  vecteur unitaire de la normal

$\frac{\partial T}{\partial n}$  Dérivée de la température le long de la normale.

## 2.3 Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (1.2)$$

Où  $S$  est l'aire de la surface ( $m^2$ ).

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise à travers la surface  $S$  par unité de temps :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.3)$$

### 3 Formulation d'un problème de transfert de chaleur

#### 3.1 Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système (Figure 1.2) et qui peuvent être :

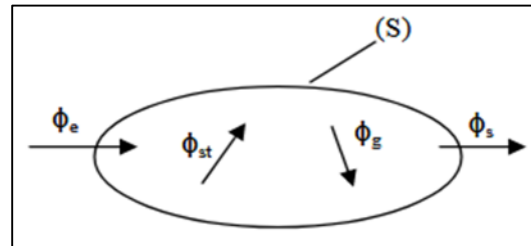


Fig 1.2 : système et bilan énergétique

$\phi_{st}$  Flux de chaleur stocké

$\phi_g$  Flux de chaleur généré

$\phi_e$  Flux de chaleur entrant

$\phi_s$  Flux de chaleur sortant

(S) le système

Le bilan thermique appliqué à un volume de contrôle, permet d'écrire :

$$\phi_e + \phi_g = \phi_s + \phi_{st} \quad (1.4)$$

#### 3.2 Expression des flux d'énergie

Il faut ensuite établir les expressions des différents flux d'énergie. En reportant ces expressions dans le bilan d'énergie, on obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

##### 3.2.1 Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température (figure 1.3). La propagation de la chaleur par

conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de J. B. Fourier qui en 1822 énonça sa loi et qui peut se traduire comme suit : «**En tout point d'un milieu isotrope, le flux thermique instantané, est proportionnel à la conductivité thermique du milieu et au gradient de température**»

$$\phi = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (1.5)$$

Pour le cas unidimensionnel, elle se réduit :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.6)$$

Avec :

- $\phi$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W).
- $\lambda$  : Conductivité thermique du milieu (W/m.K).
- $x$  : Variable d'espace dans la direction du flux (m).
- $S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>).

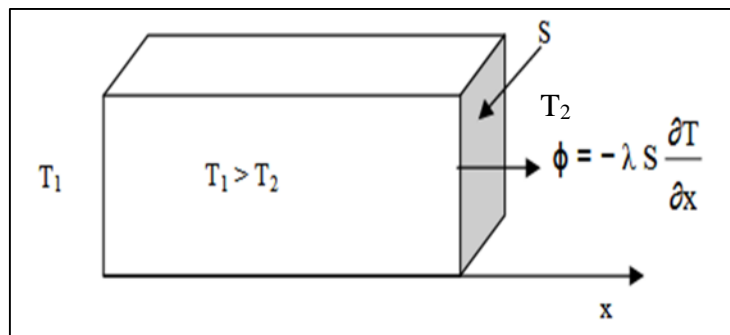


Fig 1.3 : illustration du transfert de chaleur conductif

### 3.2.2 Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton comme le montre la figure qui suit :

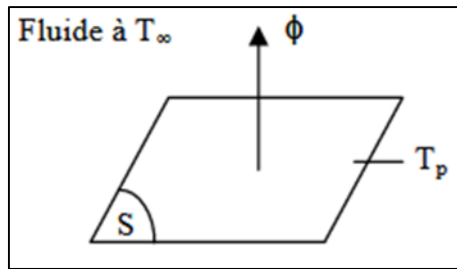


Fig 1.4 : illustration du transfert de chaleur convectif

$$\phi = h S (T_p - T_\infty) \quad (1.7)$$

Avec :

- $\phi$  : flux de chaleur transmis par convection (W).
- $h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m<sup>2</sup>.K)
- $T_p$  : Température de surface du solide (K)
- $T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide(K)
- $S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide (m<sup>2</sup>).

### Remarque

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection  $h$  est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

### 3.2.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide), (figure 1.5). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$\phi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (1.8)$$

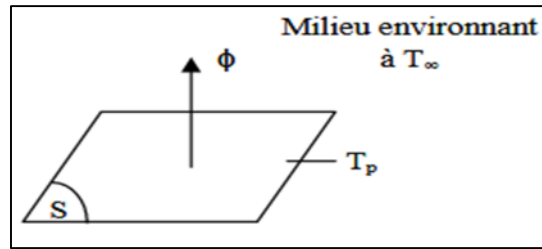


Fig 1.5 : illustration transfert de chaleur radiatif

Avec :

- $\phi$  : flux de chaleur transmis par rayonnement (W).
- $\sigma$  : Constante de Stefan Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>).
- $\varepsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface.
- $T_p$  : Température de la surface (K).
- $T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface (K).
- $S$  : air de la surface (m<sup>2</sup>).

### 3.2.4 Flux de chaleur lié à un débit massique

Lorsqu'un débit massique  $\dot{m}$  de matière entre dans le système à la température  $T_1$  et en ressort à la température  $T_2$ , on doit considérer dans le bilan (1.4) un flux de chaleur entrant correspondant :

$$\phi_e = \dot{m} c_p (T_1 - T_2) \quad (1.9)$$

Avec :

- $\phi_e$  : Flux de chaleur entrant dans le système (W).
- $\dot{m}$  : débit massique (Kg/s).
- $c_p$  : chaleur massique spécifique a pression constante (J/Kg.K).
- $T_1, T_2$  : temperature d'entrée et de sortie (K)

### 3.2.5 Stockage d'énergie

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante et en l'absence de changement d'état) :

$$\phi_{St} = \rho V c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.10)$$

Avec :

- $\phi_{St}$  : flux de chaleur stocké (W).
- $\rho$  : masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>).
- $V$  : volume (m<sup>3</sup>).
- $c$  : chaleur massique spécifique a pression constante (J/Kg.K)
- $T$  : temperature (K)
- $t$  : temps (s)

### 3.2.6 Génération d'énergie

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\phi_g = \dot{q} V \quad (1.11)$$

Avec :

- $\phi_g$  : Flux d'énergie généré (W).
- $\dot{q}$  : Densité volumique d'énergie générée (W/m<sup>3</sup>).
- $V$  : volume (m<sup>3</sup>).

## 4 Transfert de chaleur par conduction en régime permanent

### 4.1 L'équation de la chaleur

Dans sa forme monodimensionnelle, elle décrit le transfert de chaleur unidirectionnel au travers d'un mur plan (figure 1.6) :

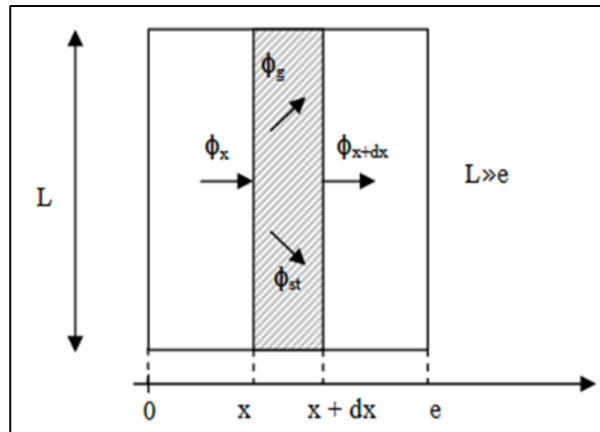


Fig 1.6 : bilan thermique sur un système élémentaire

Considérons un système d'épaisseur  $dx$  dans la direction  $x$  et de section d'aire  $S$  normalement à la direction  $O_x$ . Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\phi_x + \phi_g = \phi_{x+dx} + \phi_{st}$$

Avec :

$$\phi_x = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \quad \text{Et} \quad \phi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx}$$

$$\phi_g = \dot{q} S dx \quad \phi_{st} = \rho c S dx \frac{\partial T}{\partial t}$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par  $dx$ , nous obtenons

Soit 
$$\frac{(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_{x+dx} - (\lambda S \frac{\partial T}{\partial x})_x}{dx} + \dot{q} S = \rho c S \frac{\partial T}{\partial t}$$

Et dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.12)$$

Selon le système étudié, des simplifications peuvent se faire. Nous résumerons tout cela dans le tableau suivant :

Tableau 1: condition simplificatrice des équations de chaleur

Condition simplificatrice	Equation de la chaleur
si le milieu est isotrope ( $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ )	$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$
sans source de chaleur interne $\dot{q} = 0$ et isotropie du milieu	Equation de Fourier : $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$
Milieux homogènes, $\lambda = \lambda(T)$	$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{d\lambda}{dT} \left[ \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 \right] = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$
en régime permanent	L'équation de Laplace : $\nabla^2 T = 0$
Milieu isotrope, homogène en coordonnées cylindriques	$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$
Coordonnée cylindrique avec la température qui ne dépend que de r et t	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$
Coordonnée sphérique	$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (r T)}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$

a : La diffusivité thermique ( $m^2/s$ ), elle est définie par  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$

r : Le rayon (m).

$\theta$  : L'angle (rad).

## 4.2 Transfert unidirectionnel :

### 4.2.1 Mur multicouches :

Dans la réalité, un mur est constitué de plusieurs couches (Figure 1.7), où l'évolution de la température nous est inconnue, ne connaissant que  $T_{f1}$  et  $T_{f2}$  qui représentent les Températures des fluides en contact avec les deux faces du mur.

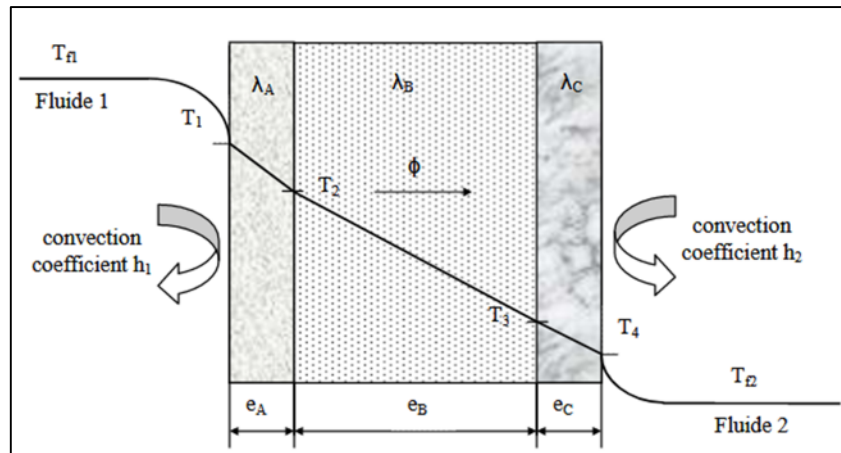


Fig 1.7: schématisation des flux et des températures dans un mur multicouche

Le schéma électrique équivalent est représenté sur la figure qui suit.

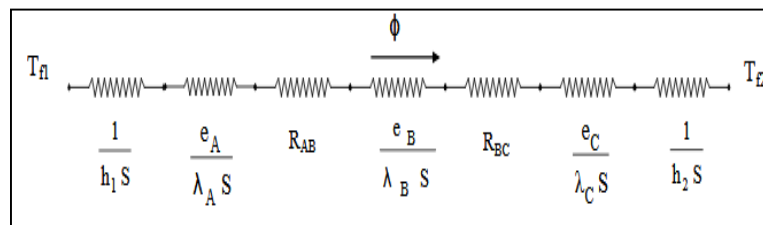


Fig 1.8: schéma électrique équivalent

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

$$\phi = h_1 S (T_{f1} - T_1) = \frac{\lambda_A S (T_1 - T_2)}{e_A} = \frac{\lambda_B S (T_2 - T_3)}{e_B} = \frac{\lambda_C S (T_3 - T_4)}{e_C} = h_2 S (T_4 - T_{f2}) \quad (1.13)$$

D'où :

$$\phi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}} \quad (1.14)$$

#### 4.2.2 Détermination de la résistance thermique :

Cette notion est utile pour accéder aux flux de chaleur traversant un objet. Elle peut être expliquée par l'analogie qui existe entre la loi de **Fourier** et la loi d'**Ohm** en électricité. Cette analogie se résume comme suite :

Tableau 2: analogie entre la loi d'Ohm et la loi de Fourier

$\vec{j} = \sigma \overrightarrow{\text{grad}} V$	$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductivité électrique <math>\sigma</math></li> <li>• Potentiel électrique <math>V</math></li> <li>• Densité du courant <math>j</math></li> <li>• Courant électrique <math>I</math></li> <li>• <math>\Delta V = R_{\text{elec}} I</math></li> <li>– <math>R_{\text{elec}}</math> : résistance électrique</li> <li>– <math>\Delta V</math> : différence de potentiel</li> <li>– <math>\frac{1}{R_{\text{elec}}}</math> : conductance électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductivité thermique <math>\lambda</math></li> <li>• Température <math>T</math></li> <li>• Densité de flux <math>q</math> ou <math>\phi</math></li> <li>• Flux thermique <math>\phi</math></li> <li>• <math>\Delta T = R_{\text{th}} \phi</math></li> <li>– <math>R_{\text{th}}</math> : résistance thermique</li> <li>– <math>\Delta T</math> : différence de temperature</li> <li>– <math>\frac{1}{R_{\text{th}}}</math> : conductance thermique</li> </ul>

La loi d'Ohm, exprime la différence de potentiel

$$\Delta V = R_{\text{elec}} I \tag{1.15}$$

La loi de Fourier (pour un transfert unidirectionnel) nous donne la différence de température proportionnelle à la densité de flux :

$$\Delta T = \frac{e}{\lambda} \phi \tag{1.16}$$

Par conséquent, cela nous permet de définir la résistance thermique :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S} \text{ (K/W)} \tag{1.17}$$

Quand les murs sont disposés en série, la résistance totale  $R_t$  sera, comme dans le cas électrique, la somme des résistances :

$$R_t = \sum_i R_i = \sum_i \frac{1}{\lambda_i} \frac{e_i}{S_i} \tag{1.18}$$

Par contre, s'ils sont disposés en parallèles :

$$\frac{1}{R_t} = \sum_i \frac{1}{R_i} = \sum_i \frac{\lambda_i S_i}{e_i} \tag{1.19}$$

**Remarque**

La résistance thermique des **cylindres** est donnée par :

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Et les **sphères** :

$$R = \frac{1}{4\lambda\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

### 4.3 Transfert multidirectionnel

Lorsque la chaleur se diffuse sur plusieurs directions, on peut appliquer deux méthodes pour calculer le flux de chaleur :

#### 4.3.1 Méthode du coefficient de forme

En présence d'un système bidimensionnel où tridimensionnel et en ne connaissant que les températures limites  $T_1$  et  $T_2$ , l'expression du flux de chaleur est :

$$\phi = \lambda F(T_1 - T_2) \quad (1.20)$$

**Avec :**

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu entre les surfaces  $S_1$  et  $S_2$  ( $\text{w. m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ).

