



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Commande

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**ZEBILA MOHAMED –MEDJANI MABROUK**

Le : mardi 21 juin 2022

## **Modélisation des phénomènes thermiques dans une paroi multicouches par la méthode des volumes finis**

---

### **Jury :**

|    |                     |     |                      |            |
|----|---------------------|-----|----------------------|------------|
| M. | REZIG Mohamed       | MCB | Université de Biskra | Président  |
| M. | ALLOUI Lotfi        | Pr  | Université de Biskra | Examineur  |
| M. | KHENE Mohamed Lotfi | MCA | Université de Biskra | Rapporteur |



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Commande

Réf. : Entrez la référence du document

---

## **Modélisation des phénomènes thermiques dans une paroi multicouches par la méthode des volumes finis**

Le : .....

**Présenté par : Avis favorable de l'encadreur :**

**Signature Avis favorable du Président du Jury**

**Cachet et signature**

## Résumé

Dans notre travail, nous modélisons le transfert de chaleur dans une paroi multicouche par la méthode des volumes finis. Pour surmonter ce problème, nous avons développé un code de calcul en monodimensionnelle sous l'environnement Matlab basé sur la méthode des volumes finis comme méthode de résolutions des équations aux dérivées partielles caractéristique au du phénomène de transfert de chaleur étudié. Ce code permet de calculer l'évolution de la température à tous points de la paroi modélisée.

## ملخص

في عملنا هذا قمنا بنمذجة نقل الحرارة في جدار متعدد الطبقات بطريقة الحجم المحدود. للتغلب على هذه المشكلة ، قمنا بتطوير كود كمبيوتر أحادي البعد في بيئة Matlab بناءً على طريقة الحجم المحدود كطريقة لحل المعادلات التفاضلية الجزئية المميزة لظاهرة انتقال الحرارة المدروسة. هذا الرمز يجعل من الممكن حساب تطور درجة الحرارة في جميع نقاط الجدار النموذجي.

## *Remerciement*

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté  
d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord , ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir  
le jour sans l'aide de l'encadrement de Monsieur. KHENE Mohamed*

*Lotfi , on le remercie*

*pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience , sa rigueur  
et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire .*

*Nos remerciement s'adresse à (président de juris) pour son aide pratique  
et son soutien moral et ses encouragements.*

*Nos remerciement s'adresse également à tout nos professeurs pour leurs  
générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs  
charges académique et professionnelle*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents.*

*A tous mes amis.*

*A mes soeurs.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la*

*réalisation de ce travail.*

| <b>Chapitre I</b>  |    |
|--|----|
| Figure I-1 : Constituants d'un béton ordinaire   | 4  |
| Figure. I-2types de béton  | 5  |
| Figure. I-3Le béton cellulaire   | 5  |
| Figure.I-4Faïence du ciment  | 6  |
| Figure I-5LA BRIQUE.   | 7  |
| Figure I-6. Briques pleines  | 8  |
| figure .I-7Brique perforée   | 8  |
| FigureI-8. Construction des murs en parois multicouches ; (a) :construction d'un mur en adobéton ; (b) :mur double en BTC + isolant intégré ; (c) : mur double en pisé + isolant intégré.  | 10 |
| Figure I.9 Le polystyrène expansé  | 12 |
| Figure. I.10 : (a) :Liste de quelques isolants conventionnels ; (b) :Laine de verre (isolant conventionnels); (c) : Balle de paille (isolant non conventionnel) ; (d) : Panneau de réalisé à partir de Cotton recyclé (isolant non conventionnel). | 15 |
| <b>Chapitre II</b>   |    |
| Figure. II.1 : Isotherme et gradient thermique   | 20 |
| Figure.II.2 : les modes de transferts thermique  | 22 |
| Figure.II.3: transfert de chaleur par conduction   | 23 |
| Figure. II.4.direction du transfert de chaleur   | 23 |
| Figure.II.5 : transfert de chaleur par convection  | 26 |
| Figure II.6: l'échan conducto-convectif entre l'air  | 27 |
| Figure.II.7: transfert de chaleur par rayonnement  | 28 |
| FigureII.8. conductivité $\lambda$ et épaisseur L en régime permanent  | 30 |
| FigureII.9. mur plan   | 31 |
| FigureII.10.Mur composite  | 32 |
| Figure II.11.Mur // porte // fenêtre   | 32 |
| Figure II.12. Application de l'analogie électrothermique au système modélisé   | 33 |
| <b>Chapitre III</b>  |    |
| Figure.III.1.Configuration géométrique en 2D.  | 35 |
| Figure III.2. : Représentation du maillage de la surface   | 36 |
| Figure. III.3. Maillage triangulaire de MEF  | 37 |
| Figure III.4.la discrétisation domaine de calcul   | 40 |

|  |           |
|--|-----------|
| Figure III.5.volume de contrôle bidimensionnel   | 41        |
| Figure III.6. la propagation de la chaleur dans un milieu multicouche                          | 41        |
| Figure III.7.Discrétisation en volumes finis dans le cas monodimensionnel.                     | 45        |
| Figure. III.8. volume fini au première nœud ( $T_{\text{exterieur}}$ )                         | 46        |
| Figure. III.9.derniers nœud ( $T_{\text{interieur}}$ )   | 48        |
| Figure. III.10. Discrétisation en volumes finis à la surface                                   | 49        |
| Figure III.11. Algorithme de résolution du code de calcul                                      | 50        |
| <b>Chapitre IV</b>   |           |
| Figure IV.1.: Paroi à trois couches  | <b>52</b> |
| Figure: IV.2. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.  | 53        |
| FigureIV.3.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.     | 54        |
| Figure: IV.4.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.          | 54        |
| Figure. IV.5.: Paroi à trois couches   | 55        |
| Figure: IV.6. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée   | 56        |
| Figure: IV.7.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.   | 56        |
| Figure: IV.8.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.          | 57        |
| Figure IV.9. : Paroi à quatre couches  | <b>58</b> |
| Figure: IV.10. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée. | 58        |
| Figure: IV.11.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.  | 59        |
| Figure: IV.12.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée          | 59        |
| Figure IV.13. : Paroi à quatre couches   | 60        |
| Figure: IV.14. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée. | 61        |
| Figure: IV.15.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.  | 61        |
| Figure: IV.16.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.         | 62        |
| Figure IV.17. : Paroi à cinq couches   | 63        |
| Figure:IV.18 : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.   | 63        |
| Figure: IV.19.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.  | 64        |
| Figure: IV.20.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.         | 64        |
| Figure IV.21.: Paroi à cinq couches  | 65        |
| Figure:IV.22. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.  | 66        |
| Figure :IV.23.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.  | 66        |
| Figure: IV.24.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.         | 66        |
| Figure IV.25 : Paroi à cinq couches  | <b>67</b> |

## Liste des figures

---

|  |    |
|--|----|
| Figure: IV.26. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée. | 68 |
| Figure:IV27: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.     | 69 |
| Figure: IV.28.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.         | 69 |
| Figure IV.29.: Paroi à cinq couches  | 70 |
| Figure: IV.30. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée. | 71 |
| FigureIV.31.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.    | 71 |
| Figure: IV.32.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.         | 72 |



## Liste des tableaux

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Chapitre I</b>   |    |
| Tableau I.1: Les propriétés de Béton                                  | 6  |
| Tableau I.2: Les propriétés de ciment                                 | 6  |
| Tableau.I.3.Domaine d'utilisation de différent ciment:                | 7  |
| Tableau I.4 : Propriétés des briques pleins et perforés               | 9  |
| Tableau I.5 : la Résistance thermique des briques pleines et perforés | 9  |
| Tableau I.6 : Table caractéristique des isolants                      | 16 |
| <b>Chapitre II</b>  |    |
| Tableau II .1.Comparaison des modes de transfert                      | 28 |
| Tableau II.2.Ordre de grandeur de $\lambda$ à 20 °C                   | 29 |
| <b>Chapitre III</b>   |    |
| Tableau.III.1. de grandeurs thermiques, électriques                   | 38 |
| <b>Chapitre IV</b>  |    |
| <b>Tableau IV. 1.</b> Les propriétés thermiques des matériaux.        | 53 |
| <b>Tableau.IV.2.</b> Les propriétés thermiques des matériaux.         | 55 |
| <b>Tableau IV.3 :</b> Les propriétés thermiques des matériaux         | 58 |
| <b>Tableau IV.4:</b> Les propriétés thermiques des matériaux          | 60 |
| <b>Tableau IV.5 :</b> Les propriétés thermiques des matériaux         | 63 |
| <b>Tableau IV.6 :</b> Les propriétés thermiques des matériaux         | 65 |
| <b>Tableau IV.7 :</b> Les propriétés thermiques des matériaux         | 68 |
| <b>Tableau IV.8 :</b> Les propriétés thermiques des matériaux         | 70 |

## Introduction générale

Le transfert de chaleur est l'un des modes, les plus connus d'échange d'énergie. Lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un système à des températures différentes sont mises en contact, on constate une tendance à l'égalisation des températures. On dit qu'il y'a transfert de chaleur. Le transfert de chaleur obéit aux principes fondamentaux de la thermodynamique, mais les lois de la thermodynamique ne suffisent pas pour expliquer de quelle manière s'effectue le transfert de chaleur ou pour prévoir la vitesse de ce transfert.

En physique, on appelle chaleur une forme particulière de l'énergie. Cette équivalence de la chaleur et du travail constitue le premier principe de la thermodynamique. Il en résulte qu'énergie, travail et quantité de chaleur ont une même unité: le joule. A la base de l'étude des transferts thermiques se trouvent les concepts de quantité de chaleur et de différence de température.

Le transfert de chaleur d'une partie d'une substance à une autre partie, ou d'un corps à un autre corps, s'effectue sous forme d'énergie cinétique d'agitation moléculaire désordonnée.

Ce transfert est le fait d'une différence de température entre les deux corps. La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant ainsi la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier, dans la mesure où le volume des deux corps reste constant.

Le transfert de chaleur s'effectue selon trois mécanismes désignés sous les termes de conduction, de convection et de rayonnement. En pratique, il existe beaucoup de problèmes qui exigent l'étude du phénomène de la conduction thermique. Parmi ces problèmes, nous citons, le problème de l'isolation de la maison qui dépend du choix optimal et de la disposition des matériaux de construction. En effet, en tout point du milieu s'applique une équation qui traduit le mécanisme local du transfert conductif : c'est l'équation de la chaleur. Cette équation lie entre elles les différentes grandeurs, il s'agit de la température, le temps et les variables spatiales.

Il existe plusieurs méthodes de résolution de l'équation de la thermique, dans notre travail, nous avons opté la méthode des volumes finis comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristique au problème de transfert de chaleur dans une paroi multicouches. Pour étudier ce problème, on doit trouver la température en tous points de la paroi étudiée et le flux thermique échanger à travers sa surface.

Pour surmonter ce problème, nous avons développé un code de calcul en monodimensionnelle sous l'environnement MATLAB, basé sur la méthode des volumes finis. Ce code permet de calculer et de visualiser la température en tous points du milieu étudié.

Ainsi notre travail sera organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré aux présentations des différents matériaux de construction et leurs propriétés physique et thermique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents modes de transfert de chaleur et leurs lois fondamentales.

Nous sommes intéressés au troisième chapitre à présenter les méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Nous choisissons la méthode des volumes finis.

Le quatrième chapitre sera consacré aux résultats de simulation à caractère thermique obtenus par notre code de calcul développé sous l'environnement MATLAB.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale résumant notre travail et nous proposons quelques perspectives.

|   |    |
|---|----|
| Résumé  |    |
| Remerciements                                       |    |
| Dédicaces   |    |
| Liste des Figure                                    |    |
| Liste des Tableaux                                  |    |
| Introduction générale                               | 1  |
| <b>Chapitre I : Les parois multicouches</b>         |    |
| I-1. Introduction                                   | 3  |
| I-2. Le confort thermique                           | 3  |
| I-2-1. Notion de confort thermique                  | 3  |
| I-3. Parois en terre multicouches                   | 3  |
| I-3.1 .Le Pisé                                      | 3  |
| I-3.2. Le béton                                     | 5  |
| I-3.2.a. Définition                                 | 5  |
| I-3.2.b. Les différents types de béton              | 5  |
| I-3.3. Ciment                                       | 7  |
| I-3.3.a. Définition                                 | 7  |
| I-4. Le brique                                      | 8  |
| I-4.1. Les produits                                 | 8  |
| I.4.2. La Brique de Terre Comprimée plus isolant    | 9  |
| I-5. Les différentes méthodes d'isolation thermique | 10 |
| I-6. Les isolants conventionnels                    | 11 |
| I-6.1. Matériaux biosourcés                         | 12 |
| I-6.1.a. Les isolants d'origine végétales           | 12 |
| I-6.1.b. Les isolants d'origine animales            | 12 |
| I-6.2. Matériaux synthétiques                       | 12 |
| I-6.2.a. Les isolants synthétiques                  | 12 |
| I-6.3. Matériaux minéraux                           | 12 |
| I-6.3.a. Les isolants minéraux                      | 12 |
| I-7.1.a. Tige de Cotton                             | 13 |
| I-7.1.b. Fibre de palmier à huile                   | 13 |

|   |    |
|---|----|
| I-7.1.c. Balle de paille  | 14 |
| I-7.2. Les isolants recyclés  | 14 |
| I-7.2.a. Mousse de verre recyclée   | 14 |
| I-7.2.b. Plastiques recyclés  | 14 |
| I-7.2.c. Fibre textile  | 15 |
| I-8. Conclusion   | 17 |
| <b>Chapitre II : transfert de chaleur</b>                                   |    |
| II.1.Introduction   | 18 |
| II.2.Transferts thermiques  | 19 |
| II.2.1.Importance des transferts thermiques                                 | 19 |
| II.2.2. Définitions   | 20 |
| II .2.2.1.Champ de température  | 20 |
| II .2.2.2 Gradient de température   | 20 |
| II.2.2.3-Flux de chaleur  | 20 |
| II.2.2.4-Stockage d'énergie   | 21 |
| II.3.Les modes fondamentaux de transfert thermique                          | 21 |
| II.3.1. Transfert par Conduction  | 21 |
| II.3.1 a.La conduction thermique (la loi de Fourier)                        | 21 |
| II.3.1.b.Loi de Fourier et vecteur densité de courant de chaleur            | 23 |
| II.3.2. Transfert par convection  | 25 |
| II.3.2.a.La loi de Newton   | 25 |
| II.3.2.b.Transfert conducto-convectif                                       | 26 |
| II.3.3.rayonnement thermique.   | 27 |
| II.4. Conduction thermique  | 28 |
| II.5. Résistance thermique  | 30 |
| II.5.1 Résistance thermique d'un mur composite association en série         | 31 |
| II.5. 2. Résistance thermique d'un mur composite : association en parallèle | 32 |
| II.5.2.a. Coefficient de transfert thermique d'un corps                     | 33 |
| II.5.2.b. Coefficient de transfert thermique d'un mur composite             | 33 |
| II.6. Conclusion  | 34 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Chapitre III : Les méthodes numériques</b>                     |    |
| III.1.Introduction  | 35 |
| III.2.Méthodes numériques de discrétisation                       | 35 |
| III.2.1.la méthode des différences finies                         | 35 |
| III.2.2. la méthode des éléments finis                            | 37 |
| III.2.3.Méthode de circuits couples (MCC)                         | 37 |
| III.2.4.la méthode des Volumes Finis(MVF)                         | 37 |
| III.2.4.1.Le Principe de méthode des Volumes Finis(MVF)           | 38 |
| III.2.4.2.Propagation de la chaleur dans un milieu multicouche    | 39 |
| III.2.4.3. Méthode des Volumes Finis dans le cas monodimensionnel | 41 |
| III.3.Conclusion  | 41 |
| <b>Chapitre IV : résultats de simulation</b>                      |    |
| IV.1.Introduction   | 52 |
| IV.2.Description du système                                       | 52 |
| IV.3.Application N°:1   | 55 |
| IV.4. Application N° 2  | 55 |
| IV.5. Application N° 3  | 57 |
| IV.6. Application N° 4  | 60 |
| IV.7. Application N° 5  | 62 |
| IV.8. Application N° 6  | 65 |
| IV.9. Application N° 7  | 67 |
| IV.10. Application N° 8   | 70 |
| IV.11.Conclusion  | 72 |
| Conclusion générale   | 73 |
| Bibliographie   | 74 |

## **I-1. Introduction :**

Les matériaux de construction sont considérés comme tous les matériaux utilisés pour la réalisation des ouvrages en béton armé ou en constructions métallique, ainsi qui sont largement utilisés dans le domaine de travaux publics (Route, ponts, aérodrome.....etc.). Dans ce chapitre, nous allons présenter un groupe de matériaux de construction, ainsi que leurs propriétés, leur résistance à la chaleur, etc .

## **I-2. Le confort thermique**

### **I-2-1. Notion de confort thermique**

La notion de confort thermique est le plus souvent appliquée à l'être humain, bien qu'elle puisse s'appliquer à tout être vivant. En effet, la vie et spécialement l'activité métabolique assurant les fonctions vitales n'est possible que dans une certaine plage de température, qui varie d'une espèce à l'autre. Il existe cependant des conditions d'ambiance optimales qui seront ressenties par l'individu comme celle d'un état de confort thermique. Sur un plan physique, le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance. Il dépend de la sensibilité, de l'habillement, du métabolisme et de l'activité physique de chaque individu, d'une part, mais aussi de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air, et de l'humidité, d'autre part. Au-delà d'un certain niveau de déséquilibre, l'individu va ressentir de l'inconfort, notamment parce qu'il va devoir réagir pour réduire ce déséquilibre. Tout être vivant dégage de la chaleur, cependant certains sont capables de réguler leur température corporelle par des moyens physiologiques, les homéothermes (cas de l'être humain) et d'autres non (les hétéothermes ou poïkilothermes). Les premiers disposent donc d'une meilleure capacité de survie (capacité d'adaptation) alors que les seconds peuvent difficilement s'adapter.[1]

le corps d'un individu va chercher à rétablir l'équilibre par différentes réactions demandant un certain effort : des réactions comportementales et des réactions physiologiques.

la thermorégulation comportementale comprend le changement de posture, d'activité, de vêtement, etc.

la thermorégulation physiologique, accessible uniquement aux êtres homéothermes, comprend notamment frissons, transpiration, vasodilatation, vasoconstriction, etc.[1]

## **I-3. Parois en terre multicouches**

### **I-3.1 .Le Pisé**

La technique de la terre comprimée, plus généralement appelée technique du pisé, est apparue méditerranéen et au Maghreb avant d'atteindre l'Europe au VII<sup>e</sup> siècle. Elle consiste à

construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages. La terre utilisée est généralement extraite directement du site de construction. Il faudra vérifier qu'elle ne contient pas trop d'argile, provoquant des fissures au séchage. La terre à pisé peut contenir aussi bien des cailloux et des graviers que des particules plus fines. De par l'utilisation de coffrages et la granulométrie de la terre utilisée, cette technique de construction est celle qui se rapproche le plus de la technique du béton. « Béton d'argile » ou « béton de terre » sont des appellations largement utilisées pour parler du pisé. La terre extraite est placée dans des coffrages, également appelés banches.[2]

### I-3.2. Le béton

#### I-3.2.a. Définition

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné. Dans ce mélange, le ciment joue le rôle de liant (hydraulique).

Il est lui-même composé de clinker, associé parfois à des constituants secondaires tels que le laitier de haut fourneau, un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai et du coke métallurgique, des cendres volantes ou des fillers calcaires. Suivant la proportion de ces éléments, on distingue cinq types de ciment : ciment Portland, ciment Portland composé, ciment de haut fourneau, ciment de haut-fourneau à haute teneur en laitier, ciment aux laitiers et aux cendres. Les autres types de ciment sont réservés aux travaux ne nécessitant pas une résistance particulière à la chaleur. Ils sont tous indiqués pour les travaux souterrains, les ouvrages massifs en eaux agressives.

Après durcissement, une pâte de ciment est constituée de grains juxtaposés et plus ou moins enchevêtrés (Fig.1.2.3) . [3]



Figure I-1 : Constituants d'un béton ordinaire [12]





**Figure. I-2**types de béton [16]



**Figure. I-3**Le béton cellulaire [16]

### **I-3.2.b. Les différents types de béton :**

Avec les nouveaux moyens technologiques, la famille des bétons est en constante évolution. Le béton est un matériau dont la composition peut évoluer. On peut adapter son dosage et ses constituants en fonction des performances recherchées. En répondant aux normes de sécurité et s'adaptant aux envies des hommes, le béton, sous ses différentes formes, répond à nos besoins. Parmi ces types nous citons:[4]

- Béton ordinaire
- Béton auto-plaçant (BAP)
- Béton de haute performance (BHP)
- Béton de fibre
- Béton à durcissement rapide
- Béton léger
- Béton lourd
- Béton réfractaire

| Béton   |   |  |
|---|---|--|
| Conductivité thermique<br>$\lambda$ (W . m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ) | Chaleur massique Cp<br>(J.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ) | Masse volumique $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 1.75  | 600   | 2300   |

Tableau I.1: Les propriétés de Béton [4]

### I-3.3. Ciment

#### I-3.3.a. Définition

Le ciment est un liant hydraulique : la réaction chimique entre la Poudre de ciment et l'eau produit un des hydro silicates. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction hydratation s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous eau.(fig.4).[5]



Figure. I.4.Faire du ciment. I [17]

| Le ciment  |  |   |
|--|--|---|
| Conductivité thermique $\lambda$ (W . m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ) | Chaleur massique Cp (J.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> ) | Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
| 1  | [0.7 ; 1]  | [1700 ; 1900]                               |

Tableau I.2: Les propriétés de ciment [13]

| Ciment  | Désignation      | Utilisation   | Contre-indication  |
|---|------------------|---|--|
| Ciment Portland<br>Ciment composé                                 | CEM I CEM II     | Tous travaux de béton armé<br>Bonnerésistance<br>Décoffrage Rapide<br>(préfabrication)<br>Bétonnage par tempsfroid                          | Présence d’eaux<br>agressiv es<br>Travaux souterrains<br>Bétonnage en<br>grandemasse |
| Ciment au laitier Et<br>pouzzolanique Ou au<br>laitier et cendre. | CEM III CEM IV C | Béton de masse(barrage)<br>Béton de fondation (sol agressif)<br>Bétonnage en tempschaud<br>Eauusée<br>Travauxsouterrains<br>Réservoirid’eau | Bétonnage par<br>tempsfroid<br>Bétonpréfabriqué<br>Résistance à jeune<br>âge élevée  |

Tableau.I.3.Domaine d’utilisation de déférent ciment: [13]

#### I-4. Le brique

Les briques, depuis longtemps, sont considérées parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, enfin la brique stabilisée.

