

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**

**Scientifique**

**Université Ahmed Draia Adrar**

**Faculté Des Sciences et de Technologies**  
**Département Des Sciences et Technologie**



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

**Master En Génie Civil**

**Option : structure**

**Présenté Par :**

**Abed Safia**

**Fardjani Karima**

**THEME**

**Estimation de la température de sol en différent  
profondeur (élaboration d'un modèle théorique+Essais  
expérimentales)**

Soutenu Le 20/10/2020 Devant un membre de jury composé de :

<b>Mr. BASSOUDA Abdelkader</b> Univ. Adrar	<b>Président</b>
<b>Mme .BEKRAOUI Keltoum</b> .Univ. Adrar	<b>Examineur</b>
<b>Mr. BADA Abdelmalek</b> .Univ. Adrar	<b>Encadreur</b>
<b>Dr. OUDRENE Abdelatif</b> .Univ. Adrar	<b>Co-Encadreur</b>

**Année Universitaire 2019-2020**

# Remerciement

Tout d'abord, je remercie Dieu de nous aider à faire ce travail, et nous remercions Dieu qui nous a gardés en bonne santé pour terminer ce travail.

Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont consentis pour que nous terminions nos études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre superviseur, **Mr. BADA Abdelmalek** et **Dr. OUDRENE Abdelatif** pour leur intérêt pour notre travail, leurs conseils et leurs soutiens et assistance à notre égard.

Je voudrais également remercier **Dr. Ben Hammou Mohamed**, qui nous a aidés et guidés en nous fournissant quelques documents.

Nous remercions nos professeurs du Département de génie civil et les membres du jury **Mme BEKRAOUI Keltoum** et **Mr BASSOUD Abdelkader** pour leur acceptation d'évaluer ces travaux.

Et au final, pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la mise en œuvre du projet de fin d'études.

# Dédicace :

Je dédie cette humble œuvre aux deux êtres les plus précieux du monde, ma mère et mon père, afin que Dieu les protège pour ceux qui m'assiègent et me soutiennent.

Mes frères et sœurs

À toute ma famille

A tous mes amis et camarades

Pour l'amour, le soutien et la compréhension qu'ils nous ont apportés

Et pour tout le monde que j'aime

Merci à tous.

**Safia**

# Dédicace :

Je dédie cette humble œuvre aux deux êtres les plus précieux du monde, ma mère et mon père, afin que Dieu les protège pour ceux qui m'assiègent et me soutiennent.

Mes frères et sœurs

À toute ma famille

À mon cher mari

A tous mes amis et camarades

Pour l'amour, le soutien et la compréhension qu'ils nous ont apportés

Et pour tout le monde que j'aime

Merci à tous.

**Karimā**

# Sommaire

<b>Remerciement .....</b>	<b>I</b>
Sommaire .....	IV
Nomenclature .....	VII
Liste des Tableaux .....	IX
Liste des figures .....	X
Introduction générale .....	1

## chapitre I

<b>Partie I : Les Mode de transfert de chaleur.....</b>	<b>3</b>
I.1) Introduction .....	3
I.2) Quelques définitions thermiques: .....	3
I.2.1) Température T [2].....	3
I.2.2) Champ de température [3].....	4
I.2.3) Gradient de température [3].....	4
I.2.5) Densité de flux thermique [3].....	4
I.2.6) Résistance thermique [5,6]. .....	5
I.3) Formulation d'un problème de transfert de chaleur [3].....	5
I.3.1) Bilan d'énergie .....	5
I.4) Transfert thermique [5].....	6
I.5) Modes de transfert de chaleur.....	6
I.5.1) La conduction : [7]. .....	6
I.5.1.2) Transfert de chaleur par conduction en régime permanent : .....	7
I.5.2.1)- Convection naturelle et forcée [9].....	12
I.5.2.1.1)- La convection naturelle ou libre.....	12
I.5.2.2) -La loi de Newton [9] .....	13
I.5.2.2.1) -Coefficient d'échange par convection [9].....	13
I.5.3). Le rayonnement [7] .....	14
I.6). Conclusion.....	16
<b>Partie II : Recherche bibliographiques sur les transferts de chaleur dans le sol .....</b>	<b>16</b>
II .1).Quelque travaux sur les transferts de la chaleur dans les sols.....	16
II .1.1).M. Benhammou et B. Draoui [10] .....	16
II .1.2).T.Mnasri et al [11].....	18
II .1.3).M.S. Guellouz et al [12].....	18
II .1.4).S. Ouali et al [13] .....	19

II .1.5).En 2014 Yacine AHMOUDA [14] .....	20
II .1.6).En 2016-2017Karim Nahi [15] .....	20
II .1.7).ORFI et COLI [16].....	21
II .1.8).Modèle de Stéphane THIERS [17].....	21
II.1.9).Mohammed Rhachi et al [18].....	21
II .2).Conclusion .....	23

## chapitre II

II.1). Introduction.....	25
II .2). Les propriétés thermiques .....	25
II.2.1). Conductivité thermique ( $\lambda$ ) [19].....	25
II.2.2). Diffusivité thermique ( $\alpha$ ) [19] .....	25
II.2.3). la capacité thermique (c) [19] .....	25
II.3). mesures la conductivité thermique [20] .....	26
II.3.1). Méthode en régime permanent.....	26
II.3.1.1) Méthode de la plaque chaude gardée [20].....	26
Où S est la surface de la plaque chauffante.....	27
II.3.1.2). Méthode de boite [21] .....	27
II.3.2). Méthode en régime transitoire [20].....	29
II.3.2.1). La méthode du fil chaud [23] .....	29
II.3.2.2). Méthode Laser Flash [23] .....	31
II.3.2.3). Méthode flash [24] .....	33
II.3.2.4). Méthode de Parker [25].....	33
II.3.2.5). Méthode des temps partiels [25] .....	34
II.3.2.6). Calorimètre à chute [19].....	36
II.4) . Conclusion .....	38

## chapitre III

III.1). introduction :.....	40
III.2). Mécanismes de transport de chaleur dans le sol [26] : .....	40
III.2.1).Transport de chaleur par convection : .....	40
III.2.2).Transport de chaleur par conduction : .....	40
III.3). Formulation mathématique (Les équation de transfert de chaleur dans le sol ).....	44
III.3.1). Le modèle thermique du sol : [27].....	44
III.3.2) .Estimation de la température en profondeur du sol .....	44
III.3.2 .1). Modèle du milieu semi - infini .....	44

III.3.2.2). Modèle thermique du sol .....	46
III.3.2.3). Estimation de la température en surface du sol : .....	47
III.3.2.4). Transformation en série de Fourier.....	50
III.4). Recherche Bibliographique de Compare avec les autres modèles.....	56
III.4. 1). Dr: BENHAMMOU Mohammed [31] : .....	56
III.4.2) Mr. Belloufi Yousef [27] : .....	56
III.4.3). Sayeh Menhoudj [32].....	57
III.4 .4). Djamel Belatrche [33] : .....	57
III.4.5). CHEBANA Abdel basset [34] : .....	57
III.4 .6).F .Al-Ajmi [35] .....	57
III.5) .Conclusion .....	58

#### CHAPITRE IV

<b>Partie 01 : Propreté thermique de sol .....</b>	<b>60</b>
IV.1). Introduction .....	60
IV.2). Analyse granulométrique.....	60
IV.3). Résultat d’essai thermique.....	62
IV.3.1). Echantillons contient le sable concassé .....	62
IV.3.1.1). La conductivité thermique .....	62
IV.3.1.2). La diffusivité thermique .....	65
IV.3.1.3 L’effet de la masse volumique sur les propriétés thermo physique .....	68
IV.3.1.4). Détermination de la chaleur spécifique .....	70
IV.3.1.5). Détermination de l’effusivité thermique.....	70
IV.3.2). échantillons contient le sable de dune .....	71
IV.3.2.1). la conductivité thermique .....	71
IV.3.3). comparaison entre les deux types de sables.....	78
IV.5). Conclusion.....	80
<b>Parti 02 : Résultats de la température de sol .....</b>	<b>81</b>
V .1). Introduction.....	81
V .2 Présentation graphique des résultats .....	82
V .3 Discussion les résultats.....	84
V .4Validation.....	85
V .5 Discussion les résultats.....	85
V .6 Conclusion.....	86
Conclusion générale .....	88
Références.....	90

## Nomenclature

### Symboles :

<b>S</b> : surface d'échange .....	$(m^2)$
<b>h</b> : coefficient d'échange par convection .....	$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
<b>Re</b> : nombre adimensionnel de Prandtl	
<b>e</b> : épaisseur d'échantillon .....	$(cm)$
<b>E</b> : effusivité thermique .....	$W/m^2 \cdot K \cdot s^{-0.5}$
<b>C<sub>p</sub></b> : Chaleur spécifique .....	$(kJ/m^3 \cdot K), (J/kg \cdot K)$
<b>C</b> : capacité thermique .....	$(J/K)$
<b>a</b> : diffusivité thermique .....	$(m^2 \cdot s^{-1})$
<b>q<sub>1</sub></b> : Pertes latérales dans <b>B1</b> .....	$(^\circ C)$
<b>q̇</b> : Puissance émise par <b>C</b> .....	$(W)$
<b>T<sub>c</sub></b> : température de face supérieure d'échantillon .....	$(^\circ C)$
<b>T<sub>f</sub></b> : température de face supérieure d'échantillon .....	$(^\circ C)$
<b>T<sub>B</sub></b> : température de boîte .....	$(^\circ C)$
<b>T<sub>a</sub></b> : température de l'ambient .....	$(^\circ C)$
<b>A</b> : aire des faces d'échantillon.....	$(m^2)$
<b>G</b> : rayonnement solaire .....	$(W \cdot m^{-2})$
<b>Ḡ</b> : rayonnement solaire moyen .....	$(W \cdot m^{-2})$
<b>geo</b> : gradient géothermique .....	$(^\circ C \cdot m^{-1})$
<b>hc</b> : Coefficient de transfert de chaleur par convection .....	$(W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2})$
<b>hr</b> : Coefficient de transfert par rayonnement .....	$(W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2})$
<b>HR</b> : humidité relative	
<b>T</b> : période.....	$(s)$
<b>t</b> : temps .....	$(s)$
<b>T̄</b> : température moyen.....	$(^\circ C)$
<b>Z</b> : profondeur dans le sol .....	$(m)$
<b>Symboles grecques :</b>	
<b>α</b> : diffusivité thermique .....	$(m^2 \cdot s^{-1})$
<b>δ</b> : profondeur de pénétration thermique .....	$(m)$



$\varepsilon$ : émissivité, efficacité .....	
$\rho$ : masse volumique ( $\text{Kg. } m^{-3}$ ) ou albédo du sol .....	
$\tau$ : durée de temps .....	(s)
$\varphi$ : déphasage de température ou de rayonnement solaire .....	(rad)
$\varphi$ : flux thermique .....	(W)
$\Phi$ : densité de flux .....	( $\text{W.}m^{-2}$ )
$\lambda$ :conductivité thermique .....	( $\text{W.}m^{-1}.K^{-1}$ )
$\sigma$ : Constante de Stephan .....	( $\text{W. } m^{-2}. C^{-4}$ )
$\varepsilon_p$ : Facteur d'émission de la surface.....	

## Liste des Tableaux

### Chapitre III :

**Tableau III. 1** : Variation du paramètre F en fonction de la nature du sol ..... 50

**Tableau III.2** Illustration des données météorologiques de la ville d'Adrar ..... 50

### Chapitre IV :

#### Partie 01 : Propreté thermique de sol

**Tableau IV. 1** : Analyse granulométrique de sable concassé..... 60

**Tableau IV. 2** : Analyse granulométrique de sable de dune..... 61

**Tableau IV. 3** : Résultats obtenu par l'appareille EI 700. .... 63

**Tableau IV. 4** : Les résultats relèvent à partir de thermo gramme. .... 66

**Tableau .IV .5** : Propriété thermo physique d'un bloc de terre d'argile. (Sable concassé)..... 71

**Tableau .IV.6** : Résultats obtenu de l'appareille EI 700. .... 71

**Tableau IV.07**: Propriété thermo physique d'un bloc de terre d'argile (sable de dune). ... ..77

## Liste des figures

### Chapitre I :

#### Partie I : Les Mode de transfert de chaleur

Figure I. 1: Isotherme et gradient thermique .....	4
Figure. I.2 : Système et bilan énergétique .....	5
Figure I.3: La Conduction.....	6
Figure I.4 : La propagation de la chaleur dans une paroi .....	6
Figure I.5 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple.....	7
Figure I.6 : Schéma électrique équivalent d'un mur simple .....	9
Figure I.7 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouche.....	9
Figure I.8 : Schéma électrique équivalent d'un mur multicouche .....	10
Figure I.9 : Schématisation d'un mur composite .....	11
Figure I. 10 : Schéma électrique équivalent du mur composite .....	11
Figure I.11 : La convection.....	12
Figure I.12 : Refroidissement d'un bâtiment sous l'effet du vent .....	12
Figure I.13 : Le rayonnement .....	15
Figure I.14: Transfert de chaleur par rayonnement Infrarouge.....	15
Figure I.15 : Exemple de rayonnement .....	15

#### Partie II : Recherche bibliographiques sur les transferts de chaleur dans le sol

Figure II.15: Profondeur de penetration la thermique en fonction de la nature du sol.....	17
Figure II.16: Température moyenne a la surface du sol suivant la nature de sol.....	17
Figure II. 17: Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol .....	17
Figure II.18: Variation de température en fonction de la profondeur dans le sol .....	17
Figure II.19: Section de l'échangeur.....	18
Figure II.20: Schéma du transfert de chaleur dans le sol .....	19
Figure II.21: Géométrie de l'échangeur eau-sol modélise .....	20
Figure II.22: Exemple de pompe a chaleur sol/eau .....	21
Figure II.23: Relevés des températures par la technique classique .....	22
Figure II.24: Relevés des températures par la nouvelle technique .....	23

### Chapitre II :

Figure II.25 : Représentation de flux thermique .....	25
Figure II.2 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude garée.....	27
Figure II. 26 : Vue générale de la cellule de mesure " la méthode des boites ".....	27
Figure. II.4 : Boite de mesure de la conductivité thermique .....	28
Figure II. 5: Le principe de mesure à laide d'un fil chaude .....	29
Figure II.6:Diagramme d'estimation de $\lambda$ de la méthode de fil chaud.....	31
Figure II.7 : Principe de méthode laser flash.....	32
Figure II.8:Schéma de principe de la méthode flash.....	33
Figure II.9 : Courbe théorique du température réduit de la face arrière.....	34
Figure II.10 : Courbe théorique de la température réduite de la face arrière .....	35
Figure II.11 : Calorimètre à chute pour la mesure de la capacité thermique.....	36

<b>Figure II. 12:</b> Boit B1 pour la mesure de conductivité thermique.....	37
<b>Figure II.27:</b> Boite B2 pour la mesure de la diffusivité thermique .....	37
<b>Chapitre III :</b>	
<b>Figure III.1 :</b> Schéma du milieu semi- infini avec température sinusoïdale imposée en surface .....	45
<b>Figure III.2 :</b> Bilan d'énergie à la surface du sol .....	48
<b>Chapitre IV :</b>	
<b>Partie 01 : Propreté thermique de sol</b>	
<b>Figure. IV. 28 :</b> Courbe d'analyse granulométrique de sable concassé .....	61
<b>Figure .IV. 29 :</b> Courbe d'analyse granulométrique de sable de dune. ....	62
<b>Figure IV. 30 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((20 %) argile + (80 %) sable). ....	63
<b>Figure .IV. 31 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18 %) argile + (74 %) sable + (8 %) ciment.....	64
<b>Figure IV. 32 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18 %) argile + (74 %) sable + (8 %) ciment) et ((20 %) argile + (80 %) sable).....	64
<b>Figure IV. 33 :</b> Thermo gramme de variation de température en fonction de temps pour mesure la diffusivité thermique ((20% °argile + (80%) sable).....	66
<b>Figure IV. 34 :</b> La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable). ....	66
<b>Figure IV. 35 :</b> La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment) .....	67
<b>Figure IV. 36 :</b> La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment) et ((20%) argile + (80%) sable).....	67
<b>Figure IV.37 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique. ....	68
<b>Figure IV. 38 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique. ....	69
<b>Figure IV. 39 :</b> La variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique. ....	69
<b>Figure IV. 40:</b> La variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique. ....	70
<b>Figure .IV. 41 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable). ....	72
<b>Figure. IV. 42 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74 %) sable + (8%) ciment) .....	72
<b>Figure. IV. 43 :</b> La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable +(8%) ciment) et ((20%) argile + (80%)sable). ..	73
<b>Figure IV.44 :</b> La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable). ....	73

<b>Figure IV.45</b> : La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment). .....	74
<b>Figure IV.46</b> : La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment) et ((20%) argile + (80%) sable). .....	74
<b>Figure IV.47</b> : La variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique. ....	75
<b>Figure IV.48</b> : La variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique. ....	76
<b>Figure IV.49</b> : La variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique. ....	76
<b>Figure IV.50</b> : La variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique. ....	77
<b>Figure IV.51</b> : La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable). ....	78
<b>Figure IV.52</b> : La variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment). ....	78
<b>Figure IV.53</b> : La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable). ....	79
<b>Figure IV.54</b> : La variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment). ....	79

#### **Parti 02 : Résultats de la température de sol**

<b>Figure V.1</b> Evolution de température ambiante et température de sol, mois (janvier, Février, Mars). ....	82
<b>Figure V.2</b> Evolution de Température ambiante et Température de sol du mois janvier... ..	82
<b>Figure V.3</b> Evolution de Température ambiante et Température de sol du mois Février . ..	83
<b>Figure V.4</b> Evolution de Température ambiante et Température de sol du mois Mars.....	83
<b>Figure V.5</b> Evolution de Température de sol du 3 mois .....	84
<b>Figure V.6</b> Température du sol prévue et mesurée .....	85

# INTRODUCTION GENERALE

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le terme géothermie se compose deux mots grecs géo (terre) et thermie (chaleur). Par conséquent, l'énergie géothermique est la chaleur extraite de l'intérieur de la Terre, où nous pouvons convertir cette chaleur en vapeur ou en eau chaude utilisée pour chauffer des bâtiments ou produire de l'électricité.

L'énergie thermique est considérée comme une source d'énergie renouvelable car la chaleur est constamment produite dans le sol et l'endroit où l'énergie géothermique est générée se trouve sous les profondeurs de la terre. Dans les profondeurs de la terre, d'énormes quantités de chaleur naturelle sont cachées, provenant de la dissolution des éléments radioactifs, et c'est l'une des alternatives les plus propres, les plus faciles et les moins chères du monde entier.

Selon les connaissances actuelles, la température culminent à 6000 degrés °C dans le noyau et atteignent jusqu'à 1300°C environ dans le manteau supérieur de globe terrestre. le flux géothermique qui parvient à la surface du globe dépasse 40 milliards de KW. Plus de 99% de la masse de notre terre est soumise à des températures dépassant 100 ° C. Le reste, soit 0,1% de la masse ont des températures inférieures à 100 ° C. En moyenne, La température augmente à partir de la surface du sol 3°C environ par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient de géothermique normal. [10]

L'homme a cherché et cherche toujours des sources d'énergie, et la consommation excessive de ces dernières a entraîné des conséquences négatives et des conséquences désastreuses incarnées dans la pollution de la nature, à la fin du XXe siècle, tout le monde est devenu des politiciens économiques voire idéologiques envers les énergies renouvelables, car elles sont à la fois peu coûteuses et renouvelables sans impact négatif.

On peut citer, par exemple, l'énergie solaire ou l'énergie éolienne et l'énergie géothermie.

Le sud de l'Algérie se caractérise par un climat désertique chaud et sec en été en raison de la très forte consommation d'électricité due aux besoins de climatisation.

## **Introduction générale**

---

Pour estimer la température du sol à l'aide de la technologie géothermique, il faut connaître le type de sol et choisir la profondeur à étudier, ce que de nombreux modèles mathématiques permettent.

La température du sol influe principalement sur les performances d'un tel échangeur, le sol à une certaine profondeur devient le principal facteur d'échange thermique qui a lieu entre l'air circulant à l'intérieur de l'échangeur et le milieu environnant.

Cette étude n'a pas encore été étudiée dans notre région - Adrar - mais ils faisaient plutôt de la théorie et de la pratique dans un autre domaine, comme le chercheur BENHAMMOU Mohammed, et afin de fournir les propriétés physiques du sol, nous avons fait ce travail.

Dans ce travail, nous avons mené une étude de recherche biographique pour les travaux effectués afin de suivre l'évolution de la température du sol, puis une étude théorique et expérimentale de la température du sol à une profondeur de 1 m. et de la température de l'air environnant

Notre travail comprend 4 chapitres :

**Chapitres 01 : Recherche Bibliographique**

**Chapitres 02 : Caractérisation thermo physiques de sol**

**Chapitres 03 : Modélisation de transfert de chaleur dans le sol**

**Chapitres 04: Résultats et interprétations**



# Objective du travail (problématique)

---

## Objective du travail (Problématique)

La question de l'utilisation des énergies renouvelables est devenue une bonne alternative car ces énergies sont très économiques, disponibles en permanence et respectueuses de l'environnement. L'une de ces énergies est la géothermie, qui est l'énergie thermique stockée sous la surface de la terre et les profondeurs de la terre contiennent d'énormes quantités de chaleur naturelle. Tout comme la température du sol et le modèle de son changement dans le temps et l'espace ont un impact significatif sur les processus physiques, chimiques et biologiques du système pédologique. La température du sol est donc un facteur important pour influencer le processus d'échange de chaleur afin d'estimer la température du sol.

La région d'Adrar est caractérisée par un climat, chaud et sec en été, froid et sec en hiver, et la température du sol dans cette région diffère du reste des zones où cette étude de recherche a été menée.

La température du sol dépend de la profondeur à laquelle cette température est mesurée, comme les conditions météorologiques sur place telles que le rayonnement solaire.

La détermination de la température au niveau du sol nécessite une connaissance de la nature du sol pour que le sol soit considéré comme un milieu homogène et stable caractérisé par des propriétés stables telles que la conductivité thermique  $\lambda_{sol}$ , la masse volumique (densité molaire)  $\rho_{sol}$  et la capacité thermique  $C_p$ .

Le sol apparaît dans la modélisation comme une masse semi-infinie, les sols ont des potentiels thermiques très importants qui peuvent être utilisés en climatisation.

Les sols à une profondeur spécifique deviennent le principal facteur d'échange de chaleur qui se produit entre l'air en circulation à l'intérieur de l'échangeur et l'environnement environnant.

Pour cette raison, nous voulons étudier l'estimation de la température du sol à une certaine profondeur avec une étude appliquée de notre région en termes de conditions météorologiques, contrairement au reste des chercheurs. Ils faisaient de la théorie et étaient appliqués dans une autre région, et c'est notre objectif de ce travail ?

**Chapitre I :**  
**Recherche Bibliographique**

**Partie I : Les Mode de transfert de chaleur****I.1) Introduction**

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. 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. Les deux notions fondamentales en transferts thermiques sont la température et la chaleur. La température caractérise l'état d'un corps ; la chaleur exprime un échange énergie. Lorsque deux points dans l'espace sont à des températures différentes, il y a systématiquement transfert de chaleur toujours du corps —chaud vers le corps —froid [1].

**I.2) Quelques définitions thermiques:****I.2.1) Température T [2]**

Elle se définit en chaque point d'un corps liquide, solide ou gazeux. C'est une fonction scalaire de l'espace et du temps lorsque le problème en dépend (problème in stationnaire). L'unité de température est le degré Kelvin

### I.2.2) Champ de température [3]

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.

### I.2.3) Gradient de température [3]

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 :

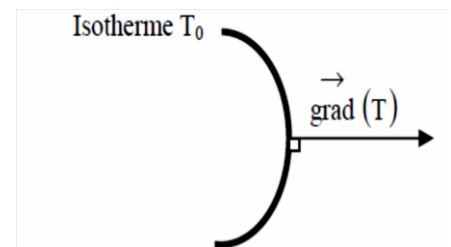


Figure I. 55: Isotherme et gradient thermique [2]

On a :

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

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

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

### I.2.4) Flux thermiques [4]

Le flux thermique est la quantité d'énergie thermique qui traverse une surface isotherme par unité de temps. Le flux s'exprime en watt (W) ou en calorie par seconde ( $\text{cal} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{I.2})$$

### I.2.5) Densité de flux thermique [3]

La densité de flux thermique (ou flux thermique surfacique), c'est le flux thermique par unité de surface. La densité de flux thermique s'exprime en watt par mètre carré ( $W.m^{-2}$ ).

$$\phi = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (I.3)$$

Si la densité de flux est uniforme sur la surface considérée :

$$\phi = \frac{\varphi}{S} \quad (I.4)$$

**I.2.6) Résistance thermique [5,6].**

La résistance thermique d'un matériau caractérise sa capacité à ralentir le transfert de chaleur réalisé par conduction. C'est le rapport entre l'épaisseur du matériau et le coefficient de conductivité thermique.