$T_1$  : Température de la surface ( $\text{°C}$ ).

$T_2$  : Température de la surface ( $\text{°C}$ ).

$F$  : coefficient de forme (m)

Le coefficient de forme  $F$ , dépend des dimensions de la forme et de la position relative des surfaces  $S_1$  et  $S_2$ .

#### 4.3.2 Méthodes numériques

Quand l'équation de Laplace ne peut être résolue par la méthode du coefficient de forme (cas des surfaces non isothermes ont autre), on fait intervenir les méthodes numériques à travers la méthode des différences finies, grâce à sa simplicité et à la précision accrue que l'on peut obtenir en l'absence de discontinuité (chocs, changement de milieux) cette méthode est préconisée pour l'étude de l'évolution de la température [3].

## 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqués le phénomène de transfert de chaleur par conduction dans un régime permanent.

D'après l'étude faite, il en ressort que la résolution du transfert de chaleur par conduction, en régime permanent (la température indépendante du temps), reste accessible de par la méthode analytique et permet d'avoir des résultats fiables.

## Chapitre 2

# Isolations thermiques dans le bâtiment

## 1. Introduction

Face au défi majeur du changement climatique. La problématique des bâtiments devient de plus en plus un enjeu environnemental et économique, et les charges énergétiques pèsent de plus en plus lourdement. Ce qui a poussé les chercheurs et les spécialistes à chercher et développer de nouvelles méthodes et matériaux pour bien isoler les habitations et avoir du confort en prenant compte des différents facteurs (esthétique, cout et frais, effet sur l'environnement).

## 2. Définition

Un Isolant thermique est un matériau, produit ou système qui permet de réduire les échanges thermique à travers la paroi sur ou dans laquelle il est placée, il est caractérisé par sa résistance thermique exprimée en (K/W). L'isolation thermique d'un bâtiment ou d'une habitation sera performante si l'isolant couvre toute les parties de celui-ci (toit et comble, murs, fenêtres et portes extérieurs ...) ce qui permettra de réduire la consommation énergétique. Donc il est nécessaire d'utiliser des isolants agréés et certifiées par les normes en vigueur, et qui soient en mesure d'offrir la résistance thermique souhaité.

## 3. Raison d'isolation

L'isolation dans le bâtiment permet de :

- Réduire la quantité d'énergie consommée pour le chauffage et pour la climatisation durant toute l'année afin d'atteindre les conditions de confort.
- Aider à la protection de l'environnement en réduisant les consommations et les émissions de gaz à effet de serre et en préservant les ressources énergétiques.

## 4. Les caractéristiques des matériaux isolants

Pour choisir un bon isolant il faut donc connaître ces caractéristiques. Les matériaux isolants possèdent différentes caractéristiques qu'il faut prendre en considération à chaque fois lors de l'utilisation de ces derniers, qui sont :

- les qualités mécaniques
- le conditionnement
- l'isolation phonique
- la rigidité ou la souplesse du produit
- la perméabilité à l'air et à la vapeur de l'eau
- la durée de vie
- la résistance au feu ou à une inondation.
- effet sur la santé et l'environnement

## 5. Les familles d'isolants

En général il existe 04 familles d'isolants qui sont:

### 5.1. Les isolants d'origine minérale

La laine de verre et la laine de roche sont les isolant conventionnels les plus souvent utilise dans le bâtiment.

#### 5.1.1. Laine de roche

Elle est obtenue à partir de la fusion de roche volcanique (basalte) de fondant et de coke industrielle. Une pate est alors obtenue, fibrée et encollée par des liants chimiques (résine phénoliques) avant d'être stabiliser par chauffage en étuve.

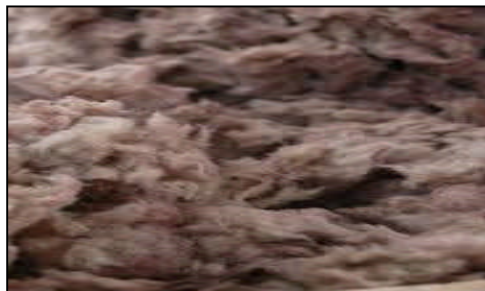


Fig 2.1 : Laine de roche

### 5.1.2. Laine de verre

Elle est obtenue par un procédé industriel similaire, mais à partir de la fusion de sable siliceux et/ou du verre recyclé.



Fig 2.2: Laine de verre

#### Leurs avantages

- Conductivité faible  $\lambda$  en (W/m.K) entre 0.03 et 0.04
- Très perméable à la vapeur d'eau mais non capillaire.
- Non putrescible ne favorisant pas le développement de moisissures.
- Moyen à bon affaiblissement acoustique en tant que ressort.
- Non combustible.
- Ressources non renouvelables mais abondantes.
- Très bon pouvoir isolant.

#### Leurs inconvénients

- Les fibres sont irritantes pour la peau, les yeux, les voies respiratoires et peuvent provoquer des lésions, rougeurs et démangeaisons.
- Mauvais bilan carbone et énergie grise élevée.
- Facilement dégradable par les rongeurs pour les faibles densités.
- Mauvaise stabilité dans le temps
- Contribution médiocre au confort d'été sauf pour les hautes densités.

## 5.2 Isolants d'origine animale

### 5.2.1 Laine de mouton

La laine de mouton est lavée pour éliminer le suint et les impuretés, puis y sont ajoutés des additifs antimites et des fibres de texturation pour constituer les produits finis d'isolation. Malgré les compromis faits pour la conservation et la texturation de la fibre, la laine de mouton reste un très bon isolant écologique.



Fig 2.3: Laine de mouton

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.035 à 0.042 (W/m.K)
- Bon pouvoir hygroscopique (capacité d'absorber l'humidité de l'air).
- Ne nécessite pas la pose d'un frein-vapeur.
- La laine peut absorber jusqu'à 33% de son poids en eau.
- Bon affaiblissement acoustique en tant que ressort.
- Sans effet négatif sur la santé.
- Pas de dégagement de flamme ni de gaz toxique en cas d'incendie.
- Insensible aux rongeurs.

#### Inconvénients

- Faible contribution au confort d'été.
- Sensible au Feu.
- Matériau putrescible en cas de forte humidité, idéal pour y nidifier.
- Nécessite un traitement antimite

### 5.2.2 La plume de canard

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

Les isolants sont fabriqués à partir de 70% de plume de canard, de 10% de laine de mouton pour une meilleure élasticité et de 20% de fibre textile pour la stabilité. La laine est recouverte d'un voile en polyester micro perforé sur une face pour une meilleure stabilité lors de la pose.

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.035 à 0.042 (W/m.K)
- Très Bon pouvoir hygroscopique.
- La plume peut absorber jusqu'à 70% de son poids en eau.
- Bon affaiblissement acoustique en tant que ressort.
- Sans effet négatif sur la santé.
- Pas de dégagement de gaz toxique en cas d'incendie.
- Insensible aux rongeurs.

#### Inconvénients

- Coût moyen.
- Tassement en isolation verticale si mauvaise accroche.
- Faible contribution au confort d'été.
- Nécessite un parement coupe feu.
- Idéale pour la nidification des petits animaux.

### 5.3 Les éco-matériaux

Ce sont des matériaux conçus à base des critères du développement durable .ses matériaux écologique sont utilise dans les projets dits à qualités environnementales. ils sont performants et peuvent être recyclable.

### 5.3.1 Laine de bois ou fibre de bois

Les fibres de bois sont obtenues par défilage de chutes de bois résineux. Elles peuvent être utilisées en vrac ou transformées sous forme de panneaux. Pour ce faire une pâte épaisse est formée par adjonction d'eau et d'adjuvants.

Un autre procédé consiste à chauffer à haute température sans l'ajout d'adjuvant, la lignine du bois étant le principal agglomérant.

Les fibres sont traitées avec du sulfate d'ammonium ou du sel de bore.



Fig 2.4: Fibre de bois

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.038 à 0.042 (W/m.K)
- Matériau non consommable par les rongeurs.
- Matériau difficilement inflammable.
- Pas de propagation de flamme ni de gaz toxique en cas d'incendie.
- Bon isolant acoustique en tant que ressort (bruits aériens) et isolation phonique des sols (bruits d'impacts).
- Ouvert à la vapeur d'eau, bon régulateur hygroscopique. Bonne contribution au confort d'été.
- Bonne stabilité dans le temps si la densité est adaptée. Bon bilan Carbone pour les hautes densités.

#### Inconvénients

- Contient des produits ignifuges et des adjuvants.
- Energie grise élevée.
- Coût moyen parmi les matériaux d'origine naturelle.

- Matériau putrescible en cas d'humidité persistante.
- Nécessite la pose d'un parement frein-vapeur.

### 5.3.2 Fibre de textiles ou fibre de coton

La collecte des textiles usagés en France par les associations permettent le développement d'une filière de transformation des tissus usagés en isolants assurés par une structure associative d'insertion : le RELAIS

Après un tri selon les matières, les tissus sont découpés, hachés et défibrés puis mélangés dans des proportions constantes de coton, laine et acrylique.

Les fibres sont ensuite thermo liées avec du polyester pour former des rouleaux ou panneaux semi rigides de densité variable.



Fig 2.5: Fibre de textile

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.035 à 0.045 (W/m.K)
- Matériau insensible aux rongeurs, incinérable en valorisation chaleur.
- Perméable à la vapeur d'eau nécessite la pose d'un frein-vapeur.
- Sans effet négatif sur la santé.
- Pas de dégagement de gaz toxique en cas d'incendie.
- Bon isolant acoustique (bruits aérien).
- Épouse la forme les inégalités lors d'une pose à plat dans les combles

#### Inconvénients

- Sensible au feu nécessite un parement coupe feu.
- Perte de 10% si le matériau est humide.

- Faible contribution au confort d'été.
- Stable en isolation verticale si accroche adaptée.

### 5.3.3 Laine de lin

Les produits d'isolation issus du lin sont fabriqués à partir des fibres courtes de la plante, qui ne sont pas utilisées dans l'industrie du textile.

Les produits finaux texturés peuvent se présenter sous différentes formes : en vrac, en rouleaux, en panneau semi-rigide ou rigide pour les cloisons, en feutre comme isolant acoustique, ou en paillette pour le béton de Lin.



Fig 2.5: Laine de lin

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.037 à 0.040 (W/m.K)
- Bon pouvoir hygroscopique.
- Bon affaiblissement acoustique.
- Sans effet négatif sur la santé.
- Pas de dégagement de gaz toxique en cas d'incendie.
- Insensible aux rongeurs.

#### Inconvénients

- Coût moyen.
- Tassement en isolation verticale.
- Faible contribution au confort.
- Sensible au feu, nécessite un parement coupe feu.

- Matériau sensible au feu.

## 5.4 Isolant synthétique

Sont des produits d'origine organique .ils regroupent plusieurs familles de produits isolants à cellules fermées .ils émettent de particules nocives en cas d'incendie.se sont des produits non renouvelable.

### 5.4.1 Polystyrène expansé

Ces isolants sont produits par l'industrie du pétrole, le plus souvent à partir d'un ou de plusieurs dérivés du processus de raffinage. Issu du naphta, le polystyrène expansé est obtenu par polymérisation des billes de styrène qui en sont issues avec de l'eau et du gaz pentane.



Fig 2.6: Polystyrène expansé

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.028 à 0.038 (W/m.K)
- Matériau non altérable en présence d'eau.
- Matériau peu perspirant, non hygroscopique, non capillaire.
- Très bonne durabilité, stabilité dimensionnelle et résistance à la compression.
- Utilisable noyé sous chape liquide ou en parties enterrés.
- Mise en œuvre aisée et maîtrisée. Très bon isolant thermique.