La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (Brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc ...etc.).(fig5) [6]



Figure. I.5 LA brique.[18]

### I-4.1. Les produits

Briques pleines ou perforées en terre cuite selon la Norme XP P 13-305.- Brique pleine : Brique ne comportant aucune perforation et dont le format d'appellation le plus courant est 6x11x22 cm.(fig.6) .[6]



Figure. I.6. Briques pleines .[18]

Brique perforée : Brique comportant des perforations perpendiculaires à la face de pose, la somme des sections des perforations étant inférieure ou égale à 50% de la section totale, et de largeur inférieure à 14 cm.(fig.7) [6]



figure I.7. Brique perforée .[18]

|                        |                                       |              |
|------------------------|---------------------------------------|--------------|
|                        | Poids spécifique (kg/m <sup>3</sup> ) | Environ 1800 |
| Résistance Mécanique   | Compression(MPa)                      | De 5 à 80    |
|                        | Traction(MPa)                         | De 0 à 2     |
|                        | Dilatation thermique (mm/m.k)         | 0.005        |
|                        | Gonflement à l'humidité (mm/m)        | 0.1          |
|                        | Retrait au durcissement (mm/m)        | 0.2 à 1.1    |
|                        | Porosité (%)                          | 5 à 18       |
| Réaction au feu        |                                       | Très élevé   |
| La conductivité w/m.°C |                                       | 1.15         |

Tableau I.4 : Propriétés des briques pleins et perforés [11]

| pleines        |                          | perforés       |                          |
|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|
| Epaisseur (cm) | R (m <sup>2</sup> .°C/W) | Epaisseur (cm) | R (m <sup>2</sup> .°C/W) |
| 5.5            | 0.05                     | 20             | 0.52                     |
| 10.5           | 0.09                     | 30             | 1.00                     |
| 22             | 0.20                     | 35             | 1.21                     |

Tableau I.5 : la Résistance thermique des briques pleines et perforés [11]

- ✓ la Résistance thermique des briques de terre cuite égale 1.15(W/m°C)

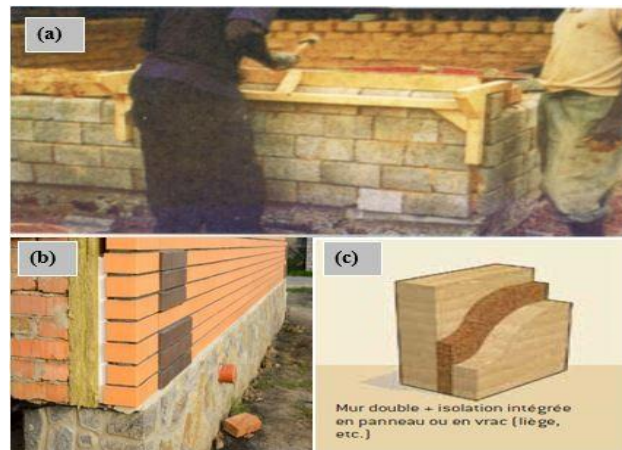
#### I.4.2. La Brique de Terre Comprimée plus isolant

Utilisée comme matériau porteur ou de remplissage la brique de terre comprimée est souvent associée à des isolants en vue de limiter l'échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur assurant ainsi un confort thermique dans les habitations.

Avec l'évolution des modes constructifs on assiste à plusieurs méthodes d'isolation dans la construction. En Belgique par exemple, dans les constructions neuves l'isolant est pratiquement toujours placé du côté extérieur par rapport au mur porteur. Le choix de ce système de mur isolé par l'extérieur avec une finition légère se fait parfois pour des raisons esthétiques. En rénovation par contre les murs sont souvent isolés par l'intérieur pour préserver l'apparence du mur (briques ou pierre, ornements particuliers,...etc) ou pour des raisons urbanistiques (alignement des façades). [7]

Il existe essentiellement trois procédés d'isolation thermiques des BTC :

- Par remplissage de la lame d'air dans le cas d'un mur creux ;
- Par l'extérieur ;
- Par l'intérieur.[7]



FigureI-8. Construction des murs en parois multicouches ; (a) :construction d'un mur en adobéton ; (b) :mur double en BTC + isolant intégré ; (c) : mur double en pisé + isolant intégré.[14]

### I-5. Les différentes méthodes d'isolation thermique

L'isolation est un procédé visant à limiter ou empêcher les transferts de chaleur entre un milieu froid et un milieu chaud. Il est essentiel pour maintenir une température de confort à l'intérieur des locaux.

Les isolants thermiques, en général sont caractérisés par leur résistance thermique et/ou leur conductivité (U-value). Un produit est cependant qualifié d'isolant lorsqu'il a une conductivité thermique qui est dépendant de la densité, de la porosité, de la teneur en humidité et du type de matériau. Un matériau est généralement considéré comme un isolant thermique si sa conductivité est inférieure à 0,07 W/m.K.[8]

Il existe plusieurs type d'isolants tel que la laine de verre, le polystyrène (EPS), le polystyrène extrudé(XPS) qui, associés à des matériaux tel que les BTC, les parpaings assure l'isolation thermique des bâtiments en empêchant le transfert de chaleur par conduction et par convection. On distingue principalement trois typologies pour la mise en place des isolants : l'ITE (l'isolation thermique par l'extérieur qui consiste à poser un manteau isolant extérieur sur le bâtiment dans son ensemble), l'ITI (l'isolation thermique par l'intérieur consiste à poser un isolant contre les murs intérieurs), l'ITR (l'isolation thermique répartie réalisé avec des structures porteuses).

Isolantes comme des parpaings, des monomurs,...etc).[8]

Les matériaux d'isolation peuvent être classés en deux grands groupes essentiels à savoir :les isolants conventionnels et les isolants non conventionnels.

## **I-6. Les isolants conventionnels :**

### **I-6.1. Matériaux biosourcés :**

Ce sont des matériaux constitués principalement de fibres végétales ou animales. Dans le bâtiment, les matériaux biosourcés les plus utilisés sont le bois, la paille, le liège, la laine de mouton, etc. [9]

#### **I-6.1.a. Les isolants d'origine végétales :**

##### **- Le liège expansé :**

Le liège pur expansé est issu de l'arbre chêne-liège. Le liège est résistant à la compression et indéformable. Le liège est également un très bon isolant phonique. Les plaques de liège expansé se posent et se découpent facilement. Le liège est utilisé sous différentes formes : en vrac, en panneaux ou bien encore en éléments composites préfabriqués [9].

##### **-Le bois :**

Le bois est une matière naturelle renouvelable idéale pour la conception des isolants pour plusieurs raisons. Il est pratique, économique et écologique. Comme isolant, le bois se présente également sous différentes formes : laine de bois (panneau semi-rigide, en vrac...), panneau de fibres de bois rigides ou encore des fibraglos (fibres de bois avec enrobage de plâtre et ciment). Les déchets des scieries sont la matière première du panneau de bois. Les fibres sont pressées et séchées pour donner des produits à fibres tendres ou dures. La fabrication se fait naturellement, sans produit ajouté. Ces panneaux peuvent être posés pour la toiture, les murs (le plus souvent comme isolant complémentaire), les cloisons intérieures et pour l'isolation acoustique et thermique des planchers.[9]

#### **I-6.1.b. Les isolants d'origine animales :**

##### **-La laine de mouton :**

La laine de mouton a des qualités d'isolation thermique et de régulation naturelle liées à la constitution de ses fibres. Les produits de tonte sont d'abord lavés au savon et à la soude pour éliminer les impuretés et surtout le suint. Ensuite la laine reçoit un traitement insecticide et un traitement contre le feu, à base de sel de bore. [10]

### **I-6.2. Matériaux synthétiques :**

Issus de ressources pétrochimiques, donc non renouvelables et fortement émetteurs de gaz à effet de serre. Ils sont particulièrement utilisés pour le traitement des zones fortement soumises à l'humidité (soubassement, sous-dalle...etc). [10]

### I-6.2.a. Les isolants synthétiques

#### - Le polystyrène (expansé et 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. Le polystyrène expansé est obtenu par polymérisation des billes de styrène qui en sont issues avec de l'eau et du gaz pentane. Le polystyrène extrudé est obtenu après polymérisation du styrène par extrusion sous pression d'une pâte de fusion grâce à un gaz lourd.[10]



Figure I.9 Le polystyrène expansé.[15]

### Propriétés

Les propriétés de polystyrène expansé sont:

- Conductivité thermique varie entre 0.028 et 0.038 (W/m.K).
- La densité du matériau varie de 10 et 30(KG/m<sup>3</sup>).
- La chaleur spécifique du matériau est de 1450 (J/Kg.K).
- Le coefficient de diffusion à la vapeur varie entre 20 et 100 [41]

### Utilisation

Le polystyrène expansé est utilisé dans plusieurs applications, parmi

Les quelles nous citons:

- protection des appareils fragiles.
- Emballage alimentaire.
- Flottabilité : en peut l'utiliser comme un flotteur.
- Isolation thermique et phonique. [41]

### I-6.3. Matériaux minéraux

#### I-6.3.a. Les isolants minéraux

Les isolants minéraux sont fabriqués à partir des matières naturelles inorganiques. Ils



regroupent : le verre cellulaire, la laine de verre, la laine de roche (basalte en particulier), la vermiculite, l'argile expansé.

Elles présentent de bonne performance thermique, très résistant au feu, ils sont stables et solides, ils sont couramment utilisés dans tous les domaines de la construction ; et peuvent être fabriqués sous différentes formes (matelas ou panneaux). La laine de roche et la laine de verre sont les isolants minéraux les plus communément utilisés. [10]

**- La laine de roche :**

La laine de roche est obtenue à partir de la fusion de roche volcanique (basalte) de fondant et de coke industrielle. Une pâte est alors obtenue, fibrée et encollée par des liants chimique (résine phénoliques) avant d'être stabilisé par chauffage en étuve.[10]

**- La laine de verre :**

La laine de verre est composée de la silice (sable), du verre de récupération (ou calcaire) transformé par fusion, fibrage, et polymérisation.[10] .

## **I-7. Les isolants non conventionnels**

### **I-7.1. Les isolants naturels**

#### **I-7.1.a. Tige de Cotton**

Le coton est la culture non agricole la plus répandue utilisée principalement pour la production textile. Une étude réalisée par X. Zhou et al ont permis de tester la performance thermique de la tige de coton, un résidu de la production de coton. Les panneaux de particules ont été obtenues en transformant les tiges en fibres sans utiliser de liant chimique. La conductivité thermique de l'échantillon testé est comprise entre 0,0585 et 0,0815 W/m.K ce qui a permis de déduire que plus le matériau est dense, plus l'isolation thermique est basse.[11]

#### **I-7.1.b. Fibre de palmier à huile**

Le palmier est un végétal de la famille botanique des arécacés, largement cultivée pour ses fruits et ses graines riches en huile à usage alimentaire et industriel. C'est aussi une plante dont les fibres sont utilisées pour l'isolation des bâtiments. Plusieurs recherches ont été menées pour recycler les résidus d'huile palmier, une culture cultivée dans 11 millions d'hectares dans le monde entier (Afrique de l'Ouest, Asie du Sud-Est et Amérique du Sud). L'effet de la densité sur la conductivité thermique d'un échantillon a base de fibre de palmier à huile a été étudié en 2012 par Manohar. La valeur de conductivité thermique la plus basse était de 0,055 W/m.K pour une masse volumique de  $100 \text{ kg/m}^3$  . [11] .

### **I-7.1.c. Balle de paille :**

La paille est un sous-produit de la culture de céréales qui est disponible en grande quantité et à bas prix dans un grand nombre de pays. La paille a été l'un des premiers matériaux utilisés dans les bâtiments écologiques et de nombreux bâtiments ont été construits selon cette technique dans le monde entier. Habituellement, la paille utilisée pour les applications de construction provient de la culture du blé. Plusieurs travaux de recherche évaluent les effets de l'utilisation de ballots de paille comme isolant thermique dans les bâtiments. Goodhew et ses collaborateurs ont procédé à une caractérisation thermique du matériau en mesurant une conductivité thermique de 0,067 W/m.K, une diffusivité de  $18,2.107 \text{ m}^2/\text{s}$  et une capacité calorifique spécifique de 600 J/kg.K pour un échantillon dense de  $60 \text{ kg/m}^3$ . Des valeurs de conductivité thermique inférieures ont été mesurées et analysées pour des échantillons similaires par l'Université d'Aalborg au Danemark. Cette dernière étude a également révélé que les échantillons obtenus avec les tiges de paille perpendiculaires au flux de chaleur avaient de meilleures propriétés d'isolation thermique . [11]

### **I-7.2. Les isolants recyclés**

#### **I-7.2.a. Mousse de verre recyclée**

Plusieurs études ont prouvé que les déchets de verre pouvaient être utilisés avec succès recyclé pour la réalisation de matériaux d'isolation thermique et acoustique utilisant des procédés de moussage. Ayadi et al ont réalisé un matériau dense de  $450 \text{ kg/m}^3$  caractérisé par une très faible conductivité thermique, 0,031 W/m.K. L'échantillon testé était un matériau en sandwich dans lequel la mousse a été placée entre deux couches de fibres de verre . [11]

#### **I-7.2.b. Plastiques recyclés :**

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est l'un des matériaux plastiques les plus produits, utilisés notamment dans l'industrie de l'emballage et de la fabrication de bouteilles. Des recherches effectuées ont permis d'utiliser les bouteilles de Polyéthylène téréphtalate (75%) associé à des thermocollants vierge (25%) pour produire des panneaux isolants innovants. Le panneau obtenu était caractérisé par une faible conductivité thermique de 0,0355 W/m.K, en considérant un matériau dense de  $30 \text{ kg/m}^3$  . [11]

### I-7.2.c. Fibre textile

La fabrication de produits textiles génère une grande quantité de déchets, communément mis en décharge ou utilisés pour la récupération d'énergie. Valverde et al ont réalisé des études sur un matériau à base de déchets de l'industrie du textile synthétique, constitué de polyester et de polyuréthane. La conductivité thermique des échantillons testés était comprise entre 0,041 et 0,053 W/m.K.[11] .



Figure I.10 : (a) :Liste de quelques isolants conventionnels ; (b) :Laine de verre (isolant conventionnel); (c) : Balle de paille (isolant non conventionnel) ; (d) : Panneau de réalisé à partir de Cotton recyclé (isolant non conventionnel).[14]

| Isolant                            | Conductivité thermique<br>$\lambda$ (W/m.K) | Chaleur spécifique | Densité(Kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------------|---|--------------------|-----------------------------|
| <b>ISOLANTS CONVENTIONNELS</b>     |   |                    |                             |
| Matériaux biosourcés               |   |                    |                             |
| Isolants d'origine végétale        |   |                    |                             |
| Liège expansé                      | 0,037                                       | 1670               | 120                         |
| Fibre de bois                      | 0,036 à 0,042                               | 2100               | 50 à 170                    |
| Isolants d'origine animale         |   |                    |                             |
| Laine de mouton                    | 0,035 à 0,042                               | 1000 à 1800        | 13 à 35                     |
| Matériaux synthétiques             |   |                    |                             |
| Isolants synthétiques              |   |                    |                             |
| Polystyrène extrudé (XPS)          | 0,035                                       | 1300 à 1500        | 25 à 45                     |
| Matériaux minéraux                 |   |                    |                             |
| Isolants minéraux                  |   |                    |                             |
| Laine de verre                     | 0,04  | 840 à 1000         | 10                          |
| Laine de roche                     | 0,039                                       | 840 à 1000         | 25 à 59                     |
| <b>ISOLANTS NON CONVENTIONNELS</b> |   |                    |                             |
| Isolants naturels                  |   |                    |                             |
| Fibre de palmier à huile           | 0,055                                       | –                  | 100                         |
| Isolants recyclés                  |   |                    |                             |
| Polyéthylène téréphtalate          | 0,035                                       | –                  | 30                          |

Tableau I.6 : Table caractéristique des isolants [14]

## **I-8. Conclusion**

Le flux de chaleur à travers les murs a à voir avec les propriétés physiques et thermiques des matériaux qui composent les murs , telles que la conductivité thermique et la capacité de stockage ..etc. pour une bonne isolation thermique une sélection rigoureuse des matériaux qui permettent d'économiser de l'énergie lors du refroidissement ou du chauffage.

## II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur les modes de transferts thermiques ainsi que les grandeurs liées à ces phénomènes physiques et les principales lois régissent ces modes. Les principes de la thermodynamique énoncent que la chaleur ou l'énergie calorifique ne disparaît pas, elle se déplace ou se transforme sous une autre forme d'énergie. Au cours d'un échange de chaleur entre deux corps physiques, c'est toujours le plus chaud qui cède de l'énergie au profit du plus froid, l'échange thermique s'arrête lorsque les deux corps ont atteint la même température [21].

La thermodynamique nous a montré qu'elle est essentiellement basée sur deux principes mesurant la variation d'énergie entre un état initial et un état final. Dans la majorité des cas, cette variation est due à des échanges de travail et thermique (chaleur). Pratiquement, le travail s'applique sur les fonctions d'états qui ont la propriété de ne dépendre que des états initial et final. Ainsi on n'étudie pas la nature et la durée de l'interaction du système avec l'extérieur qui est à l'origine de la variation de l'état du système. Lorsqu'on parle de « transferts thermiques », on cherche à expliquer la façon dont les transferts de chaleur se font ainsi que leur vitesse.

Le second principe de la thermodynamique spécifie que le transfert de chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid, ou de façon équivalente d'une température élevée vers une température plus basse. Le système ne sera donc pas en équilibre thermique durant le transfert. L'approche qu'on va poursuivre est essentiellement phénoménologique, c'est à dire d'origine expérimentale, et macroscopique. Ainsi on parle de transfert thermique pour décrire un échange de chaleur lié à une différence de température, Plusieurs modes de transfert vont être étudiés mais dans tous les cas on peut définir la puissance transmise entre deux points de températures différentes  $T_1 > T_2$  [26].

$$P = h S (T_1 - T_2) \quad (\text{II.1})$$

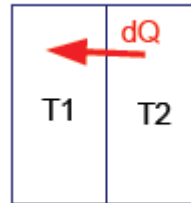
L'unité de P est le Watt (W) ou Joule / s.

Cette relation est connue sous le nom de loi de Newton, S est la surface au travers de laquelle le transfert se fait en  $m^2$ , h un coefficient de transfert de chaleur en  $W m^{-2} K^{-1}$ .

Le but de l'étude thermique est souvent de déterminer h.

## II.2. Transferts thermiques

Lorsque deux points dans l'espace sont à des températures différentes, il ya systématiquement transfert de chaleur toujours vers le corps froid. C'est une Conséquence directe du deuxième principe de la thermodynamique [19].



$$\partial S = \partial S_1 + \partial S_2 \quad (\text{II.2})$$

$$\partial S = \frac{\partial Q}{T_1} + \frac{-\partial Q}{T_2} = \partial Q \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (\text{II.3})$$

$$\partial S = \partial Q \frac{(T_2 - T_1)}{T_1 T_2} \quad (\text{II.4})$$

$$\partial S > 0 \rightarrow T_2 > T_1$$

Corolaire : la connaissance de la distribution de températures dans les corps (appelée aussi champ de températures) doit permettre l'obtention des flux de chaleur. [19]

Flux de chaleur : est un débit de chaleur :

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{Unités : j/s ou w} \quad (\text{II.5})$$

Densité de flux thermique :

$$\varphi = \frac{\phi}{S} \quad \text{Unités : W m}^{-2} \quad (\text{II.6})$$

### II.2.1. Importance des transferts thermiques

- Le transfert thermique intervient dès qu'il existe une différence de température dans un système : il est difficile de trouver une activité humaine où n'intervient pas un échange de chaleur.
- Exemples d'application: chauffage centrale, production de vapeur, refroidissement moteur thermique, mise en température d'un réacteur, matien de la température au cours d'une réaction, hauts-fourneaux (élaboration d'aciers, verres), isolation de bâtiments, refroidissement de composants électriques ou électroniques, bio thermie, géothermie, etc.,...[19].

En plus La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier

la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final [23].

## II.2.2. Définitions

### II .2.2.1.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.

[23]

### II .2.2.2 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. 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 (Figure. II.1).

$$\vec{grad}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{II.7})$$

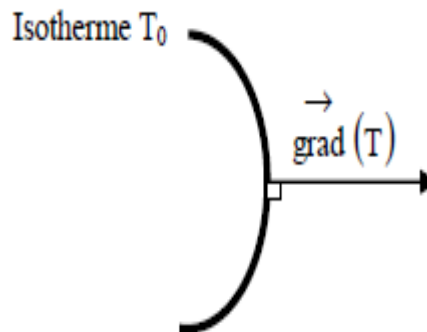


Figure. II.1.Isotherme et gradient thermique [23].

Avec :

$\vec{n}$  : Vecteur unitaire de la normale

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

### II.2.2.3-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 :



$$\phi = \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

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

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps:

$$\varphi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

### II.2.2.4-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) :

$$\varphi_{st} = \rho V c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

|                |                        |                                  |
|----------------|------------------------|----------------------------------|
| $\varphi_{st}$ | Flux de chaleur stocke | (W).                             |
| $\rho$         | masse volumique        | ( $kg\ m^{-3}$ ).                |
| V              | volume                 | ( $m^3$ ).                       |
| c              | chaleur spécifique     | ( $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ). |
| T              | température            | ( $^\circ C$ ).                  |

Le produit  $\rho V c$  est appelé la capacitance thermique du corps.

## II.3.Les modes fondamentaux de transfert thermique

Les modes fondamentaux de transfert thermique : il ya trois modes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement): (Figure. II.2)

### II.3.1.Transfert par Conduction

Le transfert par conduction est un échange d'énergie se réalisant sans déplacement de matière : il concerne donc les solides et les fluides immobilisés. Ce transfert peut se réaliser au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps. L'énergie thermique due à la vibration des atomes autour de leur position d'équilibre dans le solide, se transmet de proche en proche : c'est un phénomène de diffusion. (fig.1.2) Dans le cas le plus simple d'une paroi d'épaisseur e solide dont les deux surfaces d'aire S, présentent une différence de température homogène  $T_1 - T_2$ , le flux thermique dépend de la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau ( $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ) :

$$\phi_{1 \rightarrow 2} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{e} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad (\text{II.11})$$

$R_{th}$ : est la résistance thermique de conduction. [20].

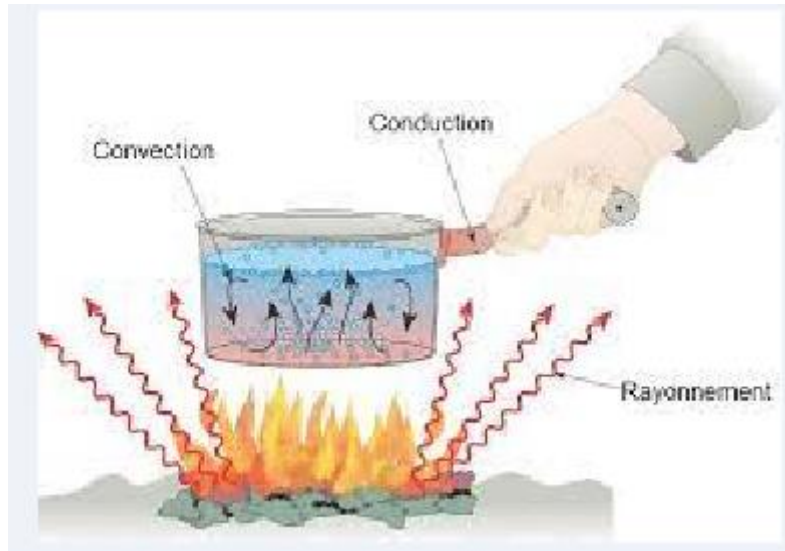


Figure. II.2. les modes de transferts thermique [20]

---

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : le flux est proportionnel au gradient de température : loi de Fourier : [20]

$$\phi = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{II.12})$$

$\lambda$  : conductivité thermique (W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

$\phi$ : Flux de chaleur (W)

T : la température (°C)

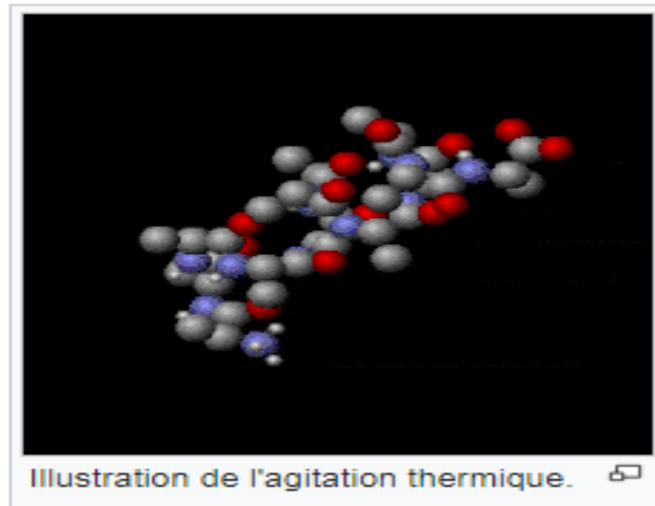


Figure. II.3. transfert de chaleur par conduction [20]

### II.3.1.a.La conduction thermique (la loi de Fourier)

Dans le cas d'un champ de températures à une dimension:

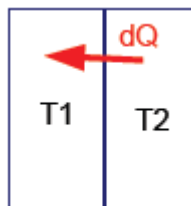


Figure. II.4.direction du transfert de chaleur[19]

$$\Phi = - \lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{ou} \quad \phi = - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II.13})$$

S: surface perpendiculaire au flux thermique

$\frac{\partial T}{\partial x}$  : Le gradient de température au point x considéré, c'est à dire la variation de la température par unité de longueur dans la direction x

- Le signe moins : le flux de chaleur est positif quand la Température diminue avec x.