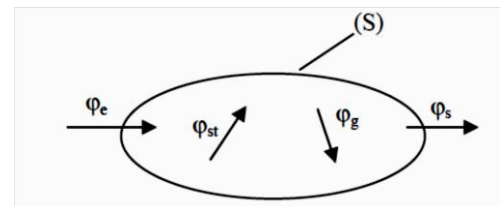
$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (I.5)$$

Plus le R est élevé, plus le matériau ou la paroi est isolante. Elle s'exprime en  $(m^2.K)/W$  ou  $(m^2.0C)/W$

**I.3) Formulation d'un problème de transfert de chaleur [3]**

**I.3.1) Bilan d'énergie**

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



**Figure. I. 56 :** Système et bilan énergétique [3]

- $\phi_{st}$  : flux de chaleur stocké
  - $\phi_g$  : flux de chaleur généré
  - $\phi_e$  : flux de chaleur entrant
  - $\phi_s$  : flux de chaleur sortant
- | dans le système (S)

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st} \quad (I.6)$$

#### I.4) Transfert thermique [5].

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique

L'étude de ces transferts s'effectue dans le cadre de la discipline thermodynamique en s'appuyant sur ces trois modes suivants :

#### I.5) Modes de transfert de chaleur

##### I.5.1) La conduction : [7].

Le phénomène de conduction pure se rencontre essentiellement dans les solides ou les fluides fixes, la propagation de la chaleur à travers un ou plusieurs éléments en contact direct. Le sens du flux thermique va toujours de l'élément le plus chaud vers l'élément le plus froid. La quantité de chaleur qui se propage dans un corps, dans un temps donné, est proportionnelle à la conductivité thermique du matériau et à la différence de température entre les deux faces.

**Exemple** (figure I.4) : propagation de la chaleur dans une paroi entre l'intérieur de bâtiment chauffé et l'extérieur

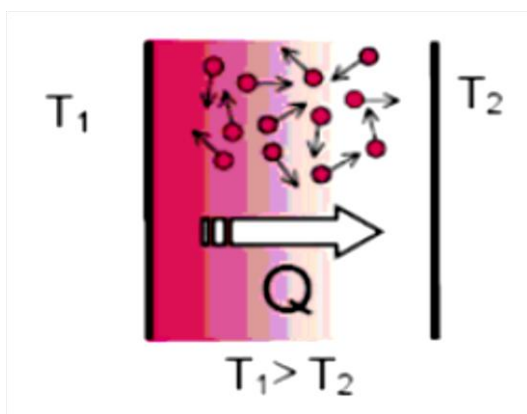


Figure I.57: La Conduction [23]

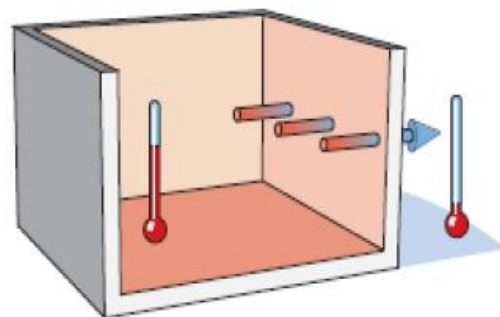


Figure I.58 : La propagation de la chaleur dans une paroi [8]

##### I.5.1.1) Loi de Fourier [4].

La conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse, et obéit à la loi dite de Fourier établie

mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822. La densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température. (La loi de Fourier est une loi semi- empirique)

$$\overline{\varphi} = -\lambda \overline{\text{grad}} (T) \quad (\text{I.7})$$

En forme algébrique :

$$\overline{\varphi} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{I.8})$$

$\overline{\varphi}$  : Flux de chaleur par conduction

$\lambda$  : conductivité thermique ( $\text{w.m}^{-1}\text{C}^{-1}$ )

$S$  : surface d'échange ( $\text{m}^2$ )

$x$  : Variable d'espace ( $\text{m}$ )

### I.5.1.2) Transfert de chaleur par conduction en régime permanent :

#### a) Mur simple [3]

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

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

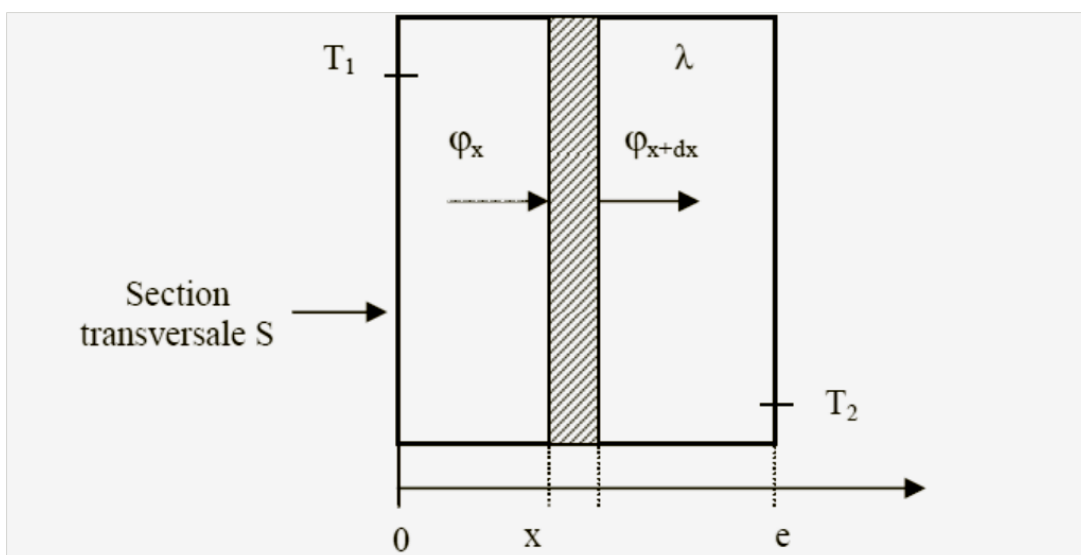


Figure I.59 : Bilan thermique élémentaire sur un mur simple [3]

En effectuant un bilan thermique sur le système (S) constitué par la tranche de mur comprise entre les abscisses  $x$  et  $x + dx$ , il vient :

On à:  $\varnothing_x = \varnothing_{x+dx} \Leftrightarrow -\lambda.s \left(\frac{dt}{dx}\right) x = -\lambda.s \left(\frac{dt}{dx}\right) x + dx$

$$\boxed{T(x) = Ax + B} \quad \left(\frac{dt}{dx}\right) = A \quad \text{et} \quad \text{(I.9)}$$

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

D'où :

$$\left\{ \begin{array}{l} X=0 \Leftrightarrow T(0)=B=T_1 \\ X=e \Leftrightarrow T(e)=A \cdot e + T_1 \end{array} \right. \Leftrightarrow \begin{array}{l} \boxed{B=T_1} \\ \boxed{A = \frac{T_2 - T_1}{e}} \end{array} \quad \text{(I.10)}$$

En remplace(I.10) par la relation (I.9)

Donc :  $\boxed{T(x) = \left(\frac{T_2 - T_1}{e}\right) X + T_1}$  (I.11)

Onà :

$$\boxed{\phi = \lambda \left(\frac{T_1 - T_2}{e}\right)} \quad \phi = -\lambda \left(\frac{T_2 - T_1}{e}\right) \Leftrightarrow$$

Donc :

$$\boxed{\phi = \frac{\lambda \Delta T}{e}} \quad \text{(I.12)}$$

$$S = 1 \text{ m}^2$$

La relation (I.12) peut également se mettre sous la forme :  $\frac{T_1 - T_2}{\frac{e}{\lambda.s}}$

cette relation est analogue à la loi d'Ohm en électricité qui définit l'intensité du courant comme le rapport de la différence de potentiel électrique sur la résistance électrique.

La température apparaît ainsi comme un potentiel thermique et le terme  $\frac{e}{\lambda.s}$  apparaît comme la résistance thermique d'un mur plan d'épaisseur  $e$ , de conductivité thermique  $\lambda$  et de surface latérale  $S$ . On se ramène donc au schéma équivalent représenté sur la figure 6



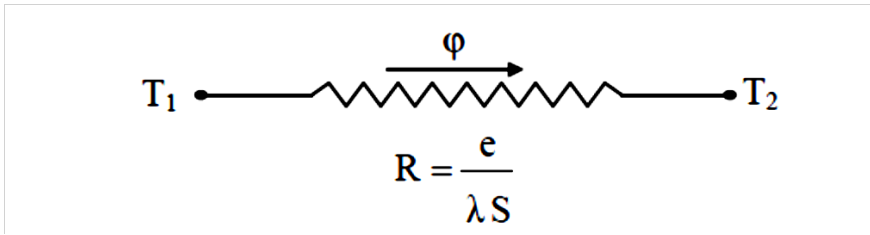


Figure I.60 : schéma électrique équivalent d'un mur simple [3]

b) Mur multicouche [4]

Les interactions continues des facteurs climatiques sur l'enveloppe des bâtiments impliquent des transferts d'énergie à travers ses parois (murs ou toiture) (figure II.8). Ces transferts sont des processus qui se produisent simultanément dans les deux directions. C'est le cas des murs réels constitués de plusieurs couches de matériaux différents et où on ne connaît que les températures  $T_{f1}$  et  $T_{f2}$  des fluides en contact avec les deux faces du mur de surface latérale  $S$  :

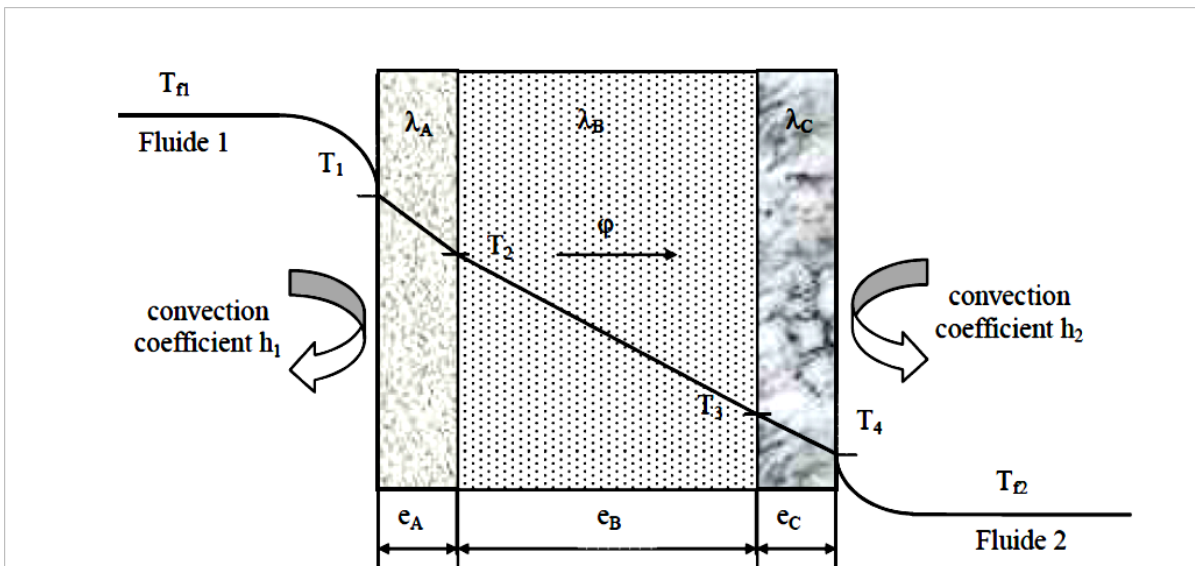


Figure I.61 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouche [4]

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

$$\varphi = h_1 \cdot S (T_{f1} - T_1) = \frac{\lambda_A \cdot S (T_1 - T_2)}{e_A} = \frac{\lambda_B \cdot S (T_2 - T_3)}{e_B} = \frac{\lambda_C \cdot S (T_3 - T_4)}{e_C} = h_2 \cdot S (T_4 - T_{f2}) \quad (I.13)$$

D'où:

$$\text{Fluide 1} \quad (T_{f1} - T_1) = \frac{\varphi}{h_1 \cdot S} = R_{thf1} \cdot \varphi$$

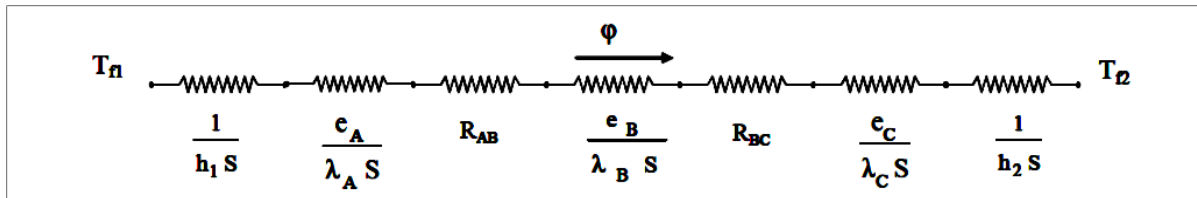
$$\text{Couche 1 } (T_1 - T_2) = \frac{e_A}{\lambda_A \cdot S} \cdot \varphi = R_{th1} \cdot \varphi$$

$$\text{Couche 2 } (T_2 - T_3) = \frac{e_B}{\lambda_B \cdot S} \cdot \varphi = R_{th2} \cdot \varphi$$

$$\text{Couche 3 } (T_3 - T_4) = \frac{e_c}{\lambda_c \cdot S} \cdot \varphi = R_{th3} \cdot \varphi$$

$$\text{Fluide 2 } (T_4 - T_{f2}) = \frac{\varphi}{h_2 \cdot S} = R_{thf2} \cdot \varphi$$

Le schéma électrique équivalent est représenté sur la figure 1.7.



**Figure I.62** : Schéma électrique équivalent d'un mur multicouche [4]

$T_{f1}, T_{f2}$  : température de fluide (ambiance).

$h_1, h_2$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection.

Le flux de chaleur devient :

$$\phi = \left( \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A \cdot S} + R_{AB} + \frac{e_B}{\lambda_B \cdot S} + R_{BC} + \frac{e_c}{\lambda_c \cdot S} + \frac{1}{h_2 S}} \right) \quad (\text{I.14})$$

**Remarques :**

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

c) Mur composite [3]

C'est le cas le plus couramment rencontré dans la réalité où les parois ne sont pas homogènes. Considérons à titre d'exemple un mur de largeur  $L$  constitué d'agglomérés creux (figure 9).

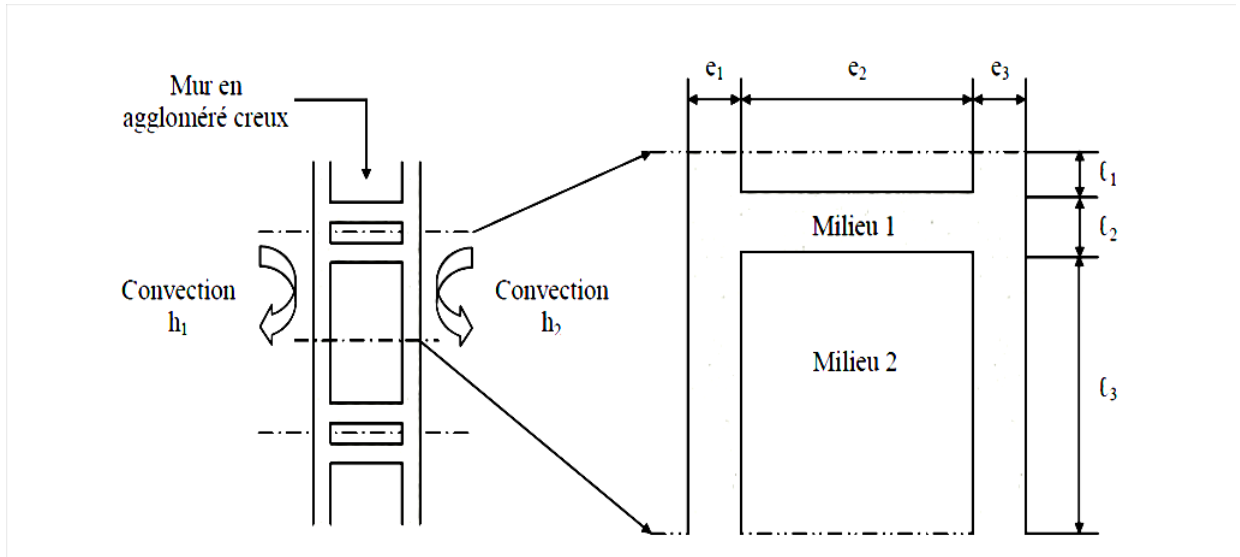


Figure I.63 : Schématisation d'un mur composite [3]

En supposant le transfert unidirectionnel et en tenant compte des axes de symétrie, on peut se ramener au calcul du flux à travers l'élément isolé sur la droite de la figure et calculer la résistance thermique  $R$  équivalente d'une portion de mur de largeur  $L$

et de hauteur  $l = l_1 + l_2 + l_3$  en utilisant les lois d'association des résistances en série et en parallèle par la relation :

Selon le schéma électrique équivalent suivant :

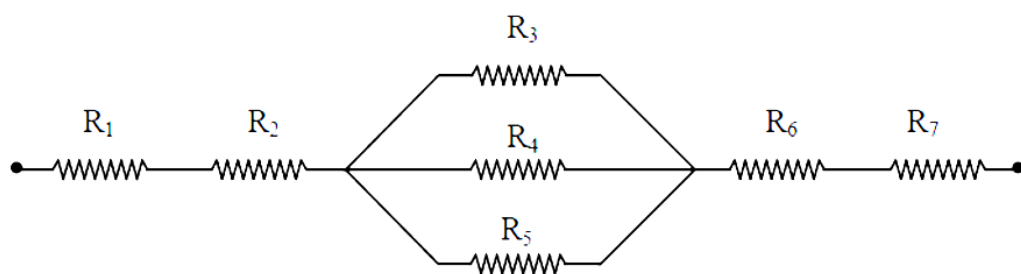


Figure I. 64 : Schéma électrique équivalent du mur composite[3]

$$R = R_1 + R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} + R_6 + R_7 \tag{I.15}$$

Avec :

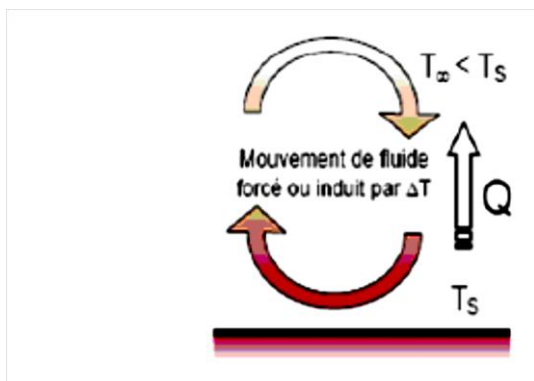
$$R_1 = \frac{1}{h_1.L.l} ; \quad R_2 = \frac{e_1}{\lambda_1.L.l} \quad ; R_3 = \frac{e_2}{\lambda_2.L.l_1} ; R_4 = \frac{e_2}{\lambda_1.L.l_2}$$

$$R_5 = \frac{e_2}{\lambda_2.L.l_3} \quad ; \quad R_6 = \frac{e_3}{\lambda_1.L.l} \quad ; \quad R_7 = \frac{1}{h_2.L.l}$$

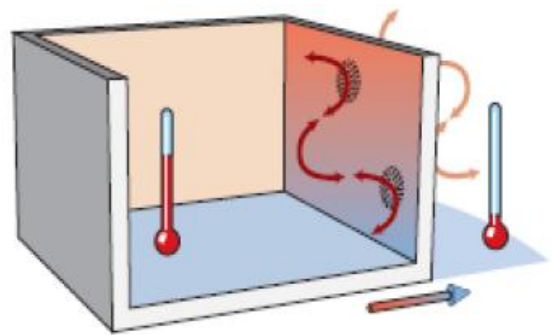
**I.5.2) La Convection [7]**

La convection est le transfert de la chaleur d'un corps solide vers un corps gazeux et inversement. La quantité de chaleur transmise dépend de la différence de température entre les éléments de la vitesse de l'air et de la surface de contact. Par exemple, une paroi exposée à un vent froid et puissant se refroidira très rapidement.

**Exemple (figure 12) :** refroidissement d'un bâtiment sous l'effet du vent



**Figure I.65 :** La convection [23]



**Figure I.66 :** refroidissement d'un bâtiment sous l'effet du vent [8]

**I.5.2.1)- Convection naturelle et forcée [9]**

Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

**I.5.2.1.1)- La convection naturelle ou libre**

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masses volumiques résultant des différences de températures sur les frontières d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

**I.5.2.1.2)- La convection forcée**

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de Chaleur se produisant entre un fluide et une paroi

### I.5.2.2) -La loi de Newton [9]

La loi de Newton donne l'expression de la quantité de chaleur  $dQ$  échangée entre la surface d'un solide à la température  $T_s$  et le fluide à la température  $T_f$ .

#### I.5.2.2.1) -Coefficient d'échange par convection [9]

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

La quantité de chaleur  $dQ$  qui traverse  $dS$  pendant l'intervalle de temps  $dt$ , peut s'écrire :

$$dQ = h \cdot (T_p - T_\infty) \cdot dS \cdot dt \quad (I.16)$$

Où  $h$  est le coefficient d'échange par convection, il s'exprime en  $W/(m^2.K)$ ;

$dQ$  s'exprime en Joules et  $dQ/dt$  en Watts

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur transmis est donné par la relation dite **loi**

**De Newton :**

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot (T_p - T_\infty) \cdot dS \quad (I.17)$$

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer  $h$  qui

Dépend de nombreux paramètres :

- caractéristiques du fluide,
- nature de l'écoulement,
- la température,
- la forme de la surface d'échange,...

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivant:

#### ➤ le nombre de Reynolds [2]

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (I.18)$$

$$\text{On a } \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

#### ➤ Nombre de Nusselt [2]

Ce nombre caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi, il est défini comme suit :

$$\text{- une plaque} \quad \text{Nu} = \frac{h.l}{\lambda} \quad (\text{I.19})$$

$$\text{- Une cylindre} \quad \text{Nu} = \frac{h.D}{\lambda} \quad (\text{I.20})$$

➤ **Nombre de Prandtl [2]**

Caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température.

$$Pr = \frac{\mu.c_p}{\lambda} \quad (\text{I.21})$$

**I.5.3). Le rayonnement [7]**

C'est l'échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi transparent. Les matériaux ont la propriété d'absorber ou d'émettre des photons (ou des quantités d'énergie). Dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques entre deux surfaces (même dans le Vide). Sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière.

il est défini comme suit :

$$\varphi = \sigma \cdot \varepsilon_p (T_E^4 - T_r^4) \quad \text{en Watt} \quad (\text{I.22})$$

Avec :

$\sigma$  : constante de Stephan ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{C}^4$ )

$\varepsilon_p$  : Facteur d'émissions de la surface

S : surface d'échange

**Exemple** (figure I.14) : Le rayonnement est le transfert de chaleur à travers un gaz ou le vide par rayonnement

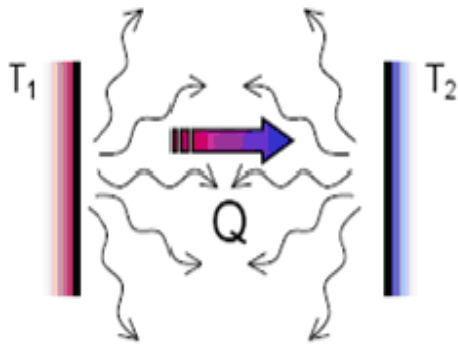


Figure I.67 : le rayonnement [23]

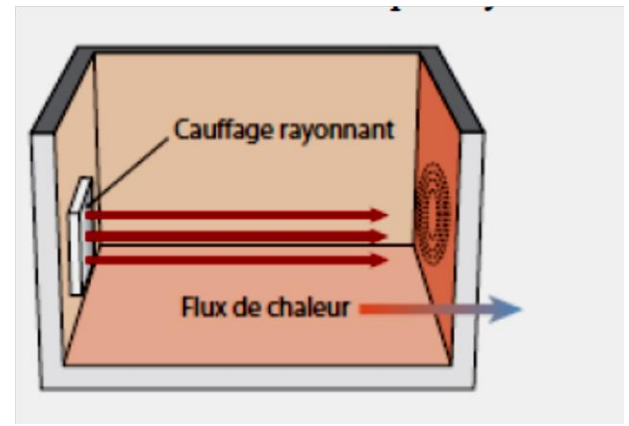


Figure I.68: Transfert de chaleur par rayonnement Infrarouge [8]

Il y a 4 actions possibles du rayonnement sur le matériau :

Flux d'énergie Diffusion  $\Phi_i$

Flux réflexion  $\Phi_r$

Flux transmis  $\Phi_t$

Flux absorbé  $\Phi_a$

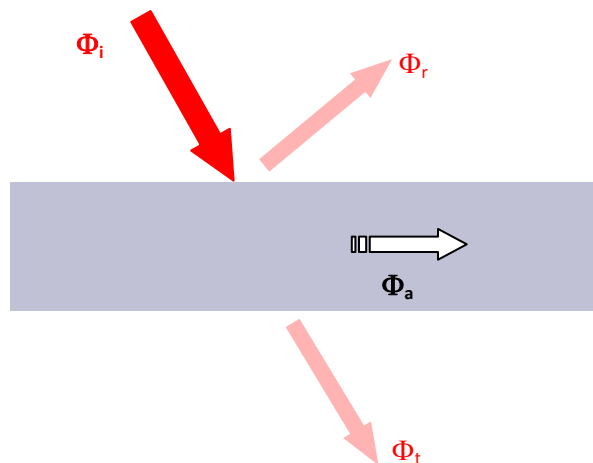


Figure I.15 : exemple de rayonnement [3]

On appelle :

- réflectivité  $r = \Phi_r / \Phi_i$
- absorptivité  $a = \Phi_a / \Phi_i$
- transmittivite  $t = \Phi_t / \Phi_i$

La conservation de l'énergie impose que :  $\Phi_i = \Phi_r + \Phi_t + \Phi_a$

Cette relation peut encore s'écrire :

$$1 = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} = r + t + \alpha \quad (\text{I.23})$$

Avec :

r : coefficient de réflexion

t : coefficient de transmission

$\alpha$  : Coefficient d'absorption

**Exemple** : corps gris à la température TS enfermé dans une enceinte à  $T_\infty$

### I.6). Conclusion

L'étude menée dans ce partie vise à exposer quelques propriétés thermo physique ainsi que les transferts thermique entre les différents matériaux qui manifesté en trois mode, qu'ils sont la conduction qui est généralement présenté dans la matière, la convection entre les fluide et le rayonnement.