#### Inconvénients

- Bilan carbone très mauvais et énergie grise élevée.
- Dégagement de pentane (pollution de l'ozone).
- Matière première limitée pétrole. Difficilement recyclable.
- Mauvaise performance phonique.

- Sensible au feu, dégagement de gaz toxique en cas de coupe à chaud et risque grave en cas d'incendie.

#### 5.4.2 Isolant sols polyuréthane

Les mousses de polyuréthanes sont obtenues par catalyse et expansion à partir d'un mélange d'isocyanate, de polyol, et d'un gaz expanseur (CO<sub>2</sub>) avec ajout de stabilisant et d'ignifugeants.

On obtient des mousses dures à cellules fermées, peu compressibles et très bon pouvoir isolant.



Fig 2.7: Polyuréthane

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.024 à 0.03 (W/m.K)
- Matériau insensible à l'eau.
- Matériau peu à très peu perspirant, non hygroscopique, non capillaire.
- Utilisable noyé sous chape liquide ou en parties enterrés.
- Permet de se passer d'une dalle de ragréage.
- Moulage en éléments spéciaux type coque de ballon.

#### Inconvénients

- Bilan carbone très mauvais et énergie grise très élevée.
- Matière première limitée pétrole Difficilement recyclable.
- Mauvaise performance phonique.
- Dégradable par les rongeurs.

- Sensible au feu, dégagement de gaz hautement toxique en cas d'incendie.

### 5.4.3 Isolant murs polystyrène extrudé

Ces isolants sont produits par l'industrie du pétrole, le plus souvent à partir d'un ou de plusieurs dérivés du processus de raffinage.

Issu du naphta, le polystyrène extrudé est obtenu après polymérisation du styrène par extrusion sous pression d'une pâte de fusion grâce à un gaz lourd [4].

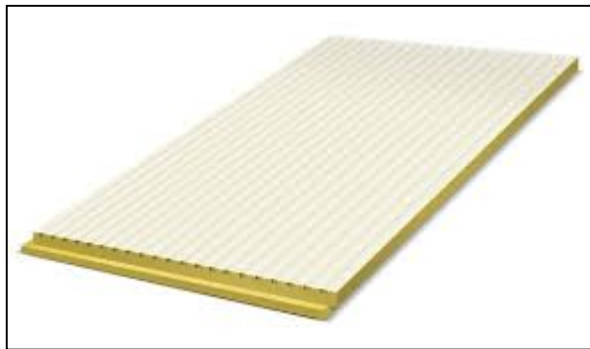


Fig 2.8 : Polystyrène extrudé

#### Avantage

- La conductivité thermique peut varier de 0.029 à 0.035 (W/m.K)
- Matériau non altérable en présence d'eau.
- Matériau très peu perspirant, non hygroscopique, non capillaire.
- Très bonne durabilité, stabilité dimensionnelle et résistance à la compression.
- Utilisable noyé sous chape liquide ou en parties enterrés

#### Inconvénients

- Bilan carbone très mauvais et énergie grise élevée.
- Dégagement de pentane (pollution de l'ozone).
- Matière première limitée pétrole.
- Difficilement recyclable
- Mauvaise performance phonique.
- Dégadable par les rongeurs.
- Sensible au feu.
- Dégagement de gaz toxique en cas de coupe à chaud et risques graves en cas d'incendie.

## 6 Conclusion

Isoler son habitation c'est plus de confort. L'isolation thermique du bâtiment permet de réduire les émissions du gaz à effet de serre et les déchets radioactifs qui nuisent à la santé et l'environnement, donc éviter l'épuisement des ressources et limiter la production de l'énergie. Et faire en sorte que le changement climatique à l'extérieur n'est pas beaucoup d'influence sur l'intérieure d'une habitation.

## Chapitre 3

### Méthodes de mesure de la conductivité thermique

#### 1. Introduction

On ne peut parler de conductivité que dans le cas où le transfert de chaleur est dû uniquement à la conduction pure. Pour les matériaux isolants, qui sont dans la plupart des cas des matériaux poreux légers, cette hypothèse ne peut être systématiquement retenue. De nouveaux termes sont alors nécessaires pour décrire les caractéristiques de ces matériaux, sièges de transferts de chaleur combinés par conduction et rayonnement.

- À l'aide des méthodes de mesure en **régime stationnaire**, on peut déterminer dans tous les cas, correctement, le rapport entre une différence de température et la densité de flux thermique qui en résulte, c'est-à-dire une résistance thermique, quel que soit le mécanisme du transfert de chaleur à travers ce matériau. Les meilleures précisions de mesure (mieux que 1 %) sont obtenues par **la méthode de la plaque chaude gardée**. Dans le cas plus simple où le transfert de chaleur se réduit à un seul mode, celui de la conduction, on peut calculer la conductivité thermique de l'éprouvette si l'on connaît sa géométrie et si les différences de température sont suffisamment réduites.
- Les méthodes en **régime non stationnaire** sont plus rapides et moins précises que les méthodes en régime stationnaire. Elles sont basées habituellement sur des équations valables uniquement pour des milieux opaques où le transfert de chaleur est purement conductif, ayant une conductivité thermique constante. C'est pour cette raison que l'on doit analyser attentivement, dans chaque cas, si une telle méthode peut être utilisée sans risquer d'importantes erreurs [6].

## 2. Définition

En physique, la conductivité thermique est la grandeur introduite pour quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface sous l'action d'une différence de température entre les deux extrémités d'un échantillon de ce corps, donc en présence d'un gradient de température.

Dépendant essentiellement de la nature des matériaux considérés, on la trouve généralement en relation directe avec la conductivité électrique d'un corps. Cette propriété surprenante, a été expliquée simplement par le fait que ce sont les électrons libres dans un corps qui sont le plus souvent associés aux transferts de chaleur.

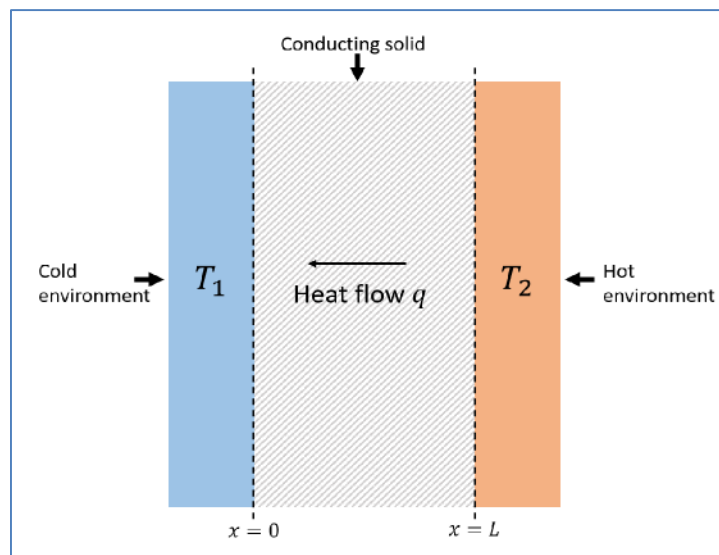
La conductivité thermique intervient dans la formulation de la loi de Fourier pour la conduction de la chaleur.

$$q = -\lambda \text{ grad } T \quad (3.1)$$

$q$ : La densité du flux de chaleur exprimé ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\lambda$ : Conductivité thermique exprimé en ( $\text{W}/\text{m.K}$ )

grad  $T$  : gradient de temperature



**Fig.3.1:** la densité de flux traversant un corp.

Pour un transfert de chaleur dans un mur d'épaisseur  $e$  dont les deux faces plane de surface  $S$  sont maintenues aux températures uniformes et constantes  $T_1$  et  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ), le flux de chaleur  $\phi$  (quantité de chaleur traversant le mur) est, en régime permanent :

$$\phi = \frac{\lambda * S}{e} (T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

$\phi$  : Flux de chaleur en (w)

S : surface en (m<sup>2</sup>)

e : épaisseur en (m)

$\lambda$ : Conductivité thermique exprimé en (W/m.K)

$T_1$  et  $T_2$  : Températures en (K)

### 3. Méthode de la mesure de la conductivité thermique d'un solide

Les méthodes de mesure peuvent être classées selon trois critères :

— le type de régime thermique ;

— le type de mesure ;

— la géométrie de l'appareillage et des éprouvettes.

- Le régime thermique utilisé peut être stationnaire ou transitoire. Dans les appareillages à plaque chaude gardée, à fluxmètres et à symétrie cylindrique, le régime thermique couramment utilisé est stationnaire. Dans certains appareillages à fluxmètres, dans la méthode flash et dans la méthode du fil chaud, le régime thermique est transitoire.
- Les méthodes peuvent aussi être classées comme absolues ou relatives (méthodes de comparaison). Sont des méthodes absolues : la méthode de la plaque chaude gardée, la méthode à symétrie cylindrique, la méthode du fil chaud et la majorité des méthodes en régime thermique transitoire.
- Le dernier critère de classement peut être la géométrie de l'appareillage et des éprouvettes. On parle de géométrie plane avec des éprouvettes soit carrées, soit circulaires pour les appareillages à plaque chaude gardée ou à fluxmètres ; on parle de géométrie cylindrique pour les appareillages à symétrie cylindrique ; enfin on parle d'approximation de l'espace semi-infini pour certaines méthodes flash ou d'espace infini à symétrie radiale pour la méthode du fil chaud.

### 3.1. Méthode en régime permanent

Il existe plusieurs méthodes, on citera trois d'entre elles dans ce travail :

- la méthode de la boîte
- la méthode de la plaque chaude gardée
- Méthode de fluxmètre

#### 3.1.1. Méthode des boîtes

Attardons nous sur une des méthodes de mesure de la conductivité thermique, que nous utiliserons plus tard, à savoir la méthode dite des boîtes. Elle a été mise au point par le laboratoire d'études thermiques et solaires de l'Université Claude Bernard Lyon I en France [7]. Le schéma de principe de cette méthode est présenté sur la Figure

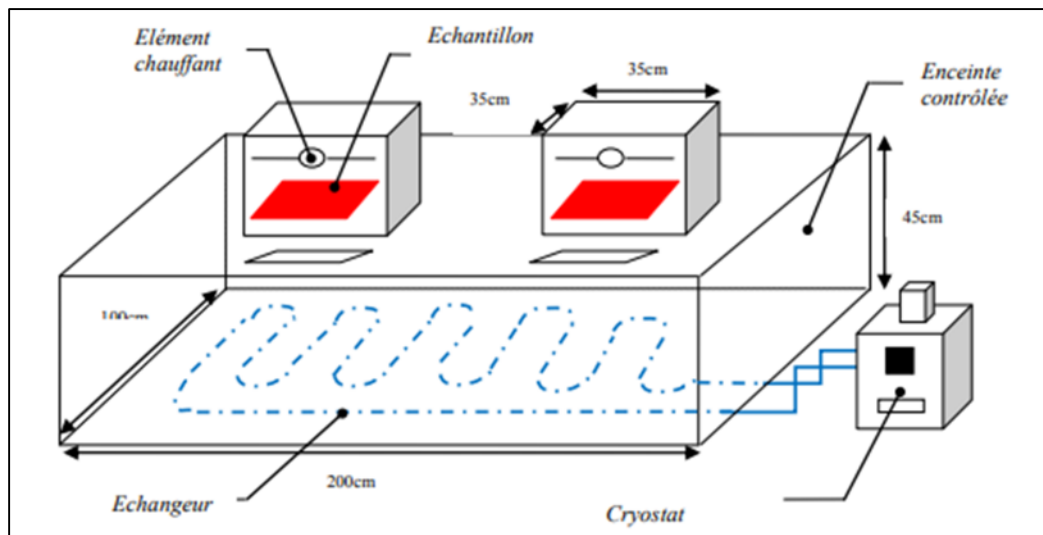


Fig 3.2: coupe du dispositif des boîtes

Une grande enceinte notée A, très bien isolée, est maintenue à une température très faible grâce à un refroidissement à l'aide d'un cryostat. Deux boîtes identiques mais indépendantes, sont isolées de l'intérieur. Une résistance chauffante crée un gradient de température au niveau de l'échantillon. Les capteurs de température sont des thermo-sondes à résistances. La première boîte permet de mesurer, en régime permanent, la conductivité thermique tandis que la seconde donne accès, en régime transitoire, à la diffusivité thermique.

On fait le bilan thermique en écrivant que le flux émis par la résistance chauffante (effet Joule) est égal au flux traversant l'échantillon auquel s'ajoute le flux dû aux pertes thermiques à travers la paroi de la boîte.

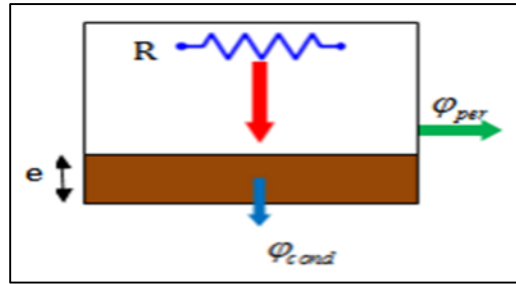


Fig 3.3: schéma représentant le flux dans la boîte

$$\phi_{\text{res}} = \phi_{\text{per}} + \phi_{\text{cond}} \quad (3.3)$$

$$\phi_{\text{res}} = \frac{V^2}{R}$$

Puissance émise par la résistance.

$$\phi_{\text{per}} = c(T_B - T_a)$$

Pertes latérales.

$$\phi_{\text{cond}} = \frac{\lambda_e S}{e} (T_c - T_f)$$

Flux par conduction.