Origine physique : la vibration des atomes dans les matériaux. [19]

### II.3.1.b.Loi de Fourier et vecteur densité de courant de chaleur

La présence, dans un milieu matériel sans mouvement macroscopique, d'une inhomogénéité de température fait apparaître un transfert thermique par conduction qui possède les propriétés

suivantes :

- Le transfert a lieu des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides
- Il est proportionnel à la surface à travers laquelle on évalue la puissance diffusée ainsi qu'à la durée du transfert
- Il augmente de manière linéaire avec le gradient de la température Joseph Fourier (1768 – 1830) a proposé une loi phénoménologique décrivant ce mode de transfert thermique par conduction :

On considère un corps dont la température dépend de  $x$  uniquement et du temps. La quantité d'énergie  $\delta Q$ , qui travers par conduction thermique une surface élémentaire  $dS$  perpendiculaire à l'axe  $(Ox)$  pendant une durée  $dt$  dans le sens choisi pour l'axe  $(Ox)$

$$\delta Q = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} dS dt \quad (\text{II.14})$$

Où  $\lambda$  (notée parfois  $K$ ) est une constante positive caractéristique du matériau appelée conductivité thermique (elle s'exprime en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).

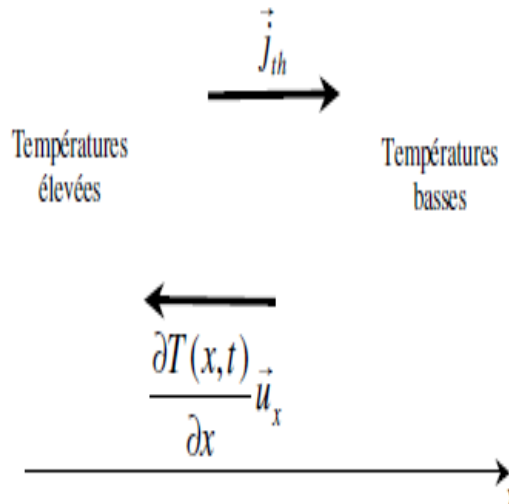
On définit le vecteur densité de courant thermique (par analogie avec le vecteur densité de courant électrique)

$$\vec{j}_{th} = \frac{\delta Q}{dS dt} = \lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \vec{u}_x \quad ; \quad \vec{J}_{th} = j_{th} \vec{u}_x = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \vec{u}_x = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}(x, t) \quad (\text{II.15})$$

Cette dernière expression, faisant intervenir le gradient de la température, constitue la loi de Fourier[22].

Elle se généralise à des distributions de températures dépendant des trois variables d'espace : [22]

$$\vec{J}_{th} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}(x, y, z, t) = -\lambda \left( \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} \vec{u}_x + \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} \vec{u}_y + \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z} \vec{u}_z \right) \quad (\text{II.16})$$



### II.3.2. Transfert par convection

Dans ce cas le phénomène thermique est compliqué par des déplacements de matière et au transfert de chaleur se superpose le transfert de masse. Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide (ou agrégats) ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures figure(II.5) (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques (on parle alors de convection forcée) [27].

Les phénomènes de convection interviennent dans la transmission de la chaleur chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes. Lorsque se produit au sein du fluide des courants du simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée [24].

La convection forcée concerne les mouvements convectifs qui apparaissent sous l'action d'une source externe, telle qu'une pompe ou le déplacement d'un objet dans le fluide, les mouvements induits par une différence de pression sont des mouvements de convection forcée où l'écoulement persiste même en l'absence de gradient de température [28].

Dans la convection forcée, le fluide doit son mouvement à une cause extérieure (pompe, ventilateur, agitateur, etc.). En convection forcée proprement dite, la poussée d'Archimède est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement. C'est le cas, par exemple, du refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau pousse le liquide de refroidissement à travers le moteur, puis dans l'échangeur [29].

#### II.3.2.a. La loi de Newton

Les transferts thermiques entre un corps et le milieu extérieur suivent la loi de Newton si la densité de flux thermique sortant algébriquement à travers la surface du matériau est proportionnelle à l'écart de température entre celle de la surface du matériau et celle de l'extérieur. Avec les notations du paragraphe précédent :  $j_{conv} = h(T_P - T_F)$   $h$  est appelé le coefficient de transfert thermique de surface [22].

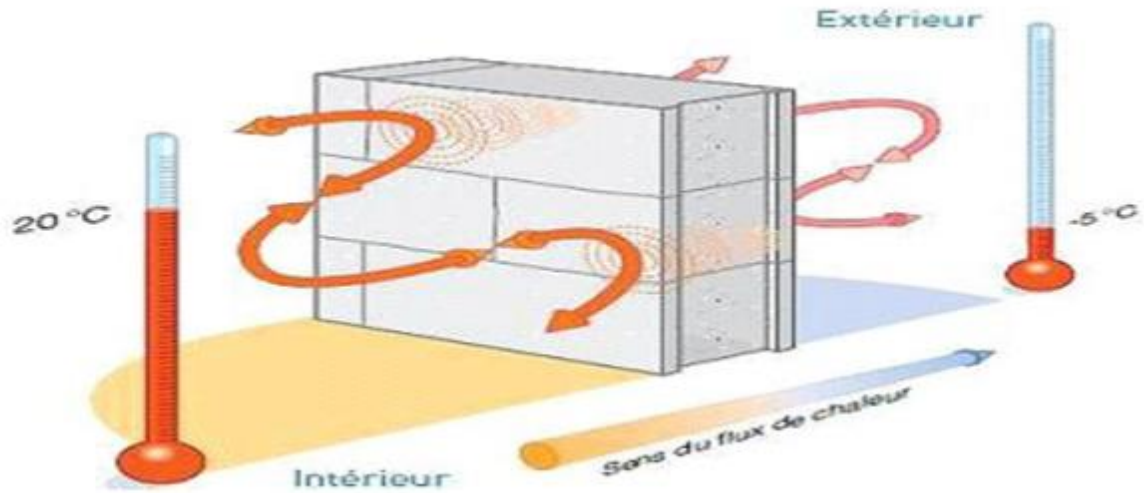


Figure II.5. Transfert de chaleur par convection [22]

### II.3.2.b. Transfert conducto-convectif

Il est d'observation courante que, pour refroidir un liquide chaud contenu dans un flacon, on agite le flacon. Ainsi font les parents avant de présenter le biberon à leur bébé. Le transfert thermique à travers les parois du flacon s'effectue par conduction thermique diffusive.

L'agitation du liquide provoque en son sein des mouvements

Convectifs qui favorisent la conduction thermique à travers les parois. Un autre exemple est donné par l'échange conducto-convectif entre l'air d'une pièce

D'habitation et la surface des radiateurs utiles pour chauffer la pièce. Pour modéliser ces exemples, on considère un modèle unidirectionnel en régime stationnaire, tel que représenté sur la figure. II.6

Le fluide est animé de mouvements de convection qui provoquent une homogénéisation de la température. On considère que ce brassage est suffisamment efficace pour que la température du fluide soit constante spatialement et égale à TF.

Dans la paroi, en revanche, le transfert est conductif et dirigé selon l'axe (Ox). On y observe donc un gradient de température [22].

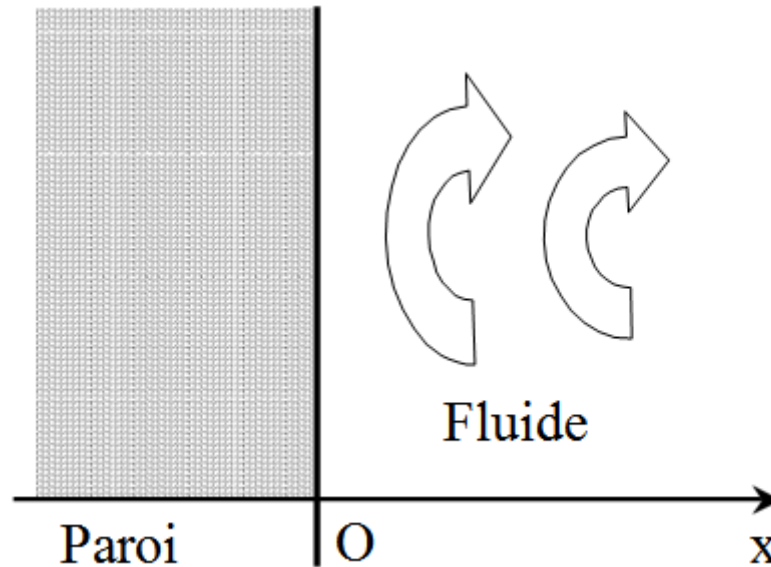


Figure. II.6.1'échan conducto-convectif entre l'air [22].

### II.3.3.Rayonnement thermique

Les corps chauffés émettent un rayonnement EM. Ce phénomène est appelé rayonnement thermique. Il ne s'agit pas d'un transfert thermique a proprement parlé. En particulier, il peut se propager dans le vide alors que la conduction thermique nécessite un support matériel. Toutefois, le rayonnement thermique devra intervenir dans les bilans énergétiques comme autre cause d'échange d'énergie.

Le rayonnement thermique a pour origine le mouvement des charges électriques présentes dans la matière (qui génèrent alors une onde EM) et il est d'autant plus important que la température est élevée. Un métal chauffé donne lieu au phénomène d'incandescence caractérisé par une émission de lumière utilisée pour l'éclairage dans des lampes à incandescence. Le métal apparaît d'abord rougeâtre, puis jaune, en fin de plus en plus blanc à mesure que la température s'élève. A l'inverse, à température ambiante, c'est le rayonnement infra-rouge qui domine [22]. Figure II.7

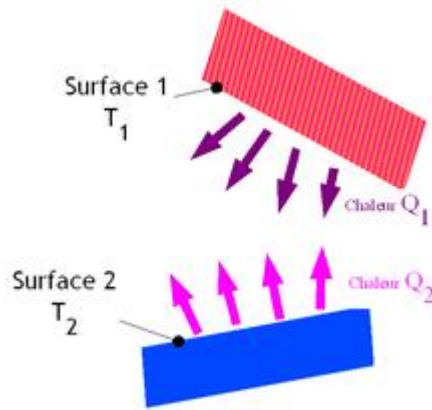


Figure. II.7.transfert de chaleur par rayonnement [ 20]

**Comparaison des modes de transfert :**

| Mode de transfert | Matière de transfert     | Milieu de transfert   | Transport de matière |
|-------------------|--------------------------|---|----------------------|
| conduction        | Solides et fluides       | Au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps             | Non                  |
| convection        | fluides                  | Au sein d'un seul fluide ou au contact entre un solide et un fluide | Oui                  |
| Rayonnement       | Solides, fluides et vide | A partir d'un corps rayonnant vers un autre                         | Non                  |

Tableau II .1.Comparaison des modes de transfert : [20]

Notions thermiques :

Flux thermique: Le flux thermique c'est la quantité d'énergie thermique qui traverse une Surface isotherme par unité de temps. [25]

$$\phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \tag{II.17}$$

**II.4.Conductivité thermique**

La conductivité thermique (notée  $\lambda$ ) correspond à la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps, sous un gradient de température. [21]

La conductivité thermique dépend de:

- La nature chimique du matériau



- La nature de la phase considérée (solide, liquide, gazeuse)
- La température
- L'orientation des fibres ou cristaux dans les corps anisotropes (bois, plastiques laminés, etc.)

Unités :  $W m^{-1} k^{-1}$  [19].

Quelques conductivités thermiques : ( $\lambda$  en  $W m^{-1} k^{-1}$ ) :

- Gaz (de 0,006 à 0,18) : mauvais conducteurs
- Liquides non métalliques ( $\lambda$  de 0,1 à 1) : conducteurs moyens (eau)
- Solides métalliques ( $\lambda$  de 10 à 400) : excellents conducteurs (cuivre, acier)
- Matériaux non métalliques ( $\lambda$  de 0,004 à 4) : conducteurs moyens (verre, béton, bois) ou mauvais conducteurs (laine de verre, polystyrène expansé). [22]

| Matériaux :                     | $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------|--|
| Gaz à la pression atmosphérique | 0.006 - 0.18                                   |
| Matériaux isolants              | 0.025 - 0.25                                   |
| Liquides non métalliques        | 0.1 - 1.0                                      |
| Solides non métalliques         | 0.025 - 3.0                                    |
| Liquides métalliques            | 8.5 - 85                                       |
| Alliages métalliques            | 10 - 150                                       |
| Métaux purs                     | 20 - 400                                       |

Tableau II.2. Ordre de grandeur de  $\lambda$  à 20 °C : [19]

L'air à température ambiante :  $\lambda \approx 0.025 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

L'eau à température ambiante :  $\lambda \approx 0.60 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

## II.5. Résistance thermique :

Résistance thermique : La résistance thermique (notée  $k$ ) correspond à la capacité d'un Matériau à résister au froid et à la chaleur. Elle est déterminée en divisant l'épaisseur du Matériau ( $e$ ) par la conductivité thermique de ce dernier ( $\lambda$ ) [25].

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Conduction dans un mur de conductivité  $\lambda$  et épaisseur  $L$  en régime permanent : [19]

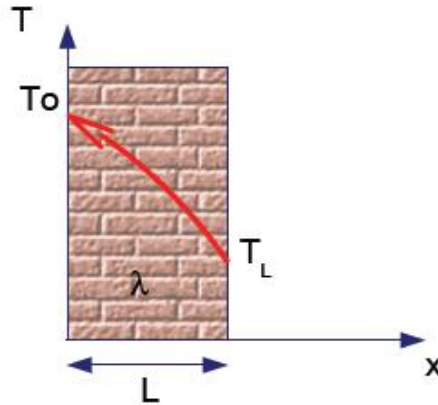


Figure II.8. conductivité  $\lambda$  et épaisseur  $L$  en régime permanent [19]

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \rightarrow \phi \partial x = -\lambda \partial T \quad (\text{II.18})$$

$$\frac{\phi}{S} \int_0^L \partial x = - \int_{T_0}^{T_L} \lambda \partial T \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Si } \lambda \neq f(T) \rightarrow \frac{\phi}{S} L = (T_0 - T_L) \lambda \quad (\text{II.20})$$

$$\phi = \frac{\Delta T}{\frac{L}{\lambda S}} = \frac{\Delta T}{R_\lambda} \quad \text{avec } R_\lambda \equiv \frac{L}{S\lambda} \quad (\text{II.21})$$

Résistance thermique:  $R_\lambda$

Conductance thermique:

$$K_i = \frac{1}{R_i}$$

Conductance thermique spécifique (ou par unité de surface) :

$$K_i = \frac{K_i}{S}$$

Résistance thermique spécifique (ou par unité de surface) :

$$(II.21) R_{\lambda} = \frac{1}{K_{\lambda}} = S R_{\lambda}$$

### II.5.1. Résistance thermique d'un mur composite association en série :

Soit un mur plan e dimensions pratiquement infinies, constitué de n couches de matériaux différents en série: [19]

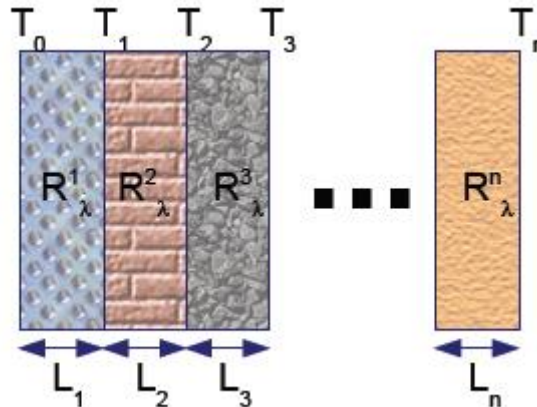


Figure II.9. mur plan [19]

Pas de perte ou production de chaleur :

$\Phi$  est identique dans tout le solide

$$\Phi = \frac{T_0 - T_1}{R_{\lambda}^1} \rightarrow T_0 - T_1 = \Phi R_{\lambda}^1$$

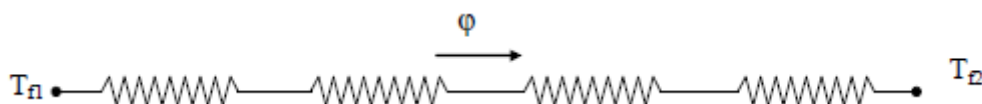
$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{\lambda}^2} \rightarrow T_1 - T_2 = \Phi R_{\lambda}^2$$

$$\Phi = \frac{T_2 - T_3}{R_{\lambda}^3} \rightarrow T_2 - T_3 = \Phi R_{\lambda}^3$$

$$\Phi = \frac{T_{n-1} - T_n}{R_{\lambda}^n} \rightarrow T_{n-1} - T_n = \Phi R_{\lambda}^n$$

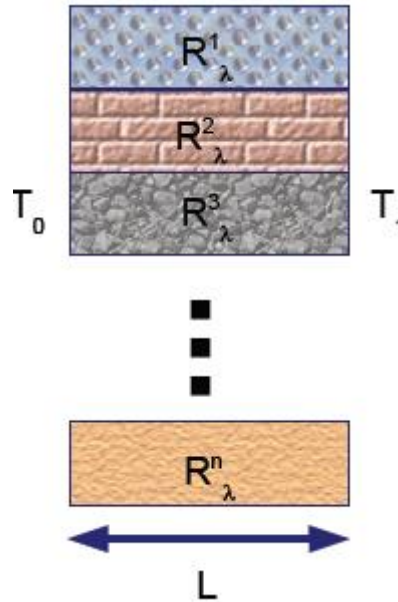
$$T_0 - T_n = \Phi (R_{\lambda}^1 + R_{\lambda}^2 + R_{\lambda}^3 + \dots + R_{\lambda}^n)$$

$$T_0 - T_n = \Phi (R_{\lambda}^{série}) \rightarrow \Phi = \frac{T_0 - T_n}{R_{\lambda}^{série}} \quad \text{avec} \quad R_{\lambda}^{série} = R_{\lambda}^1 + R_{\lambda}^2 + R_{\lambda}^3 + \dots + R_{\lambda}^n$$



### II.5.2. Résistance thermique d'un mur composite : association en parallèle :

Soit un mur plan e dimensions pratiquement infinies, constitué de n couches de matériaux différents en parallèle:



FigureII.10.Mur composite [19]

Pas de perte ou production de chaleur :

$$\phi_1 = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^1} \quad \phi_2 = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^2} \quad \phi_3 = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^3} \quad \dots \quad \phi_n = \frac{T_0 - T_1}{R_\lambda^n}$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \dots \phi_n = T_0 - T_1 \left( \frac{1}{R_\lambda^1} + \frac{1}{R_\lambda^2} + \frac{1}{R_\lambda^3} + \dots + \frac{1}{R_\lambda^n} \right)$$

$$\text{Donc } \phi = \frac{T_0 - T_1}{R_{\text{parallèle}}} \text{ avec } \frac{1}{R_{\text{parallèle}}} = \frac{1}{R_\lambda^1} + \frac{1}{R_\lambda^2} + \frac{1}{R_\lambda^3} + \dots + \frac{1}{R_\lambda^n}$$

#### Exemple d'application :

Mur composite (brique + plâtre) avec une porte simple et une fenêtre à double vitrage.

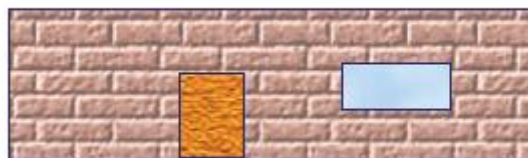
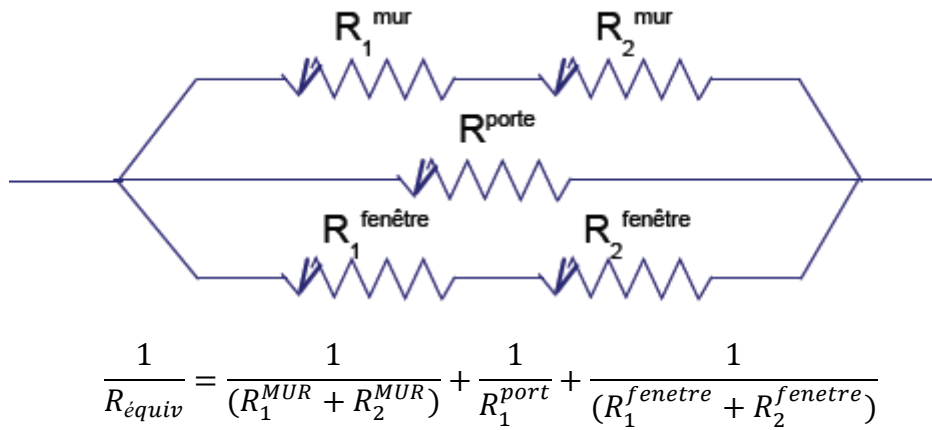


Figure II.11.Mur // porte // fenêtre[19]



### II.5.2.a. Coefficient de transfert thermique d'un corps

Le coefficient de transfert  $h$  de chaleur d'un corps de surface  $A$  et de température  $T_1$  à un corps de température  $T_2$  est défini par la relation: [19]

$$\Phi \equiv hS(T_1 - T_2) \quad \rightarrow \quad h = \frac{1}{SR_\lambda} \quad \rightarrow \quad h = \frac{\lambda}{L}$$

$$\Phi = \frac{(T_1 - T_2)}{R_\lambda} \quad R_\lambda = \frac{L}{S\lambda}$$

### II.5.2.b. Coefficient de transfert thermique d'un mur composite

$$R_\lambda^{\text{serie}} = R_\lambda^1 + R_\lambda^2 + R_\lambda^3 + \dots + R_\lambda^n \quad \frac{1}{h_{\text{serie}}} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \dots + \frac{1}{h_n}$$

$$\frac{1}{R_{\text{parallèle}}} = \frac{1}{R_\lambda^1} + \frac{1}{R_\lambda^2} + \frac{1}{R_\lambda^3} + \dots + \frac{1}{R_\lambda^n} \quad h_{\text{parallèle}} = h_1 + h_2 + \dots + h_n$$

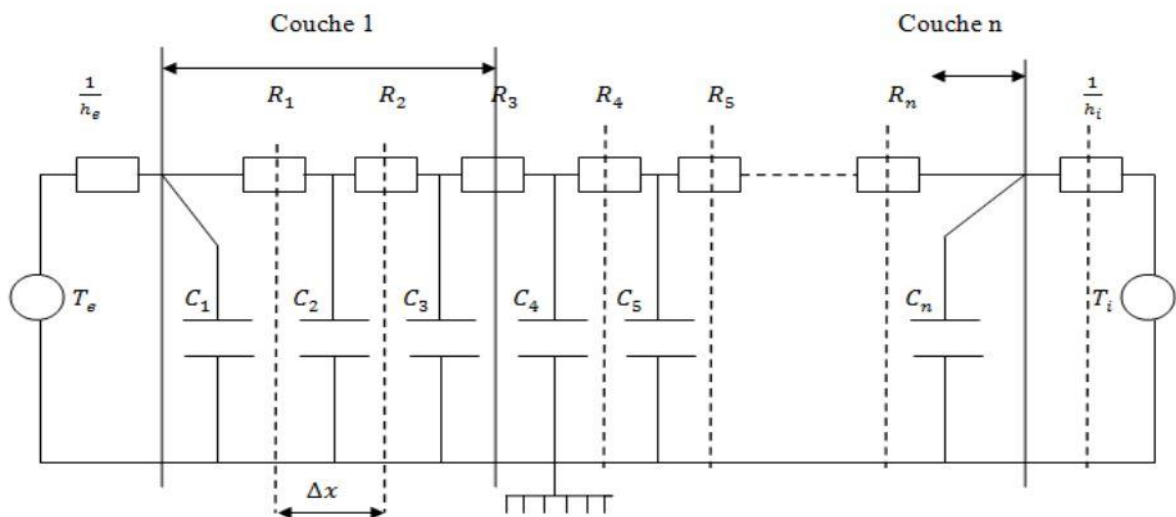


Figure II.12. Application de l'analogie électrothermique au système modélisé

Capacité thermique massique : On appelle capacité thermique massique ( $C_p$ ) la quantité de chaleur qu'il faut appliquer à 1kg de matière pour élever sa température de 1K.