## Partie II : Recherche bibliographiques sur les transferts de chaleur dans le sol

### II .1). Quelque travaux sur les transferts de la chaleur dans les sols

Cette étude de recherche bibliographique présente une revue synthétisée des Études théoriques, analytiques et numériques, ainsi qu'expérimentale sur la géothermie. Afin d'élargir nos connaissances dans ce domaine, nous avons fait une lecture de différentes études d'autres auteurs.

Les travaux menés rencontrés dans la littérature en relation avec notre travail sont résumés comme suit :

#### II .1.1). M. Benhammou et B. Draoui [10]

Dans ce travail est étudiée l'influence de la nature du sol sur la température en profondeur du sol, ainsi que sur le déphasage et la profondeur de pénétration du signal de température.

Dans ce contexte, est réalisée cette étude sous les conditions météorologiques de la ville d'Adrar. Les résultats obtenus nous indiquent que la profondeur de pénétration annuelle de même que le déphasage sont beaucoup influencés par la nature du sol, alors que la température moyenne de la surface du sol y est insensible



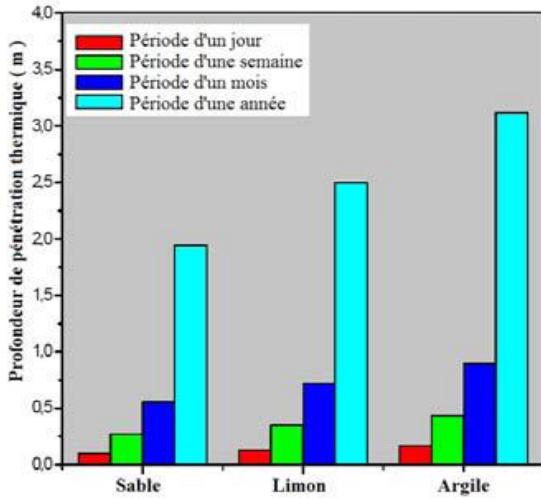


Figure II.70: Profondeur de pénétration thermique en fonction de la nature du sol [10]

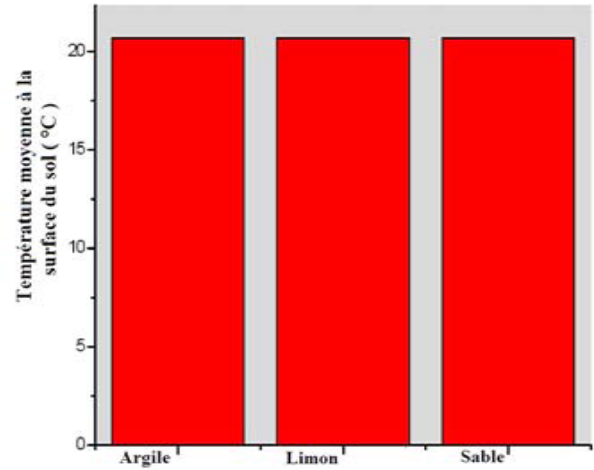


Figure II.69: température moyenne à la surface du sol suivant la nature de sol [10]

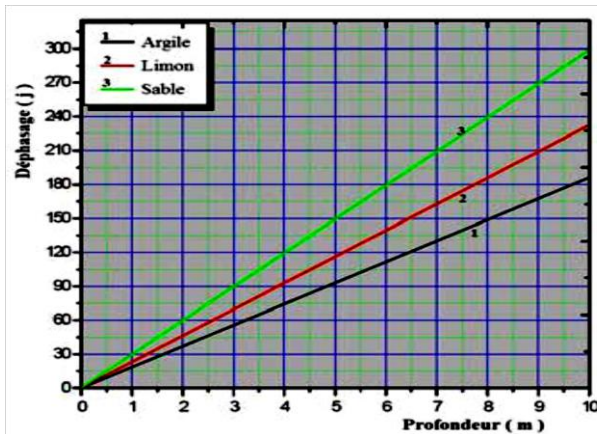


Figure II.72: Variation du déphasage en fonction de la profondeur dans le sol [10]

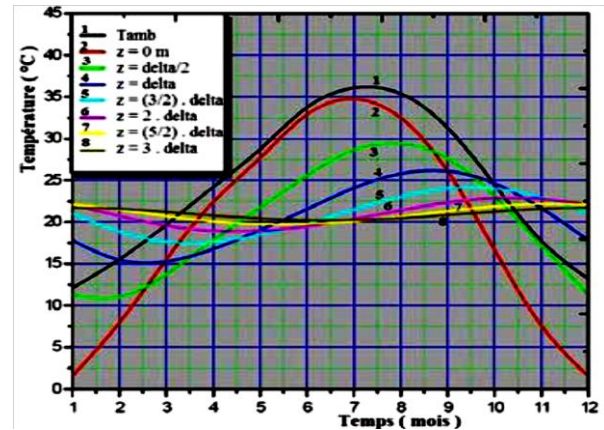


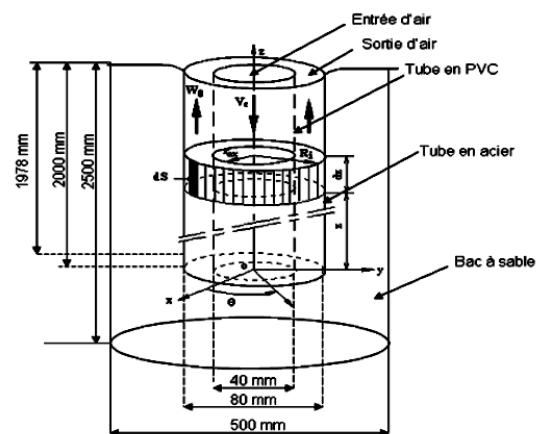
Figure II.71: Variation de température en fonction de la profondeur dans le sol [10]

Quant à l'évolution du déphasage selon la profondeur, les résultats illustrés dans la figure (II.3) nous indiquent que plus on s'enfonce dans le sol, plus le déphasage devient important. Afin que les résultats soient indépendants de la nature du sol, on a pris, dans la figure (II.4) comme unité de longueur la profondeur de pénétration annuelle. L'évolution de la température du sol au cours d'une année en fonction de la profondeur dans le sol montre que l'amplitude du signal

de température décroît quand la profondeur augmente et au-delà d'une distance valant deux fois la profondeur de pénétration, la température du sol n'a plus la forme d'une sinusoïde et se stabilise autour d'une certaine valeur.

### II .1.2).T.Mnasri et al [11]

Ils ont fait la modélisation numérique d'un échangeur bi-tubulaire enfoui air-sol. Cet échangeur a pour rôle de stocker et de récupérer de l'énergie dans le sol par chaleur sensible. La complexité de la géométrie (II.5) a conduit à développer un modèle basé sur deux méthodes de résolution par volumes finis et éléments finis couplés à la frontière. Ce travail a permis de proposer une corrélation correcte pour le coefficient de transfert  $h(z,t)$ . Les résultats obtenus montrent que le coefficient  $h$  en est indépendant de la température d'entrée (pour un faible écart de température où  $pf$  demeure constant), ils ont vérifié que le coefficient d'échange par convection est indépendant de la durée de chauffe pour des écarts de températures du fluide faible ( $\Delta T/T$  petit).



**Figure II.73:** section de l'échangeur [11]

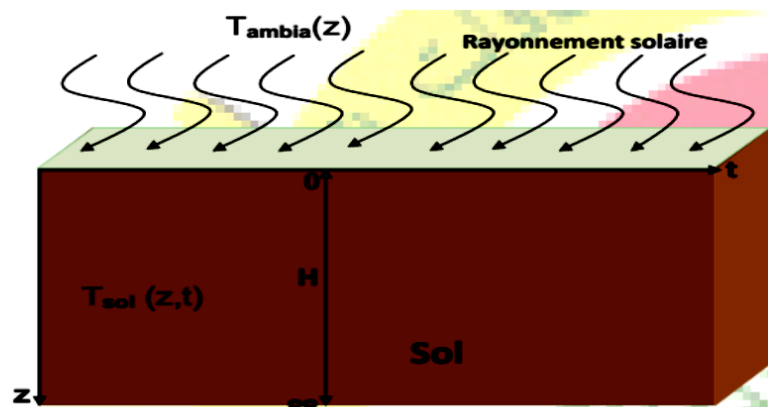
### II .1.3).M.S. Guellouz et al [12]

Ont fait une étude de faisabilité de la climatisation et du chauffage par géothermie de surface en Tunisie. Elle consiste en la modélisation de la température du sol à différentes profondeurs pour différents types de sols et différentes localités tunisiennes. Le modèle employé est développé à partir de l'équation in stationnaire de la chaleur pour un milieu homogène et utilise les températures ambiantes journalières durant une année représentative pour les localités considérées. Ils ont trouvé la température du sol en fonction de  $t$  et de  $z$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$T(z, t) = T_{\text{moy}} + A \exp(-z/d) \cos(w(t - t_0) - z/d) \quad (\text{II.1})$$

Les résultats de l'étude ont montré la faisabilité de la climatisation par géothermie de surface pour les localités tunisiennes et les types de sol considérés. Cependant, le chauffage par géothermie de surface n'est possible que dans les villes de Nafta et Médenine. Pour le reste des Localités, la géothermie peut fournir un préchauffage important représentant entre 70 et 90 % de l'énergie de chauffage.

Les localités étudiées peuvent être divisées en deux groupes selon leur potentiel pour la climatisation et le chauffage par géothermie de surface : le groupe du littoral comprenant Bizerte, Tunis, Sfax, et Gabés; et le groupe de l'intérieur, offrant un meilleur potentiel que le précédent et incluant Siliana, Jendouba, Kairouan, Gafsa, Nafta et Médenine.



**Figure II. 74:** Schéma du transfert de chaleur dans le sol [12]

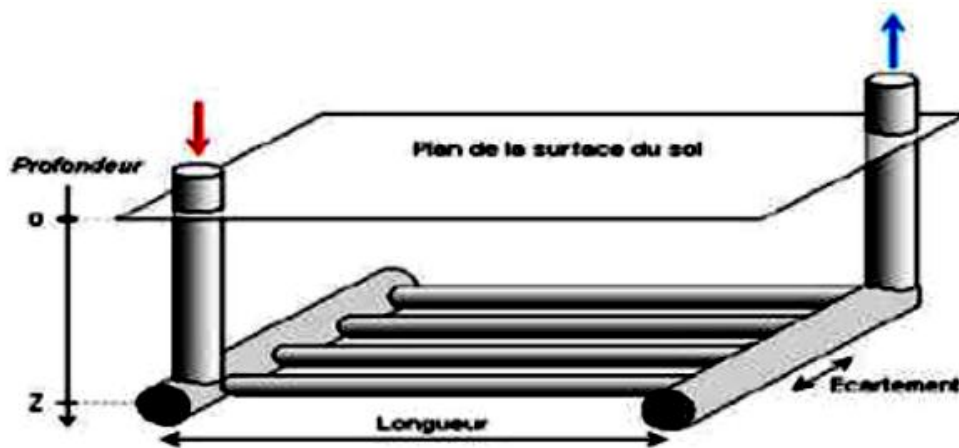
#### II .1.4).S. Ouali et al [13]

Ont étudié des ressources géothermiques du Sud algérien pour déterminer la cartographie du gradient de température du Sud de l'Algérie afin d'y identifier les régions d'intérêt. Les résultats sont présentés sous forme de cartes et de graphes de gradient. Ces résultats montrent que le Sud algérien est caractérisé dans son ensemble par un gradient géothermique moyen 3°C/100m. La partie Est montre une anomalie thermique qui est de 3 à 4°C/100m. Le bassin de Béchar est anormalement chaud avec un gradient dépassant les 7°C/100m.

A travers la carte réalisée, il convient de conclure que les conditions thermiques sont réunies dans le sud algérien pour avoir un important potentiel géothermique.

**II .1.5).En 2014 Yacine AHMOUDA [14]**

Fait une étude intéressante au rafraîchissement par la géothermie. Cette technique très simple et moins chère n'est pas pratiquée chez nous. Elle réduit la consommation des hydrocarbures en limitant la pollution ; Cette technique renouvelable exploite l'énergie thermique du sol dans un échangeur enterré dit puits canadien ou puits provençal utilisé pour chauffer ou rafraîchir l'eau qui circule dans des tubes enterrés à quelques mètres de profondeur

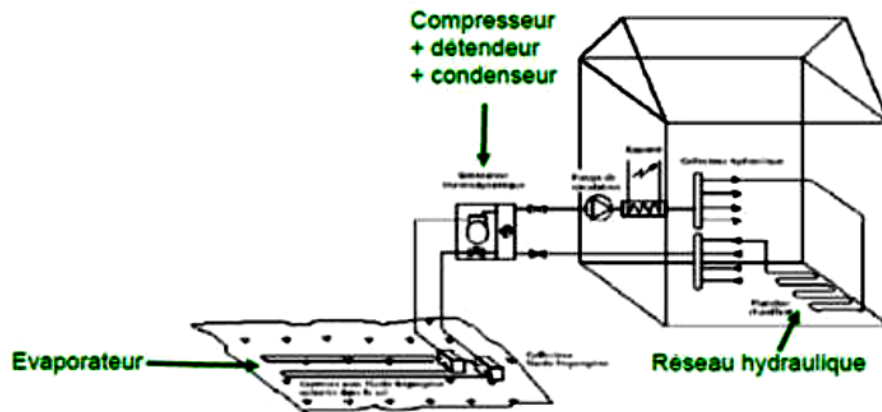


**Figure II.75:** Géométrie de l'échangeur eau-sol modélisé [14]

**II .1.6).En 2016-2017 Karim Nahi [15]**

ont étudié une application de la simulation numérique dans l'étude technique de la géothermie par nappes horizontales de tuyauterie, appliquée à un projet immobilier mixte de commerces, bureaux et hôtel, ce travail qui a pour objectif le dimensionnement d'une pompe à chaleur géothermique pour répondre à une partie des besoins thermiques (chauffage et refroidissement) d'un futur bâtiment mixte de commerces, bureaux et hôtel situé à Luxembourg ville.

Au départ nous parlons des pompes à chaleur et de l'intérêt de les coupler au sol, en effet le sol présente l'avantage d'être une source de chaleur à température stable. Et nous présentons aussi quelques exemples de configurations existantes des systèmes géothermiques.



**Figure II.76:** Exemple de pompe a chaleur sol/eau [15]

### II .1.7).ORFI et COLI [16]

Ont présenté les effets de l'inclinaison et de l'intensité du flux thermique sur le développement de l'écoulement et la distribution des coefficients de transfert thermique.

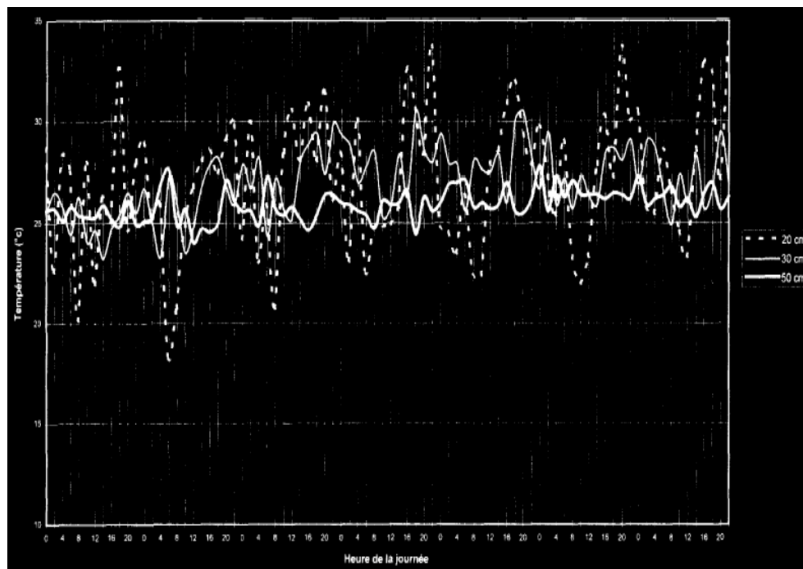
### II .1.8).Modèle de Stéphane THIERS [17]

S'intéresse aux bilans énergétiques et environnementaux de bâtiment à énergie positive La thèse de doctorat de Stéphane Thiers (2008) ; est aussi considérée comme une référence principale dans le domaine des échangeurs géothermiques. L'auteur a réalisé un modèle mathématique très avancé qui donne la distribution instantanée de la température du sol et à toute profondeur, en prenant en considération le comportement thermique du sol, ce modèle est l'un des meilleurs modèles qui simule parfaitement cette température. Pour le modèle numérique de l'échangeur, l'auteur a choisie la méthode des différences finies pour l'appliquer sur un modèle comportant 80 mailles pour un échangeur composé de quatre tubes. Pour la résolution, l'auteur a utilisé un outil informatique spécifique (logiciel de simulation thermique multi zones qui a été développé au sein du Centre Energétique et Procédés de L'école des Mines de Paris dit « COMFIE »).

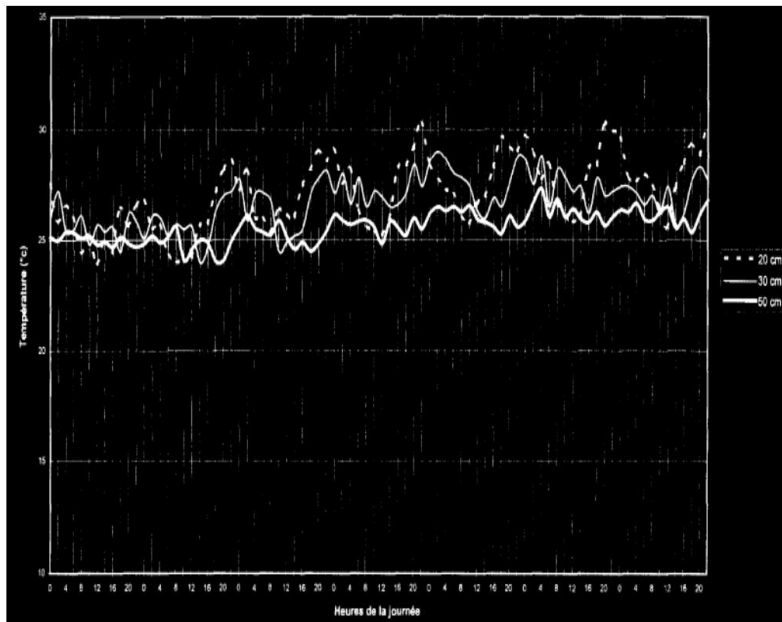
### II.1.9).Mohammed Rhachi et al [18]

Etude d'une nouvelle technique de mesure des températures dans le sol La mesure des températures dans le sol est généralement réalisée en implantant des sondes à différentes profondeurs. Pour la mise en place de ces sondes dans le sol et afin de résister aux contraintes de cisaillement, des piquets rigides servent de supports. L'utilisation de ces piquets, généralement en métal donne très conducteurs, induit certaines perturbations thermiques au niveau des différentes couches du sol. Pour minimiser ce genre de perturbations, une étude qualitative d'une nouvelle technique de mesure de la température est présentée. Le principe de

cette technique consiste à remplacer le piquet de la technique classique par une tige fendue longitudinalement, amovible, pouvant être retirée après la mise en place des sondes. Mis à part l'aspect thermique, des tests mécaniques sur l'efficacité du dispositif expérimental de la nouvelle technique sont réalisés. Une étude comparative entre les deux techniques a été menée afin de relever l'influence des piquets, généralement utilisés par la technique classique, sur les résultats de mesures. L'étude s'intéresse particulièrement aux profondeurs de 20, 30 et 50 cm, et met en évidence les écarts en température et en déphasage enregistrés par les deux techniques



**Figure II.77:** Relevés des températures par la technique classique [18]



**Figure II.78:** Relevés des températures par la nouvelle technique [18]

Il est remarqué aussi que les températures mesurées par la technique classique sont, durant la journée, généralement supérieure à celles relevées par la technique nouvelle (présence d'ensoleillement) alors que durant la nuit, les températures mesurées par la TC sont inférieures à celles de la TN. Ces écarts de températures montrent bien l'influence du piquet sur les valeurs des températures mesurées (l'influence des caractéristiques thermo physiques du piquet sur les apports de chaleur à différents profondeurs dans le sol)

## II .2).Conclusion

A partir de cette étude bibliographique concernant quelques travaux qu'on a pu rencontrer dans la littérature, on conclut que l'estimation de la température en différent de profondeur est un domaine de recherche très large et approfondi soit de point de vue théorique ou expérimental. Partant des constatations et observations faites après un passage en revue à travers une brève étude bibliographique, il a été jugé utile d'entamer une étude numérique et expérimentale basée sur la estimation de la température en différent de profondeur, en ayant pour objectif de déterminer l'évolution de la température du sol.

## Chapitre II

Caractérisation thermo physiques de sol



## II.1). Introduction

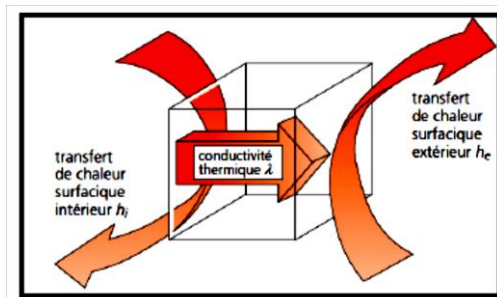
L'étude des propriétés thermiques des matériaux occupe une place très importante dans le cadre de la recherche sur les économies d'énergie dans l'habitat. On s'intéresse particulièrement aux problèmes d'isolation qui sont liés directement à la conductivité thermique des matériaux.

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la conductivité et la diffusivité thermique en régime permanent tel que la méthode de la plaque chaude gardée, et en régime transitoire comme la méthode fil chaude et méthode flash.

## II .2). Les propriétés thermiques

### II.2.1). Conductivité thermique ( $\lambda$ ) [19]

La conductivité thermique est le flux de chaleur traversant un matériau d'épaisseur un mètre, pour une différence de température de 1K entre les deux faces entrante et sortante. Elle s'exprime en  $w \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .sa valeur permet de quantifier le pouvoir du matériau à conduire la chaleur (en termes d'amplitude).



**Figure II.79 :** Représentation de flux thermique [19]

### II.2.2). Diffusivité thermique ( $\alpha$ ) [19]

La diffusivité thermique est une propriété dynamique du matériau car elle intervient dans Les transferts en régime transitoire de température .elle caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre la chaleur(en terme de vitesse) elle s'exprime en  $m^2/s$ .

Ce paramètre est directement contenu dans l'équation de la chaleur simplifiée :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.3). la capacité thermique (c) [19]

La capacité thermique traduit l'aptitude du matériau à absorber une quantité de chaleur (Q) et à s'échauffer (élévation de sa température) de  $\Delta T$  :

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (\text{II.2})$$

Dans la pratique, et pour définir une propriété du matériau Independent de sa masse (m). On utilise la capacité thermique massique  $c$  qui s'exprime en  $J.K^{-1}. Kg^{-1}$

$$C = \frac{c}{m} \quad (\text{II.3})$$

cette grandeur était anciennement appelée chaleur spécifique ou capacité calorifique pour la mesure, différents processus thermodynamiques peuvent être mis en œuvre :les plus usuels sont l'échauffement du matériau à pression constante : mesure de **CP** (capacité thermique à pression constante) et l'échauffement à volume constant : mesure de **Cv** (capacité thermique à volume constant).ces deux grandeurs obtenues différemment sont reliées entre elles par le volume molaire  $v$  le coefficient d'expansion volumique  $\alpha$  et le coefficient de compressibilité isotherme  $\beta$  pour le matériaux considéré à la température  $T$  :

$$C_P - C_V = \frac{\alpha^2 v T}{\beta} \quad (\text{II.4})$$

### II.3). mesures la conductivité thermique [20]

La mesure de la conductivité thermique est d'une grande importance quand on désire étudier les échanges de chaleur dans un système. Un grand nombre de méthodes ont été déjà utilisées pour déterminer la conductivité thermique de différents matériaux. Les méthodes de mesure la conductivité thermique peuvent être classée en deux grandes catégories : les méthodes à état stable et les méthodes à état transitoires.