On obtient l'expression de la conductivité thermique de l'échantillon  $\lambda_e$  sous la forme :

$$\lambda_e = \frac{e}{S(T_c - T_f)} \left[ \frac{V^2}{R} - c(T_B - T_a) \right] \quad (3.4)$$

Avec:

- e: L'épaisseur de l'échantillon en (m).
- S: La surface de la face de l'échantillon en (m<sup>2</sup>).
- c: La constante des pertes latérales
- V: La tension aux bornes de la résistance en (V).
- R: La valeur de la résistance chauffante en (Ω).
- $\lambda_e$  : la conductivité thermique de l'échantillon en (W/m.K).
- $T_c, T_f, T_B, T_a$ , sont respectivement les températures de la face supérieure, la face inférieure, la boîte et celle de la salle [8].

A noter que cette méthode permet des mesures sur tous les types de matériaux utilisés dans l'industrie et le bâtiment, à l'exception des métaux, qu'ils soient solides, granulaires, pulvérulents ou liquides.

Néanmoins il faut noter qu'elle est plus appropriée à des matériaux homogènes, pas trop conducteur ( $\lambda < 3 \text{ W/m. K}$ ), de plus la précision est moins bonne quand la température augmente [5].

### 3.1.2. Méthode de la plaque chaude gardée

C'est une expérience en régime permanent où l'on impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel ; on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon.

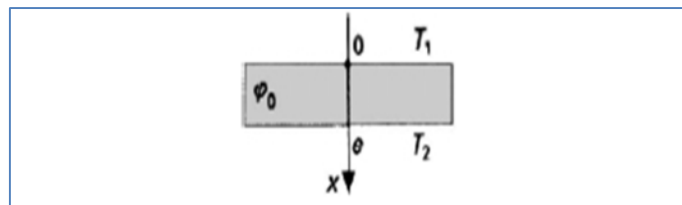


Fig 3.4 : principe de la plaque chaude gardée

Le **modèle thermocinétique** est particulièrement simple :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (3.5)$$

$$T = T_1 \quad \text{à} \quad x = 0$$

$$T = T_2 \quad \text{à} \quad x = e$$

Soit 
$$T = \frac{T_2 - T_1}{e} x + T_1 \quad (3.6)$$

Les grandeurs mesurées sont la densité de flux  $\varphi$ , les températures  $T_1(x = 0)$  et  $T_2(x = e)$ .

L'identification de paramètres est élémentaires puisqu'il n'y a qu'un paramètre  $\lambda$ .

Calculons la densité de flux  $\varphi$  [9] :

$$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{e} \quad (3.7)$$

D'où 
$$\lambda = \frac{\varphi * e}{T_1 - T_2} \quad (3.8)$$

### 3.1.3. Méthode de fluxmètre

La méthode fluxmètre a pour but, comme la méthode à plaque chaude gardée, d'établir une densité de flux thermique unidirectionnelle, constante dans le temps et uniforme dans l'espace, qui traverse simultanément la zone centrale de mesure de deux éprouvettes planes, superposées, situées entre deux surfaces planes isothermes, de températures imposées  $T_1$  et  $T_2 < T_1$  (figure 3.5).

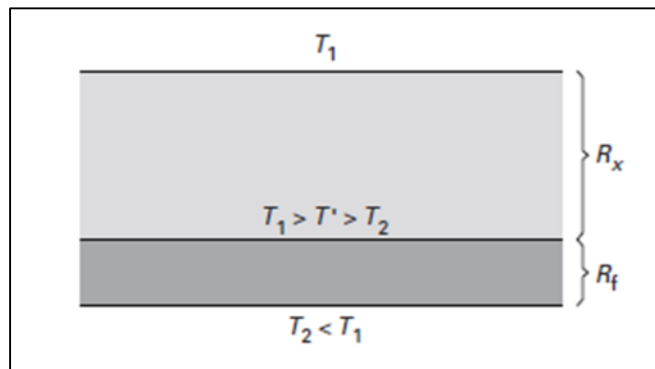


Fig 3.5 : principe de la méthode fluxmètre

La résistance thermique  $R_f$  d'une des deux éprouvettes est connue. Si la résistance thermique  $R_x$  de la seconde éprouvette est inconnue et si la température à l'interface des deux éprouvettes est notée  $T'$ , suite à la conservation de la densité de flux thermique à travers les deux éprouvettes dans les hypothèses énoncées, on peut écrire :

$$\varphi = \frac{T_1 - T}{R_x} = \frac{T' - T_2}{R_f} \quad (3.9)$$

Ce qui nous permet de déterminer  $R_x$  par rapport à  $R_f$ , selon la relation :

$$R_x = R_f \frac{T_1 - T}{T' - T_2} \quad (3.10)$$

La différence de température entre les deux faces de l'éprouvette de référence de résistance thermique  $R_f$  est mesurée d'habitude à l'aide d'une thermopile contenant de nombreuses jonctions distribuées uniformément dans les plans isothermes de températures  $T'$  et  $T_2$ . La thermopile occupe seulement une zone centrale de mesure pour éviter l'effet des fuites latérales.

Le dispositif ainsi constitué ne fait que définir le principe de fonctionnement d'un fluxmètre thermique de type à gradient, dont la thermopile délivre une force électromotrice proportionnelle à la différence de température  $T' - T_2$  et, par voie de conséquence, à la densité de flux thermique  $\varphi$  qui le traverse. La loi de fonctionnement de ce fluxmètre est exprimée par la relation :

$$\varphi = \frac{T' - T_2}{R_f} = f * e \quad (3.11)$$

Avec :  $f$  constante d'étalonnage du fluxmètre, en  $[W/(V.m^2)]$ ,

$e$  force électromotrice délivrée par le fluxmètre, en (V)

L'épaisseur du fluxmètre est généralement beaucoup plus faible que celle de l'éprouvette à mesurer ; on a aussi généralement :  $R_f \ll R_x$

À partir des relations (3.10) et (3.11), la relation qui nous permet de calculer  $R_x$  devient, dans le cas de cette configuration :

$$R_x = \frac{T_1 - T}{f * e} \quad (3.12)$$

Comme nous avons supposé  $R_f \ll R_x$ , alors  $T \approx T_2$ , où  $T_2$  est la température imposée par la surface isotherme « froide » ou « chaude » de l'appareil sur laquelle est fixé le fluxmètre. La surface du fluxmètre en contact avec l'éprouvette doit donc être munie d'un capteur de température. Si l'on peut associer à l'éprouvette mesurée une conductivité thermique.

Celle-ci sera donnée par la relation déduite de l'équation (3.12) :

$$\lambda = \frac{f}{T_1 - T} e * d \quad (3.13)$$

Où  $d$  est l'épaisseur moyenne de l'éprouvette en (m) [6].

## 3.2. Régime transitoire

### 3.2.1. Méthode du fil chaud

Cette méthode s'appliquant, autant pour un solide que pour un liquide, permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau isolant à partir de l'évolution de la température.

On aura d'abord à placer un fil chauffé entre les surfaces de deux échantillons du matériau à Etudier.

La figure suivante, schématise le montage de la méthode du fil chaud :

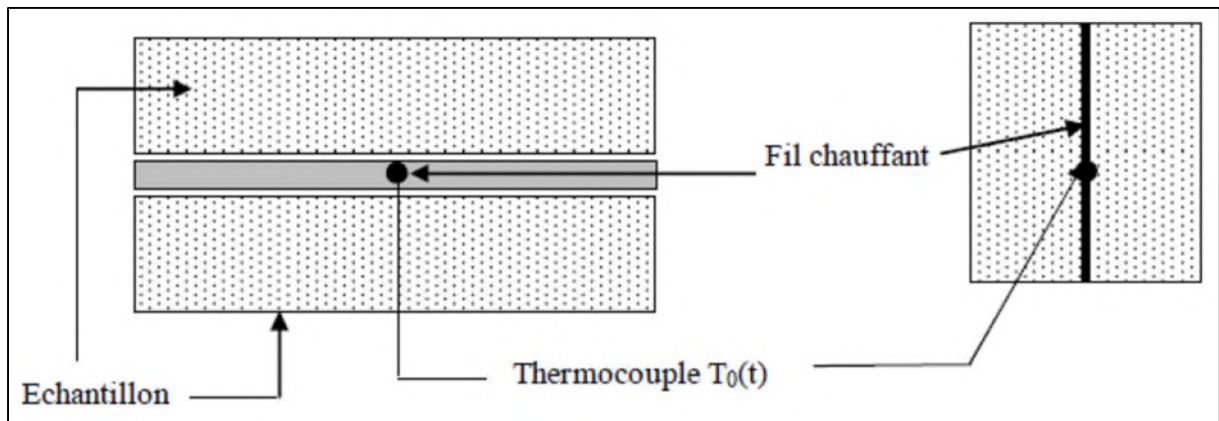


Fig 3.6 : schéma du montage du fil chaud

On appliquera ensuite un flux de chaleur constant au fil ( $\phi = 0$  si  $t < t_0$  et  $\phi = \phi_0$  si  $t > t_0$ ) on déterminera par la suite l'évolution de sa température.

Dans l'hypothèse d'un milieu semi infini, la perturbation appliquée n'atteindra pas les autres faces des échantillons, le transfert sera ainsi pris radial, en négligeant tout autre transfert.

La modélisation de ce transfert de chaleur nous permet de déduire l'évolution de la température au centre de l'échantillon. On appliquera par la suite une méthode d'estimation de paramètre afin de calculer la valeur de la conductivité thermique [10].

$$\lambda = \frac{\phi_1}{4\pi} \frac{\ln(t_1 - t_2)}{T_1 - T_2} \quad (3.14)$$

### 3.2.2. Méthode du Hot Disk

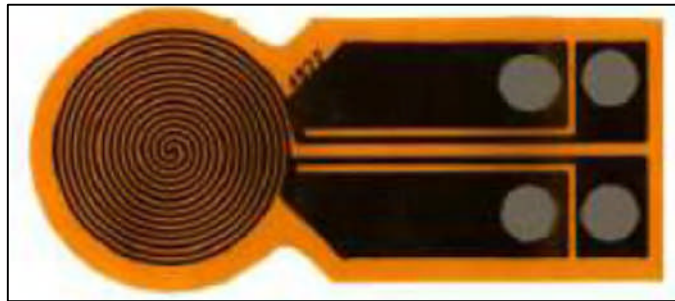


Fig 3.7 : sonde de type hot disk

Développée par Gustafsson S.E. en 1991 à l'université de chalmers en suède, cette méthode appliquée en régime transitoire consiste à insérer une sonde de forme cylindrique constituée d'une résistance de platine enroulée en spirale sur un support en plastique entre deux échantillons du matériau à caractériser.

On pose l'hypothèse d'un milieu semi infini. Pour cela les dimensions du matériau doivent satisfaire cette hypothèse.

La résistance de platine jouera le rôle d'une génératrice de flux de chaleur et celui de mesurer la température moyenne  $\bar{T}(t)$  du disque, qui a pour expression [10]:

$$\bar{T}(t) = \varphi_0 (\pi^2 \lambda^3 r) D(\tau) \quad (3.15)$$

Avec :  $\tau = \sqrt{\frac{at}{r^2}}$

## 4. Conclusion

Les techniques de caractérisation thermique des matériaux idéaux sont maintenant bien maîtrisées dans les laboratoires de recherche ; néanmoins, certaines de ces techniques ont du mal à s'implanter dans l'industrie. Pour les autres matériaux, la plus grande prudence est conseillée.

Les techniques les plus employées actuellement sont :

— la plaque chaude gardée ;

— le fil chaud.

## Chapitre 4

# Conception et réalisation du dispositif de mesure de la conductivité thermique

## 1 Problématique

Dans le cadre du développement de la construction bâtiment, les constructeurs et les laboratoires de recherche ont envisagé la mise en place de nouveaux matériaux pour réduire les déperditions thermiques des différents milieux soit de l'intérieur vers l'extérieur ou bien l'inverse.

Ce dernier problème nous amène à l'idée de chercher une solution pour l'isolation thermique entre deux milieux chaud et froid afin de minimiser les pertes de chaleur tout en satisfaisant les besoins en termes de confort de l'occupant.

L'objet de notre travail est de concevoir et de fabriquer un dispositif pour la mesure de la conductivité thermique des différents matériaux solides à utiliser dans la construction des habitations.

## 2 Objet

L'objectif est de concevoir un dispositif isolé thermiquement du milieu extérieur, et qui disposera de deux compartiments différents par leurs températures et qu'on appellera compartiment chaud et compartiment froid.

Le compartiment chaud (situé en bas) pouvant être maintenu à une température largement supérieure à la température ambiante ( $T > 45^\circ$ ) que l'on obtiendra grâce à une résistance chauffante placée dedans.

Le compartiment froid (situé en haut) peut être maintenu à une température largement inférieure à la température ambiante ( $T < 0^\circ$ ) que l'on obtiendra grâce à une installation frigorifique qui sera placée convenablement dans la boîte.