Capacité thermique : La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température de un 1K. Elle s'exprime en (J/K). C'est une grandeur Extensive [21].

$$C = C_p \times m \quad (\text{II.22})$$

### II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques définitions sur le transfert de chaleur et leurs équations et aux quelques figures pour éclairiser les phénomènes thermiques

### III.1.Introduction

Les méthodes numériques convertissent les équations de dérive partielle (EDP) en un système d'équations algébriques dont les solutions fournissent des approximations pour les inconnues situées à différents points des nœuds du réseau. Parmi ces méthodes, nous citons la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis et la méthode du circuit de couple.

### III.2.Méthodes numériques de discrétisation

Les méthodes numériques de discrétisation précédemment citées consistent à ramener Résolution de systèmes d'équations différentielles dans le domaine d'étude, conditionnelle à la limite appropriée, limite du système d'équations algébriques dont la solution donne Énergie potentielle et densité électronique.

#### III.2.1.la méthode des différences finies

C'est une méthode basée sur le théorème de Taylor où l'on remplace l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences. Le domaine d'étude est découpé au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque point ou nœud de maillage, pour cela on aura un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds. [33]

La figure (III.1, III.2) représente un exemple de maillage pour le cas bidimensionnel.

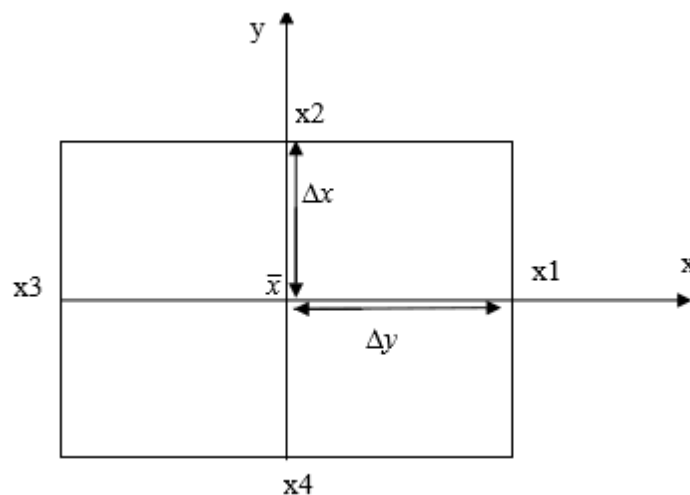


Figure.III.1.Configuration géométrique en 2D.

Où est le point d'évaluation et  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  et  $x_4$  étant les nœuds du maillage.

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage. D'après le développement de Taylor, on a: [36]

$$f(x) = \frac{\partial f}{\partial x} |_{x_0} (x - x_0) + f(x_0) + 0(x - x_0)^2 \quad (\text{III. 1})$$

On tire alors la dérivée :

$$\frac{\partial f}{\partial x} |_{x_0} = \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \quad (\text{III. 2})$$

Ainsi, on a remplacé la dérivée qui est une différence infinitésimale par une différence finie pour des petites intervalles  $[x,0]$  On peut faire la même chose pour les dérivées d'ordre 2. [36]

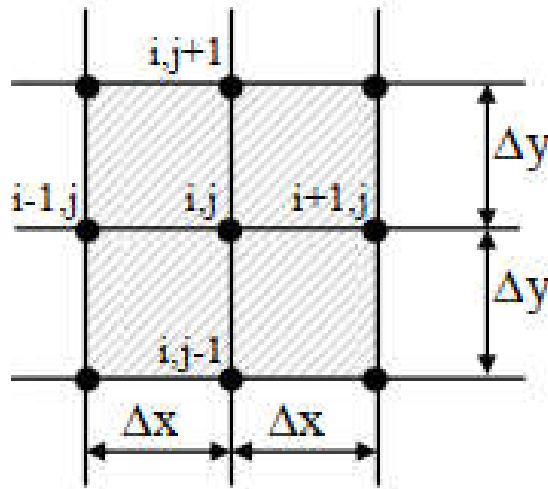


Figure III.2. : Représentation du maillage de la surface [23].



### III.2.2. la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode d'approximation des solutions d'équations aux dérivées partielles qui est construite à partir d'une formulation équivalente du problème à résoudre, cette dernière est appelée formulation vibrationnelle du problème et nécessite le minimum de régularité de la solution. [37]

cette méthode consiste à transformer l'équation différentielle sous la forme Intégral est basé sur le concept de minimisation des quantités (comme l'énergie...), conduisant à la solution exacte. En d'autres termes, trouver une fonction globale Modèle mathématique représentant le domaine d'études.

**Remarque** (avantages et inconvénient de MEF)

**Avantages :** traitement possible de géométries complexes, nombreux résultats théoriques sur la convergence.

**Inconvénient :** complexité de mise en œuvre et grand coût en temps de calcul et mémoire

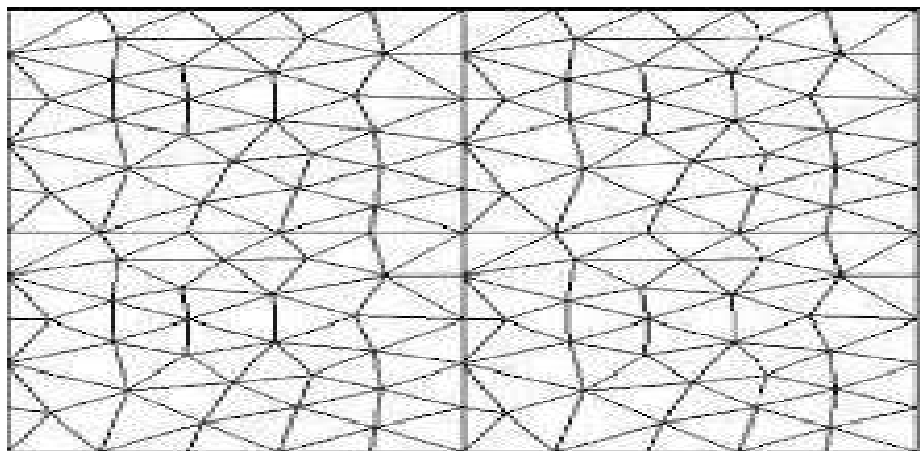


Figure. III.3. Maillage triangulaire de MEF [38].

### III.2.3.Méthode de circuits couplés (MCC)

MCC permet de fournir des solutions aux EDP par des expressions intégrales du type Méthodes BIOT et SAVARD. Dans ce cas, associé à la forme intégrale de la solution, un Subdiviser l'inducteur en tours de base. En appliquant les lois de KIRCHOFF à ces circuits élémentaires, on aboutit à un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des densités du courant. La

MCC peut être couplée à une méthode numérique de discrétisation type MEF ou MDF de la charge. [32]

Le transfert de chaleur entre deux points dans un solide homogène est analogue au courant électrique dans un conducteur. Dans les deux cas, la quantité délivrée par unité de temps est proportionnelle à :

- Conductivité du solide (conductivité thermique et électrique respectivement) - Section du conducteur perpendiculaire aux lignes de flux magnétique.
- Gradients et potentiels de température.

Le tableau ci- dessous représente l'analogie thermoélectrique

| Grandeurs thermiques  | Grandeurs électriques                     |
|---|---|
| Différence de température $\Delta T$ (K ou $^{\circ}C$ )          | Différence de potentiel $\Delta U$ (V)    |
| Flux $\Phi = \frac{\Delta T}{R}$                                  | Courant I (A) $I = \frac{\Delta U}{R_i}$  |
| Densité de flux $\vec{\varphi} W . m^{-2}$                        | Densité de courant $\vec{j}(A . m^{-2})$  |
| Chaleur Q (joule)   | Charge $Qe$ (coulomb)                     |
| Résistance R, $R = \frac{L}{s\lambda}$ OU $\frac{1}{sh}$ en (K/W) | Résistance (ohm)                          |
| Conductivité $\lambda$ ( $W / ^{\circ}Km$ )                       | Conductivité $\sigma(S.m^{-2})$           |
| $\Delta T = R \Phi$ (K)   | Loi d'Ohm $\Delta U = R_e i$ (V)          |
| Loi du Fourier $\vec{\varphi} = \lambda \overrightarrow{grad} T$  | Loi $j = -\sigma \overrightarrow{grad} V$ |

Tableau.III.1. de grandeurs thermiques, électriques

### III.2.4.la méthode des Volumes Finis(MVF)

La méthode des Volumes Finis, comme la méthode des différences Finies et la méthode des éléments finis, est une méthode numérique. Elle transforme un problème continu en un problème discret dont la solution est approximativement la même que celle du problème continu aux points de discrétisation.

Cette méthode a connu un progrès important non seulement pour la modélisation en mécanique des fluides, mais aussi pour la modélisation d'autres branches de l'ingénierie

Scientifique : électromagnétisme, transfert thermique...etc. [34], en plus La méthode des Volumes Finis est utilisée, en particulier en mécanique des fluides (l'équation d'écoulement), où elle est apparue depuis une vingtaine d'années, sa procédure donne une solution plus précise que celle fournie par la MDF. [35]

### III.2.4.1. Le Principe de méthode des Volumes Finis(MVF)

Dans la simulation par la méthode des volumes finis, le domaine de calcul est divisé en un nombre  $n$  de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle (figure III.5). La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles, décrites au chapitre précédent, sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers (volumes de contrôle) contenant un nœud dit: "nœud principal". Un exemple de volume de contrôle est montré dans la figure ci-dessous. Pour un nœud principal (P), les points E et W (E: Est, W: West) sont des voisins dans la direction, tandis que N et S (N: Nord, S: Sud) sont ceux dans la direction. Le volume de contrôle entourant (P) est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points (e) et (w) dans la direction, (n) et (s) dans la direction. [31]

L'idée principale de cette méthode est d'intégrer les équations différentielles dans le volume de contrôle, afin d'aboutir à une équation algébrique. L'assemblage de toutes les équations, relatives aux différents volumes du domaine, se traduit par un système d'équations algébriques que l'il faudra ensuite résoudre par des méthodes adéquates. [39]

Elle consiste à :

- Discrétiser le domaine de calcul : diviser le domaine en plusieurs sous-domaines appelés volumes de contrôle non superposés et entourer chacun d'eux d'un nœud. Pour ce faire, placez  $N$  points appelés nœuds sur les segments de droite AB qui composent le domaine de calcul. Les surfaces de contrôle (limites) sont placées entre les nœuds adjacents. Donc chaque nœud est entouré d'un volume contrôlé. En effet, les volumes de contrôle proches de la frontière du domaine sont placés de telle sorte que leurs faces coïncident avec la frontière du domaine. Il est approprié (recommandé), dans la méthode des volumes fins, d'utiliser un système de notation qu'on utilisera ultérieurement :
  - a) Un nœud quelconque est identifié par la lettre alphabétique  $P$ .

b) Ces voisins, dans le cas unidimensionnel sont les nœuds West et Est, sont respectivement identifiés par  $W$  et  $E$ .

c) La face West du volume de contrôle est désigné par  $w$ .

d) La face Est du volume de contrôle est désigné par  $e$ .

e) La distance entre les nœuds  $W$  et  $P$  est désignée par  $\delta x_w$ .

f) La distance entre les nœuds  $P$  et  $E$  est désignée par  $\delta x_e$ .

g) La distance entre la face  $w$  et  $e$  est désignée par  $\Delta x$

Cette étape est appelée discrétisation du domaine de calcul, figure (III.4, III.5).

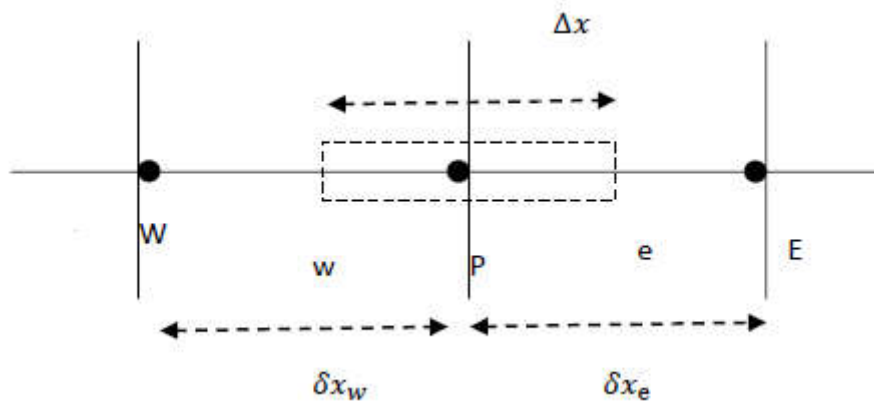


Figure III.4. la discrétisation domaine de calcul

- Résoudre un système algébrique qui donne des approximations de  $T$  aux nœuds. Le système d'équations obtenu précédemment constitue un système algébrique linéaire à trois matrices diagonales. Sa résolution peut être réalisée par la méthode de Gauss appliquée à un système tri diagonal, appelé algorithme de Thomas dans la méthode des volumes finis.

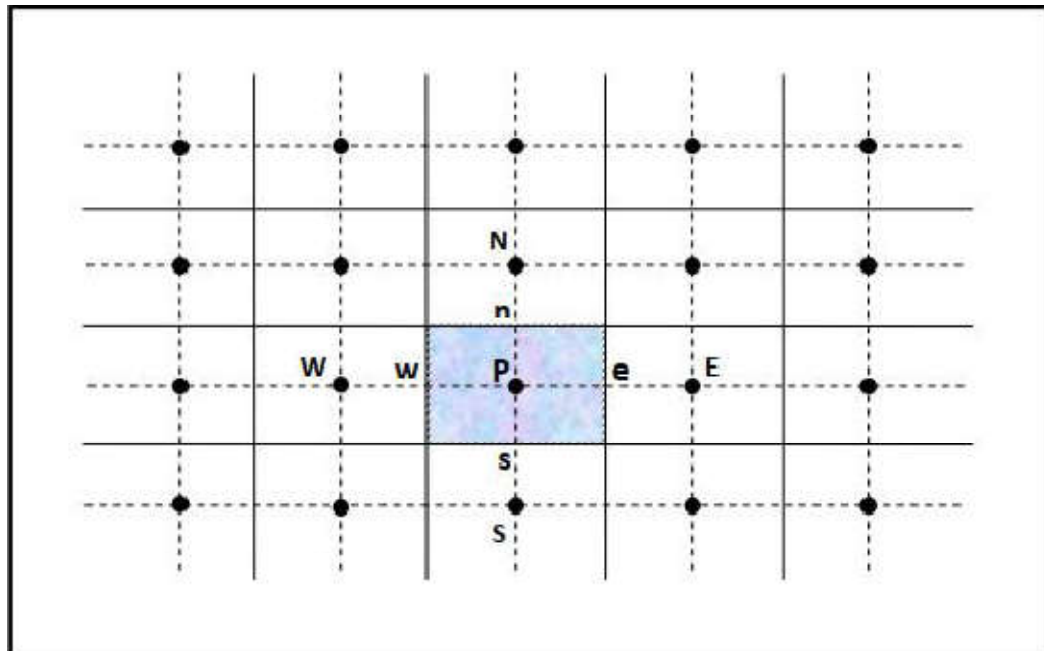


Figure III.5. volume de contrôle bidimensionnel [40]

### III.2.4.2. Propagation de la chaleur dans un milieu multicouche

Considérant un milieu isotrope d'épaisseur infinie, la propagation de la chaleur dans le milieu se fait uniquement selon l'axe des abscisses  $x$ , c'est-à-dire que la propagation de la chaleur est latérale. La température  $T$  en tout point d'abscisse  $x$  dépend spatialement de cette variable et elle dépend aussi du temps (figure III.6).

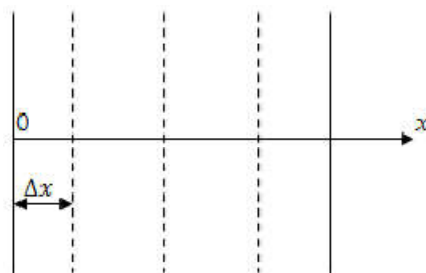


Figure III.6. la propagation de la chaleur dans un milieu multicouche

### III.2.4.3. Méthode des Volumes Finis dans le cas monodimensionnel

Formulation monodimensionnelle de l'Equation de Poisson par la MVF

L'équation de Poisson dans le cas monodimensionnel s'écrit (la source de la température  $c$  est la température extérieure).

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \operatorname{div} \overrightarrow{\operatorname{grad}} T = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$\vec{D} = D_1 \vec{i} + D_2 \vec{j} + D_3 \vec{k} \quad (\text{III.4})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{grad}} f = \frac{\partial f}{\partial q_1} \frac{\vec{u}_1}{h_1} \quad (\text{III.5})$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left( \frac{dh_2 h_3 h_1}{dq_1} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$\overrightarrow{\operatorname{grad}} T = \frac{dT}{dx} \vec{u}_1 \quad (\text{III.7})$$

$$\operatorname{div} (\overrightarrow{\operatorname{grad}} T) = \frac{1}{1 \times 1 \times 1} \left( \frac{d(1 \times 1) (\overrightarrow{\operatorname{grad}} T)}{\partial x} \right) \quad (\text{III.8})$$

$$\operatorname{div} (\overrightarrow{\operatorname{grad}} T) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) \right] = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{III.9})$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{III.10})$$

(Équation de chaleur)

La solution de l'équation de chaleur :

$$\Delta x = \delta x_e + \delta x_w \quad (\text{III.11})$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{III.12})$$

$$\int_w^e \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt \quad (\text{III.13})$$

$$- \int_w^e \int_t^{T+Dt} \frac{\lambda \partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt + \int_w^e \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} dx dt \quad (\text{III.14})$$

$$I = \int_w^e \int_t^{T+Dt} \frac{\lambda \partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt = \left( \lambda \frac{dT}{dx} \Big|_w^e \right) \Delta t \quad (\text{III.15})$$

$$I = \left( \lambda \frac{dT}{dx} \Big|_e^e - \frac{dT}{dx} \Big|_w \right) \Delta t \quad (\text{III.16})$$

$$= \left[ \lambda_e \left( \frac{T^e - T^p}{\delta x_e} \right) - \lambda_w \left( \frac{T^p - T^w}{\delta x_w} \right) \right] \Delta t \quad (\text{III.17})$$

$$I = \frac{\lambda_e T^e}{\delta x_e} \Delta t - \frac{\lambda_e T^p}{\delta x_e} \Delta t - \frac{\lambda_w T^p}{\delta x_w} \Delta t + \frac{\lambda_w T^w}{\delta x_w} \Delta t \quad (\text{III.18})$$

$$II = \int_w^e \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} dx dt = \rho C_p \Delta x (T_T^p - T_{t_0}^p) \quad (\text{III.19})$$

$$= \frac{\frac{\lambda_e T^e}{\delta x_e} \Delta t + \frac{\lambda_e \Delta t T^p}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w \Delta t T^p}{\delta x_w} - \frac{\lambda_w \Delta t T^w}{\delta x_w} + \rho C_p \Delta x (T_1^p + T_{t_0}^p)}{\Delta t} \quad (\text{III.20})$$

$$= -\frac{\lambda_e T^e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_e T^p}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w T^p}{\delta x_w} - \frac{\lambda_w T^w}{\delta x_w} = -\frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} (T_t^p + T_{t_0}^p) \quad (\text{III.21})$$

$$= T^p \left( \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} \right) = \frac{\lambda_e T^e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w T^w}{\delta x_w} - \rho C_p \frac{\Delta x}{\Delta t} \left( T_{t_0}^p + \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} T^p \right) \quad (\text{III.22})$$

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{III.23})$$

$$- \int_w^e \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt = 0 \quad (\text{III.24})$$

$$\int_w^e \int_t^{T+Dt} \frac{\lambda \partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt + \int_w^e \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} dx dt \quad (\text{III.25})$$

I II

$$I = \int_w^e \int_t^{T+Dt} \frac{\lambda \partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt = \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right) \Big|_w^e \Delta t \quad (\text{III.26})$$

$$= \left( \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right) \Big|_e - \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right) \Big|_w \right) \Delta t \quad (\text{III.27})$$

$$= \left[ \lambda_e \left( \frac{T^e - T^p}{\delta x_e} \right) - \lambda_w \left( \frac{T^p - T^w}{\delta x_w} \right) \right] \Delta t \quad (\text{III.28})$$

$$I = \frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^p - \frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^p - \frac{\lambda_w \Delta t}{\delta x_w} T^p + \frac{\lambda_w \Delta t}{\delta x_w} T^w \quad (\text{III.29})$$

$$II = \int_w^e \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} dx dt = \rho C_p D x (T_1^p + T_{t_0}^p) \quad (\text{III.30})$$

$$= \frac{\frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^e + \frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^p + \frac{\lambda_w \Delta t}{\delta x_w} T^p - \frac{\lambda_w \Delta t}{\delta x_w} T^w + \rho C_p \Delta x (T_1^p + T_{t_0}^p)}{\Delta t} = 0 \quad (\text{III.31})$$

$$\left( \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{\rho C_p \Delta x}{\delta t} \right) T_{t0}^p = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} T^e + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} T^w - \frac{\rho C_p \Delta x}{\delta t} T_{t0}^p \quad (\text{III.32})$$

équation algébrique

L'équation à résoudre :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{III.33})$$

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = h_e (T_e - T_1) \quad (\text{III.34})$$

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = h_i (T_n - T_i) \quad (\text{III.35})$$

$$T_i = 29 \text{ °C}$$

$$T_e(t) = \left( \frac{T_{e \max} + T_{e \min}}{2} \right) + \left( \frac{T_{e \max} - T_{e \min}}{2} \right) \times \sin \left( \frac{\pi}{12} t - \frac{3\pi}{4} \right) \quad (\text{III.36})$$

$$T_{e \max} = 40.5 \text{ °C}$$

$$T_{e \min} = 24.5 \text{ °C}$$

Le domaine de recherche est subdivisé en un nombre limité de nœuds. Chaque volume fini entoure un nœud "P" principal. Les nœuds adjacents sont "E" du côté est et "W" du côté ouest. Les lignes en tirés représentent les faces du volume fini sur les côtés est (e) et ouest (w) (Figure III.7). Pour un problème unidimensionnel, le volume d'un volume fini est  $\Delta x \times 1 \times 1$ .

nœud 01: ( transfert par convection)

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = h_e (T_e - T_1) \quad (\text{III.37})$$

nœud 02: ( transfert par conduction)

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=\text{epaisseur}} = \rho C_p \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{III.38})$$

$p=n-1$

nœud n: ( transfert par convection)

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=e} = h_i (T_n - T_i) \quad (\text{III.39})$$