#### II.3.1). Méthode en régime permanent

##### II.3.1.1) Méthode de la plaque chaude gardée [20]

Le principe de montage expérimental consiste à maintenir une différence de température entre deux plaques A et B, planes, parallèles et portées respectivement aux températures constantes  $T_A$  et  $T_B$ . Un échantillon du matériau à étudier, solide faiblement conducteur, est place entre les deux plaques. (Voir la figure II.80 )

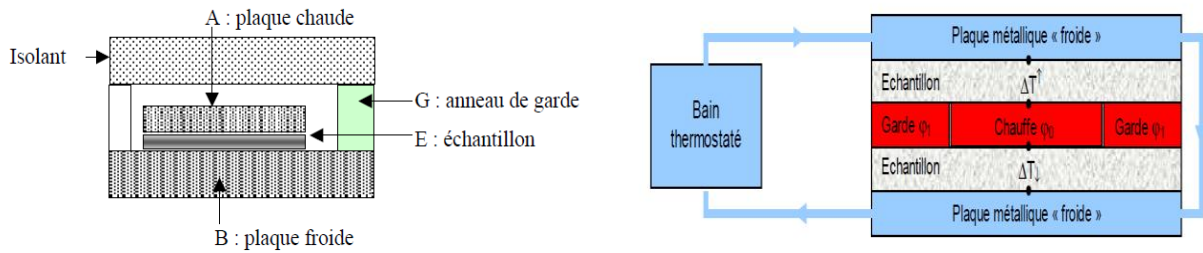


Figure II.2 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude garée [20]

La conductivité thermique s'en déduit par : 
$$\lambda = \frac{\phi \cdot e_0}{S \cdot (\Delta T \uparrow + \Delta T \downarrow)} \tag{II.5}$$

Où S est la surface de la plaque chauffante.

II.3.1.2). Méthode de boîte [21]

La méthode des boîtes est une méthode de régime permanent : il s'agit de réaliser un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers un échantillon de matériau à tester, en effectuant les mesures après obtention du régime permanent.

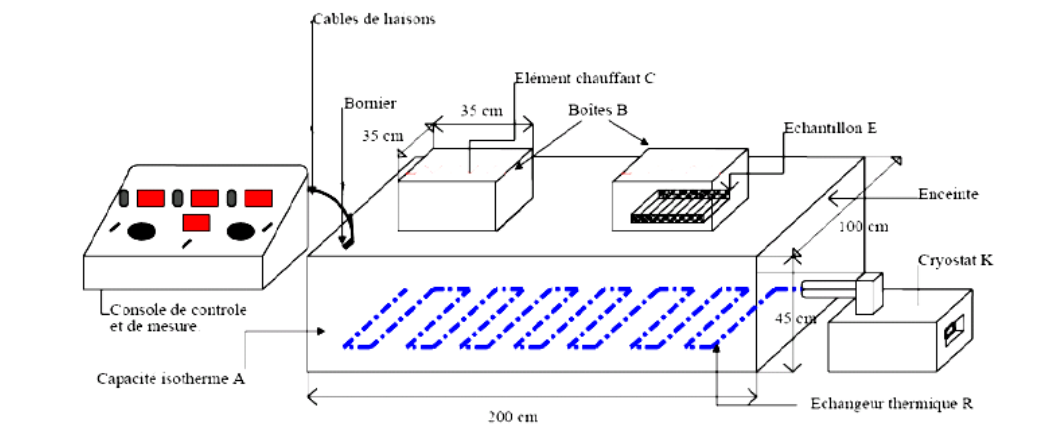


Figure II. 81 : Vue générale de la cellule de mesure " la méthode des boîtes "[21]

- Le volume A maintenu à température faible grâce à un échangeur R situé à sa base, parcouru par de l'eau glycolée refroidie (environ -5°C) par un cryostat K. ce volume A est fortement isolé au moyen de l'isolant styrodur.

- Des boîtes chaudes, B1, revêtues, sur la partie interne de leur face supérieure, d'un film chauffant C dont l'émission de chaleur peut être contrôlée à l'aide d'un rhéostat.

L'échantillon E du matériau à tester est situé entre la boîte B1 et la capacité A de telle manière que les flux latéraux soient négligeables.

En refroidissant A et en chauffant B1, on crée un gradient de température entre B1 et A de telle manière que les échanges convectifs sur les faces de E soient nuls.

On fait en sorte, par réglage de l'émission de chaleur, que la température à l'intérieure de B1 :  $T_B$  soit légèrement supérieure à la température extérieure  $T_a$  (température de la salle d'expérimentation). On relève les températures sur les deux faces de l'échantillon (au centre de ceux-ci) :  $T_c$  et  $T_f$  (faces chaude et froide).

En régime permanent, on obtient deux ou trois heures après le début de l'expérience, on a :

$$q = \frac{\lambda}{e} (T_c - T_f) \times A + q_1 \tag{II.6}$$

$q$  : Puissance émise par C

$q_1$  : Pertes latérales dans  $B_1$

$\lambda$  : Conductivité thermique de l'échantillon E

$e$  : Epaisseur de l'échantillon

$A$  : Aire des faces de l'échantillon

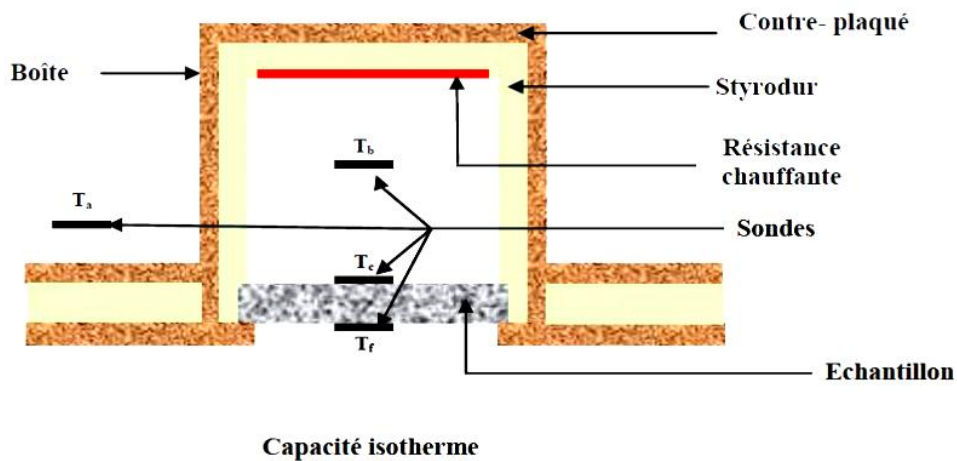


Figure. II.4 : Boite de mesure de la conductivité thermique [22]

$q_1$  : est en général faible mais non nul, car on ne peut obtenir exactement  $T_B = T_a$ , on calcule  $q_1$  par la formule :

$$q_1 = C (T_B - T_a) \tag{II.7}$$

C : est une constant de l'appareil qui est donnée par le fabricant, mais peut être retrouvée aisément par une seule manipulation. La conductivité  $\lambda$  se réduit de l'égalité (II.2).  
 - La boîte B1 peut être remplacée par la boîte B2 de même dimension. A sa partie supérieure est intégrée une lampe, on envoie un flux thermique pendant quelques secondes sur la face supérieure de l'échantillon, la durée et l'intensité dépendent de l'épaisseur et de la nature du matériau.

Par relève du thermo gramme sur la face froide et à l'aide de formules établis à partir de la modélisation du transfert de chaleur, on atteint la diffusivité thermique  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \tag{II.8}$$

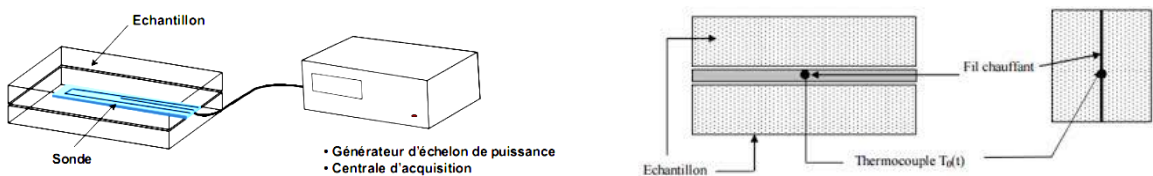
La connaissance de  $\lambda$ , la masse volumique et la diffusivité  $\alpha$  permet de déduire la valeur de la chaleur massique.

**II.3.2). Méthode en régime transitoire [20]**

Ces méthodes sont le plus souvent utilisées pour des matériaux biologiques qui sont généralement hétérogènes et ont un taux d'humidité élevé.

**II.3.2.1). La méthode du fil chaud [23]**

Ce méthode permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau à partir de L'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif. La sonde, constituée du fil résistif et du thermocouple dans un support isolant en kapton, est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser (figure II.5)



**Figure II. 5:** le principe de mesure à laide d'un fil chaude [23]

La conductivité s'obtient par la résolution de l'équation de la chaleur en géométrie Cylindrique infinie

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{II.9}$$

Avec :  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$

Conditions aux limites

Echantillon « initial » isotherme ;  $\forall (r, t) \leq 0, \Delta T(r, t) = T(r, t) - T_0$

$\forall T \geq 0, r=0, \lim(r \frac{\partial T}{\partial r}) = -\frac{\phi}{2\pi\lambda}$  Puissance injectée connue ;

Milieu semi-infini ;  $r \rightarrow \infty, \forall T \geq 0, \lim_{r \rightarrow \infty} (\Delta T(r, t)) = 0$

Donc :

$$\Delta T(r, t) = \frac{\phi}{4\pi\lambda} \text{Ei}\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \tag{II.10}$$

Avec :

$$\text{Ei}(\xi) = \int_{\xi}^{\infty} \left(\frac{e^{-x}}{x}\right) dx = -\gamma - \text{lim}(\xi) + \xi + \text{O}(\xi^2), \text{ ou } \xi = \frac{r^2}{4\alpha t} \tag{II.11}$$

A l'interface échantillon / sonde (de rayon  $R_s$ )

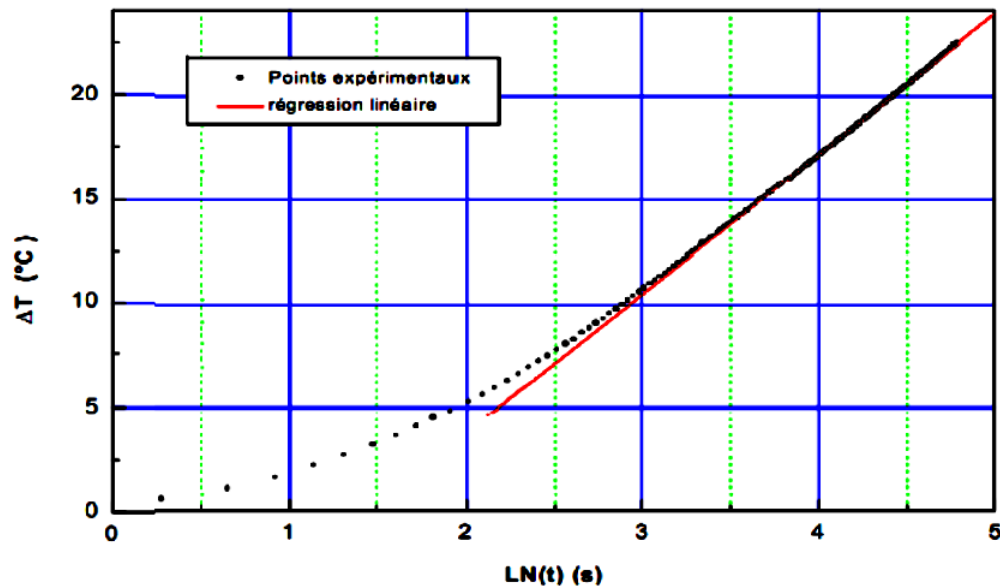
$$\Delta T(R_s, t) = \frac{\phi}{4\pi\lambda} \left( \ln\left(\frac{4\alpha t}{R_s^2 e^{\gamma}}\right) + \left(\frac{R_s^2}{4\alpha t}\right) + \text{O}\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \right) \tag{II.12}$$

Asymptote linéaire aux temps « longs »,

$$\Delta T(R_s, t) = \frac{\phi}{4\pi\lambda} \ln(t) + \left(\frac{\phi}{4\pi\lambda}\right) \ln\left(\frac{4\alpha t}{R_s^2 e^{\lambda}}\right)$$

$\lambda$  estimée à partir de la pente ( $\alpha$ ) du thermo gramme aux temps longs

$$\Delta T(t) = \alpha \ln(t) + \beta \text{ et } \lambda = \frac{\phi}{4\pi\alpha} \tag{II.13}$$



**Figure II.6:**Diagramme d'estimation de  $\lambda$  de la méthode de fil chaud [23]

### II.3.2.2). Méthode Laser Flash [23]

Pour les températures supérieures à la température ambiante, il devient de plus en plus difficile d'éliminer ou de tenir compte des pertes thermiques par radiation (conditions adiabatiques), et l'utilisation de la technique à l'état stationnaire présentée ci-dessus n'est pas recommandée. Une solution est de mesurer la diffusivité thermique en lieu et place de la Conductivité thermique. Ces deux grandeurs sont en effet liées par la relation :

$$\lambda(t) = \alpha(t)d(t)C_p(t) \quad (\text{II.14})$$

Où

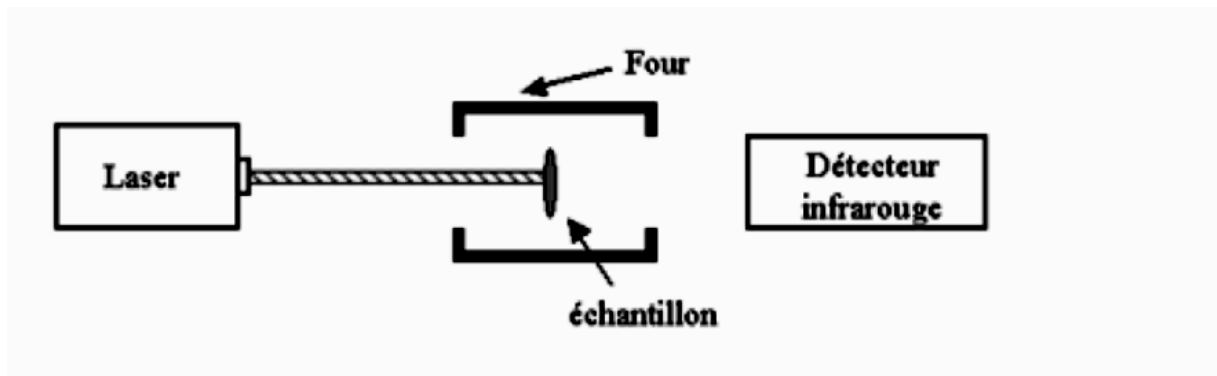
$\lambda(T)$  : Est la conductivité thermique en  $\text{W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$\alpha(T)$  : Est la diffusivité thermique en  $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$

$d(T)$  : Est la masse spécifique en  $\text{g.cm}^{-3}$

$C_p(T)$  : Est la chaleur spécifique en  $\text{J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Si l'on suppose que la masse spécifique ne varie pas avec la température, il suffit de mesurer la diffusivité thermique et la chaleur spécifique pour obtenir une mesure de la conductivité thermique à haute température.



**Figure II.7** : principe de méthode laser flash [23]

Un échantillon cylindrique dont l'épaisseur ( $e$ ) est nettement plus faible que son diamètre est placé dans un porte-échantillon qui se trouve à l'intérieur d'un four maintenu à température constante. Une de ses faces est illuminée par des pulses (de l'ordre de la milliseconde) émis par un laser, ce qui assure un chauffage uniforme de la face avant. La température de la face arrière est mesurée, en fonction du temps, à l'aide d'un capteur de mesure infrarouge (figure II.7). En l'absence de pertes thermiques de l'échantillon, la température devrait augmenter de manière monotone. Dans une situation réelle, l'enregistreur mesurera un pic de température suivi d'un retour à la température du four. Le temps ( $t$ ) nécessaire pour que la face arrière atteigne la moitié de la température de pic (par rapport à la température du four), permet de déterminer la diffusivité thermique suivant:

$$\alpha = \frac{1.37e^2}{t\pi^2} \quad (\text{II.15})$$



**II.3.2.3). Méthode flash [24]**

La détermination de la conductivité thermique par méthode de flash à cette appareil.



**Figure II.8:**Schéma de principe de la méthode flash

**a)-Principe de la mesure:**

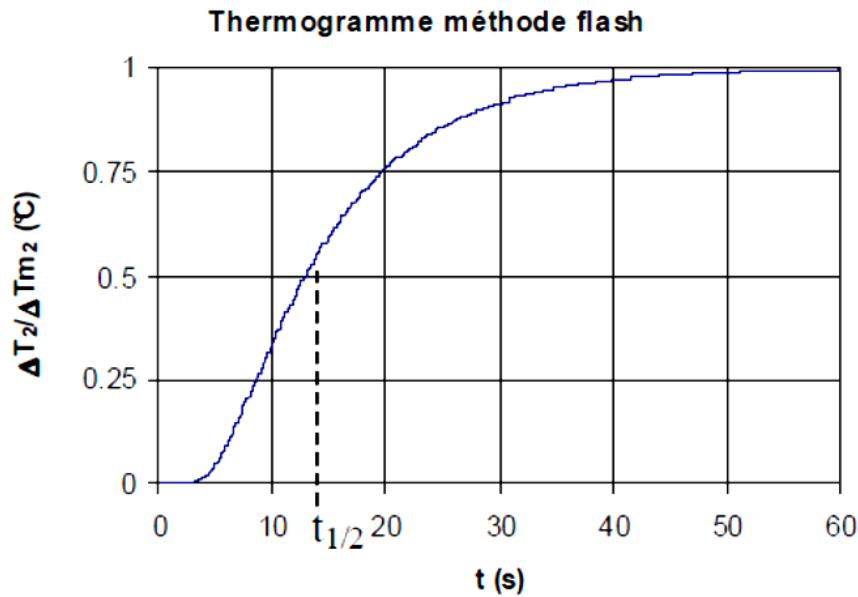
Les échantillons des différents matériaux à l'état sec sont taillés à des formes parallélépipédiques, avec une des dimensions (hauteur) très faible par rapport aux autres dimensions. Les mesures de la conductivité ( $\lambda$ ) sont obtenues grâce à l'application d'un flux de chaleur de 40w, émis par une résistance électrique (effet Joule). Le rayonnement thermique est appliqué sur la face avant (T1), tandis que la température de la face arrière (T2) est maintenue constante par refroidissement à l'aide d'un régulateur de température.

A cause de la faible épaisseur d'un art et l'isolation des côtés de l'échantillon, nous avons considéré que la propagation de la chaleur est unidimensionnelle s'effectuant, de la face avant vers la face arrière, selon l'épaisseur (d) seulement. Les mesures des évolutions en fonction du temps des températures T1, T2 de chaque échantillon sont obtenues par des thermocouples de surface, qui sont en contact avec les deux faces.

**II.3.2.4). Méthode de Parker [25]**

Cette méthode ne s'applique que dans le cas où la durée de l'éclair de flash est très petite et où les pertes thermiques sur les différentes faces de l'échantillon sont négligeables. La diffusivité thermique est calculée à partir du temps  $t_{1/2}$  nécessaire pour la température T2(t) de la face arrière soit égale à la moitié de la température maximale atteinte T2m :

$$\alpha = \frac{1.38e^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (\text{II.16})$$



**Figure II.9 :** Courbe théorique de la température réduite de la face arrière[25]

**II.3.2.5). Méthode des temps partiels [25]**

Cette méthode prend en compte les pertes thermiques mais ne s’applique toutefois que dans le cas où la durée de l’éclair de flash est très petite .Son principe repose sur l’utilisation de quatre points du thermo gramme représentés sur la figure (II.10)

La diffusivité thermique peut être obtenue par les formules suivantes (Degiovanni, 1977) :

$$a = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left( 1,131 - 1,222 \frac{t_2}{t_5} \right) \tag{II.17}$$

$$a = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left( 0,954 - 1,581 \frac{t_2}{t_5} + 0,558 \left( \frac{t_1}{t_5} \right)^2 \right) \tag{II.18}$$

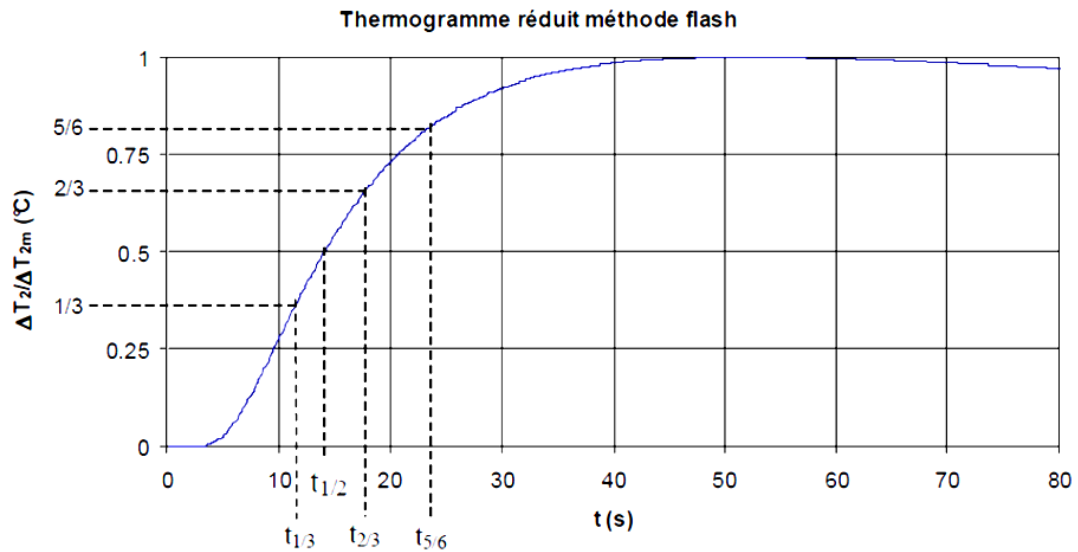
$$a = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left( 0,818 - 1,708 \frac{t_1}{t_5} + 0,885 \left( \frac{t_1}{t_5} \right)^2 \right) \tag{II.19}$$

Où :

e : est l’épaisseur de l’échantillon en m

tp est le temps écoulé depuis l’excitation pour que la température la face arrière s’élève de p fois son élévation maximale au cours de l’expérience (voir figure II.10).

Thermo                      gramme                      réduit                      méthode                      flash                      [25]



**Figure II.10** : Courbe théorique de la température réduite de la face arrière [23]

On retient en général une moyenne des trois valeurs obtenues. Cette méthode est plus précise que la méthode de Parker car elle prend en compte les pertes convectives mais présente l'inconvénient de n'utiliser qu'un nombre très réduit de points du thermo gramme.

### II.3.2.6). Calorimètre à chute [19]

Le principe du banc de référence du LNE est celui d'un calorimètre à chute. C'est une mesure indirecte de  $C_p$  par la mesure absolue du flux de chaleur fournie ou absorbée par l'échantillon, de masse  $m$  pour équilibrer sa température avec le milieu ambiant lors d'une variation de température de ce milieu. Cette mesure se fait à l'aide d'un fluxmètre de type « Calvet ». la température de l'échantillon est initialement à une température stable  $T_0$  inférieure à la température  $T_f$  finale (celle du four dans lequel l'échantillon tombe).il se produite alors des échanges de chaleur vers l'échantillon pour uniformiser sa température avec celle du for la mesure du flux est différentielle entre les deux tubes du for(avec et sans échantillon).pour étalonner le fluxmètre , un dispositif électrique de chauffage par l'effet joule en été construit et est inséré a la place de l'échantillon.