Les deux compartiments seront séparés par une paroi isolante, dans laquelle on prévoit un emplacement usiné pour y placer l'échantillon.

Pour le contrôle des températures dans les deux compartiments, nous utiliserons un système de régulation électronique de températures agissant sur l'élément chauffant et sur le compresseur du système de refroidissement. En effet, il est nécessaire que notre dispositif permette le maintien des compartiments à des températures réglables. Il est également nécessaire que la mesure et l'acquisition des températures au voisinage des deux surfaces de l'échantillon et dans les deux compartiments soit assurée et que l'échantillon soit facilement accessible. L'ensemble du système sera désigné par boîte de mesure de la conductivité thermique.

### 3 Cahier de charge fonctionnelle

- La boîte doit pouvoir assurer la production du froid et du chaud simultanément et séparément.
- La boîte doit avoir une très bonne isolation thermique du milieu extérieur, pour minimiser les déperditions.
- La boîte doit être équipée de deux régulateurs de température ; l'un pour le froid et l'autre pour les températures élevées.
- Les matériaux à utiliser pour la réalisation de la boîte doivent être suffisamment rigides.
- Les dimensions de la boîte doivent être suffisantes pour permettre l'installation d'une plaque de congélation convenable pour le système de réfrigération et, éventuellement, ajouter d'autres systèmes de modification de l'ambiance dans les deux compartiments (humidité, lumière, etc) ainsi que des dispositifs de mesure de propriétés physiques.
- La conception de la boîte doit permettre une utilisation facile (avoir un accès pour changer l'échantillon et régler une panne).

### 4 Conditions de fonctionnement

La boîte à concevoir servira à mesurer la conductivité thermique des matériaux et évaluer leur comportement d'échange thermique dans des conditions proches des conditions réelles auxquelles sont soumises les parois des habitations. Donc, le dispositif à réaliser doit permettre de produire une basse température et une haute température simultanément.

Certaines contraintes, liées au fonctionnement de la boîte sont à prendre en considération.

A titre d'exemple, le matériau à utiliser dans le compartiment froid doit résister aux basses températures et doit être indéformable et isolant.

Aussi pour le compartiment chaud, la partie motrice de l'installation frigorifique doit être séparé de la résistance chauffante. Le compresseur qui permet le fonctionnement du système frigorifique est à placer dans une enceinte bien isolée en dessous du compartiment chaud pour permettre son bon fonctionnement.

La paroi isolant les deux compartiments et sur laquelle sera placé l'échantillon doit être indéformable au contact de la chaleur, et très isolante, et aussi elle doit permettre d'accéder facilement à l'échantillon.

## 5 Choix des solutions

L'étude des diverses solutions envisagées en tenant compte des avantages que chacune procure, des facilités de mise en œuvre et des contraintes d'ordre technique nous a permis de dégager les solutions les plus optimales à savoir :

L'armoire à fabriquer sera en 3 étages : le premier (bas niveau) servira pour accueillir le compresseur ; le second pour constituer le compartiment chaud et le troisième pour le compartiment froid. Pour faciliter la manipulation du dispositif, l'accès aux deux compartiments se fera par ouverture de portes de haut vers le bas (chaque compartiment sera doté d'une porte).

- Utilisation d'une résistance chauffante pour produire la chaleur dans le compartiment chaud. On utilisera une résistance en tungstène pour les températures qu'elle peut atteindre (jusqu'à 350 °C), la disponibilité et sa facilité de mise en œuvre.

- Utilisation du bois pour constituer l'armoire dans laquelle le dispositif sera placé. Cette armoire servira pour une meilleure solidité du dispositif, une bonne isolation thermique et pour son caractère d'isolant électrique (minimiser tout risque de court-circuit électriques). C'est un moyen disponible à moindres frais.

- Une installation frigorifique pour produire du froid, cette installation comportera :

- Un compresseur : pour la boîte à réaliser, on aura besoin d'un compresseur adapté pour une plaque de congélation, système permettant d'atteindre des températures pouvant aller jusqu'à  $-10^{\circ}\text{C}$ .
- Une plaque de congélation adaptée au compresseur choisi.
- Un détendeur : la majorité des installations frigorifiques de petites dimensions utilisent un tube capillaire. Un moyen simple et efficace.
- Un condenseur : on utilisera un condenseur statique (celui utilisé dans les frigidaires) qui convient à notre installation.
- Un fluide frigorifique : on utilise le gaz R134a qui est un réfrigérant de bonne qualité, disponible, pas très cher et qui rentre dans les normes ISO.
- Un filtre, qui sera utile pour ne pas endommager le tube capillaire.

Il est à noter que l'aspect financier et la disponibilité de ces organes sont pris en considération dans l'étude du choix des solutions. En effet, le rapport qualité/prix est optimal vu que notre installation sera destinée pour des mesures de laboratoire et servira, éventuellement, pour les travaux pratiques.

Pour l'isolation thermique, les plaques de bois serviront pour constituer l'armoire. Ces plaques seront doublées, chacune, d'une plaque de plâtre moulé. Ensuite, l'isolation des deux compartiments sera considérablement améliorée en utilisant des matériaux mieux adéquats pour les températures considérées. Ainsi, la laine de verre, fournie en rouleau collé sur des feuilles d'aluminium est mieux indiquée pour les températures élevées. Le compartiment chaud sera isolé en couvrant ses parois de laine de verre. Le polyester expansé, bon isolant pour la gamme des basses températures, fourni en plaques épaisses de 4 cm, sera utilisé pour le compartiment froid. Ces deux isolants sont disponibles dans le commerce.

- La paroi sur laquelle sera posé l'échantillon et qui sépare les deux compartiments sera réalisée en plaque de plâtre moulé couverte des deux côtés par la laine de verre (coté chaud) et le polyester (coté froid).

- L'acquisition des températures se fera en utilisant des thermocouples K, un pyromètre infrarouge doté d'un thermocouple K avec acquisition instantanée sur ordinateur. La régulation des températures se fera au moyen de régulateurs électroniques qui agiront, en fonction du signal provenant des thermocouples (température instantanée) comparé à la consigne (température de consigne instantanée), sur des contacteurs. Ces derniers jouent le

rôle d'interrupteurs et servent à couper / remettre le courant d'alimentation (alternativement) de la résistance et/ou du système de refroidissement.

## 6 Conception

### 6.1 Conception de la boîte

Comme nous l'avons décrit plus haut, l'armoire à fabriquer sera en 3 étages avec une zone d'échange de chaleur entre le 2<sup>ème</sup> (compartiment chaud) et le 3<sup>ème</sup> (compartiment froid). La figure 4.1 montre une perspective de cette armoire.

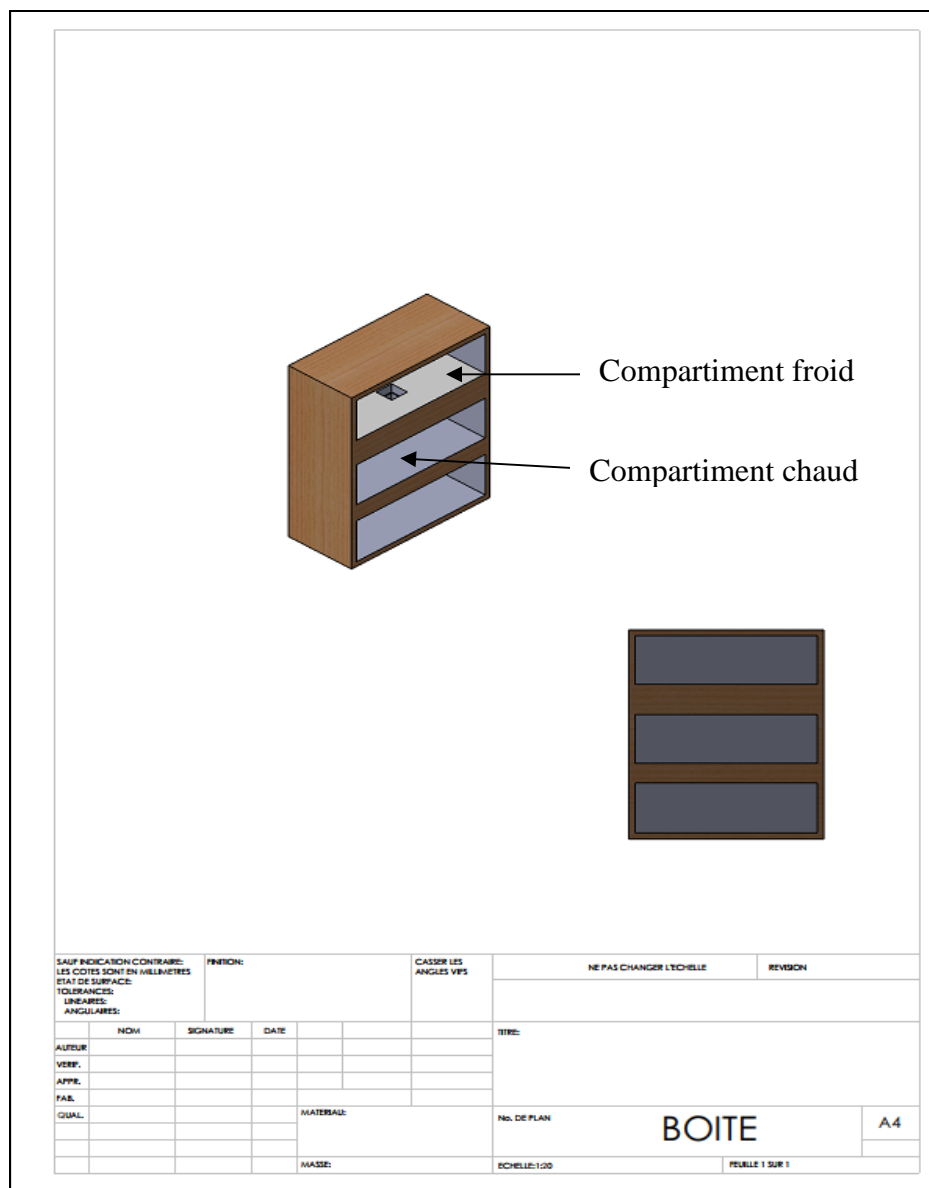


Fig 4.1 : Vues en perspective et de face de l'armoire

## 6.2 Conception de la partie frigorifique

La partie frigorifique est une installation constituée d'un compresseur, un condenseur, un détendeur et un évaporateur comme le montre le schéma de la figure 4.2

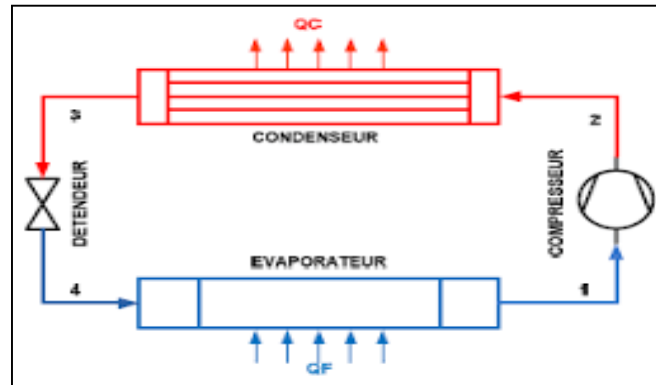


Fig 4.2 : Schéma d'une installation frigorifique

## 6.3 Conception de la partie chaude

Nous utiliserons une résistance chauffante qui s'alimente avec un courant de  $ddp = 220 \text{ V}$ .

# 7 Construction de la boîte

## 7.1 Réalisation de la boîte

La boîte est fabriquée avec des feuilles épaisses de bois sur lesquelles des plaques de plâtre ont été moulées pour améliorer leur isolation thermique.

Pour une meilleure solidité, l'assemblage des parois de la boîte est fait en utilisant des cornières. Ainsi, les plaques de bois-plâtre sont vissées (avec vis-écrou) sur des cornières en forme de L comme le montre la figure 4.3.



Fig 4.3 : Assemblage des parois de la boite



Fig 4.4 :Boite du dispositif fabriqué

## 7.2 Réalisation de l'installation frigorifique :

Après avoir acquis les différentes pièces constitutives de la partie frigorifique, nous procédons à la réalisation.

En première étape, nous mettons en forme l'évaporateur (en forme de U) et l'installons au haut de la boîte en prenant le soin de laisser un espace de 4 cm jusqu'à la paroi de la boîte. Pour cela, six trous y sont percés en faisant très attention à ne pas l'endommager. Ensuite, pour éviter d'obstruer les conduits en déformant l'évaporateur, un tube rigide est utilisé lors du pliage de la plaque. Des trous sont réalisés dans la paroi, côté arrière droit pour y faire passer les conduites de l'évaporateur. Une fois ce dernier mis en place, on le fixe à la boîte en le vissant sur son plafond en laissant un espace de 4 cm comme prévu pour le côté latéraux comme le montre la figure 4.5. Cet espace servira à accueillir la couche de polyester d'isolation thermique.



Fig 4.5 : installation de l'évaporateur

En deuxième lieu, le compresseur est fixé dans le bas de la boîte et le condenseur installé sur la face arrière (Fig. 4.6 et 4.8).