$p=n$



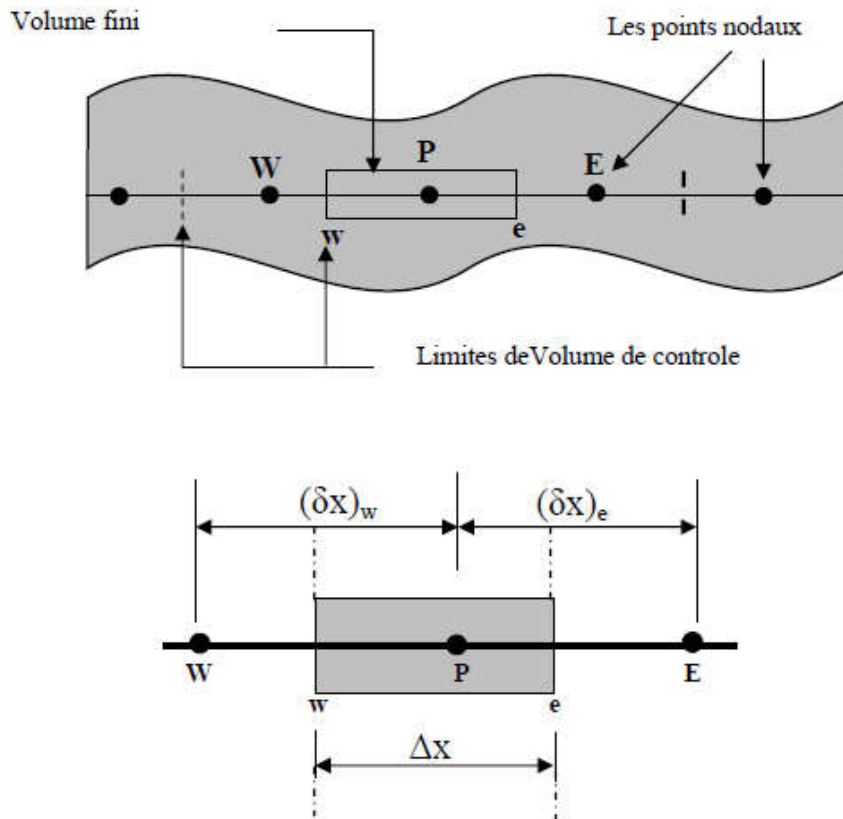


Figure III.7. Discretisation en volumes finis dans le cas monodimensionnel.

nœud 01: Figure. III.8

$$-\int_p^e \int_t^{T+Dt} -\rho C_p \frac{dT}{dt} + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt = 0 \quad (\text{III.40})$$

$$I = \int_w^e \int_t^{T+Dt} \frac{\lambda \partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt \quad (\text{III.41})$$

$$= \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_p^e \Delta t \quad (\text{III.42})$$

$$= \left( \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_e - \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right)_p \right) \Delta t \quad (\text{III.43})$$

$$= \left( \lambda_e \left( \frac{T^e - T^p}{\delta x_e} \right) - \lambda_p \left( \frac{dT}{dx} \right)_p \right) \Delta t \quad (\text{III.44})$$

$$= \left( \lambda_e \left( \frac{T^e - T^p}{\delta x_e} \right) + h_e (T_e - T_1) \right) \Delta t \quad (\text{III.45})$$

Avec:

$$- \lambda \left( \frac{dT}{dx} \right) \Big|^{p=1} = h_e (T_e - T_1) \quad (\text{III.46})$$

$$I = \frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^e - \frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^p + h_e \Delta t (T_e - T_1) \quad (\text{III.47})$$

$$II = - \int_w^e \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} dx dt = -\rho C_p \delta x_e (T_t^p - T_{t1}^p) \quad (\text{III.48})$$

Donc:

$$= \frac{\frac{\lambda_e}{\delta x_e} \Delta t + T^e + \frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^p + h_e \Delta t (T_e - T_1) - \rho C_p \delta x_e (T_t^p - T_{t0}^p)}{Dt} = 0 \quad (\text{III.49})$$

$$\left( \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t} \right) T_t^p = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} T^e + \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t} T_{t0}^p + h_e (T_e - T_1) \quad (\text{III.50})$$

ept(1)

Avec:

$$T_e = T_{my} + T_{my} \times \sin \left( \frac{\pi}{12} t - \frac{3\pi}{4} \right) \quad (\text{III.51})$$

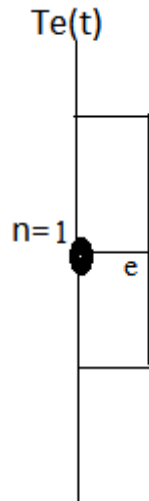


Figure. III.8. volume fini au première nœud ( $T_{exterieur}$ )

Nœud (2 → n-1) (Figure. III.9)

$$\int_w^p \int_t^{T+Dt} -\rho C_p \frac{dT}{dt} + \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt \quad (III.52)$$

II I

$$I = \lambda \int_w^p \int_t^{T+Dt} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{dT}{dx} \right) dx dt = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w^p \Delta t \quad (III.53)$$

$$= \left( \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_p - \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_w \right) \Delta t \quad (III.54)$$

$$= \left( -h_i (T_n - T_i) - \lambda_w \left( \frac{T^p - T^w}{\delta x_w} \right) \right) \Delta t \quad (III.55)$$

$$I = -h_i \Delta t (T_n - T_i) - \lambda_w \frac{\Delta t}{\delta x_w} T^p + \lambda_w \frac{\Delta t}{\delta x_w} T^w \quad (III.56)$$

$$II = - \int_w^p \int_t^{T+Dt} \rho C_p \frac{dT}{dt} dx dt = -\rho C_p \delta x_w (T_t^p - T_{t0}^p) \quad (III.57)$$

Donc:

$$= \frac{-h_i \Delta t (T_n - T_i) - \lambda_w \frac{\Delta t}{\delta x_w} T^p + \lambda_w \frac{\Delta t}{\delta x_w} T^w - \rho C_p \delta x_w (T_t^p - T_{t0}^p)}{\Delta t} = 0 \quad (III.58)$$

$$\left( \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \rho C_p \frac{\delta x_w}{\Delta t} \right) T_t^p = \rho C_p \frac{\delta x_w}{\Delta t} T_{t0}^p - h_i (T_n - T_i) + \frac{\lambda_w T^w}{\delta x_w} \quad (III.59)$$

ept(2)

L'ept(1) → n = 1

$$\left( \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t} \right) T_t^p = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} T^e + \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t} T_{t0}^p + h_e (T_e - T_p) \quad (III.60)$$

$$\left( \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + h_e + \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t} \right) T_t^p = \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t} T_{t0}^p + \frac{\lambda_e}{\delta x_e} T^e + h_e T_e \dots (*) \quad (III.61)$$

l'exterieur

Avec :

$$\alpha_e = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} \quad \alpha_{t_e} = \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t}$$

l'eqt (3)  $\rightarrow n = n$

$$\left( \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \rho C_p \frac{\delta x_w}{\Delta t} \right) T_t^p = \rho C_p \frac{\delta x_e}{\Delta t} T_{t0}^p - h_i T^p + h_i T_i + \frac{\lambda_w T^w}{\delta x_w} \quad (\text{III.62})$$

$$\left( \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + h_i + \rho C_p \frac{\delta x_w}{\Delta t} \right) T_t^p = \rho C_p \frac{\delta x_w}{\Delta t} T_{t0}^p + \frac{\lambda_w T^w}{\delta x_w} + h_i T_i \dots \dots (***) \quad (\text{III.63})$$

Avec :

$$\alpha_w = \frac{\lambda_w}{\delta x_w} \quad \alpha_{t_w} = \rho C_p \frac{\delta x_w}{\Delta t}$$

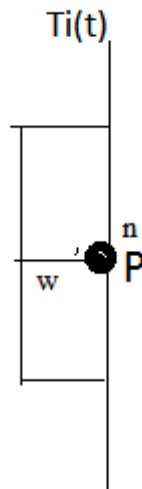


Figure. III.9.derniers nœud ( $T_{interieur}$ )

Nœud 2: Figure. III.10

L'eqt (2)  $\rightarrow n = n - 1$

$$\frac{-\frac{\lambda_e}{\delta x_e} \Delta t T^E + \frac{\lambda_e \Delta t}{\delta x_e} T^p + \frac{\lambda_w \Delta t}{\delta x_w} T^p - \frac{\lambda_w \Delta t}{\delta x_w} T^w + \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} (T_t^p - T_{t0}^p)}{Dt} = 0 \quad (\text{III.64})$$

$$\left( \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{\rho C_p D x}{\Delta t} \right) T_{t0}^p = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} T^e + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} T^w + \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t} T_{t0}^p \quad (**)$$
(III.65)

Avec:

$$\alpha_e = \frac{\lambda_e}{\delta x_e} \quad \alpha_w = \frac{\lambda_w}{\delta x_w} \quad \alpha_{tp} = \frac{\rho C_p \Delta x}{\Delta t}$$

Équation algébrique

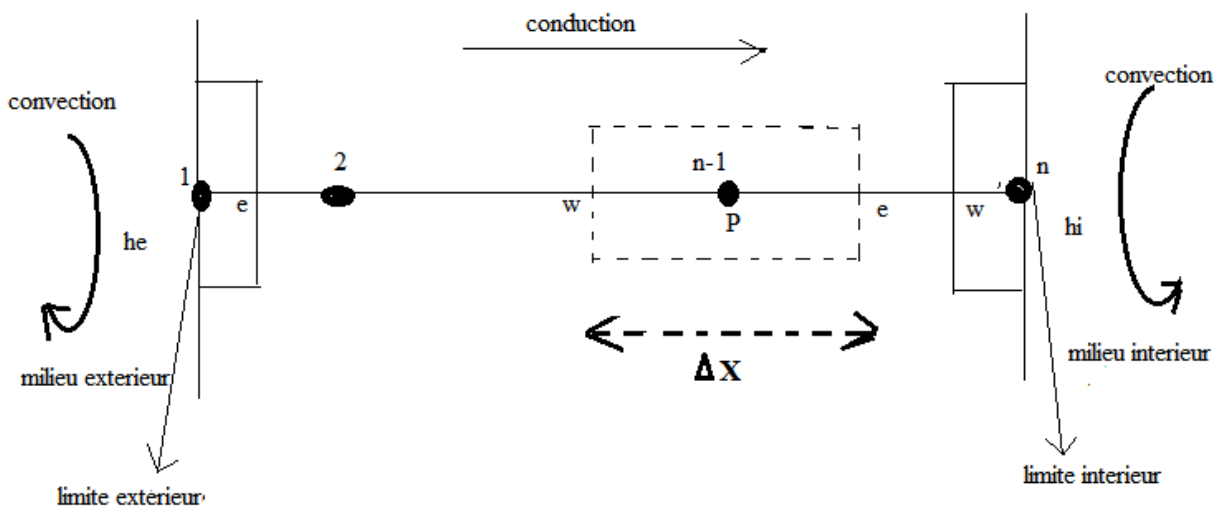


Figure. III.10. Discrétisation en volumes finis à la surface

nœud1 → (\*)

nœud2 → n - 1 (\*\*)

nœud3 → n (\*\*\*)

Tels que :

$\delta x_e$  : Distance entre les noeuds P et E

$\delta x_w$  : Distance entre les noeuds W et P

$\delta x$  : Longueur de volume fini

$$\Delta x = \delta x_e + \delta x_w$$

Ainsi, nous obtenons une équation algébrique qui relie chaque nœud principal "P" aux nœuds adjacents "E" et "W". Si la discrétisation du domaine comporte N nœuds, on obtient Résoudre un système de N équations à N inconnues. Le système résultant sera Méthodes numériques de résolution.  $a_P = a_E + a_W$

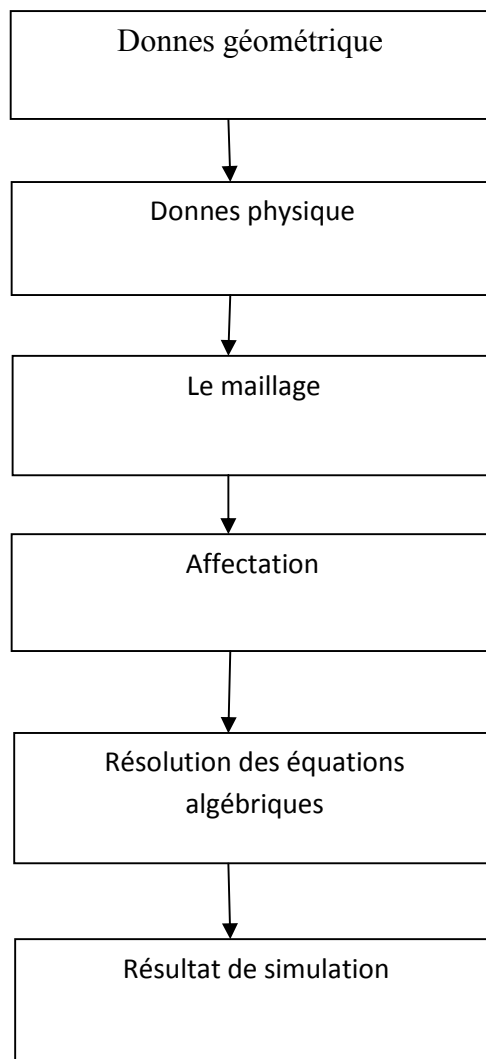


Figure III.11. Organigramme du code de calcul

### III.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les différentes méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations aux dérivées partielles caractéristique au problème étudié. Dans notre nous avons opté la méthode des volumes finis comme une méthode de résolution des équations aux dérivée partielles caractéristique au problème de transfert de chaleur dans une paroi multicouche en monodimensionnel. Les résultats obtenu par notre code de calcul développée son l'environnement MATLAB seront présentées dans le chapitre suivant.

## IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et étudier l'effet de différentes propriétés thermiques des matériaux utilisés pour construire des parois, telles que la conductivité thermique, la capacité thermique et la masse volumique des matériaux, sur l'évolution de la température à l'intérieur du paroi étudié. Les résultats des simulations thermiques seront présentés en détail. Ces résultats ont été obtenus à partir d'un code de calcul développé sous l'environnement MATLAB basé sur la méthode des volumes finis comme une méthode des équations aux dérivées partielles caractéristique au problème de transfert de chaleur dans une paroi multicouche.

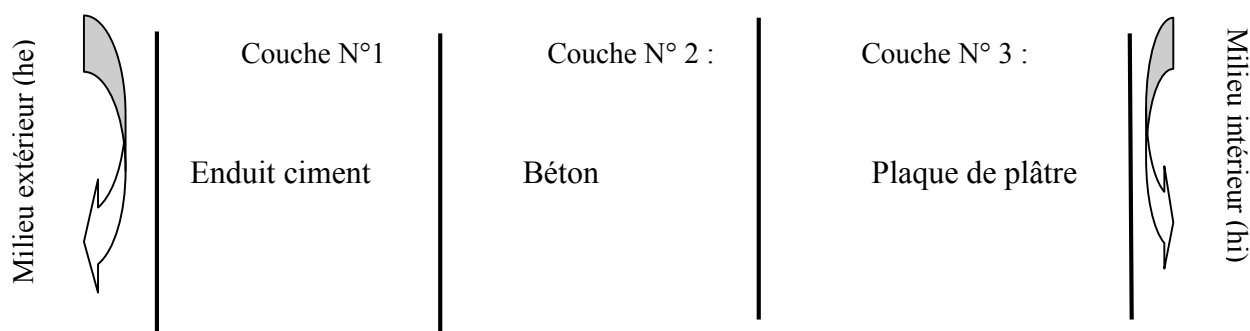
## IV.2.Description du système

Le problème que nous allons étudier consiste à la résolution de l'équation de la chaleur en monodimensionnelle dans des parois multicouches avec différents matériaux utilisées dans la construction de ces parois. Dans notre étude, nous avons modélisé huit parois multicouches, le premier et le deuxième à trois couches ; le troisième à quatre couches ; et le quatrième et le cinquième et le sixième à cinq couches.

## IV.3.Application N°:1

Paroi à trois couches : enduit ciment, béton et plaque de plâtre

Considérez le Paroi à trois couches illustré dans figure ci-dessous, ses propriétés thermiques sont présenté dans le tableau **IV.1**.



**Figure IV.1.:** Paroi à trois couches



| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 2300 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 1.75 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 600 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015 m                | 0.20 m                 | 0.015m                |

**Tableau IV. 1.** Les propriétés thermiques des matériaux.[13][4][42]

De notre code calcul le post-processeur permettant la visualisation en 1D et 2D de l'évolution de la température. Les figures IV.2., IV.3., et IV.4. représentent respectivement évolution temporelle de la température au dernier nœud et premier nœuds du paroi modélisée dans le temps et évolution spatio-temporelle de la température de paroi modélisée .

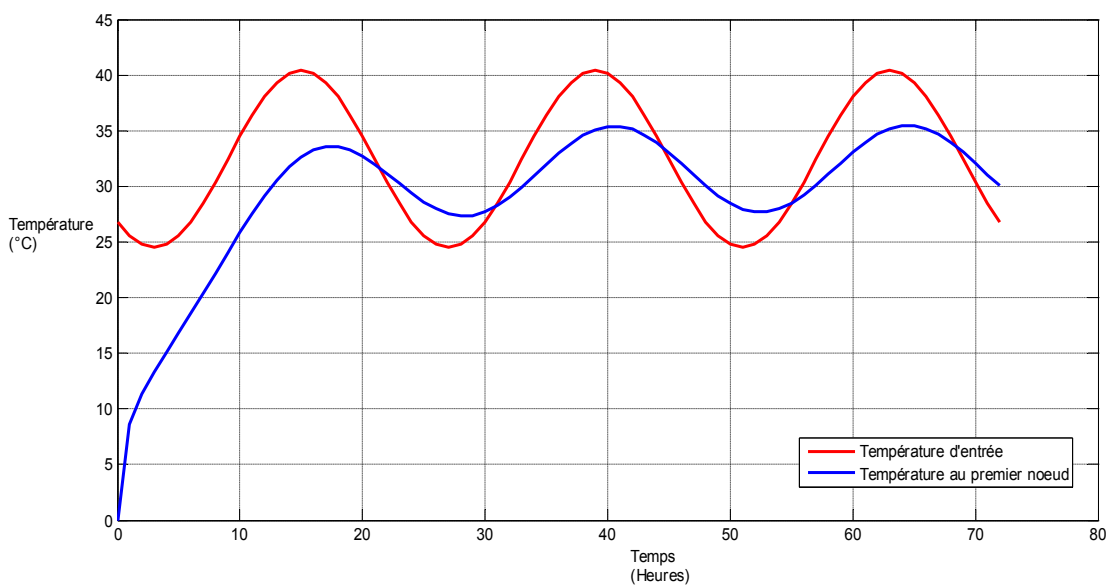
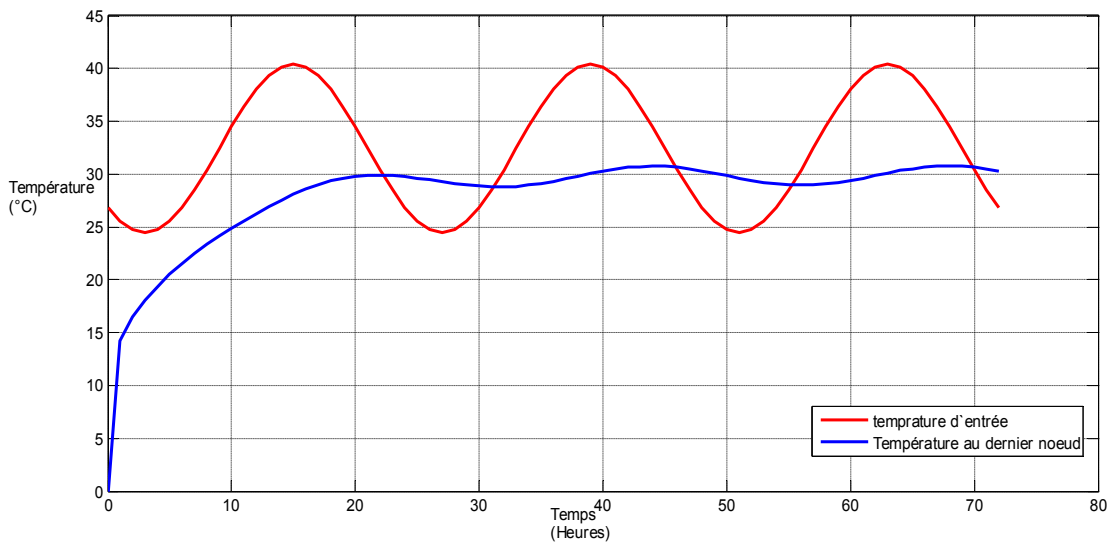


Figure: IV.2. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.



FigureIV.3.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

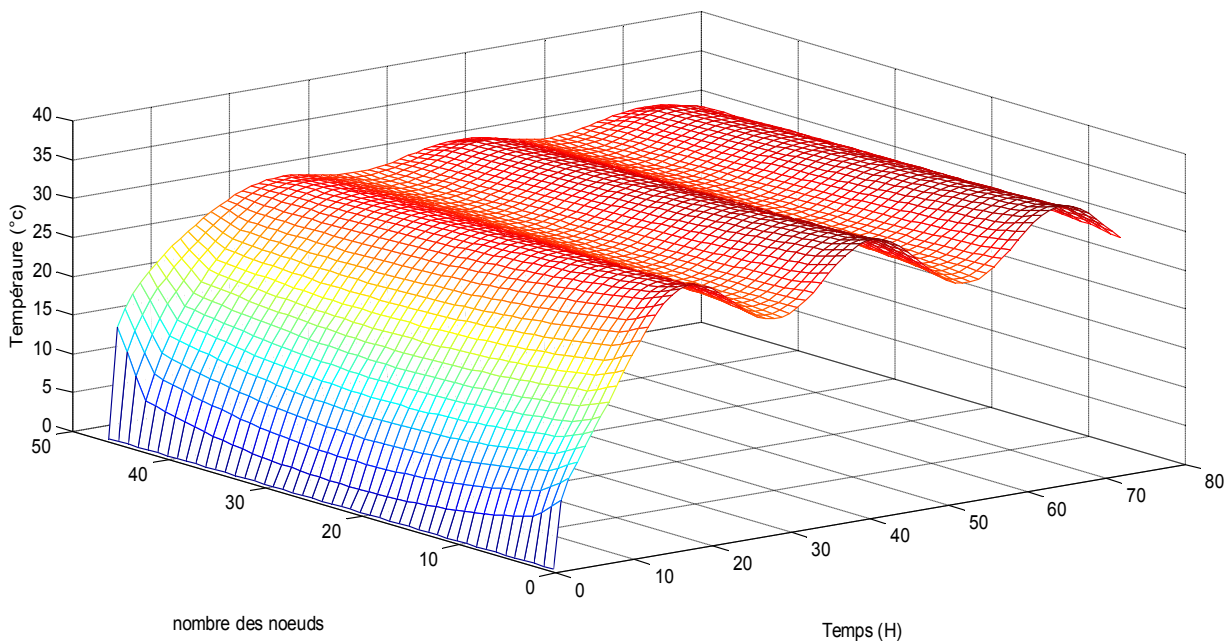


Figure: IV.4.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.

### -Interpretations

Au début, nous avons remarqué que plus le nombre de nœuds dans tous les figures était élevé, plus l'allure de température était précise.

À partir de ces figures, nous remarquons que la forme de température du dernier nœud est une forme exponentielle lors des régime transitoires, il atteint sa valeur maximale  $30.1^{\circ}\text{C}$  à  $t = 43$  heures. Après cette valeur, la tendance de la température se stabilise pendant un certain temps sous forme sinusoïdale, similaire à l'allure de température d'entrée. On calcul l'amortissement entre les deux allures, la température du dernier nœud et température d'entrée. sachant que,

l'amortissement exprime que l'amplitude de la température de sortie est inférieure à elle d'entrée .

- l'amortissement A :

$$A = \frac{T_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{30.1}{40.4} = 0.74$$

#### IV.4. Application N° 2 :

Paroi à trois couches : enduit ciment , brique et plaque de plâtre .

Soit une paroi à trois couches représenté dans la figure ci-dessous, les propriétés thermiques de chaque sont présentées dans le tableau IV. 2.