La variation d'enthalpie est l'intégration du signale délivré par le calorimètre sur tout la durée de la variation de température de l'échantillon. $T_1$  est la température à laquelle la variation d'enthalpie est mesurée. Chaque mesure fournit donc l'enthalpie d'échauffement (du matériau à une température.la mesure est reproduite pour différentes températures afin de déduire la fonction liant la variation de l'enthalpie à la température du matériau étudié.la dérivée de cette fonction donne la capacité thermique massique du matériau en fonction de la température ( $\Delta H_{T_0}^{T_f}(T)$ ) :

$$C_p(T) = \frac{1}{m} \times \frac{\gamma H_{T_0}^{T_f}(T)}{\partial T} \quad (\text{II.20})$$

Ce dispositif, en cours de caractérisation, permettra les mesures de capacité thermique massique de matériaux solides entre 100 °C et 1000 °C

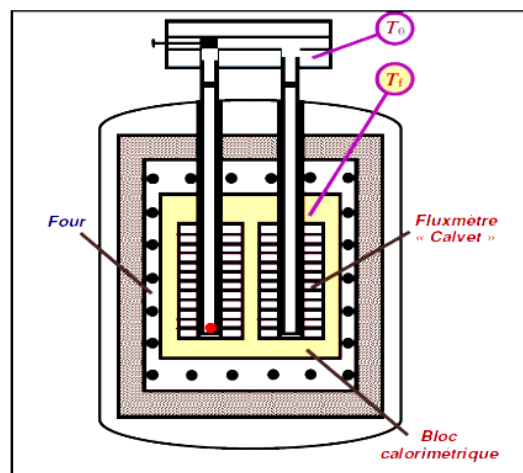


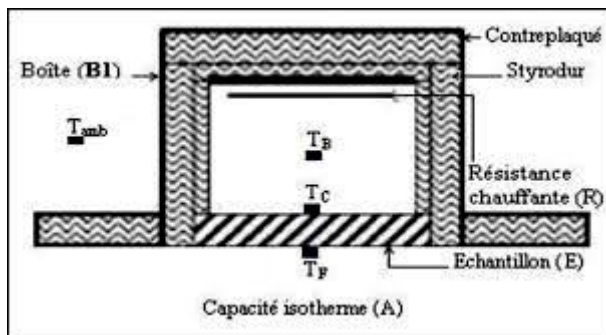
Figure II.11 : Calorimètre à chute pour la mesure de la capacité thermique [19]

### Ramarque

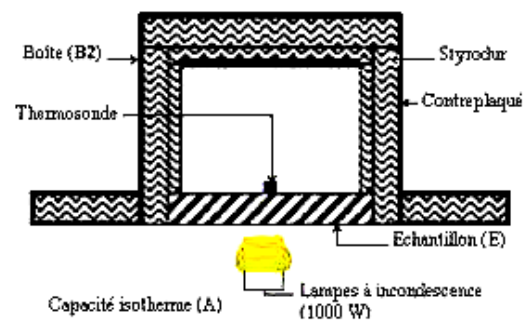
Nous avons choisi la méthode de boîte :

- sa présence dans le laboratoire de génie civil
- Méthode rapide avec une bonne précision et dans des conditions réelles d'utilisation,
- Capacité d'effectuer simultanément deux mesures différentes dans les mêmes conditions expérimentales,
- Permet des mesures sur des matériaux humides,
- Permet des mesures sur tous les types de matériaux utilisés dans l'industrie et le bâtiment, à l'exception des métaux [8], qu'ils soient solides, granulaires, pulvérulents ou liquides.

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



**Figure II.12:** Boit B1 pour la mesure de conductivité thermique



**Figure II.82:**Boîte B2 pour la mesure de la diffusivité thermique

**II.4) . Conclusion**

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination des propriétés thermophysique des matériaux, en régime permanent qui caractérisé par l'indépendance de temps, et en régime transitoire qui varier avec le temps, et utilise des thermogrammes pour détermine la diffusivité thermique puis les autres propriétés.

Dans notre travail on a choisir la méthode des boites qui permet de la mesure en régime permanent et transitoire pour déterminer la conductivité et la diffusivité thermique de notre matériaux.

## Chapitre III:

Modélisation de transfert de chaleur dans le sol

**III.1). introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons présenter le mécanisme du transport de chaleur dans le sol. il ya donc deux types de transport de chaleur dans le sol, soit par conduction ou par convection.

Le transport de chaleur est une branche de l'ingénierie thermique qui se préoccupe de générer de l'énergie thermique de la chaleur ou de la quantité de chaleur et de l'utiliser de la transfère et de l'échange entre des systèmes physique.

**III.2). Mécanismes de transport de chaleur dans le sol [26] :****III.2.1).Transport de chaleur par convection :**

a)-transport convectif par les fluides en mouvement

$$q_{FC} = C_{FW} \cdot \Delta T \cdot q \quad (\text{III.1})$$

$q_{FC}$  : Flux de chaleur échange entre le fluide et le solide ( $\text{j.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

$\Delta T$  : Différence de température entre le fluide et le solide (k)

$C_{FW}$  : Capacité thermique volumique du fluide ( $\text{j.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$ )

$q$  : flux liquide ( $\text{m.s}^{-1}$ )

b)-transport convectif de chaleur latente

$$q_{FV} = \lambda_V \cdot D_V \cdot \text{grad T} \quad (\text{III.2})$$

$\lambda_V$  : Chaleur latente de vaporisation ( $\text{j.kg}^{-1}$ )

$D_V$  : Diffusivité thermique de la vapeur ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{k}^{-1}$ )

c)-transport par convection naturelle

$$q_{Fn} = - C_{FW} D_t \cdot \text{grad T} \quad (\text{III.3})$$

$D_t$  : Diffusivité de thermo diffusion ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )

**III.2.2).Transport de chaleur par conduction :**

➤ 1<sup>ère</sup> loi de conduction de la chaleur :

$$q_F = -K_F \cdot \text{grad T} \quad (\text{III.4})$$

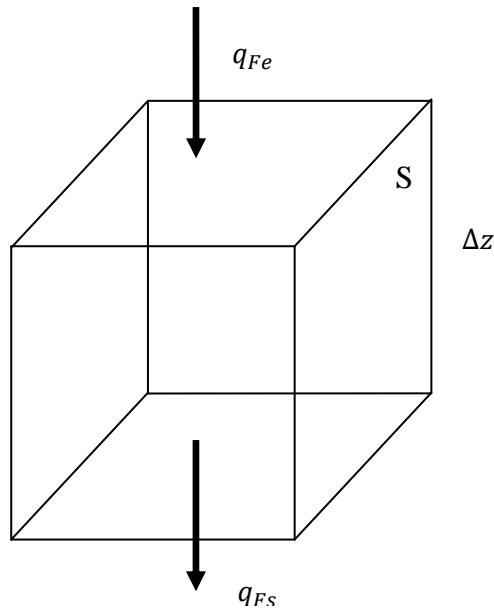
$q_F$  : Flux de chaleur transportée par conduction ( $\text{j.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )

$K_F$  : Conductivité thermique ( $\text{j.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{k}^{-1}$ )



T: température (k)

➤ Equation de conservation de l'énergie :



On à :

$$W_s - W_e = \Delta W \quad \text{(III.5)}$$

$W_s$ : : Énergie quittant le sol

$W_e$ : Énergie entrant dans le sol

$W$  : énergie stockée dans le sol

Alors que :

$$\left\{ \begin{array}{l} W_s = q_{Fs} \cdot S \cdot \Delta t \\ W_e = q_{Fe} \cdot S \cdot \Delta t \end{array} \right. \longleftrightarrow \Delta W = \Delta q_F \cdot S \cdot \Delta t \quad (t : \text{temps})$$

Or :

$$\Delta W = -S \cdot \Delta z \cdot C_F \cdot \Delta T \quad (T : \text{température})$$

( $C_F$  : Cap .thermique volumique)

$$C_F \frac{\Delta T}{\Delta t} = - \frac{\Delta q_F}{\Delta z} \quad (\text{III.6})$$

Soit, à 3 dimensions, et en passant à la limite :

$$C_F \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div } q_F \quad (\text{III.7})$$

➤ **Equation générale du transport de chaleur par conduction**

- 1<sup>ère</sup> loi de conduction de la chaleur :

$$q_F = -K_F \cdot \text{grad} T \quad (\text{III.8})$$

- Loi de conservation de l'énergie :

$$C_F \frac{\delta T}{\delta t} = -\text{div} q_F \quad (\text{III.9})$$

➤ Equation générale

$$C_F \frac{\delta T}{\delta t} = \text{div} (K_f \cdot \text{grad} T) \quad (\text{III.10})$$

- Transfert unidirectionnel :

$$C_F \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta s} \left( K_F \frac{\delta T}{\delta s} \right) \quad (\text{III.11})$$

En introduisant la diffusivité thermique :  $D_F = \frac{K_F}{C_F}$

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta s} \left( D_F \frac{\delta T}{\delta s} \right) \quad (\text{III.12})$$

Si la diffusivité thermique varie peu :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = D_F \left( \frac{\delta^2 T}{\delta S^2} \right) \quad (\text{III.13})$$

➤ **Capacité thermique volumique  $C_F$  du sol**

S'obtient en sommant la contribution de chacune des composantes du sol :

$$C_F = \sum C_{FI} \varepsilon_i \quad (\text{III.14})$$

$C_{FI}$  : capacité thermique volumique de la composante  $i$

$\varepsilon_i$  : fraction volumique de la phase  $i$

Soit :

$$C_F = C_{Fs} \varepsilon_s + C_{Fl} \varepsilon_l + C_{Fg} \varepsilon_g \quad (\text{III.15})$$

Ou encore ( $c_{fg} \approx 0$ ) et en différenciant les contributions de composantes minérales et organiques :

$$C_F = C_{Fm} \varepsilon_m + C_{Fo} \varepsilon_o + C_{Fl} \varepsilon_l \quad (\text{III.16})$$

m,o,l: composantes minérale, organique et liquide

➤ **Valeurs de la capacité thermique volumique des composants du sol :**

Eléments minéraux :	$2.10^6$	$\text{j.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$
Matière organiques :	$2,5 .10^6$	$\text{j.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$
Eau	$4,2.10^6$	$\text{j.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$
Air	1250	$\text{j.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$

- Habituellement dans les sols :

$$10^6 \text{ j.m}^{-3}.\text{k}^{-1} < C_F < 3.10^6 \text{ j.m}^{-3}.\text{k}^{-1}$$

(Sol sec)

(Sol saturé)

**III.3). Formulation mathématique (Les équation de transfert de chaleur dans le sol )****III.3.1). Le modèle thermique du sol : [27]**

Le sol est considéré comme un milieu homogène et invariant, caractérisé par une conductivité thermique  $\lambda_{sol}$ , une masse volumique  $\rho_{sol}$  et une capacité calorifique massique  $C_{sol}$ . La variation temporelle du taux d'humidité du sol due à l'infiltration d'eau est négligée et aucune nappe phréatique n'est prise en compte sous la zone d'implantation de l'échangeur. Le sol s'apparente donc à un massif semi-infini. Pour attirer le froid maximal contenu dans les premiers mètres du sous-sol à un coût financier faible, nous devons étudier la profondeur de pénétration dans le sol pour l'emplacement de notre échangeur air-sol et cela signifie que là où la température reste invariante en fonction du temps et de profondeur.

**III.3.2) .Estimation de la température en profondeur du sol****III.3.2 .1). Modèle du milieu semi - infini**

L'équation de la chaleur du milieu semi-infini s'écrit comme suit [28] :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{III.17})$$

Ou  $\alpha$  étant la diffusivité thermique du milieu

Les conditions aux limites sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} T(0, t) = T_m + T_0 \cos(wt) \\ T_{(\infty, t)} = T_m \end{array} \right. \quad (\text{III.18})$$

$T_m$  et  $T_0$  sont respectivement la valeur moyenne de la température évaluée en un intervalle de temps donné et l'amplitude de température. La pulsation  $w$  est calculée par la relation suivante :

$$W = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{III.19})$$

$T$  : étant la période exprimée en secondes.

Et la condition initiale est :

$$T_{(x,0)} = T_i \quad (\text{III.20})$$

Faisons le changement de variable suivant :

$$T'_{(z,t)} = T_{(z,t)} - T_m \tag{III.21}$$

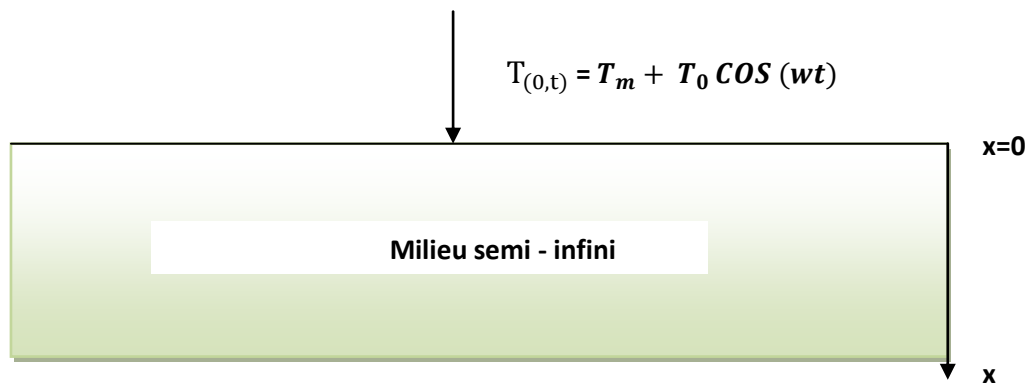
Alors l'équation de la chaleur devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T'}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T'}{\partial x^2} \\ T'_{(0,t)} = T_0 \cos (wt) \\ T'_{(\infty,t)} = 0 \end{array} \right. \tag{III.22}$$

On cherche une solution en régime établi pour laquelle le champ de température du milieu s'évolue comme suit :

$$T'_{(x,t)} = \theta (x) \cdot \exp(iwt) \tag{III.23}$$

La température en surface est donc :



**Figure III.1.** Schéma du milieu semi- infini avec température sinusoïdale imposée en surface

On a :  $\beta=iw$  (Nombre complexe constant)

$$T'_{(0,t)} = C [T_0 \exp (\beta t) ] \tag{III.24}$$

Après Application dans l'équation de la chaleur nous aboutissons à l'équation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = -i \cdot \frac{w}{\alpha} \theta (x) = 0 \\ \theta(0) = T_0 \\ \theta(\infty) = 0 \end{array} \right. \tag{III.25}$$

La solution générale de cette équation différentielle est de la forme suivante :

$$\theta(x) = c_1 \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} \cdot (1+i)x\right) + c_2 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} \cdot (1+i)x\right) \quad (\text{III. 26})$$

Comme la fonction  $\theta(x)$  doit satisfaire les conditions aux limites, on trouve :

$$\begin{cases} c_1 = 0 \\ c_2 = T_0 \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

Enfin, la solution de l'équation différentielle est :

$$\begin{cases} \theta(x) = T_0 \cdot \exp\left[-\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} \cdot (1+i)x\right] \\ T'_{(x,t)} = T_0 \cdot \exp\left[\left(-\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}x + i\left(wt - \sqrt{\frac{w}{2\alpha}}x\right)\right)\right] \end{cases} \quad (\text{III. 28})$$

La température du milieu semi-infini en un point  $x$  est donc :

$$T_{(x,t)} = T_m + T_0 \exp\left[\left(-\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}x\right) \cdot \cos\left(wt - \sqrt{\frac{w}{2\alpha}}x\right)\right] \quad (\text{III.29})$$

### III.3.2.2). Modèle thermique du sol

Le sol est assimilé à un massif semi infini homogène dont les propriétés physiques et thermique sont constantes et indépendantes de la profondeur  $z$ , et lequel est soumis à un signal de température sinusoïdal en surface ( $T_{surf}$ ). Dans ce modèle, la température à la surface du sol est une sinusoïde

Données sous la forme suivante [29] :

$$T_{surf}(z, t) = \overline{T_{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{surf}(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_{surf}(j)] \quad (\text{III. 30})$$

$N$  : étant le nombre d'harmoniques et  $(j)$  : est un nombre entier positif allant de 1 à  $N$

En s'appuyant sur le modèle du massif infini on en déduit la température du sol à une profondeur  $z$  et à l'instant  $t$  [29] :

$$T_{\text{sol}}(z, t) = \overline{T}_{\text{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{\text{surf}}(j) \exp\left(-\frac{z}{\delta[w(j)]}\right) \times \sin\left[w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}}(j) - \frac{z}{\delta[w(j)]}\right] + geo$$

$\times z$  (III.31)

La profondeur de pénétration d'un signal de température de pulsation  $w(j)$  est donnée en fonction de la diffusivité thermique du sol  $\alpha_{\text{sol}}$  par la relation suivante :

$$\delta [w(j)] = \sqrt{\frac{2 \times \alpha_{\text{sol}}}{w(j)}} \quad \text{(III.32)}$$

La pulsation  $w(j)$  se calcule à partir de la relation suivant :

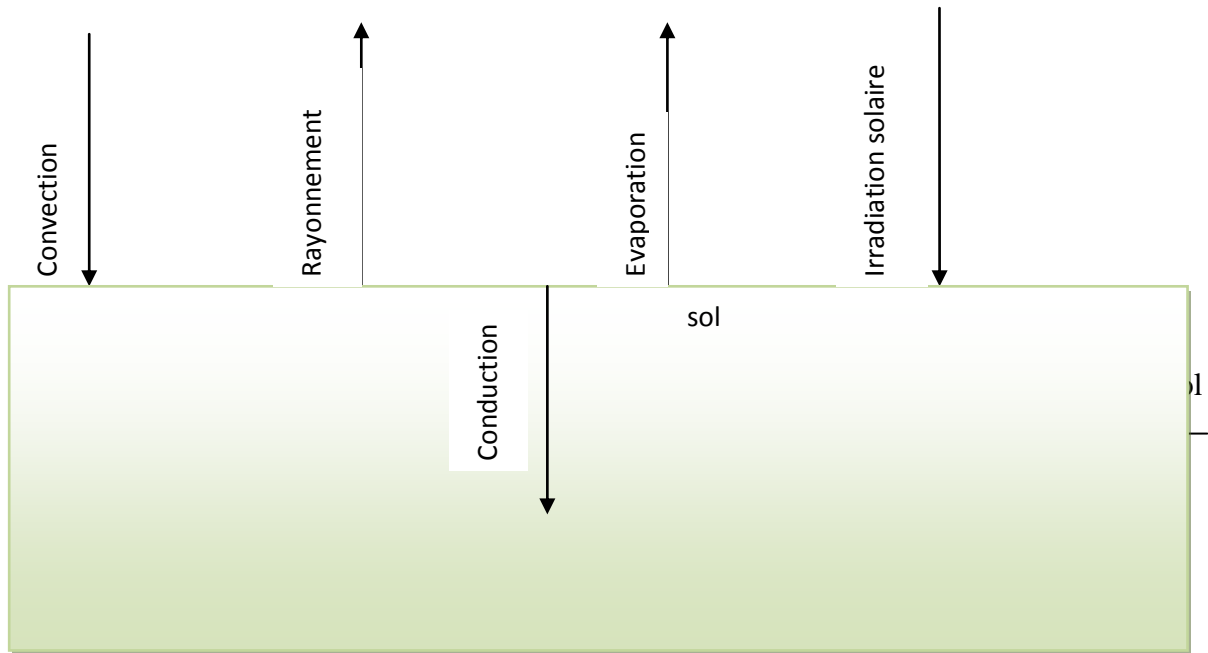
$$w(j) = \frac{2\pi}{T} \times j \quad \text{(III.33)}$$

$T$  étant la période du signal exprimée en secondes et elle s'étend sur une année entière.

Le coefficient  $geo$  est le gradient de température du au flux géothermique. Ce flux est considéré comme uniforme en tout point du sol et dirigé verticalement vers le haut. Le gradient géothermique est pris, par défaut égale à  $0.03 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ . Ce pendant, si la profondeur est faible, l'effet du gradient géothermique peut être négligé [30].

### III.3.2.3). Estimation de la température en surface du sol :

Faute des données expérimentales de la température en surface du sol. On va s'en servir d'un modèle basé sur le bilan énergétique au niveau de la surface du sol en vue d'en déduire une expression pour sa température. Ce bilan est établi de la manière suivante (**figure : III.2)**



**Figure III.2** Bilan d'énergie à la surface du sol

La surface du sol reçoit une quantité d'énergie sous forme de rayonnement du soleil et sous forme de chaleur sensible en échange convectif avec l'air ambiant. Elle perd à son tour une partie de sa chaleur par rayonnement par conduction et par convection sous forme de chaleur latente en échange avec le ciel. Le sol et l'air ambiant respectivement. Ce qui peut être traduit en équation par l'égalité suivante [29] :

$$Q_{cond} = (Q_{r-solair} - Q_{r-sol.ciel}) + (Q_{conv-sensible} - Q_{conv-latente}) \quad \text{(III.34)}$$

$Q_{cond}$  : est le flux de chaleur transmis par conduction dans le sol. Elle est déterminée par la formule suivante [39] :

$$Q_{cond} = -\lambda_{sol} \frac{dT_{surf}}{dz} \quad \left| \begin{array}{l} \\ \\ \\ \hline \\ \hline \\ \\ \end{array} \right. \quad \text{(III.35)}$$

Z=0

Le paramètre  $\lambda_{sol}$  est le coefficient de conduction thermique du sol

$Q_{r-solair}$  : est la quantité du rayonnement solaire absorbée par la surface du sol, elle est évaluée en fonction de l'albédo du sol par la relation suivante [29] :

$$Q_{r-solair} = (1-\rho_{solaire}) \times G \quad \text{(III.36)}$$



En générale la coefficient de l'albédo  $\rho_{sol}$  pour les sol  $0,1 < \rho_{sol} < 0,3 [J.m^2.s^{-1}]$

$Q_{r-sol.ciel}$  : est le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la surface du sol et la voute céleste, il est donné par l'équation suivante [29]

$$Q_{r-sol.ciel} = \varepsilon_{sol} \times \sigma \times (T_{surf}^4 - T_{ciel}^4) \quad (\text{III.37})$$

Ou  $\varepsilon_{sol}$  et  $\sigma$  sont respectivement l'émissivité de surface du sol :  $0.9 < \varepsilon_{sol} < 1$  pour le sol et la constante de Stefan –Boltzman :  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W.m^{-2}.K^{-4}]$ .

$Q_{conv-sensible}$  : est le flux de chaleur du à la convection du vent, il est estimé par la relation suivante [29] :

$$Q_{conv-sensible} = h_c \times (T_{amb} - T_{surf}) \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$$h_c = 0.5 + 1.2\sqrt{V_{vent}} \quad (\text{III.39})$$

$Q_{conv-latente}$  : est le flux de chaleur latente du à l'évaporation au niveau de la surface du sol , il est évalué par relation empirique suivante :

$$Q_{conv-latente} = C_{lat} \times F \times h_c [(a_{lat} \times T_{sur} + b_{lat}) - HR \times (a_{lat} \times T_{am} + b_{lat})]$$

(III. 40)

HR : étant l'humidité relative de l'air entre la pression partielle de la vapeur d'eau présente dans l'air et la pression de vapeur saturante de l'air, elle vaut 0 pour l'air sec et 1 (100%) pour de l'air saturé. Les constantes empiriques sont définies comme suit [29] :

$$a_{lat} = 103 [Pa K^{-1}] \quad (\text{III. 40 -a})$$

$$b_{lat} = 609 [Pa] \quad (\text{III.40-b})$$

$$C_{lat} = 0,0168 [K Pa^{-1}] \quad (\text{III.40-c})$$

Le paramètre empirique F dépend de la nature du sol et de degré d'humidité du sol :

**Tableau III. 3** : Variation du paramètre F en fonction de la nature du sol [29]

Nature du sol	Le facteur F
Aride	0,1-0,2
Sec	0,4-0,5
Humide	0,6-0,8
Saturé	1

On introduit un nouveau coefficient d'échange équivalent désigné par  $h_{eq}$  et qui fait englober le flux de chaleur perdu en échange radiatif avec le ciel et celui que la surface du sol reçoit en échange par convection avec l'air ambiant. Cela va rendre linéaire l'équation du bilan thermique par rapport à la température  $T_{surf}$ .

$$Q_{conv-sensible} - Q_{r-sol\ ciel} = h_{eq} \times (T_{amb} - T_{surf}) \quad (\text{III.41})$$

#### III.3.2.4). Transformation en série de Fourier

Les moyennes mensuelles de température ambiante ainsi que les moyens mensuels du rayonnement solaire global horizontal de la ville d'Adrar sont présentés dans le tableau (III. 2).

**Tableau III.4** Illustration des données météorologiques de la ville d'Adrar

Mois	Température ambiante Moyenne en (°C)	Rayonnement solaire Moyen en (Wh/m <sup>2</sup> )
Janvier	12,1	361 ,67
Février	15,4	445,5
Mars	19,6	561,67
Avril	24,3	639,67
Mai	28,4	661,17

Juin	34,4	683,5
Juillet	36,5	675,08
Aout	36	626
Septembre	31,8	548,83
Octobre	24,5	454,17
Novembre	17,2	369,17
Décembre	13,2	327,67

Ces données sont transformées en série harmoniques de Fourier comme suit [29] :

$$T_{amb}(t) = \overline{T_{amb}} + \sum_{j=1}^N A_T(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_T(j)] \quad \text{(III. 42)}$$

$$G(t) = \overline{G} + \sum_{j=1}^N A_G(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_G(j)] \quad \text{(III. 43)}$$

$T_{amb}$  et  $G$  : désignent respectivement la température ambiante et la rayonnement solaire.

$N$  : indique le nombre d'harmoniques.