Fig 4.6 : Installation du condenseur sur la face arrière de la boîte

On relie ensuite les différents organes : le compresseur au condenseur, le condenseur au filtre, le filtre au tube capillaire, le tube capillaire à l'évaporateur et l'évaporateur au compresseur. La réalisation de ce circuit fermé est faite en utilisant le soudage au chalumeau (Fig. 4.7).

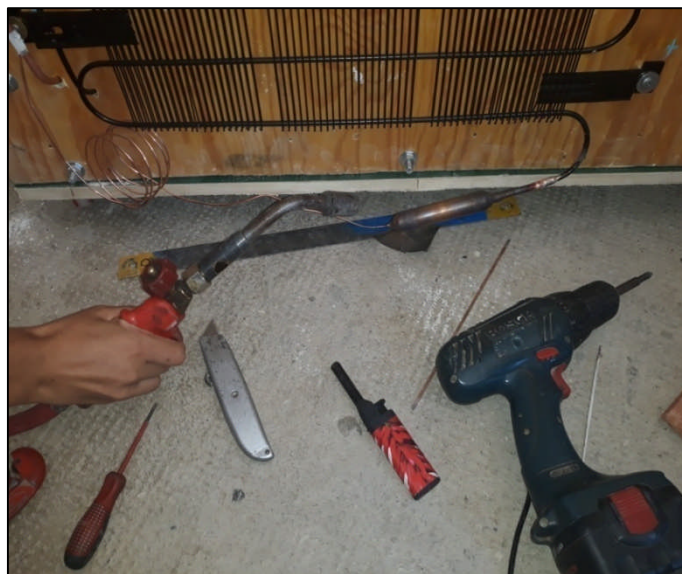


Fig 4.7 : Réalisation du circuit fermé par soudage au chalumeau

Une fois le circuit fermé réalisé, on fait le vide dans le compresseur à l'aide d'une pompe à vide (Fig. 4.8). On injecte ensuite le fréon dans le compresseur jusqu'à atteindre une pression de 0,2 bar (Fig. 4.9).



Fig 4.8 : Opération de mise sous vide du circuit de froid



Fig 4.9 : Injection du fréon dans le circuit de froid

Enfin, nous vérifions l'inexistence de fuites dans le circuit et le bon fonctionnement de l'installation par la production du froid.

### 7.3 Réalisation du compartiment chaud

Dans le compartiment chaud, on installe la résistance chauffante dans une rigole usinée en forme de serpentín dans la plaque de plâtre afin d'éviter les faux-contacts (Fig. 4.10). L'isolation entre le compartiment chaud et l'étage du compresseur est assurée en mettant plusieurs couches (plaque de bois, BA13, laine de verre et plâtre moulé).



Fig 4.10 : Installation de la résistance chauffante

### 7.4 Réalisation de l'isolation

Afin d'avoir une bonne isolation thermique dans les deux compartiments, nous avons procédé comme suit : nous avons recouvert toutes les parois du compartiment chaud avec de la laine de verre, sauf la base où est posée la résistance chauffante et toutes les parois du compartiment froid avec des plaques de polyester (Fig. 4.11).



Fig 4.11 : Installation de l'isolation thermique des deux compartiments : le chaud (à gauche de l'image) et le froid (à droite).

## 7.5 Réalisation des portes

Pour la porte du compartiment froid, nous l'avons fabriquée à l'aide de deux contre-plaquéés en bois et une couche de polyester entre les deux plaques (Fig. 4.12).



Fig 4.12 : Fabrication de la porte du compartiment froid.

Pour le compartiment chaud, nous avons utilisé un contre-plaqué en bois sur laquelle est fixée une couche de laine de verre puis une plaque de BA 13 et l'ensemble recouvert, face intérieure par une autre couche de laine de verre (Fig.4.13).



Fig 4.13 : Fabrication de la porte du compartiment chaud.

## 8 Installation de la régulation électronique

Les systèmes d'alimentation et de régulation électroniques des compartiments chaud et froid sont réalisés de sorte à alimenter le compresseur et la résistance chauffante en énergie électrique pour atteindre les températures voulues. Dans ce système, nous avons utilisé deux régulateurs, l'un pour le compartiment froid et l'autre pour le compartiment chaud. Ces deux

régulateurs agissent, en fonction des températures détectées (signal électrique  $ddp(t)$  émis par les thermocouples) et des températures de consigne, sur des contacteurs qui coupent et remettent le courant d'alimentation de la résistance chauffante et du système de froid.

Les éléments constitutifs du système sont :

Les régulateurs : il s'agit de régulateurs électroniques de type digital permettant d'introduire les températures de consigne et de réaliser le cycle thermique voulu. Ces deux régulateurs sont différents selon les plages de températures auxquelles leur fiabilité est assurée. Le régulateur pour le chaud est de type Microcor III ® de Coreci et le régulateur de froid est de type Dixell XR04CX auxquels des thermocouples de type K sont branchés.

Un contacteur utilisé pour chaque circuit (chaud et froid) est une sorte d'interrupteur actionné au moyen d'une bobine excitée par le régulateur. Il ouvre et ferme le circuit de courant électrique alimentant le compresseur et la résistance chauffante.

Le thermocouple K est un dispositif constitué de deux fils métalliques de natures différentes soudés à leur extrémité. Cette dernière est donc un alliage métallique qui produit une faible  $ddp$  dont l'évolution est fonction de la température (effet thermoélectrique Seebeck).

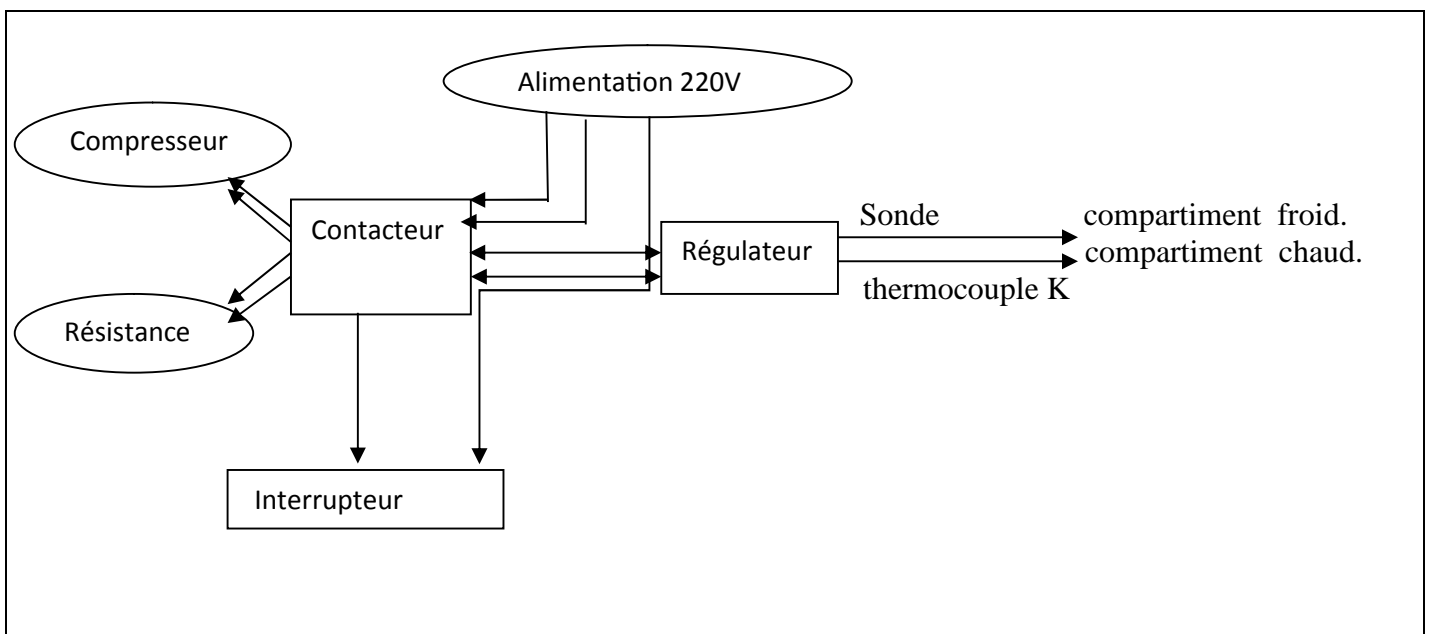


Fig. 4.14: schéma de la régulation

## Chapitre 5

### Etude expérimentale de la conductivité thermique

#### 1. Description de l'installation

Le dispositif expérimental présenté sur la Fig 5.1, est constitué de deux enceintes isothermes.

La première enceinte est de dimensions  $0,35\text{m}\times 0,35\text{m}\times 0,8$ , maintenue à une température assez haute (allant jusqu'à  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), grâce à une résistance chauffante (R) située à sa base, c'est la source chaude du système, qui est bien isolée thermiquement avec de la laine de verre. Cette enceinte possède une ouverture carrée de 9 cm de côté au milieu sur sa face supérieure sur laquelle seront disposés les différents échantillons.

La deuxième enceinte est de dimension  $0,25\text{m}\times 0,35\text{m}\times 0,7$ , maintenue à une température assez basse (allant jusqu'à  $-5^{\circ}\text{C}$ ), grâce à un évaporateur (E) situé au dessus de la première enceinte, c'est le compartiment froid du système. Elle est isolée du milieu extérieur avec du polystyrène. Cette enceinte a une ouverture carrée de 10 cm au milieu sur sa face inférieure, qui ouvre directement à la première enceinte, donc l'échantillon sera posé entre les deux sources de chaleur. La surface d'échange peut donc être considérée de 9 cm x 9 cm.



Fig. 5.1 : Dispositif de mesure de la conductivité thermique

Grace à un système de régulation, on impose les températures voulus dans les deux compartiments.

Les capteurs de température sont des thermocouples de type (K), ils permettent de mesurer la température ambiante dans la boîte ( $T_b$ ), les températures sur les faces supérieure ( $T_c$ ) et inférieure ( $T_f$ ) de l'échantillon.

Un ohmmètre électrique et un ampèremètre, permettent de mesurer la résistance  $R$  et son intensité de courant  $I$ .

Les échantillons à tester doivent être parallélépipédique à base carré de 9.5 cm de côté et d'épaisseur comprise entre 2 et 5 cm. Ils se placent entre les deux enceintes de telle sorte que les flux latéraux soient négligeables.

L'échantillon présente ainsi une face chaude du côté de la première enceinte et une face froide du côté de la deuxième enceinte.

Les dispositions de l'émetteur de chaleur, de l'échantillon à tester, et des différentes sondes, sont illustrées par la figure 5.2.

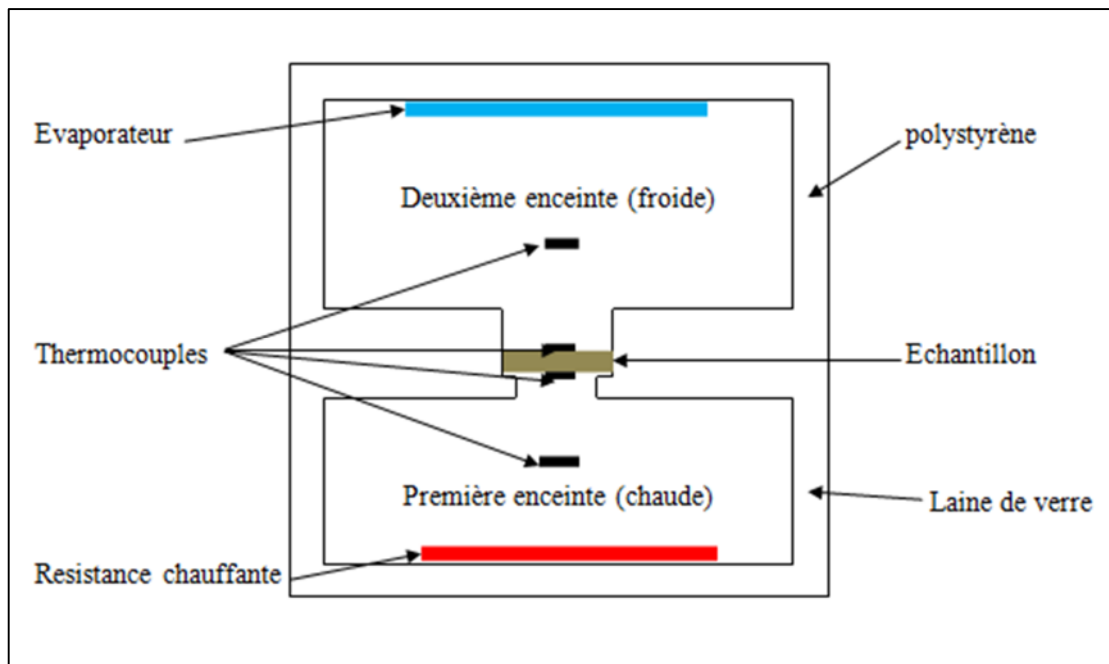


Fig 5.2 : Boîte de mesure de la conductivité thermique

## 2. Essais préliminaires sur l'appareil

On allume notre appareil afin de voir s'il y a des pertes trop importantes par mesure des températures le long des surfaces extérieures. Ces mesures ont été réalisées au moyen d'un pyromètre infrarouge (sans contact et assez fiable). Les températures détectées étant proches de la température du milieu ambiant, nous déduisons que les pertes sont négligeables pour les deux compartiments.