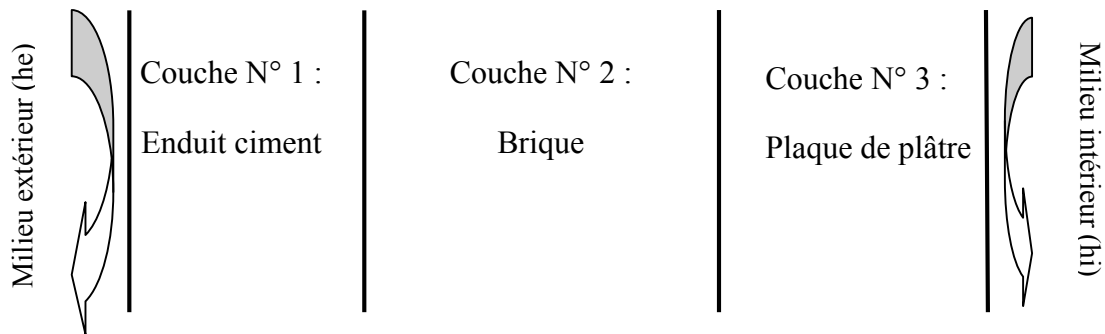


Figure. IV.5.: Paroi à trois couches

| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 1000 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 0.35 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 250 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015 m                | 0.20 m                 | 0.015m                |

**Tableau.IV.2.** Les propriétés thermiques des matériaux.[4][11][42]

Les figures IV.6., IV.7. et IV.8. représentent l'évolution temporelle de la température au premiers nœud et dernier nœuds de la paroi modélisée et l'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée .

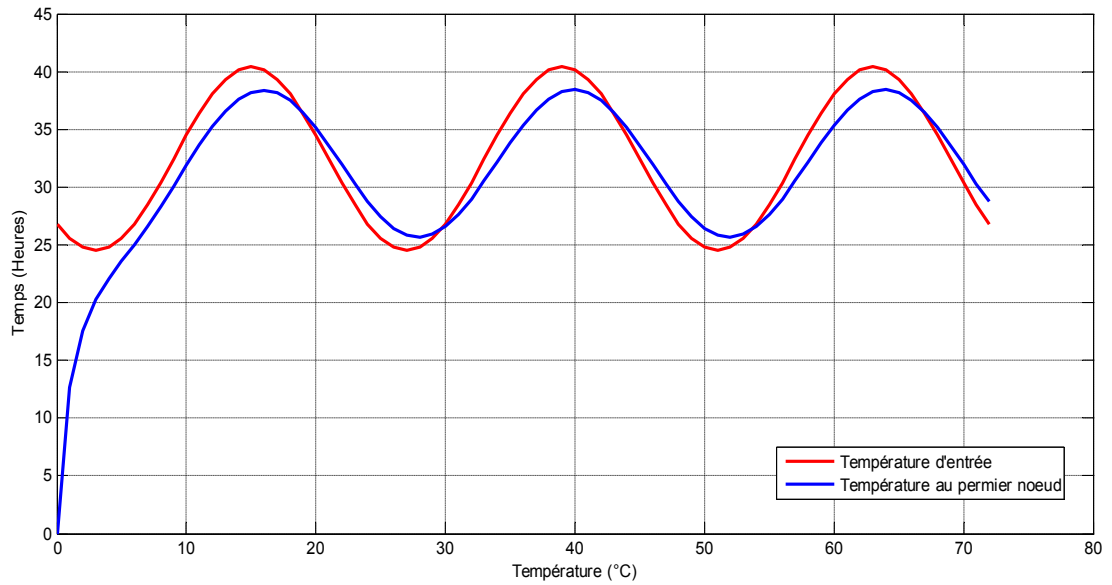


Figure: IV.6. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée

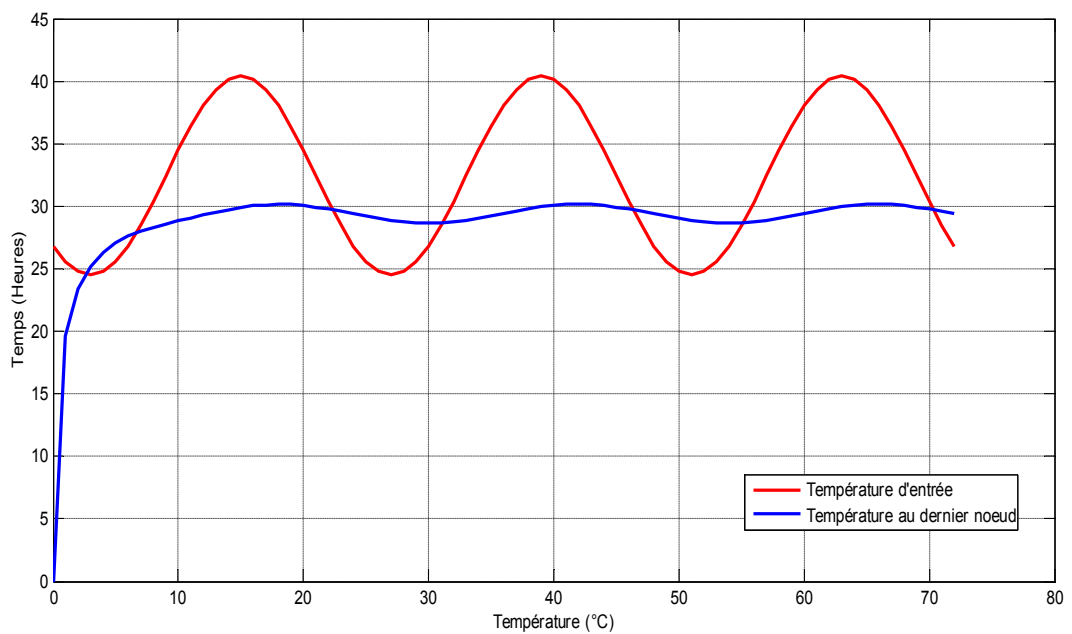


Figure: IV.7.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

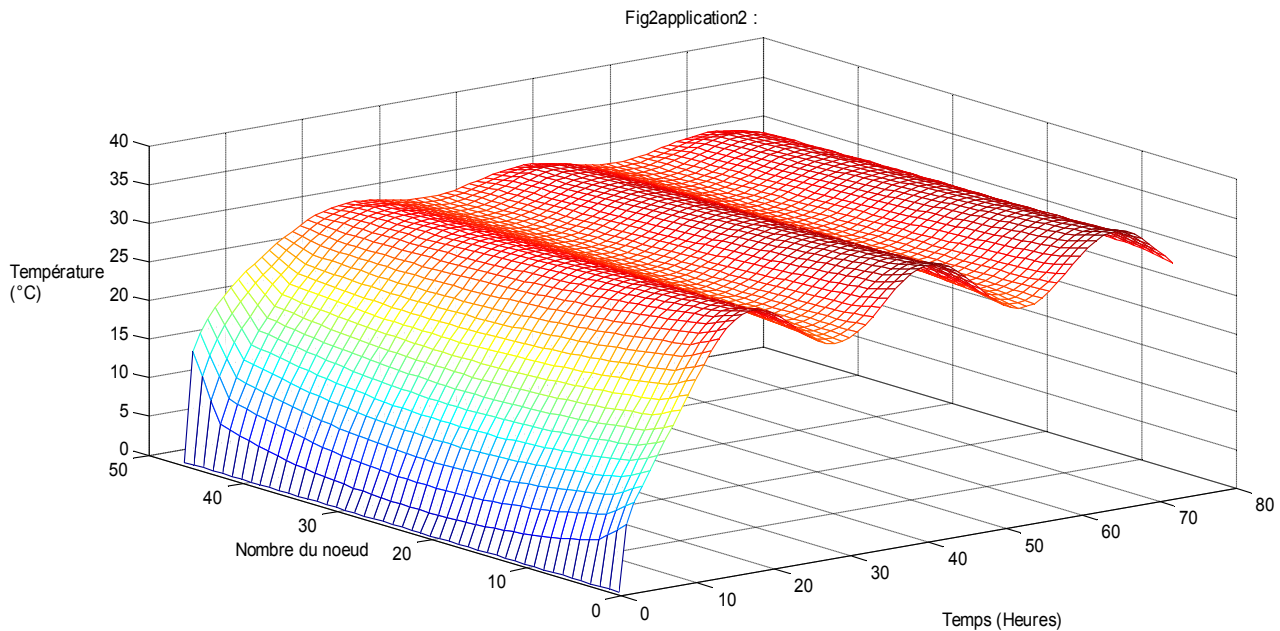


Figure: IV.8.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.

D'après ces figures, nous constatons les mêmes remarques que le cas précédents mais dans ce cas la température au dernier nœud atteint une valeur maximale de 29.5 °C à t = 43 H.

Nous calculons l'amortissement entre les deux allures, la température au dernier nœud et la température d'entrée .

- l'amortissement A :

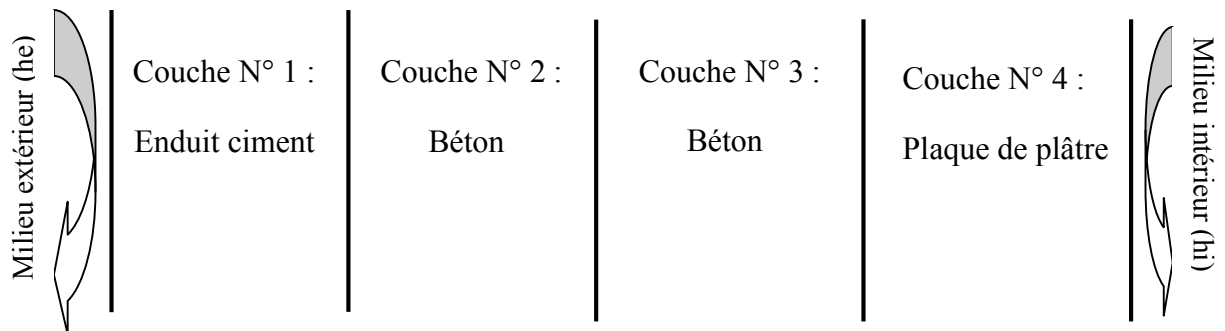
$$A = \frac{T_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{29.5}{40.4} = 0.73$$

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que la température au dernier nœud pour la deuxième Application est inférieure à celle de la première Application . On peut donc dire que les parois contenant des briques sont plus adaptés au condition de climat chaud En raison de sa faible conductivité thermique.

#### IV.5. Application N° 3 :

Paroi à quatre couches : enduit ciment , béton , béton et plaque de plâtre .

Soit une paroi à quatre couches représenté dans la figure ci-dessous, les propriétés thermiques de chaque sont présentées dans le tableau IV. 3.

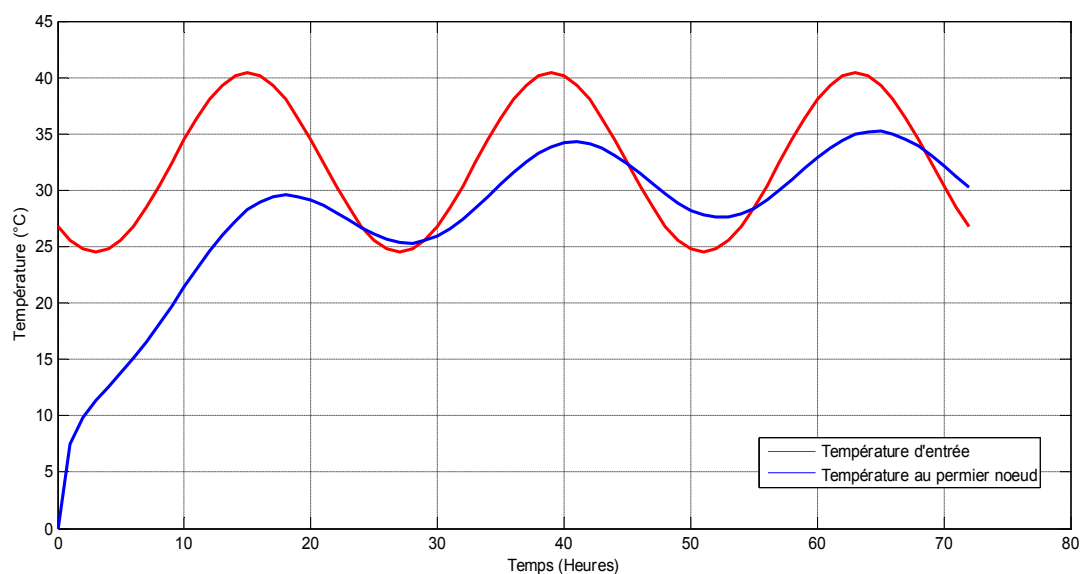


**Figure IV.9.** : Paroi à quatre couches

| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3            | Couche N° 4           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 2300 Kg/m <sup>3</sup> | 2300 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 1.75 W/m. K            | 1.75 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 600 J/Kg. K            | 600 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015 m                | 0.20 m                 | 0.20m                  | 0.015m                |

**Tableau IV.3.** Les propriétés thermiques des matériaux.[13][4][42]

Les figure IV.10. , IV.11. et IV.12. représentent respectivement l'évolution temporelle de la température au premiers nœud et dernier nœuds de la paroi modélisée et l'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée .



**Figure: IV.10.** : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.

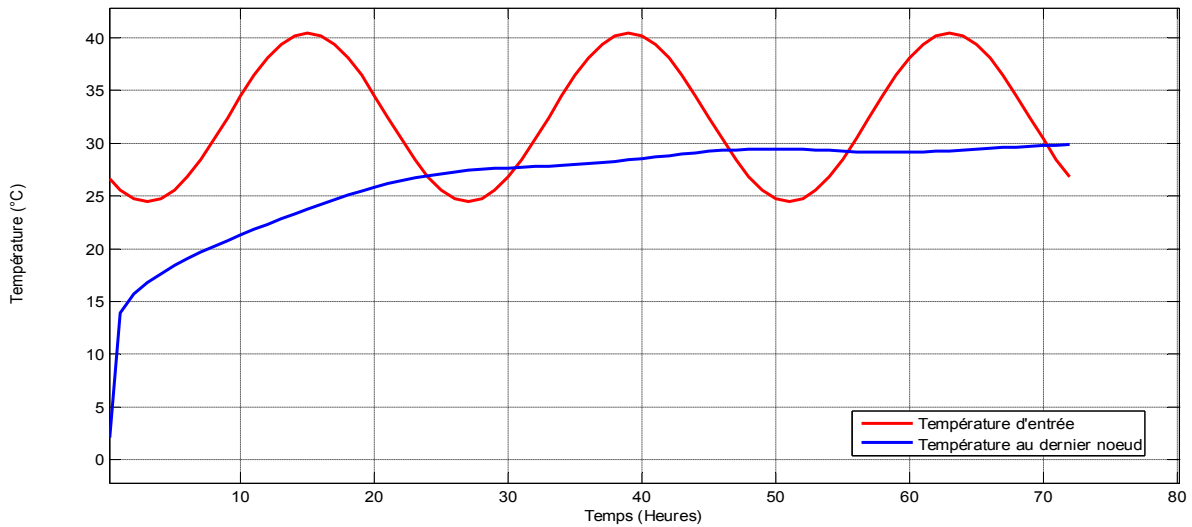


Figure: IV.11.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

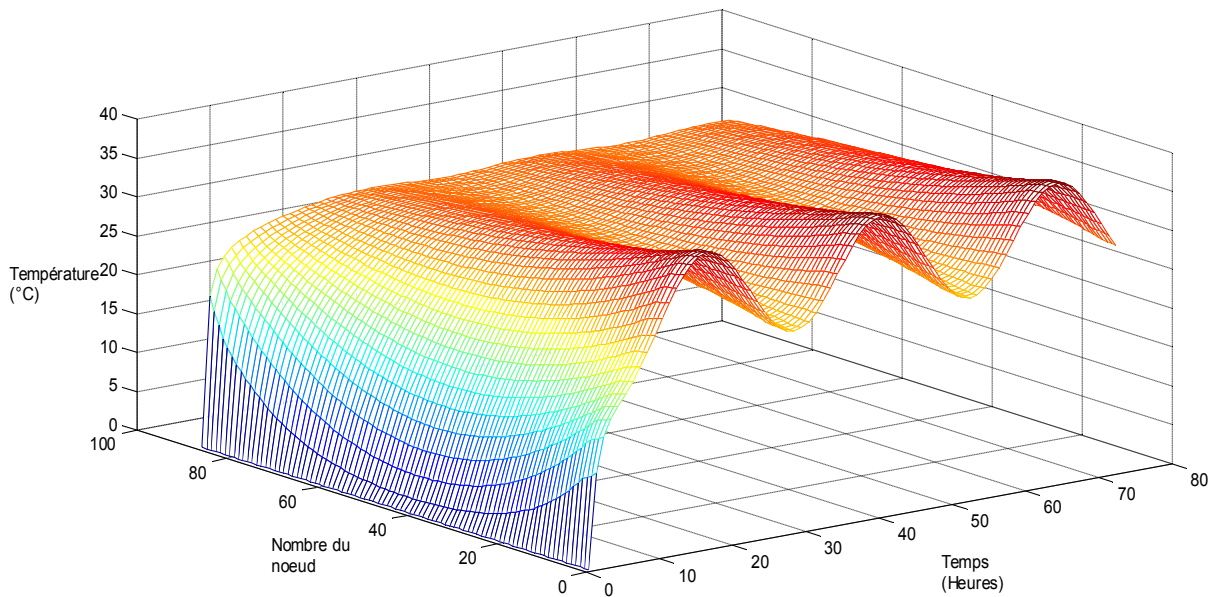


Figure: IV.12.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée

À la lumière de ces résultats, nous remarquons que la forme de température du dernier nœud est une forme exponentielle lors de régime transitoire, il atteint une valeur maximale de 28,5°C à  $t = 43H$ . Après cette valeur, la allure de la température se stabilise pendant un certain temps sous forme sinusoïdale, similaire à la courbe de température d'entrée.

- l'amortissement A :

$$A = \frac{T_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{28.5}{40.4} = 0.70$$

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'amortissement calculé dans la troisième application est inférieur à ceux obtenus pour le cas de premier application qui comporte une seule couche de béton. Donc on peut dire que la paroi qui comporte deux couches de béton est mieux adaptée au condition de climat chaud grâce à l'augmentation de l'épaisseur de la paroi modélisée dans la troisième application, c'est-à-dire que l'augmentation de l'épaisseur de la paroi augmente son isolation thermique.

#### IV.6. Application N° 4 : Paroi à quatre couches

enduit ciment , brique , brique et plaque de plâtre .

Soit une paroi à quatre couches représenté dans la figure ci-dessous, les propriétés thermiques de chaque sont présentées dans le tableau IV.4.

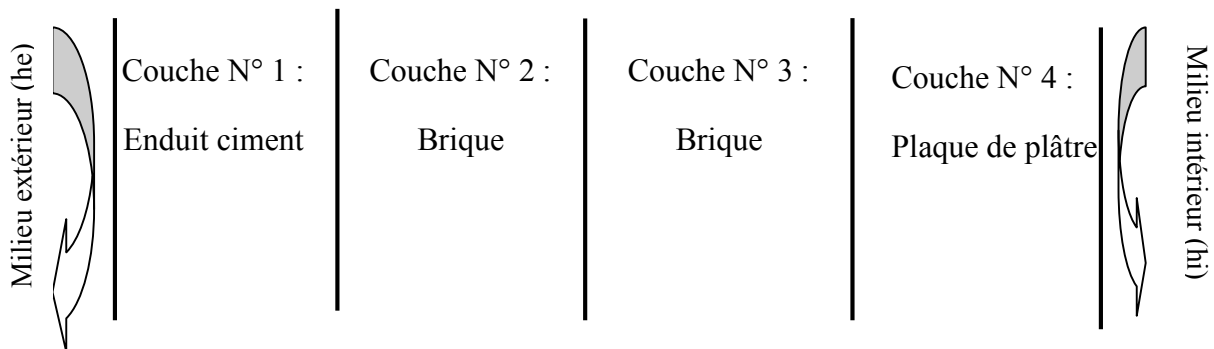


Figure IV.13. : Paroi à quatre couches

| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3            | Couche N° 4           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 1000 Kg/m <sup>3</sup> | 1000 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 0.35 W/m. K            | 0.35 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 250 J/Kg. K            | 250 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015 m                | 0.20 m                 | 0.20m                  | 0.015m                |

Tableau IV.4. Les propriétés thermiques des matériaux.[13][11][42]



Les figure IV.14., IV.15. et IV.16. représentent respectivement l'évolution temporelle de la température au premiers nœud et dernier nœuds de la paroi modélisée et l'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée .

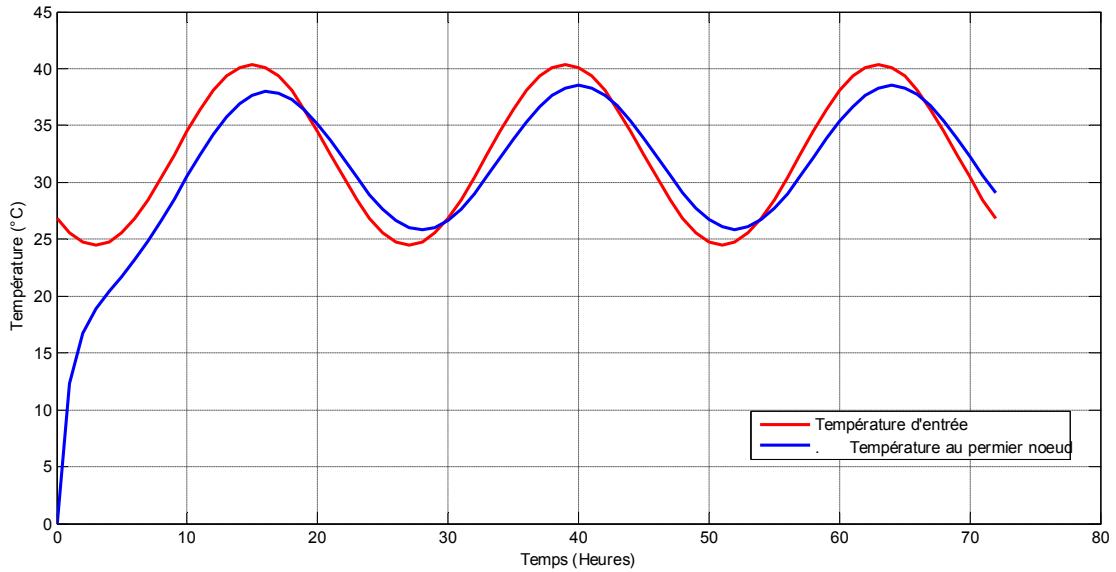


Figure: IV.14. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.