D'un manière analogue, la transformation en série de Fourier de la température de surface du sol est :

$$T_{surf}(z, t) = \overline{T_{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{surf}(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_{surf}(j)] \quad \text{(III. 44)}$$

On en déduit la transformation en série de Fourier de la température du sol :

$$T_{sol}(z, t) = \overline{T_{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{surf}(j) \times \sin \left[ w(j) \times t - \varphi_{surf}(j) - \frac{z}{\delta(j)} \right] \quad \text{(III. 45)}$$

On calcule la dérivée de la température du sol par rapport à  $z$ , on trouve :

$$\frac{\partial T_{\text{sol}}(z, t)}{\partial z} = - \sum_{j=1}^N \frac{A_{\text{surf}(j)} \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta(j)}\right)}{\delta(j)} \left[ \sin\left(w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}(j)} - \frac{z}{\delta(j)}\right) + \cos\left(w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}(j)} - \frac{z}{\delta(j)}\right) \right] \quad \text{(III. 46)}$$

Donc, le flux de chaleur par conduction dans sol est égal à :

$$Q_{\text{cond}} = -\lambda_{\text{sol}} \left. \frac{\partial T_{\text{sol}}(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \sum_{j=1}^N \frac{\lambda_s A_{\text{surf}(j)}}{\delta(j)} [\sin(w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}(j)}) + \cos(w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}(j)})] \quad \text{(III. 47)}$$

On introduit  $h_{\text{cond}}$  qui est défini par :

$$h_{\text{cond}} = \frac{\lambda_s}{\delta(j)} \quad \text{(III. 48)}$$

Alors, le flux de chaleur peut s'écrire ainsi :

$$Q_{\text{cond}} = \sum_{j=1}^N h_{\text{cond}} A_{\text{surf}(j)} [(\cos(\varphi_{\text{surf}(j)}) + \sin(\varphi_{\text{surf}(j)}) \cdot \sin(w(j) \cdot t) + (\cos(\varphi_{\text{surf}(j)}) - \sin(\varphi_{\text{surf}(j)}) \cdot \cos(w(j) \cdot t)] \quad \text{(III. 49)}$$

Après substitution, l'équation (1) devient comme suit :

$$\begin{aligned}
Q_{\text{cond}} = & (1 - \rho) \cdot \left( \bar{G} + \sum_{j=1}^N A_G(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_G(j)] \right) \\
& + h_{\text{eq}} \left[ \left( \bar{T}_{\text{amb}} + \sum_{j=1}^N A_T(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_T(j)] \right) \right. \\
& \left. - \left( \bar{T}_{\text{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{\text{surf}}(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}}(j)] \right) \right] \\
& - C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot \left[ \left( A_{\text{lat}} \left( \bar{T}_{\text{surf}} + \sum_{j=1}^N A_{\text{surf}}(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}}(j)] \right) + B_{\text{lat}} \right) \right. \\
& \left. - r \cdot \left( A_{\text{lat}} \left( \bar{T}_{\text{amb}} + \sum_{j=1}^N A_T(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_T(j)] \right) + B_{\text{lat}} \right) \right] \quad (\text{III. 50})
\end{aligned}$$

Après avoir fait un réarrangement de l'équation, on trouve :

$$\begin{aligned}
Q_{\text{cond}} = & (1 - \rho) \bar{G} + (h_{\text{eq}} + C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot A_{\text{lat}} \cdot r) \bar{T}_{\text{amb}} - (h_{\text{eq}} + C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot A_{\text{lat}}) \bar{T}_{\text{surf}} \\
& + C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot B_{\text{lat}} (r - 1) + (1 - \rho) \sum_{j=1}^N A_G(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_G(j)] \\
& + (h_{\text{eq}} + C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot A_{\text{lat}} \cdot r) \sum_{j=1}^N A_T(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_T(j)] \\
& - (h_{\text{eq}} + C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot A_{\text{lat}}) \sum_{j=1}^N A_{\text{surf}}(j) \\
& \times \sin[w(j) \times t - \varphi_{\text{surf}}(j)] \quad (\text{III. 51})
\end{aligned}$$

On définit  $h_r$  et  $h_e$  comme suit :

$$\begin{cases} h_r = h_{\text{eq}} + C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot A_{\text{lat}} \cdot r \\ h_e = h_{\text{eq}} + C_{\text{lat}} \cdot F \cdot h_c \cdot A_{\text{lat}} \end{cases} \quad (\text{III. 52})$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{aligned}
Q_{cond} = & (1 - \rho)\bar{G} + h_r\overline{T_{amb}} - h_e\overline{T_{surf}} + (h_r - h_e) \cdot \frac{B_{lat}}{A_{lat}} + (1 - \rho) \sum_{j=1}^N A_G(j) \\
& \times \sin[w(j) \times t - \varphi_G(j)] + h_r \sum_{j=1}^N A_T(j) \times \sin[w(j) \times t - \varphi_T(j)] \\
& - h_e \sum_{j=1}^N A_{surf}(j) \\
& \times \sin[w(j) \times t - \varphi_{surf}(j)]
\end{aligned} \tag{III. 53}$$

Après avoir développé les parenthèses, on aboutit à :

$$\begin{aligned}
Q_{cond} = & (1 - \rho)\bar{G} + h_r\overline{T_{amb}} - h_e\overline{T_{surf}} + (h_r - h_e) \cdot \frac{B_{lat}}{A_{lat}} \\
& + \sum_{j=1}^N ((1 - \rho)A_G \cos(\varphi_G(j)) + h_r \cdot A_T \cos(\varphi_T(j)) - h_e \cdot A_{surf} \cos(\varphi_{surf}(j))) \\
& \times \sin(w(j) \times t) - \sum_{j=1}^N ((1 - \rho)A_G \sin(\varphi_G(j)) + h_r \cdot A_T \sin(\varphi_T(j)) - h_e A_{surf} \\
& \times \sin(\varphi_{surf}(j))) \cdot \cos(w(j) \\
& \times t)
\end{aligned} \tag{III. 54}$$

Après avoir fait la comparaison entre les équations (III. 49) et(III. 54)), on obtient le système suivante :

$$\left\{ \begin{aligned}
& Q_{cond} = (1 - \rho)\bar{G} + h_r\overline{T_{amb}} - h_e\overline{T_{surf}} + (h_r - h_e) \cdot \frac{B_{lat}}{A_{lat}} = 0 \\
& (1 - \rho)A_G(j) \cdot \cos(\varphi_G(j)) + h_r A_T(j) \cos(\varphi_T(j)) - h_e A_{surf}(j) \cdot \cos(\varphi_{surf}(j)) \\
& \quad = h_{cond} \cdot A_{surf} \left( \cos(\varphi_{surf}(j)) + \sin(\varphi_{surf}(j)) \right) \\
& -(1 - \rho)A_G(j) \cdot \sin(\varphi_G(j)) - h_r A_T(j) \cdot \sin(\varphi_T(j)) + h_e A_{surf}(j) \cdot \sin(\varphi_{surf}(j)) \\
& \quad = h_{cond} \cdot A_{surf} \left( \cos(\varphi_{surf}(j)) - \sin(\varphi_{surf}(j)) \right)
\end{aligned} \right. \tag{III. 55}$$

Ou encore sous la forme suivant :

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{T}_{\text{surf}} &= \frac{(1-\rho)\overline{G} + h_r \overline{T}_{\text{amb}} + (h_r - h_e) \frac{b_{\text{lat}}}{a_{\text{lat}}}}{h_e} \\ &= \frac{(1-\rho)A_G(j) \cdot \cos(\varphi_G(j)) + h_r A_T(j) \cos(\varphi_T(j))}{(h_{\text{cond}} + h_e)A_{\text{surf}} \cdot \cos(\varphi_{\text{surf}}(j))} \\ &+ \frac{h_{\text{cond}} \cdot A_{\text{surf}} \sin(\varphi_{\text{surf}}(j))}{- (1-\rho)A_G(j) \cdot \sin(\varphi_G(j)) - h_r A_T(j) \cdot \sin(\varphi_T(j)) + h_e A_{\text{surf}}(j) \cdot \sin(\varphi_{\text{surf}}(j))} \end{aligned} \right. \quad \text{(III. 56)}$$

On introduit deux paramètres intermédiaires :

$$\left\{ \begin{aligned} Y_1 &= (1-\rho)A_G(j) \cdot \cos(\varphi_G(j)) + h_r A_T(j) \cos(\varphi_T(j)) \\ Y_2 &= - (1-\rho)A_G(j) \cdot \sin(\varphi_G(j)) - h_r A_T(j) \sin(\varphi_T(j)) \end{aligned} \right. \quad \text{(III. 57)}$$

Le système d'équation se réduit alors comme suit :

$$\left\{ \begin{aligned} (h_{\text{cond}} + h_e)A_{\text{surf}} \cdot \cos(\varphi_{\text{surf}}(j)) + h_{\text{cond}} \cdot A_{\text{surf}} \sin(\varphi_{\text{surf}}(j)) &= Y_1 \\ h_{\text{cond}} \cdot A_{\text{surf}} \cdot \cos(\varphi_{\text{surf}}(j)) - (h_{\text{cond}} + h_e)A_{\text{surf}} \sin(\varphi_{\text{surf}}(j)) &= Y_2 \end{aligned} \right. \quad \text{(III. 58)}$$

La résolution du système permet d'obtenir ceci :

$$\left\{ \begin{aligned} A_{\text{surf}} \sin(\varphi_{\text{surf}}(j)) &= \frac{h_{\text{cond}} \cdot Y_1 - (h_{\text{cond}} + h_e) \cdot Y_2}{h_{\text{cond}}^2 + (h_{\text{cond}} + h_e)^2} \\ A_{\text{surf}} \cos(\varphi_{\text{surf}}(j)) &= \frac{(h_{\text{cond}} + h_e) \cdot Y_1 + h_{\text{cond}} \cdot Y_2}{h_{\text{cond}}^2 + (h_{\text{cond}} + h_e)^2} \end{aligned} \right. \quad \text{(III. 59)}$$

En injectant ces deux dernières expressions dans le bilan d'énergie et après avoir fait les simplifications nécessaires. On a abouti à ce qui suit :

$$\overline{T}_{\text{surf}} = \frac{(1-\rho_{\text{sol}}) \times \overline{G} + h_r \times \overline{T}_{\text{amb}} + (h_r - h_e) \times \frac{b_{\text{lat}}}{a_{\text{lat}}}}{h_e} \quad \text{(III. 60)}$$

On déduit la tangente :

$$\operatorname{tg}(\varphi_{\text{surf}}(j)) = \frac{h_{\text{cond}}(w(j)) \cdot Y_1(j) - (h_{\text{cond}}(w(j)) + h_e) \cdot Y_2(j)}{(h_{\text{cond}}(w(j)) + h_e) \cdot Y_1(j) + h_{\text{cond}}(w(j)) \cdot Y_2(j)} \quad (\text{III. 61})$$

L'amplitude de la température de surface est donnée par :

$$A_{\text{surf}}(j) = \frac{Y_1(j) \sin(\varphi_{\text{surf}}(j)) + Y_2(j) \cos(\varphi_{\text{surf}}(j))}{h_{\text{cond}}(j)}$$

(III. 62)

#### III.4). Recherche Bibliographique de Compare avec les autres modèles

##### III.4. 1). Dr: BENHAMMOU Mohammed [31] :

$$T(x, t) = T_m + T_0 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} x\right) \cdot \cos\left(wt - \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} x\right) \quad (\text{III. 63})$$

$T_m$  : Température moyen

$T_0$  : Amplitude

$w$ : pulsation ( $w = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ ) (rad /s)

$\alpha$  : Diffusivité thermique ( $\alpha = \frac{\lambda}{cp \cdot \rho}$ ) (m<sup>2</sup> /s)

##### III.4.2) Mr. Belloufi Yousef [27] :

$$T(z, t) = T_i + \frac{T_{\text{moy}} \cdot \cos(w(t-t_0))}{\cos(wt)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} Z\right) \cdot \cos\left(wt - \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} Z\right)$$

(III. 64)

$T(z)$  : La température du sol en [degré]

$T_i$  : Température initiale du sol avant l'échauffement en [degré].

$T_{\text{moy}}$  : Température moyenne du jour (degré)

$w$  : Fréquence angulaire [ $w=2\pi/24$ ] (rad/heure).

$T_0$  : Déphasage des oscillations (rad)

$A$  : Amplitude  $A = \frac{T_{\text{moy}} \cdot \cos(w(t-t_0))}{\cos(wt)}$



**III.4.3). Sayeh Menhoudj [32]**

$$T(z, t) = T_s + A_s \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{w}{365\alpha}} Z\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_0) - \left(\frac{Z}{2}\right)\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)$$

(III. 65)

$T_s$ : Température moyen de la surface de sol (c)

$A_s$ : Amplitude de la variation de température de surface du sol

$t_0$ : Jour ou le température de surface est minimale

**III.4 .4). Djamel Belatrche [33] :**

$$T(z, t) = T_{mean} + A_s \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{w}{365\alpha}} Z\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_0) - \left(\frac{Z}{2}\right)\sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)$$

(III. 66)

$T_{mean}$  : Température moyen de la surface de sol (c)

$A_s$ : Amplitude de la variation de température de surface du sol

**III.4.5). CHEBANA Abdel basset [34] :**

$$T(x, t) = T_i + a \cdot e^{-\sqrt{\frac{w}{2\alpha}} x} \left(\cos\left(wt - \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} x\right)\right)$$

(III. 67)

$T_i$  : Température moyenne du jour (dégréé)

**III.4 .6).F .Al-Ajmi [35]**

$$T(z, t) = T_m - A_s \cdot e^{-\sqrt{\frac{\pi}{8760\alpha}} z} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{8760}(t - t_0) - \left(\frac{z}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{8760}{\pi\alpha}}\right)$$

(III. 68)

$a$  : Amplitude

**Remarque** : nous remarquons que grâce à notre connaissance de certaines relations, il n'y a pas de différence significative dans les relations entre les chercheurs et dans notre étude théorique, nous nous appuyerons sur la relation que BENHAMMOU a utilisée ses recherches .

**III.5) .Conclusion**

Enfin , nous concluons qu'il existe deux mécanisme de transport de chaleur dans le sol , et nous concluons que pour étudier l'équation de transfert de chaleur dans le sol , il a besoin de la quantité de lumière solaire frappant le sol, et qu'il existe un modèle thermique pour évaluer le contrôle de la profondeur du sol, et que ce modèle est inspiré du modèle moyen semi-infini qui est soumis à un signal médian sinusoïdal à la surface et qui les chercheurs qui ont mené cette étude, il n'y avait pas de différence significative et ont constaté que les relations ont une signification dans le temps, la profondeur et certaines propriétés physique du sol .

## **Chapitre IV**

### **Résultats et interprétations**

**Partie 01 : Propreté thermique de sol****IV.1). Introduction**

Dans ce partie on va présenter le résultat de l'essai qui il présent la valeur de la conductivité et diffusivité thermique on fonction de la saturation entre deux types de sable, concassé et de dune et on fait une comparaison entre ces deux types ce travail a été fait par nos collègue Bendahir et al [37] .

**IV.2). Analyse granulométrique**

Les résultats d'analyse granulométrique de sable dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1** : analyse granulométrique de sable concassé [37].

Tamis	$R_p$	$R_c$	$R_c\%$	$T_c\%$
6,3	0	0	0	100
5	8,1	8,1	0,4	99,6
4	10,1	18,2	0,91	99,29
2,5	477	495,3	24,79	75,21
2	124,9	620,3	31,05	68,95
1,6	150,6	770,8	38,55	61,45
1,25	221,9	992,7	49,69	50,31
0,63	375,4	1368,1	68,49	31,51
0,5	58,8	1426,9	71,43	28,57
0,315	131,8	1558,7	78,03	21,97
0,2	126,6	1685,3	84,37	15,63
0,16	89,9	1775,2	88,87	11,13
0,08	139,9	1915,1	95,87	4,13
Fond	82,3	1997,4	100	0

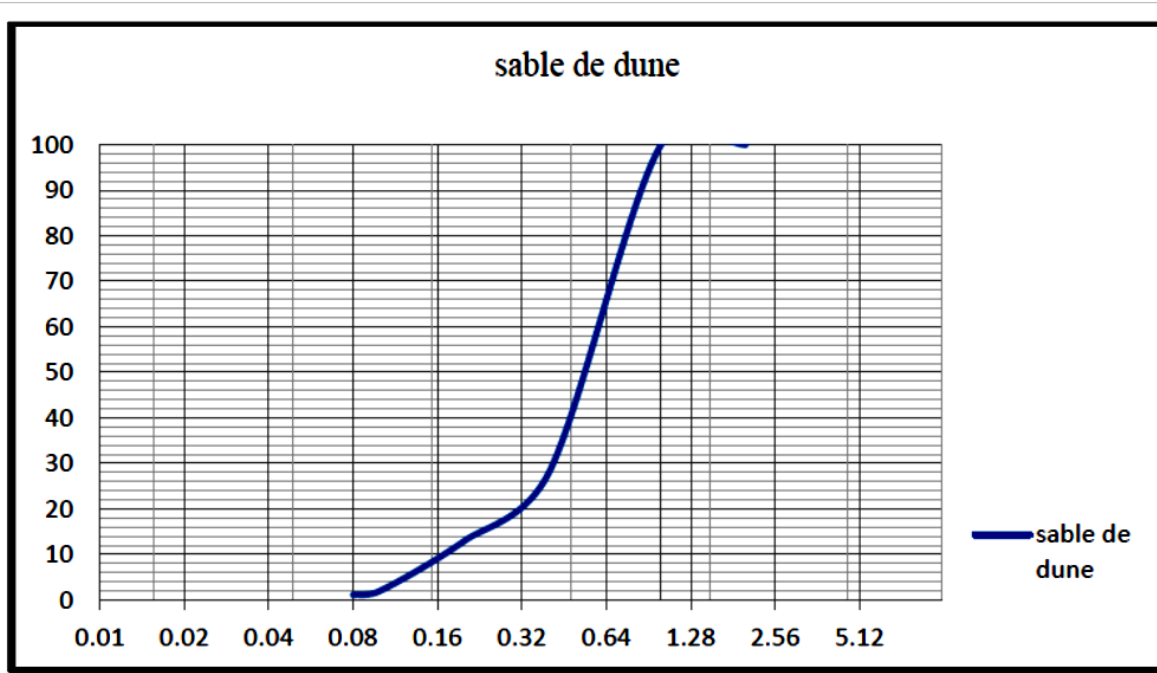


Figure. IV. 83 : courbe d'analyse granulométrique de sable concassé [37].

Tableau IV.2 : analyse granulométrique de sable de dune[37].

Tamis	$R_p$	$R_c$	$R_c \%$	$T_c \%$
2	0	0	0	100
1	21	21	0,021	99,97
0,4	697,6	718,6	71,88	28,12
0,2	151,2	869,8	87,01	12,99
0,1	110,3	980,1	98,03	1,97
0,08	9	989,1	98,94	1,06
Fond	10,5	999,1	100	0

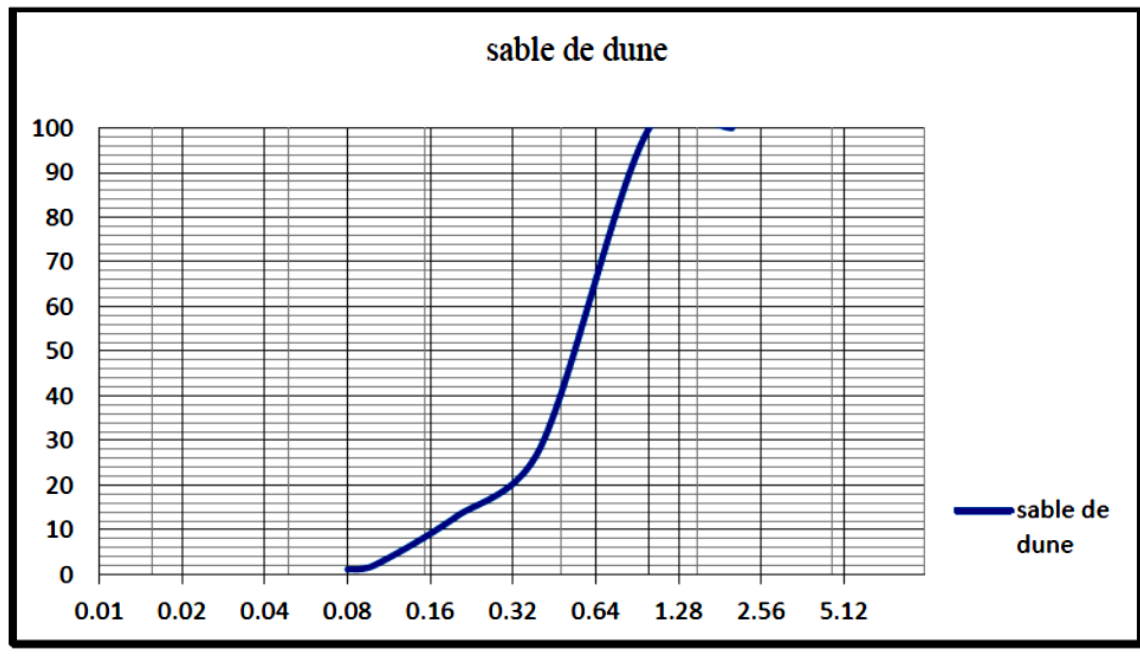


Figure .IV. 84 : courbe d'analyse granulométrique de sable de dune[37].

### IV.3). Résultat d'essai thermique

#### IV.3.1). Echantillons contient le sable concassé

##### IV.3.1.1). La conductivité thermique

Le régime permanent atteint quand les valeurs des températures restent constantes pendant plus d'une demi-heure environ, on utilise l'expression de  $q$  pour calculer  $\lambda$ .

$$q = \frac{\lambda}{e} (T_c - T_f) \times A + C(T_B - T_a) \quad (\text{IV.1})$$

$$q = \frac{V^2}{R} \quad (\text{IV.2})$$

- **Exemple de calcul :**

Les résultats obtenus par l'appareil EI700 de l'échantillon (18% argile +74% sable+8% ciment)

$$V=90 \text{ v} \quad R=2300 \Omega \quad T_c = 24 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_f = 18,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_B = 29 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_a = 28,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C = 0,16 \text{ W/}^\circ\text{C} \quad e = 0,05 \text{ m} \quad A = 0,27 \times 0,27 = 0,0729 \text{ m}^2$$

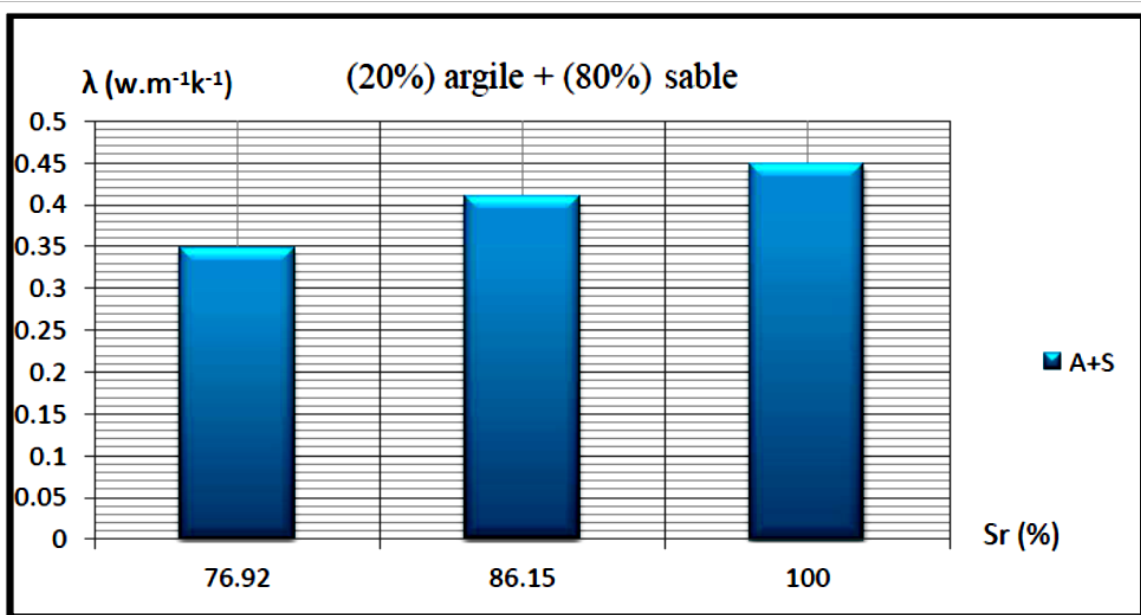
$$\lambda = \frac{e}{A(T_c - T_f)} (q - C(T_B - T_a)) \quad (IV.3)$$

$$\lambda = 0.35 \text{ w}m^{-1}K^{-1}$$

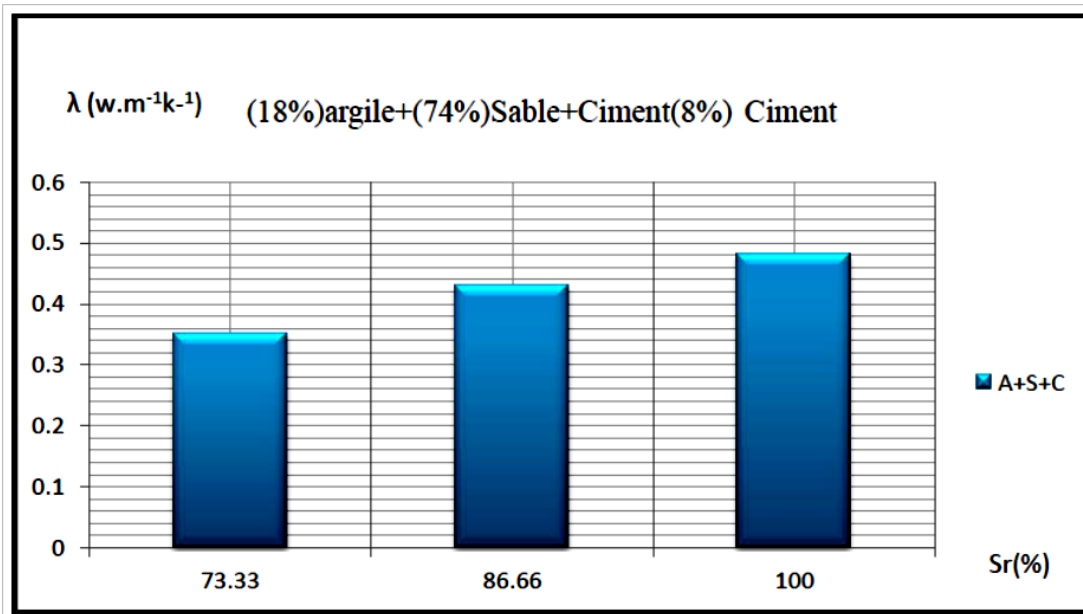
**Tableau IV.3 :** résultats obtenu par l'appareille EI 700 [37].