L'isolation entre les deux compartiments est vérifiée par mesure de la température dans les deux compartiments en maintenant l'un à une température constante (les deux enceintes ne sont pas allumées simultanément).

## 3. Essais sur un échantillon de polyuréthane expansé utilisé dans les enceintes frigorifiques

La première courbe (Fig. 5.3) montre l'évolution de la température dans un échantillon de polyuréthane dont une face est exposée à une température de 50 °C. La courbe bleue représente la température dans l'enceinte mesurée au moyen du pyromètre infrarouge (IR)

supposée égale à la température de la surface inférieure de l'échantillon (zone chaude). La figure 5.5 montre le pyromètre utilisé pour les mesures en continu des températures. La courbe en rouge représente la température sur la face supérieure de l'échantillon mesurée au moyen d'un thermocouple K.

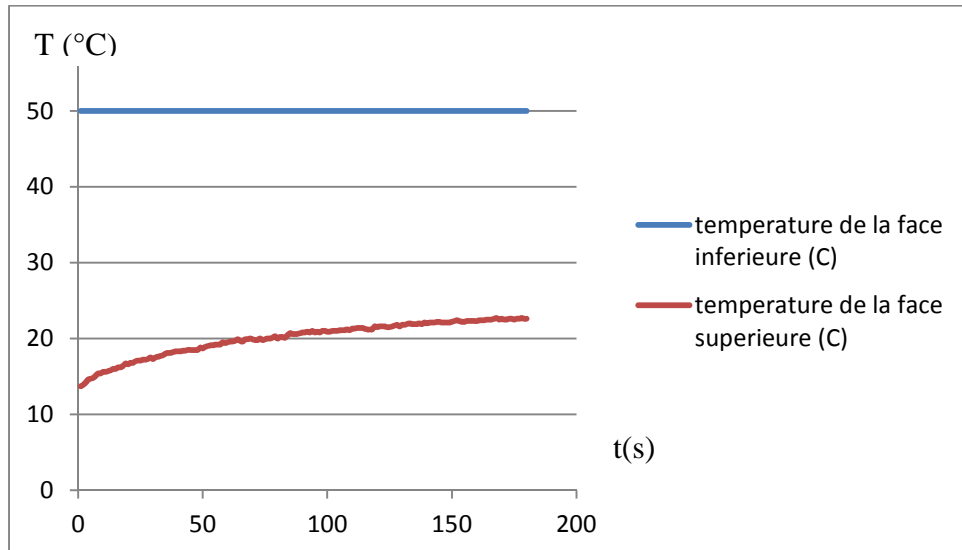


Fig 5.3 : Evolution de la température au niveau des surfaces d'un échantillon de polyuréthane exposé à une température constante de 50 °C

Dans la deuxième courbe (Fig. 5.4) le même échantillon est exposé à une température de -5 °C (courbe bleue, mesure par pyromètre IR) et le suivi du transfert de chaleur est fait par mesure de la température au niveau de la face inférieure de l'échantillon (courbe en rouge, mesure par thermocouple K).

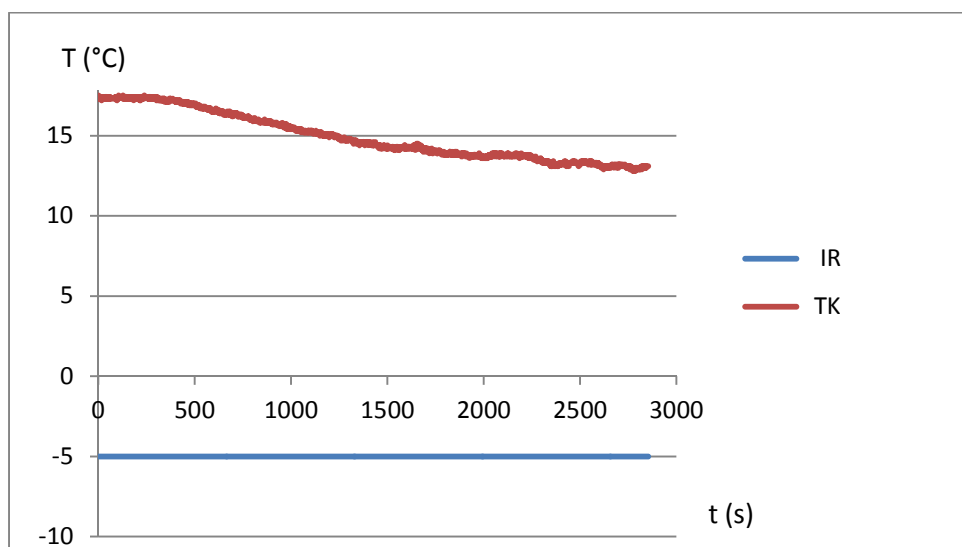


Fig 5.4 : Evolution de la température au niveau des surfaces d'un échantillon de polyuréthane exposé à une température constante de -5 °C

Sachant que le polyuréthane est matériau isolant et on remarque sur ces courbes une évolution graduelle de la température au niveau de la surface initialement maintenue à une température froide (Fig. 5.3) ou chaude (Fig 5.4). Le phénomène de transfert de chaleur par conduction dans l'échantillon étant évolutif avec le temps, on estime qu'il est possible de calculer la conductivité thermique d'un matériau une fois le régime quasi-permanent atteint.



Fig 5.5 : Pyromètre utilisé pour les mesures de température en continu grâce à la détection par infrarouge et thermocouple K.

## 4. Evaluation de la conductivité thermique

### 4.1. Principe de mesure

Le principe de mesure de la conductivité thermique des matériaux à tester est basé sur la réalisation d'un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers les deux enceintes de façon permanente en créant un gradient de températures entre la zone froide et la zone chaude. On impose ainsi les températures uniformes dans les deux enceintes, grâce à un système de régulation, l'émission de la chaleur est faite de telle sorte que la température à l'intérieur du compartiment bas ( $T_b$ ) soit supérieure à la température extérieure ( $T_a$ ) qui est la température de l'ambiance ; ( $T_b$ ) > ( $T_a$ ). La mesure est réalisée quand le régime permanent est établi, c'est-à-dire quand les valeurs des températures restent constantes pendant plus d'une demi-heure environ.

### 4.2. Détermination de la conductivité thermique

La détermination de la conductivité thermique est faite en utilisant les deux équations suivantes (5.1) et (5.2).

$$\phi_{res} = \phi_{per} + \phi_{cond} \quad (5.1)$$

$$\phi_{res} = \frac{V^2}{R} \quad \text{Puissance émise par la résistance.}$$

$$\phi_{per} = c(T_B - T_a) \quad \text{Pertes latérales.}$$

$$\phi_{cond} = \frac{\lambda_e S}{e} (T_c - T_f) \quad \text{Flux par conduction.}$$

On obtient l'expression de la conductivité thermique de l'échantillon  $\lambda_e$  sous la forme

$$\lambda_e = \frac{e}{S(T_c - T_f)} \left[ \frac{V^2}{R} - c(T_B - T_a) \right] \quad (5.2)$$

Avec:

- e: L'épaisseur de l'échantillon en (m).
- S: La surface de la face de l'échantillon en (m<sup>2</sup>).
- c: La constante des pertes latérales
- V: La tension aux bornes de la résistance en (V).
- R: La valeur de la résistance chauffante en ( $\Omega$ ).
- $\lambda_e$  : la conductivité thermique de l'échantillon en (W/m.K).
- $T_c, T_f, T_B, T_a$ , sont respectivement les températures de la face supérieure, la face inférieure, la boîte et celle de la salle.

## Manipulation

Echantillon : polyuréthane expansé (0.095m×0.095×0.01) comme montré sur la figure 5.6.



Fig 5.6 : Polyuréthane expansé

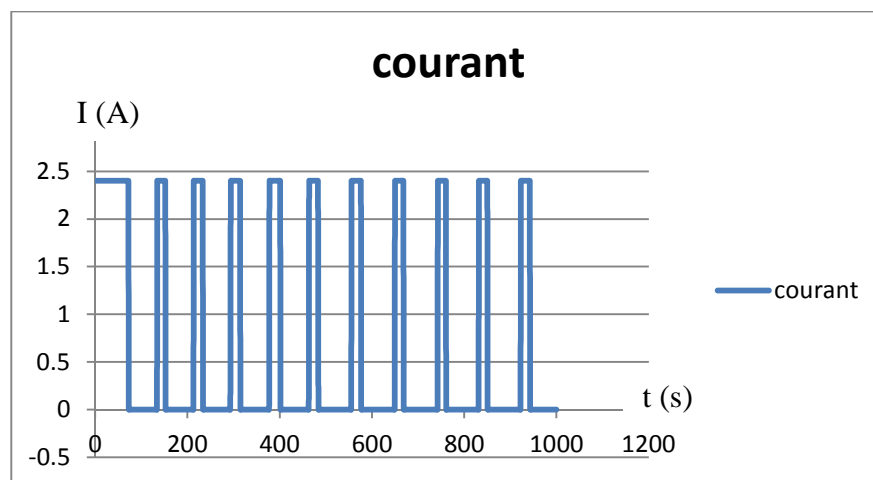
Resistance chauffante (R) :  $91\Omega$  (grandeur mesurée par multimètre digital)

### Calcul du courant moyen

Lorsqu'on met en marche notre appareil, on voit que pour maintenir l'enceinte chaude à la température voulue, le régulateur coupe le courant alternativement avec des laps de temps de l'ordre de minutes, ce qu'on appelle régulation tout ou rien (Fig. 5.7).

Donc, pour calculer la puissance émise, on doit s'intéresser au courant moyen pour voir l'évolution de l'alimentation de la résistance chauffante. On mesure le courant de fonctionnement de la résistance à l'aide d'une pince ampérométrique et les laps de temps de fonctionnement et de coupure pour déterminer la valeur moyenne du courant.

On obtient la courbe de cette courbe :

Fig. 5.7: courbe du courant  $I=f(t)$

On remarque sur cette courbe que l'évolution du courant est en valeurs alternées alors que la puissance doit être calculée en valeur moyenne. Il nous faut donc calculer le courant moyen qui passe dans la résistance chauffante pendant toute l'expérience. Cette valeur moyenne est donnée par l'expression 5.3. La valeur moyenne est représentée sur la figure 5.8.

$$I_m = \frac{\sum_{i=1}^n I * t}{\sum t} \quad (5.3)$$

$$I_m = 0,3 \text{ A}$$

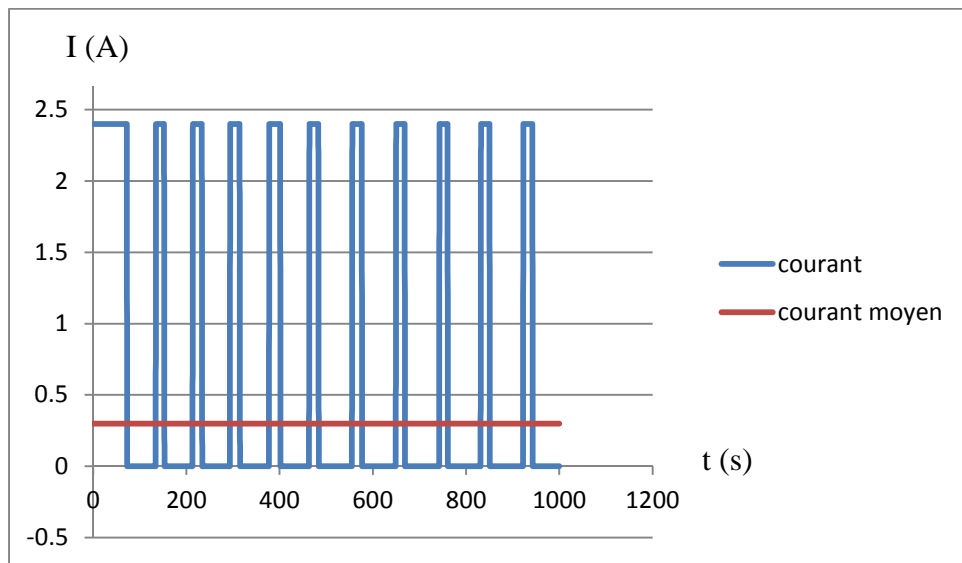


Fig. 5.8 : courbe du courant et du courant moyen I ;  $I_m = f(t)$

Température T : (grandeur mesurée)

Les températures d'essai sont :

$T_a = 20^\circ\text{C}$  ; mesurée à l'aide d'un pyromètre infrarouge.

$T_b = 49^\circ\text{C}$  ;  $T_c = 43^\circ\text{C}$  ;  $T_f = 12^\circ\text{C}$  ; mesurée à l'aide de thermocouples (Fig. 5.9) placés aux zones indiquées plus haut (voir en 4.2).



Fig. 5.9 : afficheurs des thermocouples placés dans les différentes zones concernées. La température de la salle (ambiante) est affichée sur le pyromètre infrarouge (Fig. 5.5).

#### 4.2.1.1. Coefficient de perte (c)

La puissance perdue par l'enceinte est bien évidemment la somme des puissances perdues à travers chaque paroi. Si l'on ne considère qu'une seule paroi, on peut l'assimiler à plusieurs résistances thermiques en série.