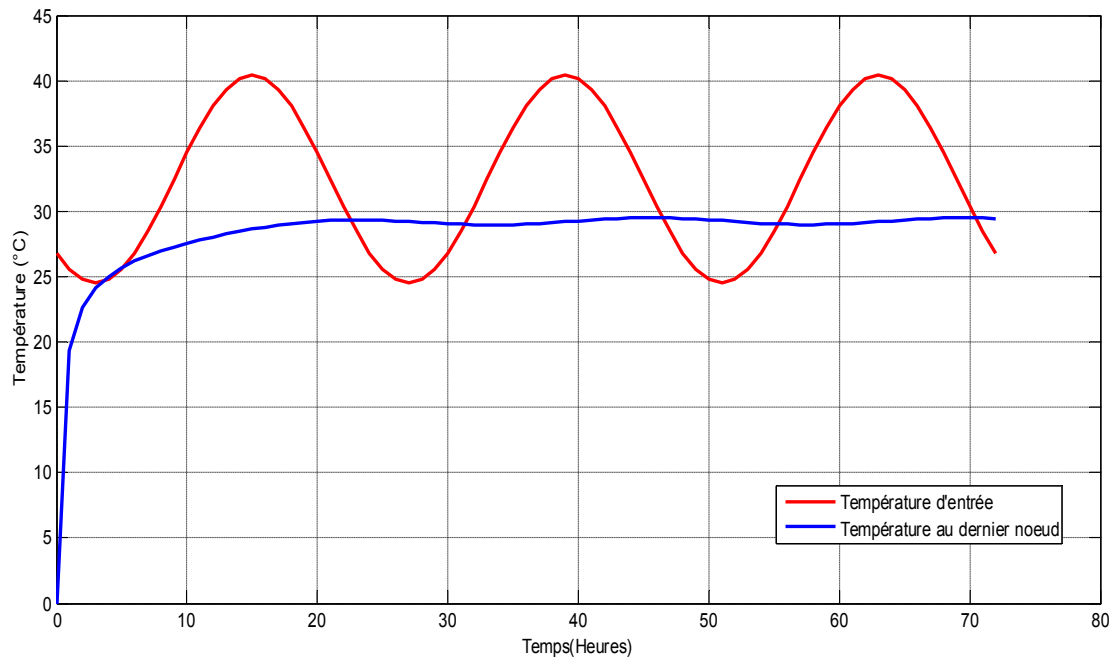


Figure: IV.15.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

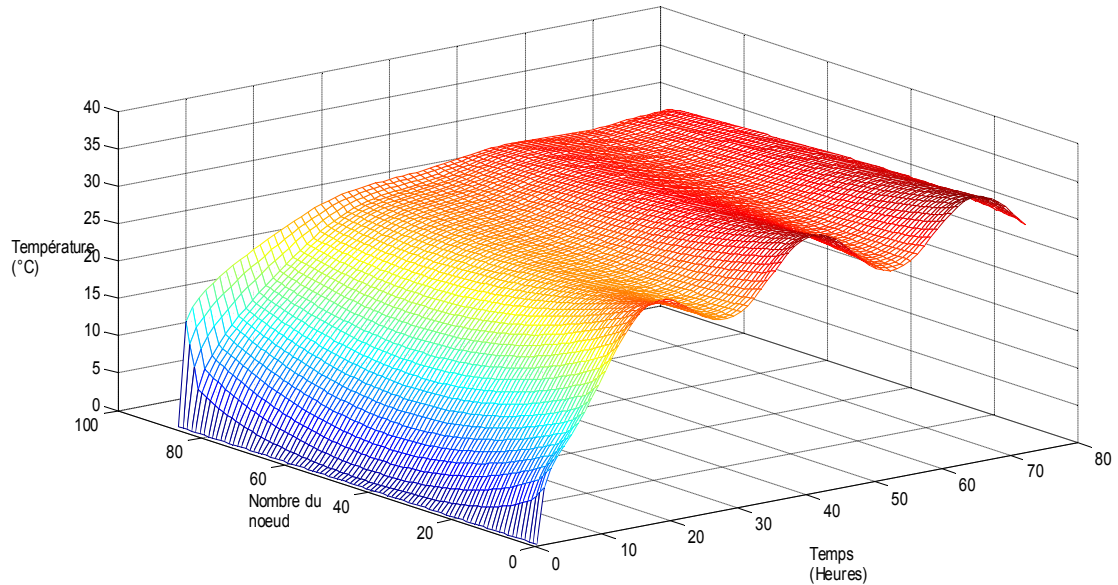


Figure: IV.16.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.

D'après ces figures, nous constatons la température au dernier nœud atteint une valeur maximale de 29°C à  $t = 44$  H. Pour l'amortissement entre les deux allures de la température d'entrée et de sortie on

- l'amortissement A :

$$A = \frac{T_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{29}{40.4} = 0.71$$

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'amortissement calculé dans la quatrième application est plus faible que dans le cas où une seule couche de brique a été incluse dans la deuxième application. On peut donc dire qu'un paroi à deux couches de brique est mieux adapté aux conditions de climat chaud du fait que l'épaisseur accrue du paroi modélisé dans la quatrième application, c'est-à-dire que l'épaisseur du paroi augmente son isolation thermique.

#### IV.7. Application N° 5 : Paroi à cinq couches

enduit ciment , brique, Air, brique et plaque de plâtre .

Soit une paroi à cinq couches représenté dans la figure ci-dessous, les propriétés thermiques de chaque sont présentées dans le tableau IV. 5.

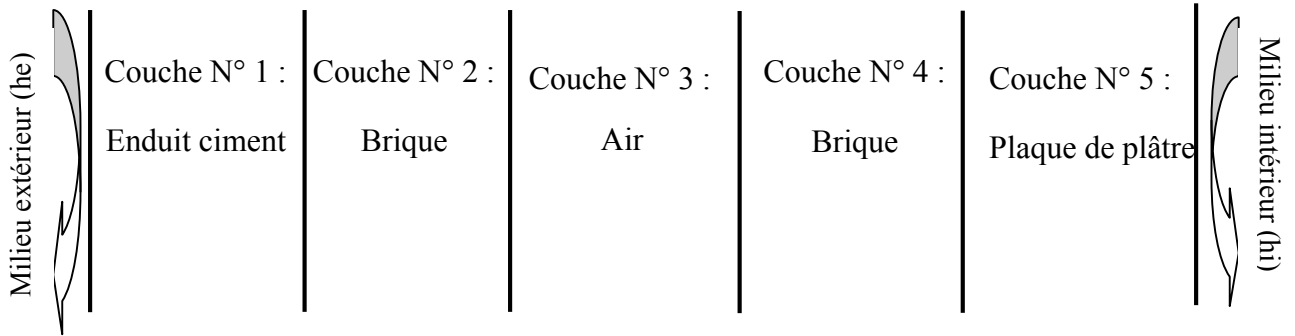


Figure IV.17. : Paroi à cinq couches

| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3             | Couche N° 4            | Couche N° 5           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 1000 Kg/m <sup>3</sup> | 1.292 Kg/m <sup>3</sup> | 1000 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 0.35 W/m. K            | 0.0262 W/m. K           | 0.35 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 250 J/Kg. K            | 1004 J/Kg. K            | 250 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015m                 | 0.20m                  | 0.05m                   | 0.20m                  | 0.015m                |

TableauIV.5. Les propriétés thermiques des matériaux.[13][11][42]

Les figures IV.18. IV.19.et IV.20.:représentent respectivement l'évolution temporelle de la température au premiers nœud et dernier nœuds de la paroi modélisée et l'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée .

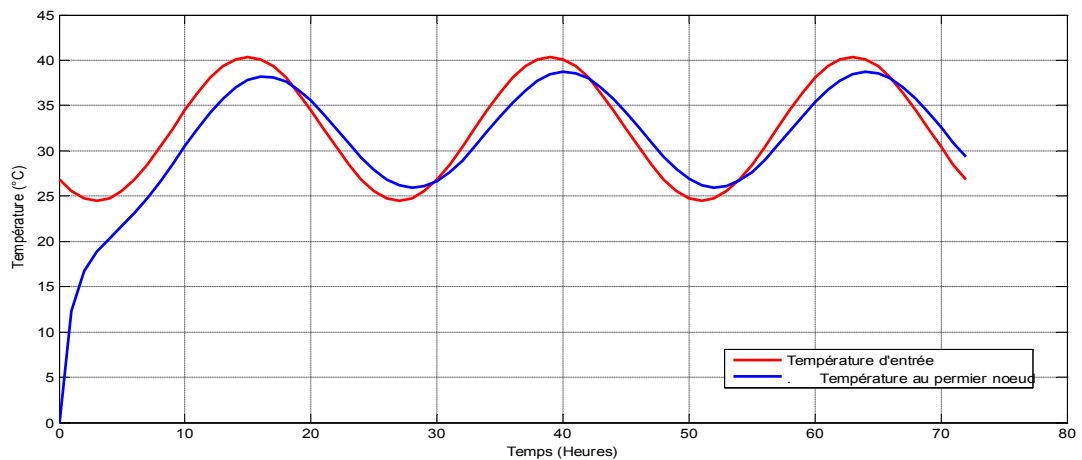


Figure:IV.18 : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.

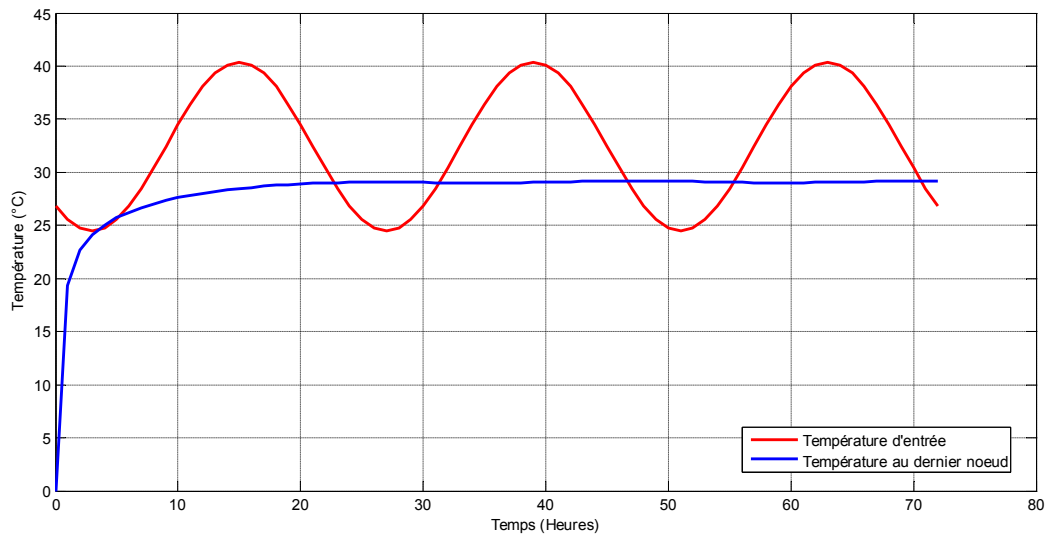


Figure: IV.19.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

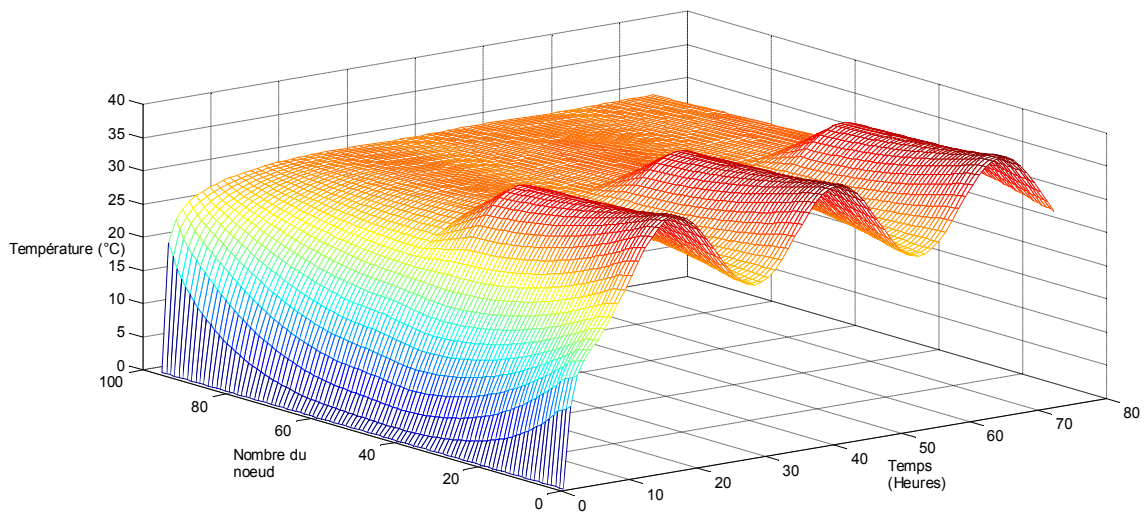


Figure: IV.20.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.

D'après ces figures ,nous constatons les mêmes remarques que dans les cas précédents, Mais l'allure de la température du dernier nœud prend une forme exponentielle durant un régime transitoire de temps très long par rapport aux cas précédents , il atteint une valeur maximale de  $t = 45$  H est de  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pour l'amortissement entre deux l'allures Les températures d'entrée et de sortie que nous obtenons:

- l'amortissement A :

$$A = \frac{T_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{29}{40.4} = 0.71$$

### IV.8. Application N° 6: Paroi à cinq couches

enduit ciment , béton, air, béton et plaque de plâtre .

Soit une paroi à cinq couches représenté dans la figure ci-dessous, les propriétés thermiques de chaque sont présentées dans le tableau IV. 6.

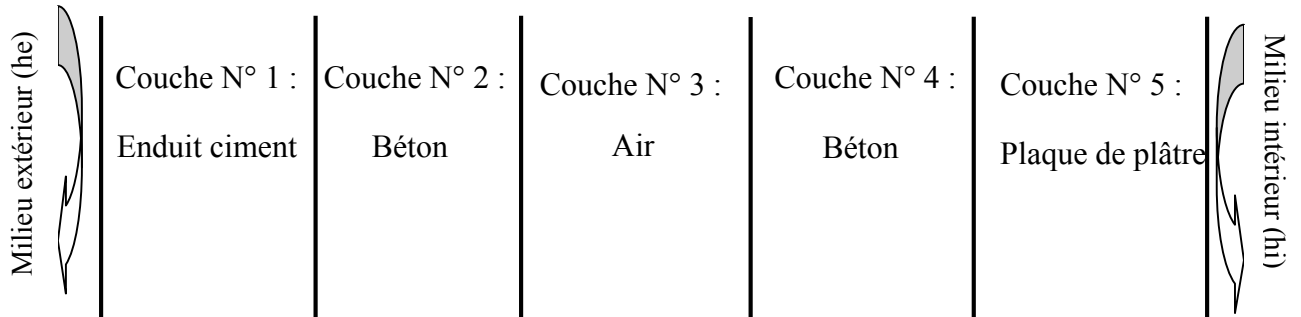


Figure IV.21.: Paroi à cinq couches

| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3             | Couche N° 4            | Couche N° 5           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 2300 Kg/m <sup>3</sup> | 1.292 Kg/m <sup>3</sup> | 2300 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 1.75 W/m. K            | 0.0262 W/m. K           | 1.75 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 600 J/Kg. K            | 1004 J/Kg. K            | 600 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015m                 | 0.20m                  | 0.05m                   | 0.20m                  | 0.015m                |

TableauIV.6. Les propriétés thermiques des matériaux.[13][4][42]

Les figures. IV.22,IV.23.,et IV.24. :représentent respectivement l'évolution temporelle de la température au premiers nœud et dernier nœuds de la paroi modélisée dans le temps et l'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée .

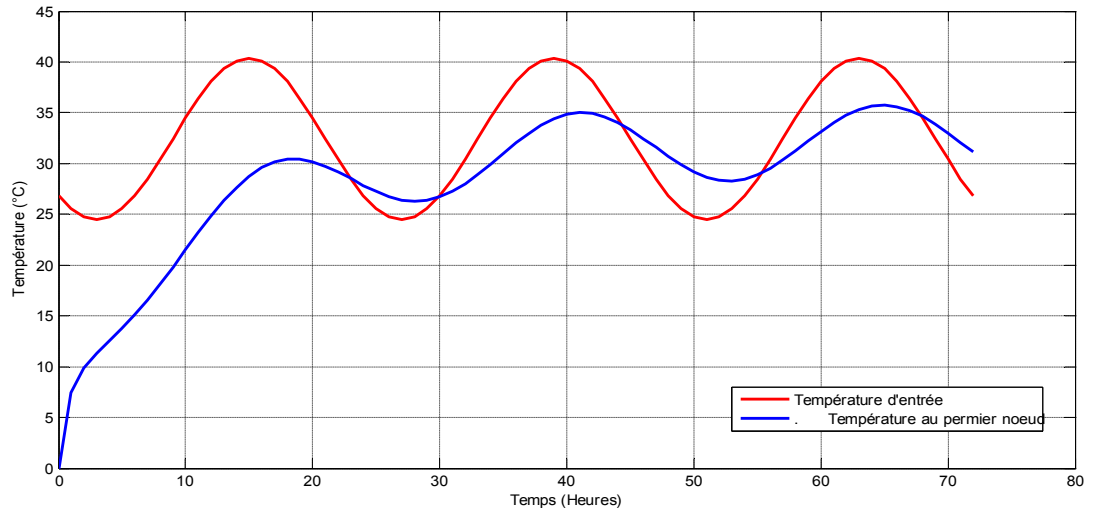


Figure:IV.22. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.

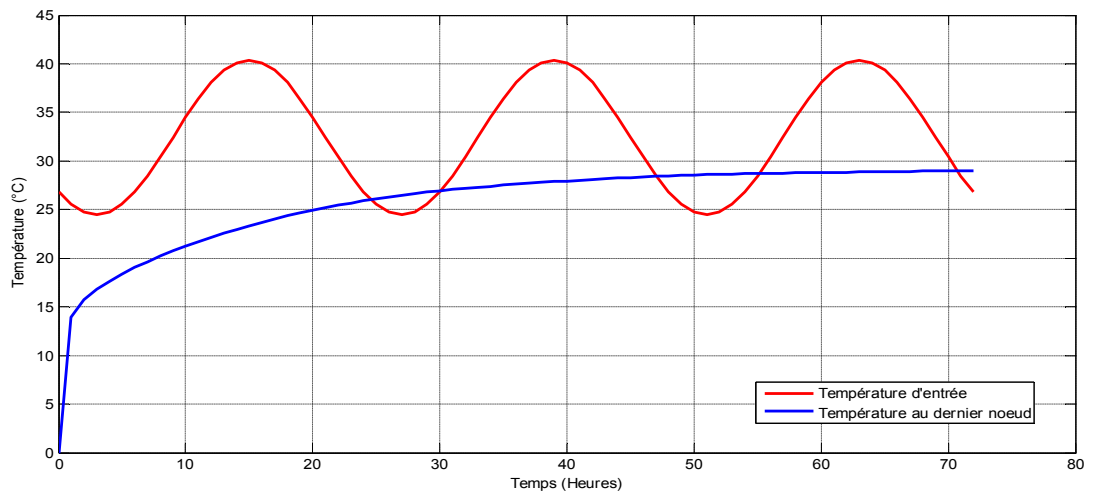


Figure :IV.23.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

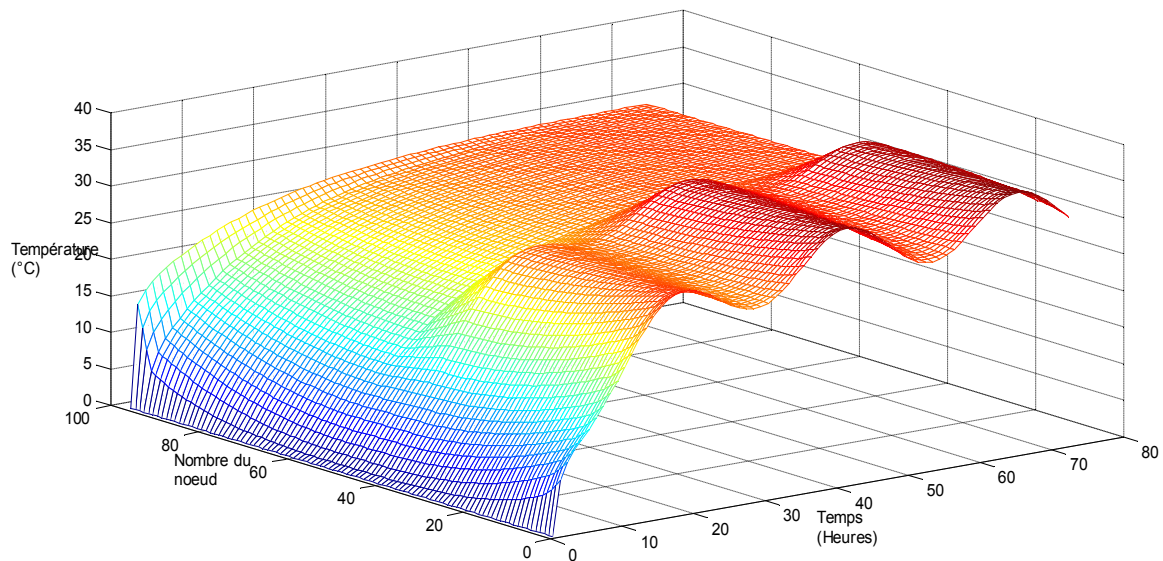


Figure: IV.24.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.

D'après ces figures ,nous constatons les mêmes remarques que dans les cas précédents, Mais l'allure de la température du dernier nœud prend une forme exponentielle durant un régime transitoire de temps très long par rapport aux cas précédents , il atteint une valeur maximale de  $t = 44 \text{ H}$  est de  $28.3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pour l'amortissement entre deux l'allures Les températures d'entrée et de sortie que nous obtenons:

- l'amortissement A :

$$A = \frac{T_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{28.3}{40.4} = 0.70$$

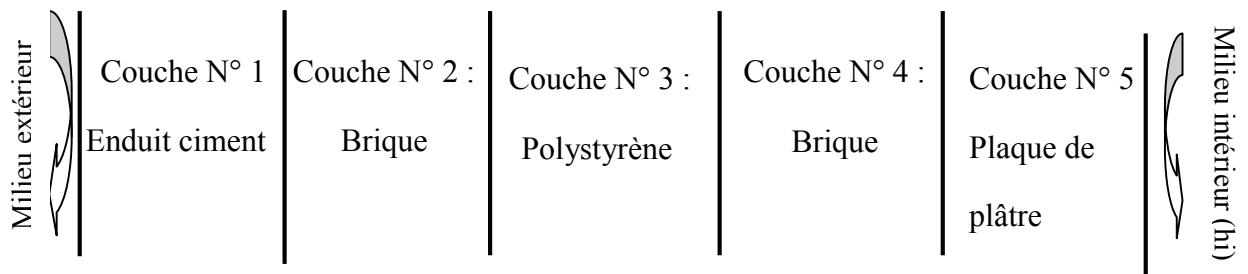
D'après les résultats obtenus, , nous remarquons que la température au dernier nœud pour La sixième application est inférieur à aux obtenus dans les cas précédents.

On peut dire qu'un paroi composé de deux couches de béton séparées par une couche d'air est mieux pour le climat chaud en raison de sa conductivité thermique. C'est à dire l'air est un isolant thermique .

#### IV.9.Application N°7

Paroi à cinq couches: enduit ciment, brique, polystyrène, brique et plaque de plâtre .

Soit une paroi à cinq couches représenté dans la figure ci-dessous, les propriétés thermiques de chaque matériaux sont présentées dans le tableau IV. 7.



**Figure IV.25** : Paroi à cinq couches

| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3            | Couche N° 4            | Couche N° 5           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 1000 Kg/m <sup>3</sup> | 1060 Kg/m <sup>3</sup> | 1000 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 0.35 W/m. K            | 0.033 W/m. K           | 0.35 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 250 J/Kg. K            | 1450 J/Kg. K           | 250 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015m                 | 0.20m                  | 0.05m                  | 0.20m                  | 0.015m                |

**TableauIV.7.** Les propriétés thermiques des matériaux.[13][11][41][42]

Les figures IV.26. IV.27.et IV.28:représentent respectivement l'évolution temporelle de la température au premiers nœud et dernier nœuds de la paroi modélisée et l'évolution spatio-temporelle de la temperature de la paroi modélisée .

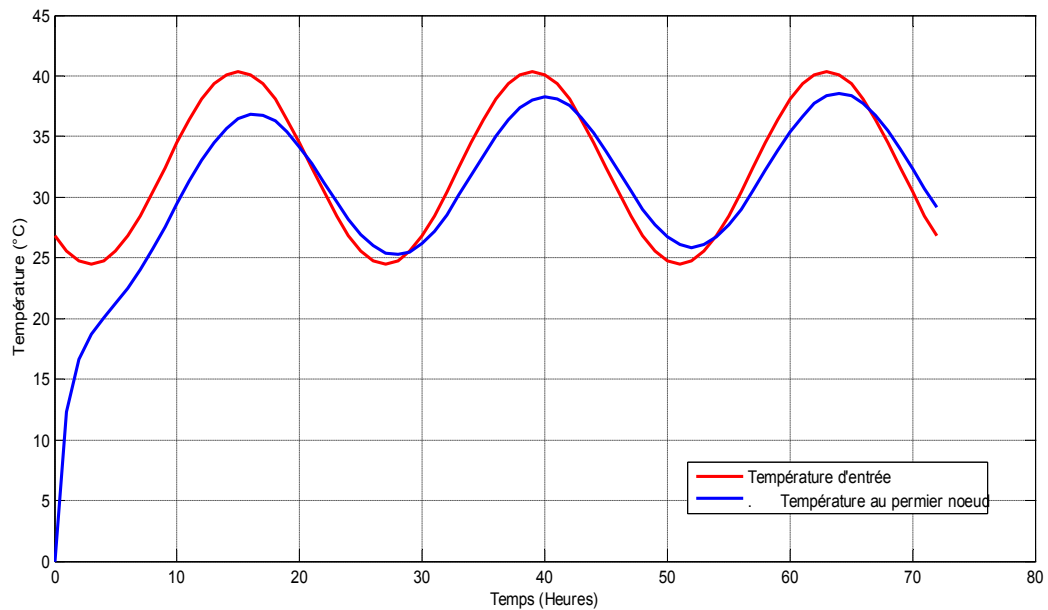


Figure: IV.26. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.