R=2300 Ω    e= 5 cm                      C= 0,16 W/°C

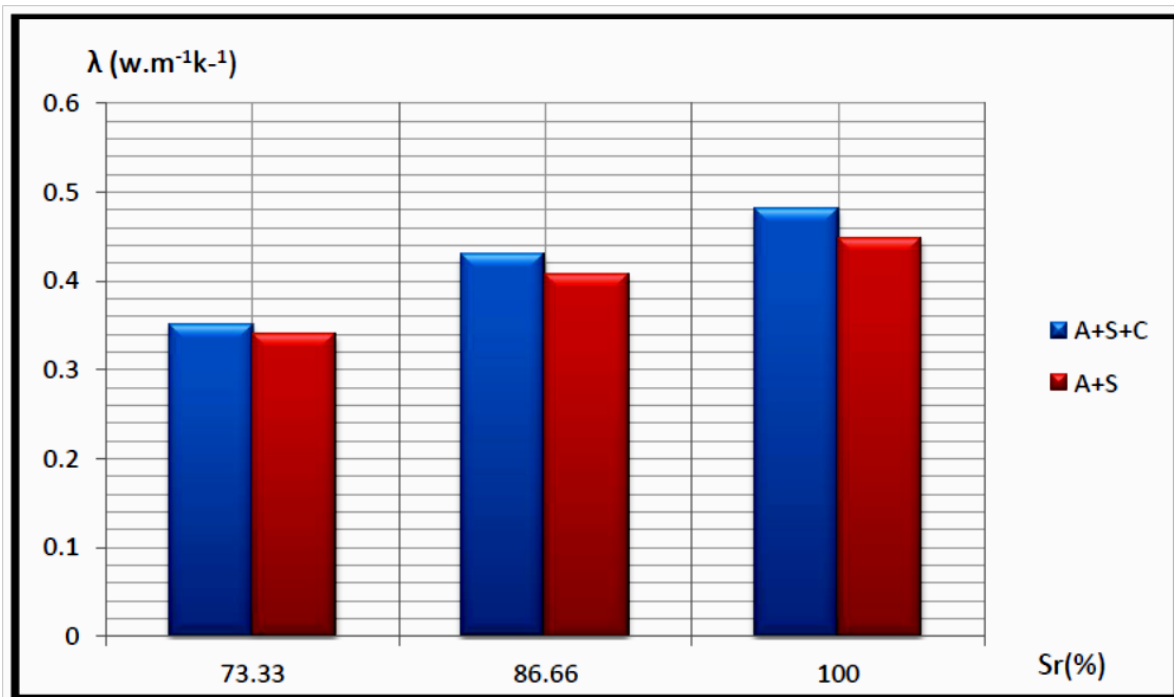
	V (voltes)	q(W)	e(m)	T <sub>c</sub> (°c)	T <sub>F</sub> (°c)	A (m <sup>2</sup> )	C (w/°c)	T <sub>b</sub> (°c)	T <sub>a</sub> (°c)
A+S+C	90	3,521	0,05	21,5	16,6	0,0729	0,16	28	27,5
		3,521	0,05	26,6	19,8	0,0729	0,16	27,6	27,5
		3,521	0,05	24	18,5	0,0729	0,16	29	28,5
A+S	100	4,347	0,05	19,3	12,3	0,0729	0,16	27,8	28
		4,347	0,05	22,8	15,6	0,0729	0,16	29,4	29
	72	2,253	0,05	22,9	19,6	0,0729	0,16	27,6	27



**Figure IV. 85 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((20 %) argile + (80 %) sable)[37].



**Figure .IV.86 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18 %) argile + (74 %) sable + (8 %) ciment [37]).



**Figure IV.87 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18 %) argile + (74 %) sable + (8 %) ciment) et ((20 %) argile + (80 %) sable) [37].



La conductivité thermique croit par l'augmentation de taux de saturation, jusqu'à il prendre la valeur 0,44w/mk dans la figure (argile+ sable) et 0,48 dans la figure (argile+ sable+ ciment), à l'état de saturation.

On explique ces résultats par la diminution de la masse d'échantillons réalisé par le phénomène d'évaporation qui résulte une augmentation des pores et des vides dans ces échantillons, cette augmentation des vides conduit une diminution de conductivité thermique.

D'après ces résultats on observe que les deux échantillons prendre une valeur minimale de 0,34w/mk et 0,35w/mk a l'état moine de saturation mais ils sont plus élevé a l'état de saturation .donc on constant que plus le matériau est humide plus il est inertielle.

On observe que l'histogramme de conductivité (argile +sable) est inférieur à la courbe de (argile+ sable+ ciment). Le ciment contient des fines qui conduisent une bonne cohésion entre les composants de mélange. Ce qui réduite les pores. Donc ces dernier est moins isolants que (l'argile+ sable).

#### IV.3.1.2). La diffusivité thermique

On applique un flux thermique sur la face chaude environ 1000W pendant quelque secondes, et on relève sur le thermo gramme de l'élévation de température en fonction de temps les valeurs suivants :  $t_{1/2}, t_{1/3}, t_{2/3}$  et  $t_{5/6}$  a la valeur maximale de température. Après sa on applique les trois formule  $a_1, a_2, a_3$ , et  $a$  est la moyenne de ces valeurs.

$$a_1 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} [1,15t_{5/6} - 1,25t_{2/3}] \text{(IV.4)}$$

$$a_2 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} [0,76t_{5/6} - 0,926t_{1/2}] \text{(IV.5)}$$

$$a_3 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} [0,618t_{5/6} - 0,862t_{1/3}] \text{(IV.6)}$$

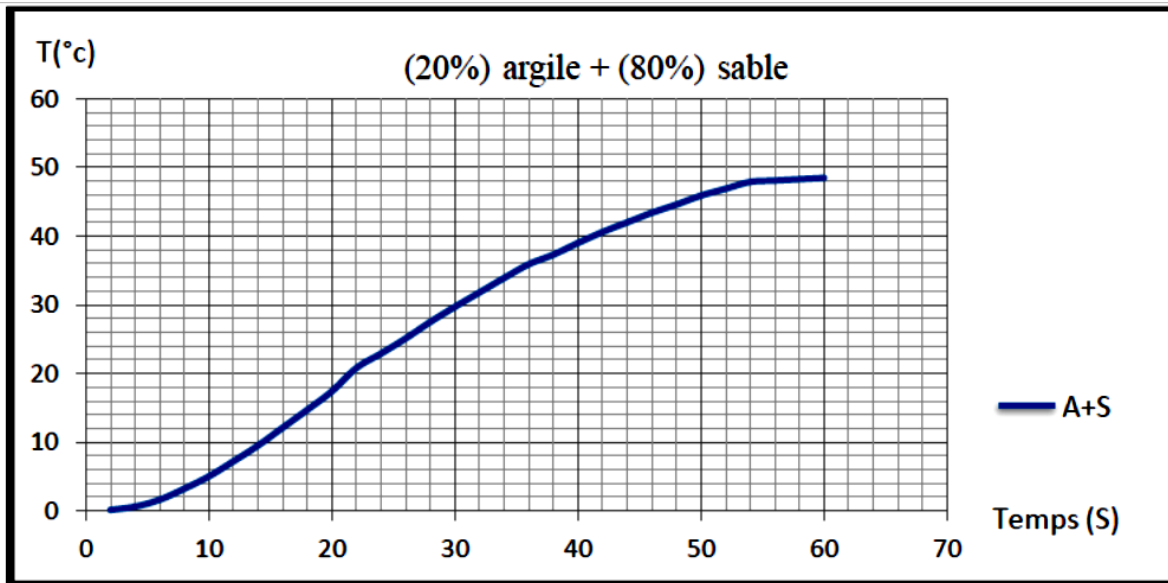


Figure IV.88 :thermo gramme de variation de température en fonction de temps pour mesure la diffusivité thermique ((20% argile + (80%) sable) [37].

- Exemple de calcul

Tableau IV.4 : les résultats relèvent à partir de thermo gramme [37].

$t_{1/2}$	$t_{1/3}$	$t_{2/3}$	$t_{5/6}$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a$
26	20	33	42	$0,99 \times 10^{-5}$	$1,11 \times 10^{-5}$	$1,23 \times 10^{-5}$	$1,115 \times 10^{-5}$

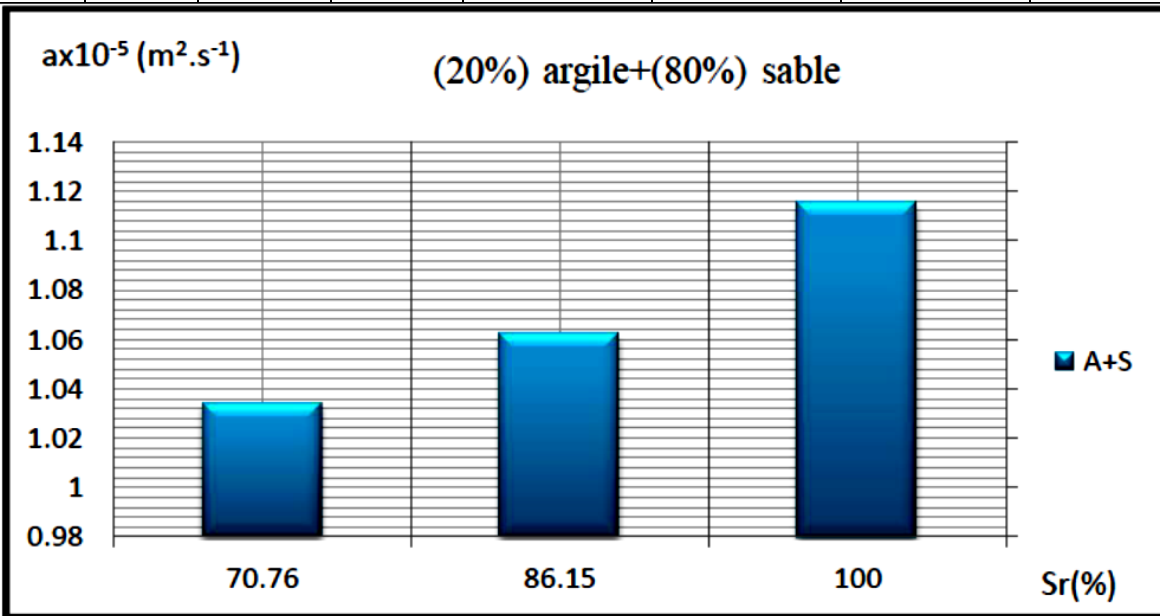
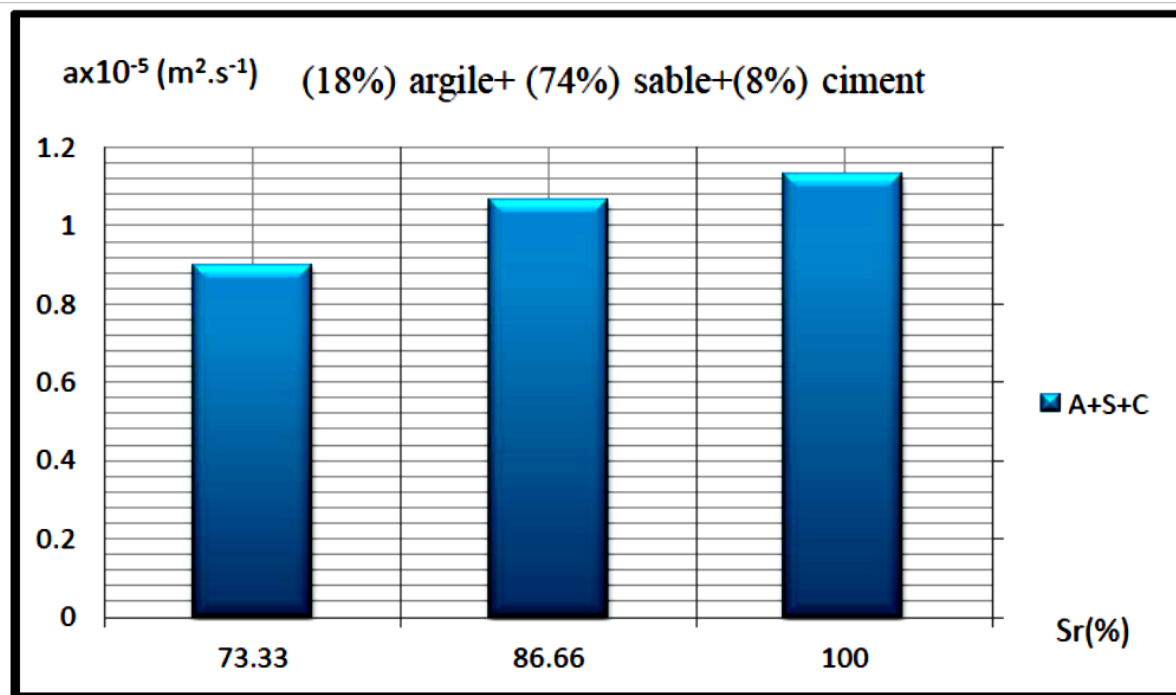
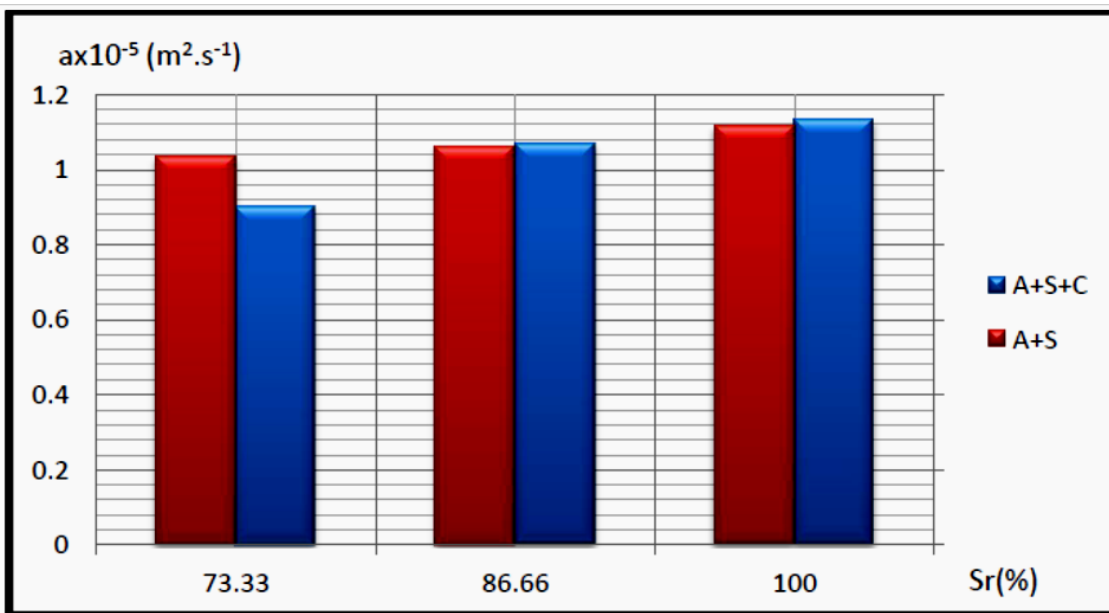


Figure IV.89 : la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable) [37].



**Figure IV. 90** : la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation

((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment) [37].

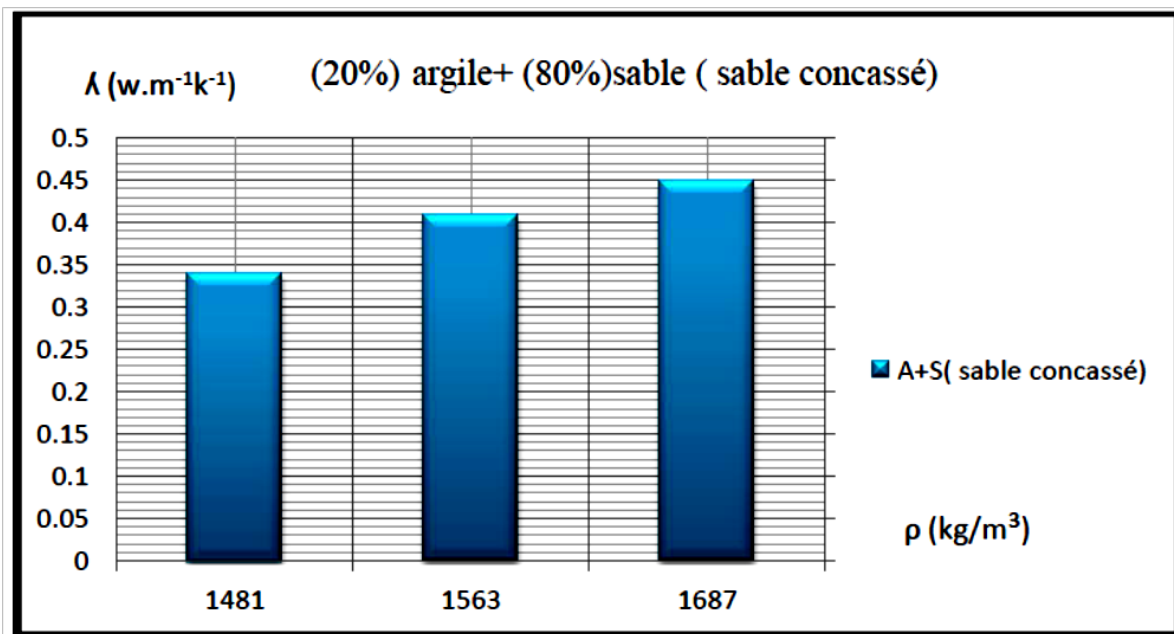


**FigureIV.91** : la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation

((18%) argile + (74%) sable +(8%) ciment) et ((20%) argile +(80%) sable) [37].

La diffusivité prend la valeur  $1,038 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  Pour le taux de saturation 70,76% et évolué jusqu'à la valeur  $1,115 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  à l'état de saturation et la histogramme A+S+C prend la valeur ( $1,133 \times 10^{-5}$ ) et ( $1,056 \times 10^{-5}$ ) pour le taux de saturation (100%) et (73,33). Donc La diffusivité augmente avec l'évolution de taux de saturation. Signifier que la vitesse de diffusion de l'énergie à travers l'échantillon élevé avec l'augmentation de quantité d'eau. On remarque que les valeurs de histogramme A+S+C et supérieur aux les valeurs A+ S. C'est à dire l'échantillon A+S+C caractérisé par la vitesse de diffusion d'énergie, ce qui signifie que le ciment facilite la diffusion d'énergie thermique, et conduit une diminution de l'isolation thermique dans les matériaux.

#### IV.3.1.3 L'effet de la masse volumique sur les propriétés thermo physique



**Figure IV.92 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique [37].

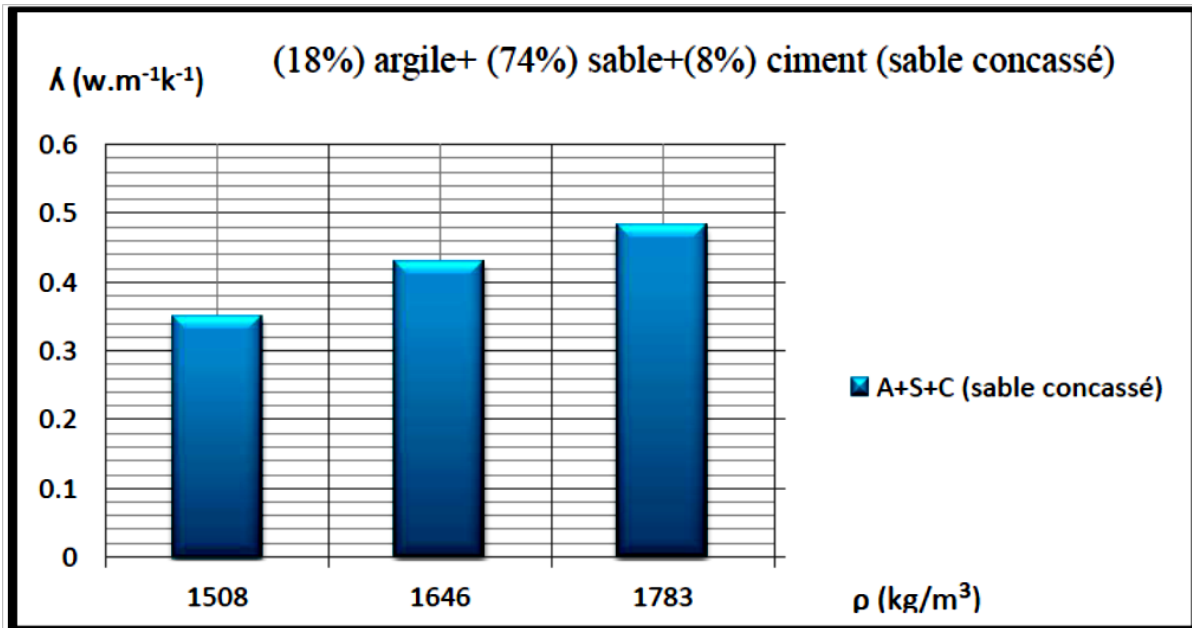


Figure IV. 93 : la variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique [37].