- résistance de surface intérieure =  $\frac{1}{h_i S}$  (indice i pour intérieur)
- résistance thermique de conduction =  $\sum_j \frac{e_j}{K_j S}$  où j indexe le nombre de couches à traverser
- résistance de surface extérieure =  $\frac{1}{h_e S}$  (indice e pour extérieur), on aura donc pour la paroi d'indice m :

$$R_m = \left( \frac{1}{h_i S} + \sum_j \frac{e_j}{K_j S} + \frac{1}{h_e S} \right) = \frac{1}{K_m} \quad (5.4)$$

A l'équilibre thermique, pour une puissance perdue P, on aura une différence entre température intérieure  $T_i$  et température extérieure  $T_e$  :  $P = c (T_i - T_e)$ .

Avec :

$$c = \sum_m K_m = \sum_m \frac{1}{R_m} \quad (5.5)$$

$c$  étant le coefficient de déperdition thermique global de l'enceinte [11].

Dans notre cas on a :

$$P = V * I = R * I^2 = 8.2 \text{ W} = \phi$$

$$\Delta T = R_{th} * \phi$$

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi} = \frac{53-21}{8.2} = 3.9(\text{K/W})$$

Donc :

$$c = 1/3.9 = 0.25 \text{ (W/K)}.$$

#### 4.2.1.2. Application numérique :

En utilisant la loi précédente (5.2)

Avec :

$$T_a = 20^\circ\text{C} ; T_b = 49^\circ\text{C} ; T_c = 43^\circ\text{C} ; T_f = 12^\circ\text{C} ; e = 0.01(\text{m}) ; S = 0.0081 \text{ (m}^2\text{)} ; R = 91 \text{ (\Omega)} ;$$

$$V = 27.33 \text{ (V)}$$

On obtient ce résultat :

$$\lambda_e = 0.0337 \text{ (W/m.K)}$$

#### 4.2.1.3. Discussion

D'après les résultats de notre expérience, le polyuréthane est un bon isolant. En effet, on voit que sa conductivité thermique est très faible. Ce qui justifie son utilisation pour les appareils tels que les réfrigérateurs et les congélateurs. Ceci étant, on peut envisager son utilisation dans le bâtiment pour réduire les pertes thermique et ainsi réduire les dépenses énergétiques.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le dispositif que nous avons conçu et fabriqué dans le cadre de notre projet. Nous avons réalisé des expériences pour vérifier son efficacité puis avons calculé la conductivité thermique du polyuréthane expansé utilisé comme isolant dans les appareils frigorifiques. La conductivité mesurée étant proche des valeurs théoriques (voir chapitre 2), on estime que le dispositif est assez fiable. Cependant, il est toujours possible de l'améliorer en doublant les couches d'isolation (compartiment chaud et froid) et recouvrir toutes zones d'échange par des feuilles d'aluminium pour une meilleure précision et une stabilité du système, ce qui réduira le nombre de coupures par les contacteurs (fluctuations de températures). L'installation d'un Rhéostat permettra d'augmenter davantage cette précision puisqu'il permettra d'ajuster la valeur du courant traversant l'élément chauffant.

## Conclusion générale

Dans ce travail, on a eu pour objectif de concevoir et réaliser un dispositif qui permet de mesurer la conductivité thermique des matériaux. La conception de la boîte a été entamée par l'élaboration d'un cahier de charges dans lequel on a présenté les exigences techniques de fonctionnement. Nous avons choisi un modèle constitué de deux compartiments, l'un chaud et l'autre froid.

Nous nous sommes proposés plusieurs solutions pour la conception et avons choisi celles que nous avons jugées plus pertinentes au vu des exigences techniques et de la disponibilité ainsi que des avantages liés à la fabrication. La forme et les dimensions du dispositif ont été déterminées en fonction des organes utilisés. Pour la production du chaud et du froid, un système de régulation électronique est également conçu. La fabrication et l'assemblage du dispositif et de son système de régulation et d'acquisition des températures est réalisée étape par étape comme expliqué au chapitre 4.

Le dispositif étant réalisé, plusieurs essais ont été effectués pour vérifier son bon fonctionnement. La stabilité constatée dans l'évolution des températures à l'intérieur des deux compartiments nous a permis d'estimer l'isolation assez suffisante pour procéder à des tests et déterminer le coefficient de pertes thermiques. Après cette étape, un essai sur un échantillon de polyuréthane est réalisé. La valeur de la conductivité thermique calculée étant proche des valeurs figurant dans la littérature, nous pouvons affirmer que le dispositif est suffisamment fiable. Cet appareil peut être utilisé au laboratoire de science des matériaux du département de génie mécanique.

En perspective, il serait intéressant d'améliorer l'isolation thermique des deux compartiments et utiliser un rhéostat pour mieux contrôler la température et augmenter la précision.

D'un point de vue matériau testé, nous estimons que le polyuréthane expansé est un très bon isolant thermique, qu'il est intéressant d'utiliser dans le bâtiment. Son prix étant en défaveur de cette option, son utilisation comme matrice dans des composites à déchets végétaux (farines de bois) permettra de valoriser ces déchets et mieux contribuer à la protection de l'environnement.

# ANNEXE 1

## Les sources de déperdition de chaleur

D'après une étude européenne on peut estimer que les valeurs moyennes des sources de déperdition de chaleur sont :

Dans une maison **isoler** selon la norme RT 2005 le bilan de déperdition est :

- Le toit 10%
- Les murs 20%
- Les fenêtres et ports extérieures 10%
- Le renouvellement d'air 15%
- Les ponts thermiques 20%

Par contre, une habitation **non isoler** le bilan de déperdition est de :

- Le toit de 25 à 30%
- Les murs de 20 à 25%
- Les fenêtres et ports extérieures de 10 à 15%
- Le renouvellement d'air de 20 à 25%
- Les ponts thermiques de 7 à 10%

## Comment faire l'isolation

Isoler une habitation c'est isoler toute ces partie constructive (murs, toit et comble, porte et fenêtre, plancher, vide sanitaire...). Dans cette partie on va parler de comment isoler son habitation [5].

### Isolation des murs

Il existe 3 méthodes pour réaliser l'isolation thermique d'un mur. Ils changent par l'usage projeté de l'habitation :

## L'isolation intérieure et les cloisons de doublage

Généralement utiliser dans des rénovations, facile à mettre en œuvre et moins coûteuse. Cette méthode consiste à bâtir les murs en double cloisons et mettre un isolant entre les 2 cloisons soit du polystyrène, polyuréthane, laine de verre ... .se qui élimine l'inertie thermique mais l'isolant perd sa résistivité au cours de la temps se qui représente un désavantage.



Fig 1: Isolation intérieure

## Isolation intégré aux matériaux porteurs

Utiliser dans les nouvelles constructions performante et durable. Cette méthode consiste à utiliser un matériau qui intègre un isolant dans sa structure.

**Exemples :** le béton cellulaire, la brique de chanvre et les briques multi alvéolaires ...etc. on peut dire que cette méthode à une grande isolation par rapport à celle des cloisons de doublage mais avec un cout plus élevée.



Fig 2 : Brique de chanvre

## Isolation extérieur sous enduit, les parements el les bardages

L'isolation extérieure permet d'assurer une bonne isolation. Ce qui fait que le changement climatique extérieur soit moins marqué dans l'intérieur du bâtiment. Cette

méthode consiste à projeter sur le mur extérieur un enduit isolant soit minéral ou végétal d'une façon naturelle ou bien mécanique, On peut faire une ou plusieurs couches selon la nécessité. Où en mettent des plaques et des panneaux isolants sur l'extérieur on les fixe avec les moyens de fixation (des vis ou des agrafes et des colles) ou un coffrage .il est difficile à mettre en œuvre et plus coûteuse mais elle est plus performante. Ou bien on utilise des panneaux isolants en les plaquant sur les murs à l'aide des vis ou bien une colle spéciale il faut qu'il soit bien fixé afin d'éviter les fissures et les endommagements et avoir une longue durée de vie et une résistance plus confortable.

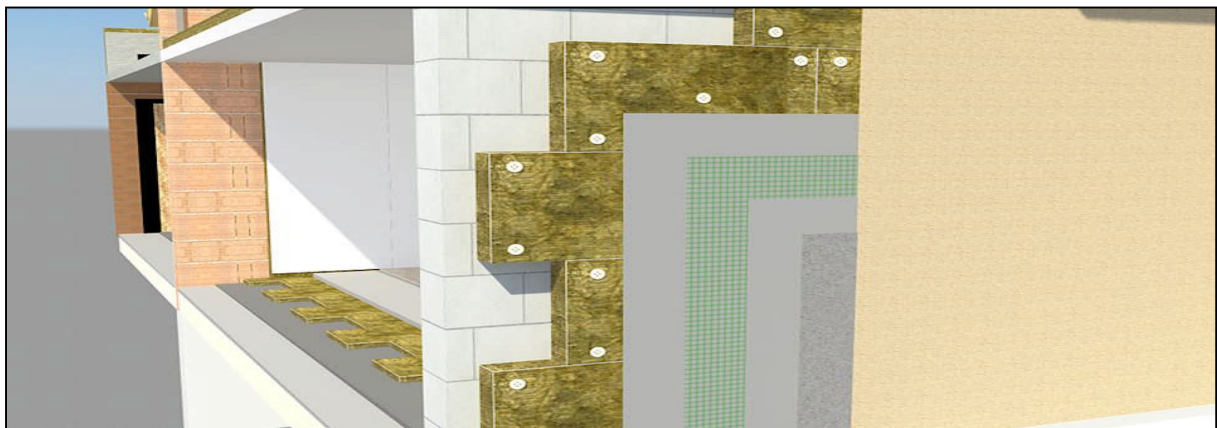


Fig 3: Isolation extérieure

## Isolation des portes et des fenêtres

Plus de 10% de déperdition thermique sont dues aux portes et fenêtres c'est pour cela les isoler est indispensable. Pour bien isoler thermiquement ses ouvertures on pourra installer des fenêtres, portes fenêtres, baies et portes isolantes on double ou triple vitrage neufs mais dans le cas où nous voulons garder les anciens matériaux mal isolés on va opter pour des traitements ou des réparations ou des renforcements en vue d'améliorer leur qualité d'isolation.



Fig 4: Isolation avec des portes et des fenêtres

### Isolation des combles et toiture

Isoler ces combles et toiture c'est plus du confort et moins de dépense énergétique. L'isolation ca se fait par l'intérieur ou l'extérieur, on met des isolants soit de la laine de verre ou de roche sous forme panneaux ou rouleaux ou bien du polyuréthane... de façon à couvrir toute sa surface et pour l'épaisseur de l'isolant on pourra faire une couche ou bien plusieurs selon la nécessité et la capacité de l'isolant.

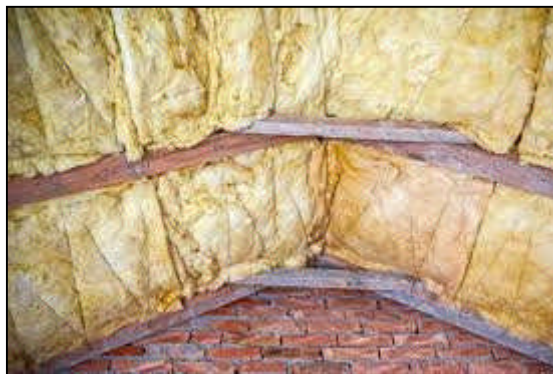


Fig 5 : Isolation des combles et des toitures

## **Bibliographie :**

- [1] S. Thiers, Bilans Energétiques et Environnementaux de Bâtiments à Energie positive, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Spécialité: Energétique, 21 Novembre 2008.
- [2] P. Meukam, Caractérisation Thermo-physique et Mécanique de Briques de Terre Stabilisées en Vue de l'Isolation Thermique de Bâtiment, Matériaux et Constructions, Vol. 36, August - September 2003, pp 453 - 460.
- [3] Transferts thermiques, Y.Jannot, école des mines Nancy, 2012.
- [4] [http://www.cg43.fr/sites/cg43/IMG/pdf/guide\\_des\\_materiaux\\_\\_isolants.pdf](http://www.cg43.fr/sites/cg43/IMG/pdf/guide_des_materiaux__isolants.pdf).
- [5] N. Sotehi. Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation. Thèse de doctorat. Université Mentouri Constantine, spécialité physique énergétique. En 2010.
- [6] Conductivité thermique des isolants par Francesco DE PONTE et Sorin KLARSFELD technique de l'ingénieur. R2930
- [7] Mohamed Tlijani. Contribution à la caractérisation thermo physique de matériaux bio isolants : Valorisation des déchets de bois de palmier. Thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS EST. le 6 décembre 2016.
- [8] Étude expérimentale des propriétés thermo-physiques d'un composite à base de fibre naturelle. 13ème Congrès de Mécanique 11, Meknès, Maroc. 14 Avril 2017
- [9] Conductivité et diffusivité thermique des solides par Alain DEGIOVANNI. Technique de l'ingénieur. R2850
- [10] Théorie et pratique de la métrologie thermique, Y.Jannot, laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée, université de Nancy, octobre 2011.
- [11] TP - L3 Physique - Plate-forme TTE - C.E.S.I.R.E. - Université Joseph Fourier - Grenoble DEPERDITIONS THERMIQUES.