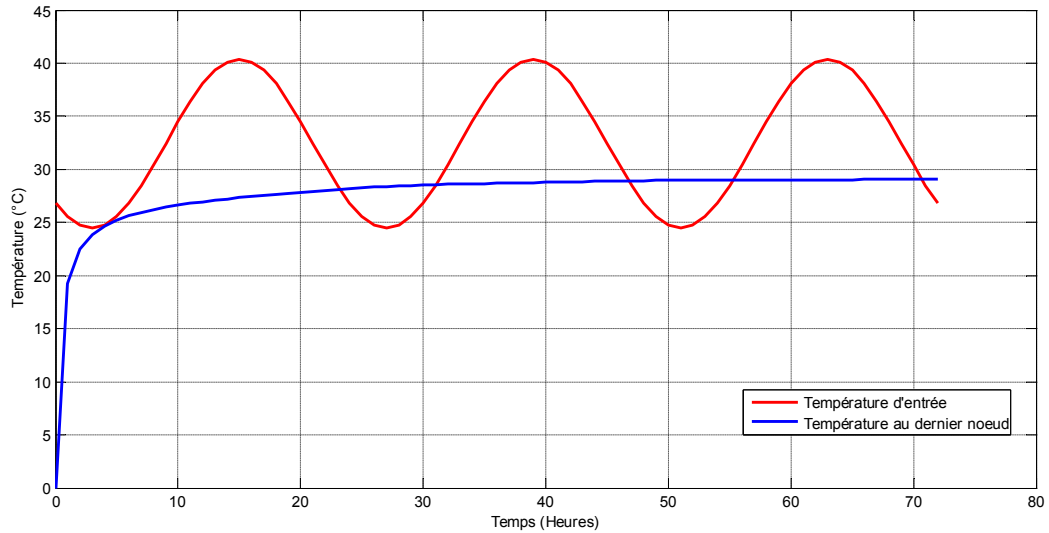


Figure:IV27: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

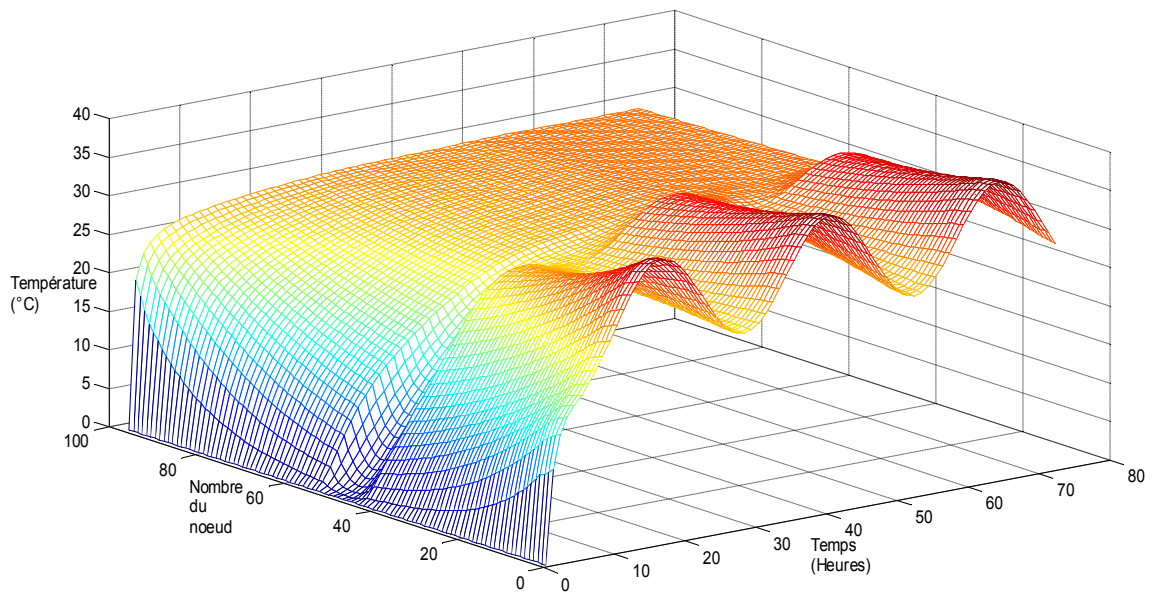


Figure: IV.28.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.

D'après ces figures ,nous constatons les mêmes remarques que dans les cas précédents, Mais l'allure de la température du dernier nœud prend une forme exponentielle durant un régime transitoire de temps très long par rapport aux cas précédents , il atteint une valeur maximale de  $t = 44 \text{ H}$  est de  $28.2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pour un amortissement entre deux l'allures Les températures d'entrée et de sortie que nous obtenons:

- l'amortissement A :

$$A = \frac{T_{max}}{Te_{max}} = \frac{28.2}{40.4} = 0.68$$

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'amortissement calculé dans la sixième application est inférieur à ceux obtenus pour tous les cas précédents, cela est dû à la différence de capacité thermique des deux matériaux "elle constaté aussi que le polystyrène est plus isolé que l'air ". Donc la paroi qui comporte deux couches de brique séparé par une couche de polystyrène c'est mieux l'solé par rapport la même paroi qui séparé par une couche d'air .

#### IV.10.Application N° 8: Paroi à cinq couches

Enduit ciment, Béton, Polystyrène, Béton et Plaque de plâtre .

Soit une paroi à cinq couches représenté dans la figure ci-dessous, les propriétés thermiques de chaque matériaux sont présentées dans le tableau IV. 8.

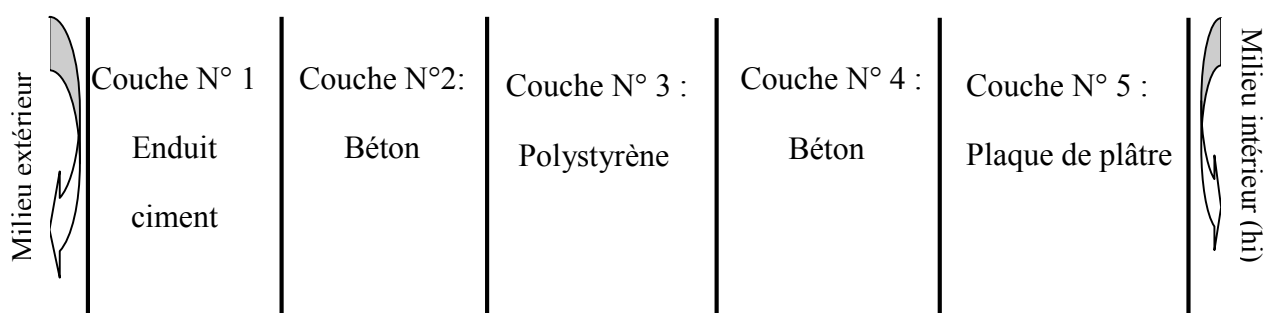


Figure IV.29.: Paroi à cinq couches

| Les propriétés thermiques | Couche N° 1            | Couche N° 2            | Couche N° 3            | Couche N° 4            | Couche N° 5           |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Masse volumique           | 1900 Kg/m <sup>3</sup> | 2300 Kg/m <sup>3</sup> | 1060 Kg/m <sup>3</sup> | 2300 Kg/m <sup>3</sup> | 900 Kg/m <sup>3</sup> |
| Conductivité thermique    | 1 W/m. K               | 1.75 W/m. K            | 0.033 W/m. K           | 1.75 W/m. K            | 0.25 W/m. K           |
| Chaleur massique          | 1000 J/Kg. K           | 600 J/Kg. K            | 1450 J/Kg. K           | 600 J/Kg. K            | 400 J/Kg. K           |
| Epaisseur                 | 0.015m                 | 0.20m                  | 0.05m                  | 0.20m                  | 0.015m                |

TableauIV.8. Les propriétés thermiques des matériaux.[13][4][41][42]

Les figures IV.30. IV.31.et IV.32. :représentent respectivement l'évolution temporelle de la température au premiers nœud et dernier nœuds de la paroi modélisée et l'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée .

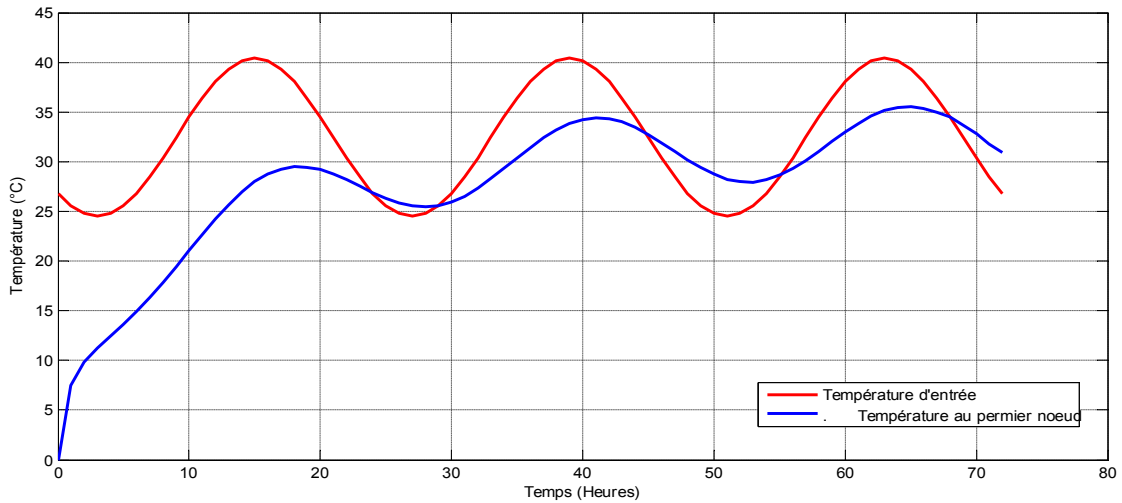
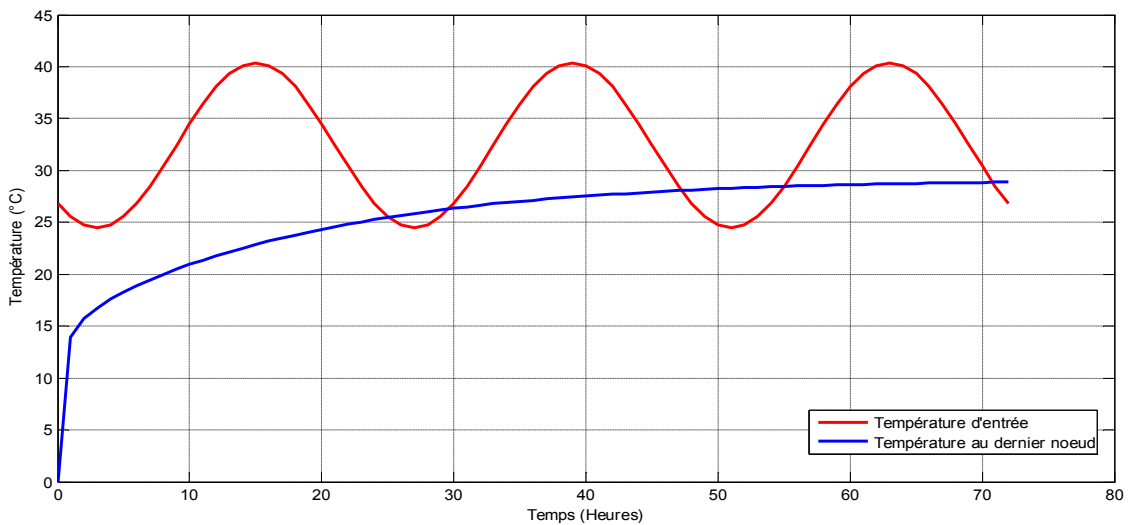


Figure: IV.30. : Evolution temporelle de la température au premier nœud de la paroi modélisée.



FigureIV.31.: Evolution temporelle de la température au dernier nœud de la paroi modélisée.

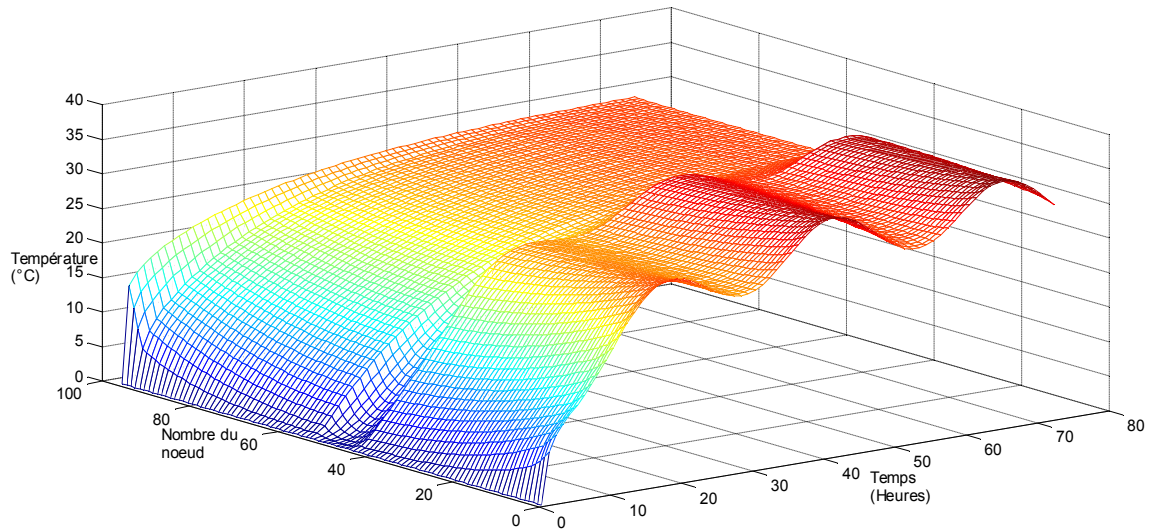


Figure: IV.32.: L'évolution spatio-temporelle de la température de la paroi modélisée.

D'après ces figures ,nous constatons les mêmes remarques que dans les cas précédents, Mais l'allure de la température du dernier nœud prend une forme exponentielle durant un régime transitoire de temps très long par rapport aux cas précédents , il atteint une valeur maximale de :  $t = 44$  H est de  $27.8$  °C. Pour un amortissement entre deux l'allures Les températures d'entrée et de sortie que nous obtenons:

- l'amortissement A :

$$A = \frac{T_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{27.8}{40.4} = 0.68$$

D'après les résultats obtenus ,Nous avons également constaté que le polystyrène est plus isolant que l'air en raison de la capacité thermique, donc le matériau qui stocke peu de chaleur est plus isolant. On peut donc dire qu'il y a un paroi avec deux couches de bétons, et Une couche de polystyrène est mieux utilisée comme isolant conditions au de climat chaud.

#### IV.11.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation de obtenus par notre code de calcul développé sous l'environnement MATLAB ,ce code est basé sur la méthode des volumes fini comme méthode de résolution des opérations aux dérivées partielles caractéristiques au problème de transfert de chaleur dans une paroi multicouche.

Notre résultats obtenus montré que l'évolution temporelle de la température dans la paroi multicouche est influencé par plusieurs paramètres, il s'agit de la conductivité thermique la chaleur massique et l'épaisseur de chaque couche éventuellement le type de matériau utilisé dans chaque couche .

## Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons présenté les résultats de la modélisation des phénomènes thermiques dans une paroi multicouches par la méthode des volumes finis. Et dans notre étude, nous avons modélisé de différents matériaux de convection et en pulse comme bien de couche de paroi, avec l'absence de source de chaleur et la dépendance à la chaleur du milieu extérieur. L'ensemble de notre rapport se situe dans :

- La modélisation des phénomènes thermiques dans une paroi multicouches par la méthode des volumes finis.
- Les différents résultats obtenus par le logiciel MATLA qui basé sur la méthode des volumes finis.
- La comparaison entre les résultats et comparaison entre les résultats obtenus grâce aux résultats du logiciel MATLAB et le nombre de couches du mur et la qualité des matériaux qui le composent avec l'identification des meilleurs matériaux d'isolation thermique.

Le code informatique développé pour résoudre notre système mathématique fonctionne pour n'importe quel nombre de couches de murs à modéliser, et il donne des résultats assez précis et assez rapides.

Code informatique développé pour résoudre notre problème D'un point de vue, afin de bien comprendre l'application de l'approche volumes finis à la modélisation de la conduction thermique, il est intéressant de : • Développer des applications de la méthode des volumes finis en 2D et 3D, • Dans ce cas, utilisez cette méthode pour simuler d'autres phénomènes thermiques, la convection naturelle, la convection forcée et le rayonnement. Le système mathématique est adapté à n'importe quel nombre de couches de murs à modéliser, il donne des résultats rapidement et avec une précision suffisante.

## Bibliographie

- [1]:A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, and J.D. Hardy. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research* , 1(1) :1–20, June 1967.
- [2] : L Courard. Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master en Ingénieur Civil Architecte par Jehanne PAULUS.
- [3] : BOUSMAT ABDELKADER, BELHACEN Mohamed Alaà Eddine, Synthèse bibliographique sur les principales dégradations affectant les constructions en béton armé, mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem 2019-2020
- [4] :RACHI LEILA, DENDANI MOHAMED AMINE, INFLUENCE DES DIFFERENTES GRANULOMETRIES DES AGREGATS SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON ORDINAIRE, mémoire de master, UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES 2016/2017
- [5] : HACHEMI NADIR, BOUSSA ADEL, Influence des différentes granulométries du sable sur le comportement mécanique du béton, mémoire de master, UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES 2016/2017
- [6] : DJOUHRI Mohamed, Confection d'une brique à base de sable de dunes, mémoire de magister, Université KASDI Merbah de Ouargla 2007
- [7] : Cellule de recherche Architecture et Climat. Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines, July 2010
- [8] :Modeste Kameni Nematchoua, Chrysostôme R.R. Raminosoa, Ramaroson Mamiharijaona, Tchinda René, José A. Orosa, Watis Elvis, and Pierre Meukam. Study of the economical and optimum thermal insulation thickness for buildings in a wet and hot tropical climate : Case of Cameroon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50 :1192–1202, October 2015
- [9] :ADIL DU LOIRET. Guide isolation thermique.page 19

[10] :Mustapha DIDA. Contribution à l'étude de l'effet d'isolation thermique sur la consommation énergétique des bâtiments.Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Master en Génie Energétique.page 88, June 2016

[11]: Francesco Asdrubali. A review of unconventional sustainable building insulation materials. page 17, 2015.

[12] : AYADI Walid abdelghani, GUENOUNE Abdelmalek, Valorisation des sables locaux dans la formulation de béton ordinaire, mémoire de master, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2015 / 2016

[13] :BELMOKHTAR NASSIMA, ZERAIG AKILA, Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment, mémoire de master, UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES 2016 – 2017

[14] :Impact des systèmes de parois multicouches masse et résistance thermique à base de brique de terre comprimée sur le confort thermique de l'habitat en climat chaud

[15] :Site : <https://isolation-thermique.org/choisir-isolant-thermique/polystyrene-expande>

[16] : Site : <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2286-beton-cellulaire.html>

[17] :Site : <https://travauxbeton.fr/faire-ciment/>

[18] :Site : <https://orobrique.ma/la-brique-un-produit-sain-et-durable/>

[19] : Thermo10 : Transferts thermiques 1 (livre)

[20] : Stéphane Olivier et Hubert Gié, *Thermodynamique*, Paris, Tec & Doc Lavoisier, coll. « Sciences physiques », 1998, 512 p. ([ISBN 978-2-7430-0133-9](#)), p. 133

Richard Taillet, Loïc Villain et Pascal Febvre, *Dictionnaire de physique*, De Boeck Supérieur, 23 janvier 2018, 976 p. ([ISBN 978-2-8073-0744-5](#), [lire en ligne \[archive\]](#)).

## Bibliographie

- *Transferts Thermiques*, Bruno Chéron, Édition Ellipses, 1999.
- *Les bases de la mécanique des fluides et des transferts de chaleur et de masse pour l'ingénieur*, Esteban Saadjian, Sapientia Éditions 2009, ([ISBN 978-2-911761-85-0](#)).

- René Leleu, *Transferts de chaleur*, Paris, Éditions techniques de l'ingénieur, 1992 (BNF 14017046, [lire en ligne](#) [archive])

[21] : L. ABDALLAH, B. TAREK, Etude expérimentale des transferts thermiques dans un local muni d'un isolant à base végétale. Mémoire de master, Université kasdi merbah d'Ouargla (2017).

[22] : Transferts thermiques, transparents de cours, MP, Lycée Montesquieu (Le Mans), Olivier Granier (livre) ; Transferts thermiques Conduction – Convection - Rayonnement

[23] : Document Transferts thermiques ,*Cours Transferts thermiques 2ème année Ecole 158 des Mines Nancy*

[24] : A. HADDAD. Transferts thermiques un cours de base pour les étudiant en cycle de graduation, Dar-El-Djazairia, Alger, (2001).

[25] : Chapitre I : Etat de l'art MÉMOIRE DE MASTER : Etude de la convection laminaire sur une plaque plane chaude pour différents  
Présenté et soutenu par : Mr. Benacer Bousaria Université Mohamed Khider de Biskra

[26] : J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Energy Thermal Processes. Second Edition. Wiley Interscience, New York, (1974).

[27] : S. BENZAADA, M. T. BOUZIANE. Cours. <https://docplayer.fr/19014578-bensaadam-t-bouziane-transfert-de-chaleur> (date de consultation le 16/02/2019).

[28] : E. ZIDI. Modélisation et simulation d'écoulement de fluide multi constituants en milieu poreux .Mémoire de Magistère, Université Biskra. (2004).

[29] : F. DOUMENC. Cours « Eléments de thermodynamique et thermique ». Université Pierre et Marie Curie. Année (2009/2010).

[30] : Alexandre Ern. "Aide-mémoire Éléments .nis". Paris, 2005.

[31] : Salhi Hicham. "etude numerique de la convection naturelle dans les enceintes nano .uide", 2015

[32] : CHOUBAR Khoutir et HERREM Zina «Modélisation des phénomènes électromagnétiques par la méthode des volumes finis dans un dispositif axisymétrique», Université Mohamed Boudiaf - m'sila, 2006



- [33] : BELKHIRI Yamina «Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques et Mécaniques Couplés par la Méthode des Volumes Finis (CVM)», UNIVERSITE DE BATNA.
- [34] : Bergoug Nassima «Etude de l'influence des matériaux ferromagnétiques sur les performances d'une machine MHD par la modélisation numérique 2D», Université de Batna, 2006 .
- [35]: SUHAS V.patankar «Numerical heat transfer and fluid», Series in computational methods in mechanics and thermal science, University of Minnesota
- [36] : NEGADI Chahrazad, Résolution numérique de l'équation de chaleur stationnaire à deux dimensions, mémoire de master, UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA 2018 – 2019.
- [37] : KORICHI Wennassa, Simulation numérique d'une plaque bidimensionnelle avec source de chaleur, Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme Master, Université Mohamed khider – BISKRA – 2014
- [38] : DEBOUB Ilyas, Etude Et Dimensionnement D'une Machine Supraconductrice, mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra 01 Juin 2017
- [39] : HAMADA KARIMA, ETUDE DU TRANSFERT DE CHALEUR A TRAVERS UNE AILETTE VERTICALE, MEMOIRE DE MAGISTER
- [40] : MERABET AYECHÉ Chahra, Modélisation et simulation des phénomènes thermoconvectifs des écoulements se produisant dans des cavités : Influence du rayonnement thermique, Université 20 Août-1955 Skikda
- [41] Mansouri Zine Eddine, Etude Numérique des performances des matériaux isolants dans le bâtiment (régime permanent) sous conditions de températures réelles de Constantine, mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi Oum -El –Bouaghi 2 juillet 2018.
- [42] RACHEDI Mokhtar, Contribution à l'Etude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier dattier, mémoire de magister, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA 2013