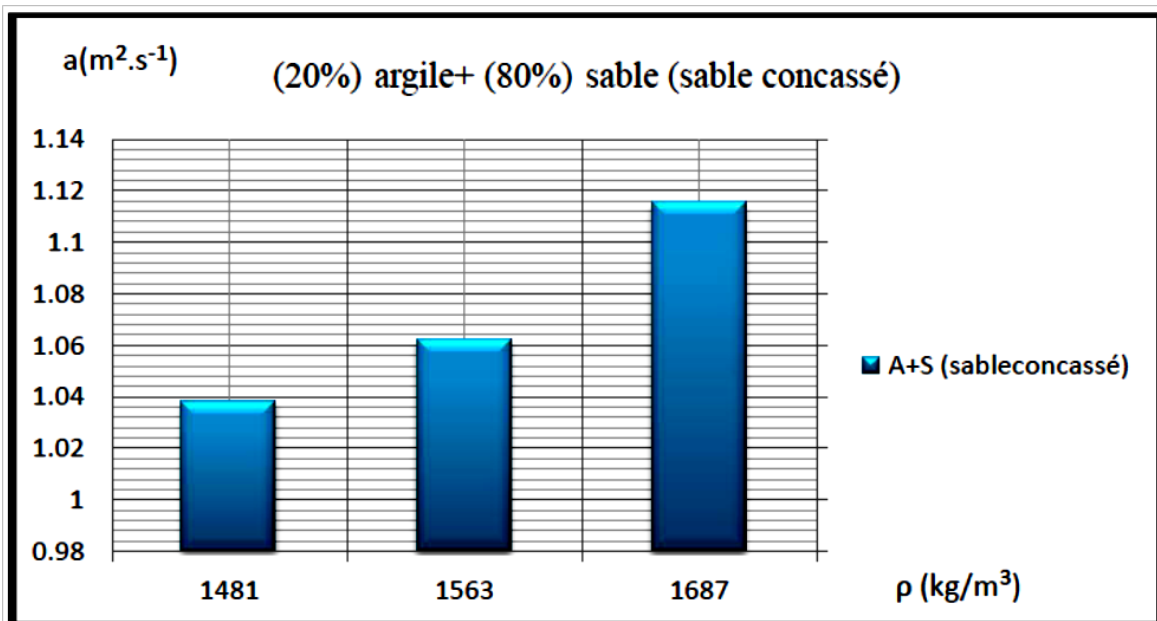
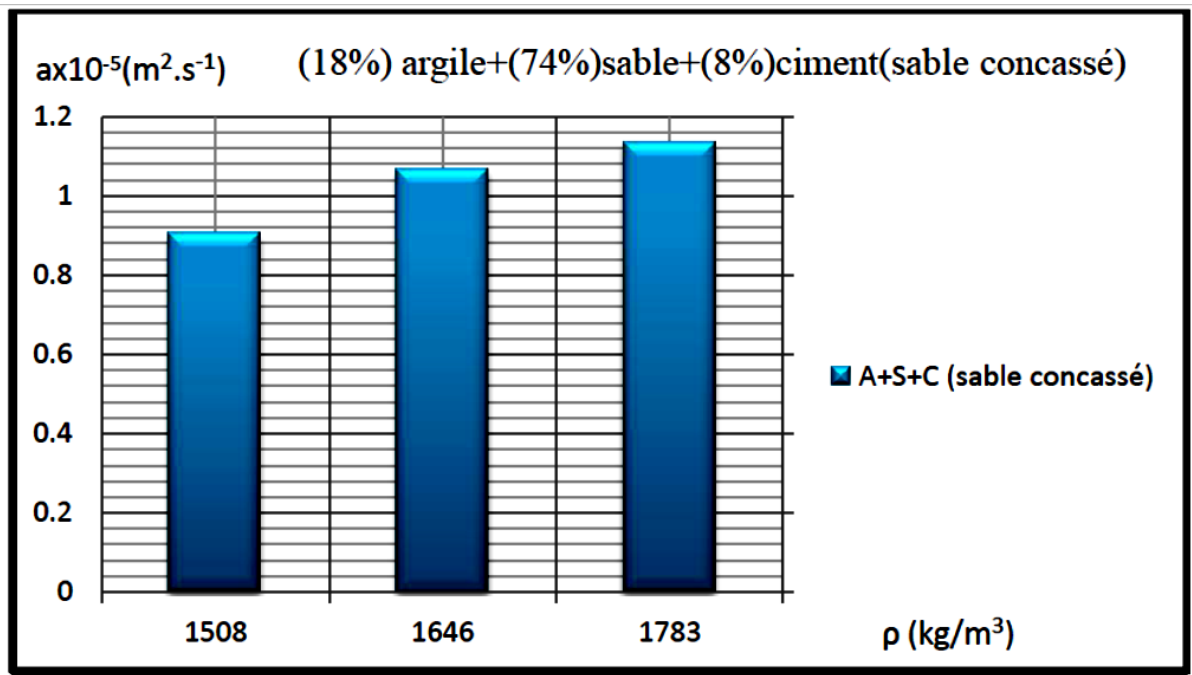


Figure IV. 94 : la variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique [37].



**Figure IV. 95:** la variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique [37].

D'après ces résultats on observe que la conductivité thermique croit avec l'augmentation de masse volumique, par ce que la diminution de masse volumique conduit une augmentation des pores dans l'échantillon, ce qui conduit une diminution de conductivité thermique.

#### IV.3.1.4). Détermination de la chaleur spécifique

La connaissance de  $\lambda$  et  $\rho$  permettent de calculer  $C_p$  en ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ). par la relation suivants :

$$C_p = \frac{\lambda}{\alpha \rho} \text{(IV.7)}$$

- Exemple de calcul :**

$$\lambda = 0,448 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1} \quad \rho = 1,687 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad \alpha = 1,115 \times 10^{-5} \text{ m}^2. \text{ s}^{-1}$$

$$C_p = 0,238 \times 10^2 \text{ J. kg}^{-1}.K^{-1}$$

#### IV.3.1.5). Détermination de l'effusivité thermique

On calcule  $E$  par la relation suivant :

$$E = \sqrt{\lambda \rho C_p} \text{(IV.8)}$$

• Exemple de calcul :

$$\lambda=0,448 \text{ w.m}^{-1}.\text{k}^{-1} \rho=1,687 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \text{Cp}= 0,238 \times 10^2 \text{ j. kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$$

$$E= 134,117 \text{ j.s}^{(1/2)}\text{m}^2\text{k}^{-1}$$

**Tableau .IV .5 :** propriété thermophysique d'un bloc de terre d'argile. (Sable concassé) [37].

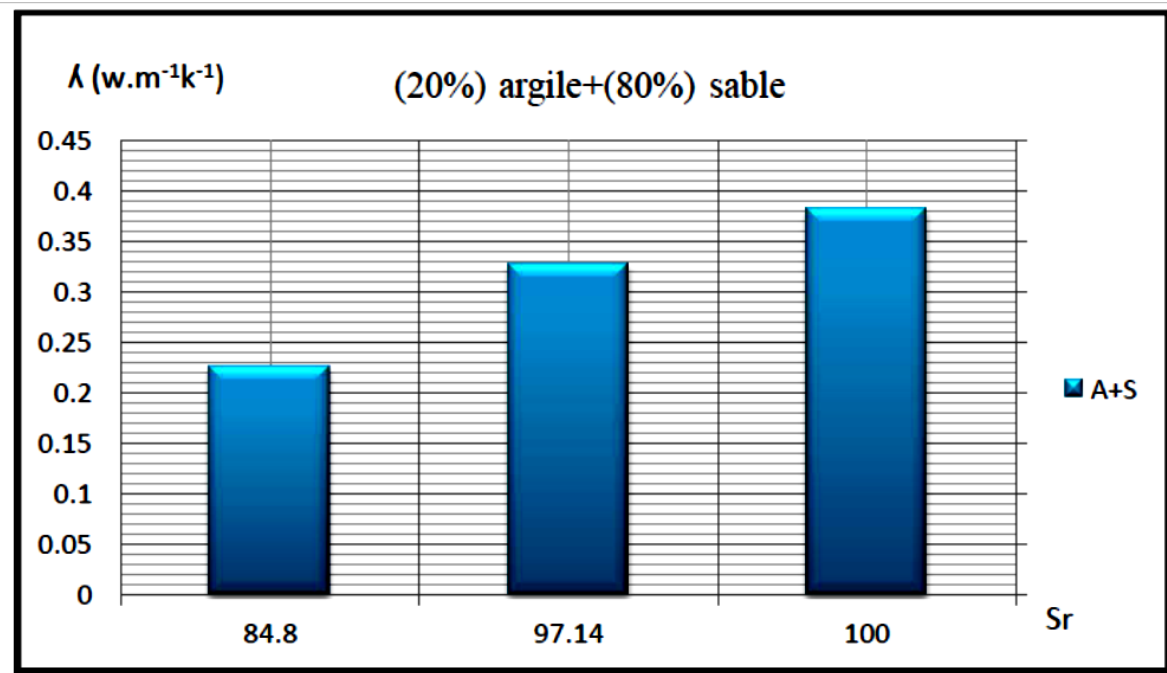
	e(m)	Sr (%)	$\lambda$ ( $\text{w.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$ )	a ( $\text{m}^2. \text{s}^{-1}$ )	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	R ( $\text{m}^2\text{k/w}$ )	Cp ( $\text{j. kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ )	E ( $\text{j.s}^{(1/2)}\text{m}^2\text{k}^{-1}$ )
(20%) argile + (80%) sable	0,05	100	0,448	$1,115 \times 10^{-5}$	$1,687 \times 10^3$	1,53	$0,238 \times 10^2$	134,117
		86,15	0,408	$1,062 \times 10^{-5}$	$1,563 \times 10^3$	1,86	$0,245 \times 10^2$	124,99
		70,76	0,34	$1,038 \times 10^{-5}$	$1,481 \times 10^3$	2,02	$0,221 \times 10^2$	105,49
(18%) argile+(74%) sable + (18%) ciment	0,05	100	0,481	$1,133 \times 10^{-5}$	$1,783 \times 10^3$	1,42	$0,238 \times 10^2$	142,86
		86,66	0,429	$1,066 \times 10^{-5}$	$1,646 \times 10^3$	1,59	$0,244 \times 10^2$	131,26
		73,33	0,35	$0,903 \times 10^{-5}$	$1,508 \times 10^3$	1,95	$0,258 \times 10^2$	116,69

**IV.3.2). échantillons contient le sable de dune**

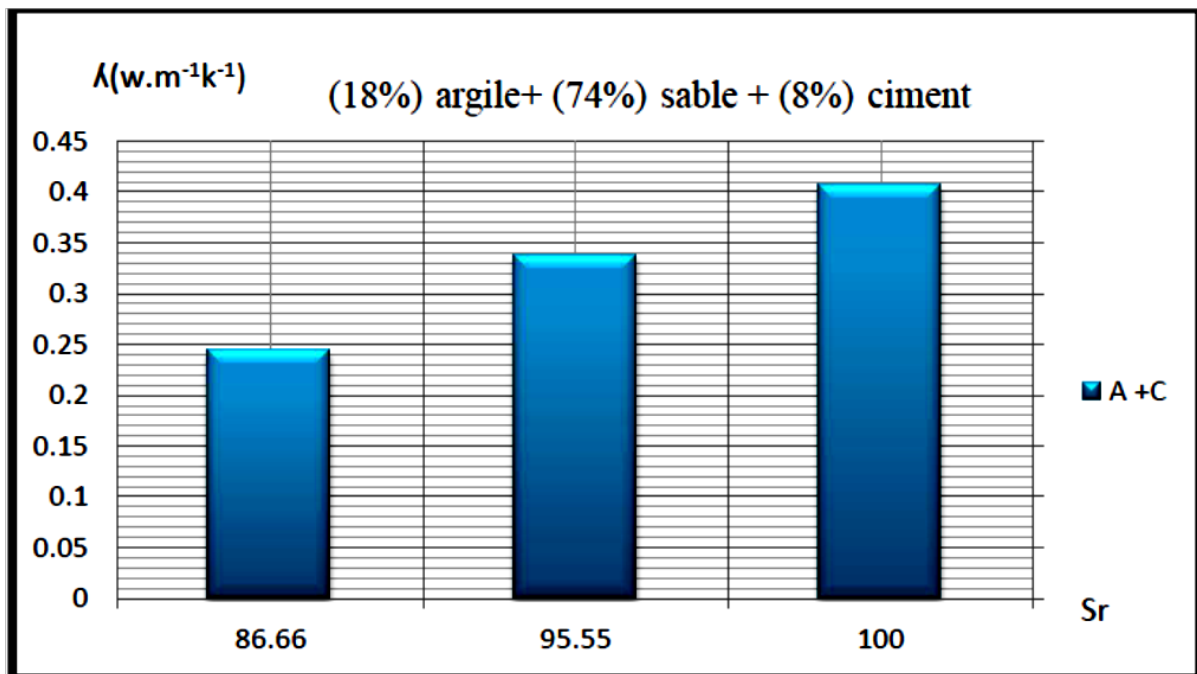
**IV.3.2.1). la conductivité thermique**

**Tableau. IV.6 :** résultats obtenu de l'appareille EI 700 [37].

	V (voltes)	R (ohm)	q (W)	e (m)	$T_C$ (°c)	$T_F$ (°c)	A ( $\text{m}^2$ )	C ( $\text{W}/\text{°c}$ )	$T_b$ (°c)	$T_a$ (°c)
(20%) argile + (80%) sable	85	2300	3,1413	0,04	22,3	17,9	0,0729	0,16	29,5	29,1
	60	2300	1,5652	0,04	21,9	18,3	0,0729	0,16	26,4	25,9
	85	2300	3,1413	0,04	23,4	18,3	0,0729	0,16	30,3	29,7
(18%) argile+(74%) sable + (18%) ciment	80	2300	2,7826	0,04	23,8	19,5	0,0729	0,16	30,2	29,4
	100	2300	4,3478	0,04	23,7	16,1	0,0729	0,16	30,2	29,4
	71	2300	2,1917	0,04	23,7	19,6	0,0729	0,16	29,5	29,1

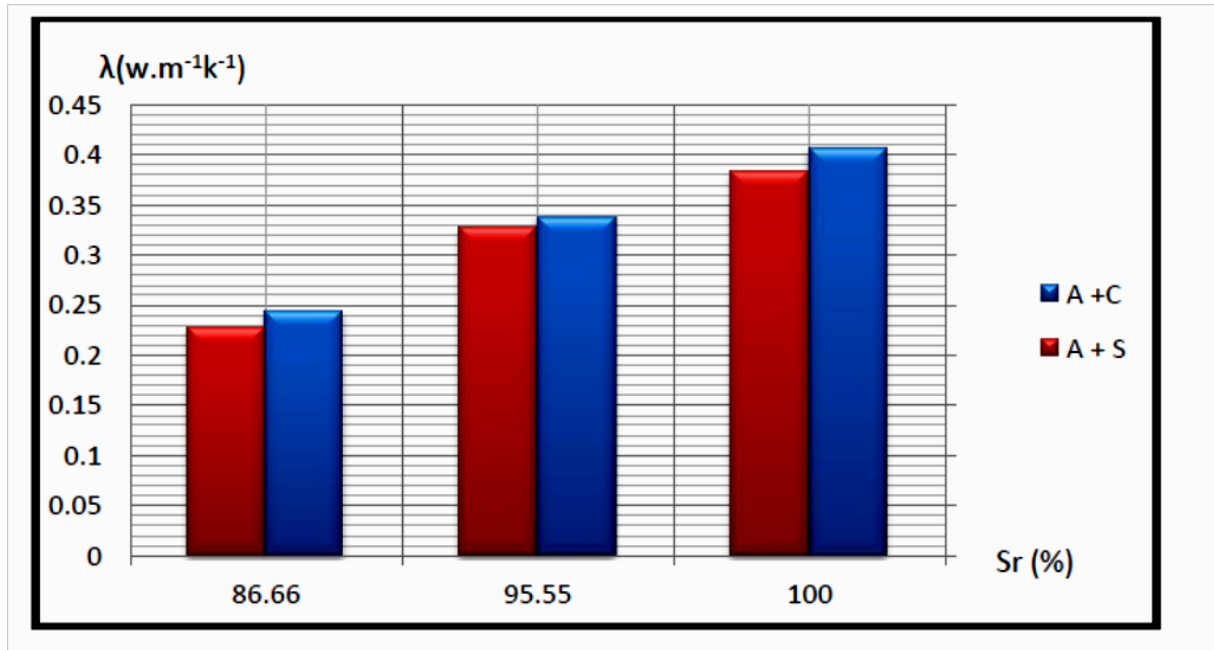


**Figure .IV. 96 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%)argile + (80%) sable) [37].



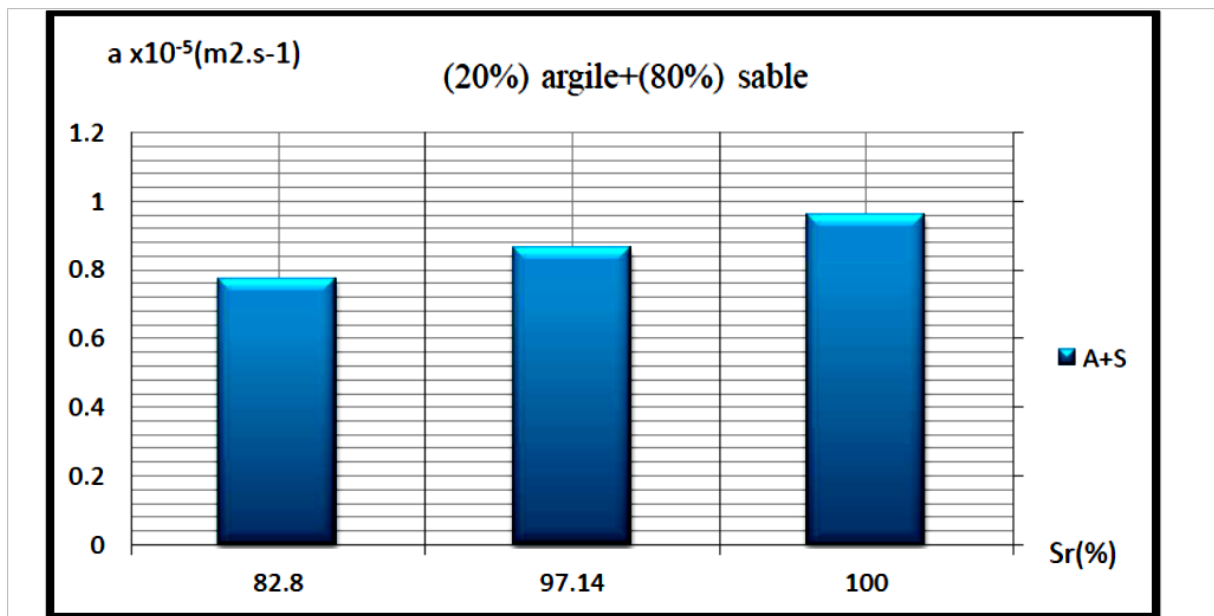
**Figure. IV. 97 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74 %) sable + (8%) ciment) [37].



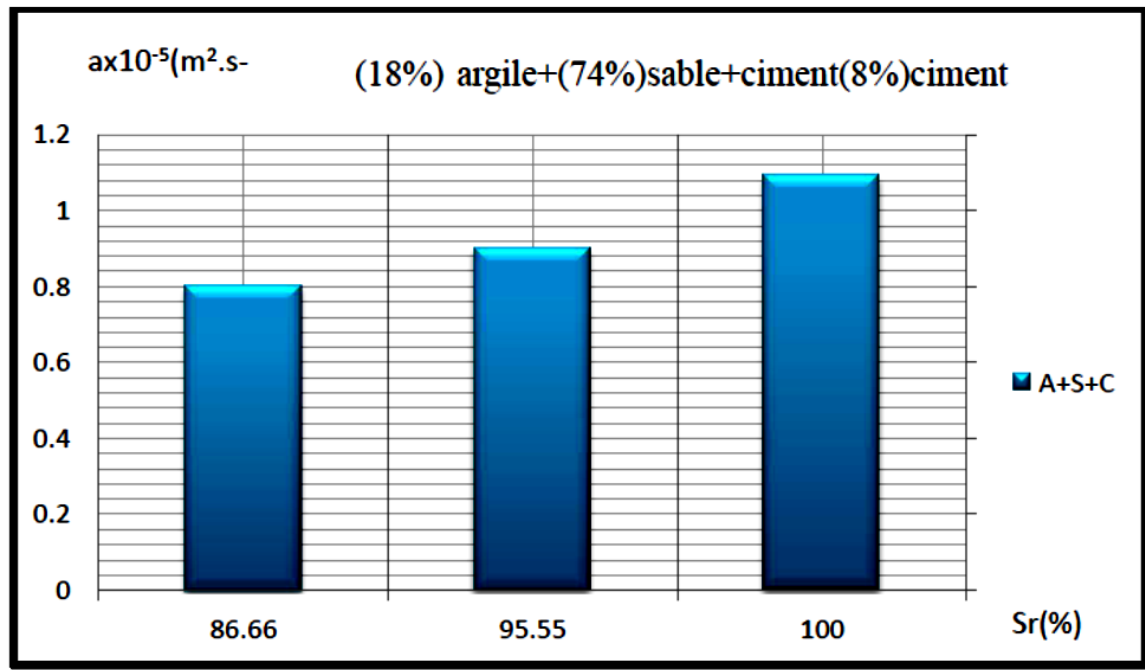


**Figure. IV.98 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable +(8%) ciment) et ((20%) argile + (80%)sable) [37].

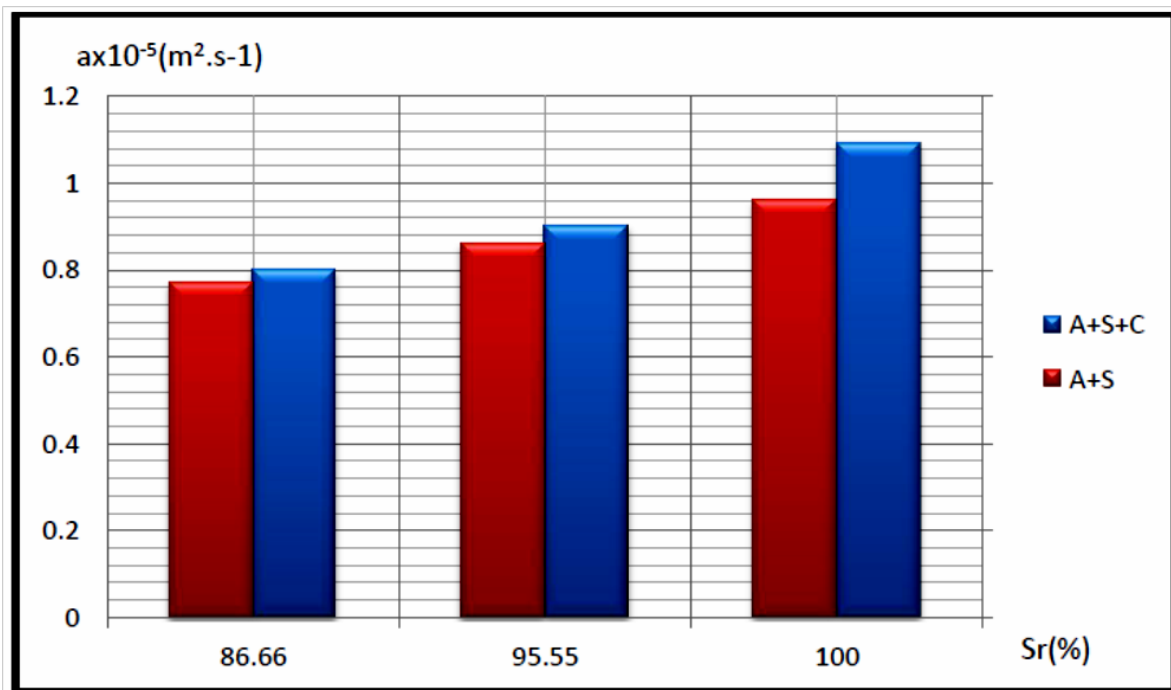
#### IV.3.2.2). la diffusivité thermique



**FigureIV.99 :** la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable) [37].



**Figure IV.100** : la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable + (8%) ciment) [37].

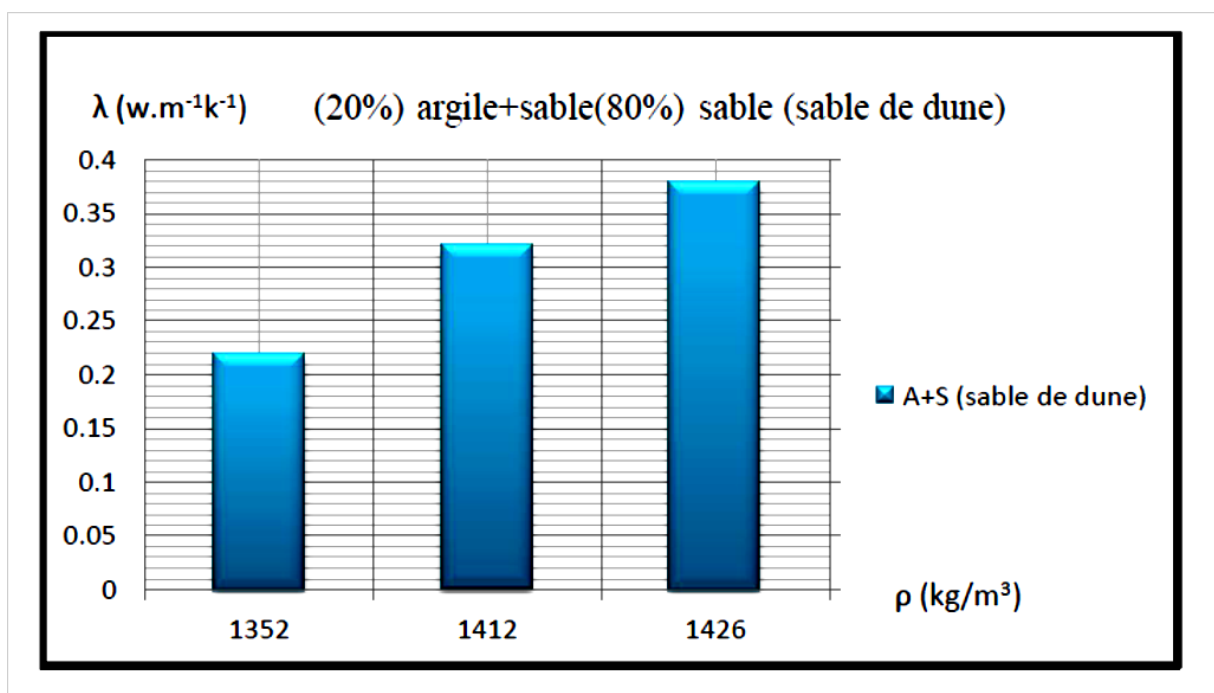


**Figure IV.101** : la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation

((18%) argile+ (74%) sable+ (8%)ciment) et ((20%) argile + (80%) sable) [37].

La conductivité et la diffusivité thermique croit avec l'augmentation de taux de saturation donc l'élévation de quantité d'eau implique une augmentation des propriétés thermique ce ci montré que la conductivité de l'eau est supérieur à la a la conductivité de l'air.

Ce résultat montre que la conductivité dépend à la porosité des matériaux. Plus les matériaux est poreux, plus il est isolation, ainsi que l'eau facilite la diffusion d'énergie a traversé l'échantillon



**Figure IV.102** : la variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique [37].

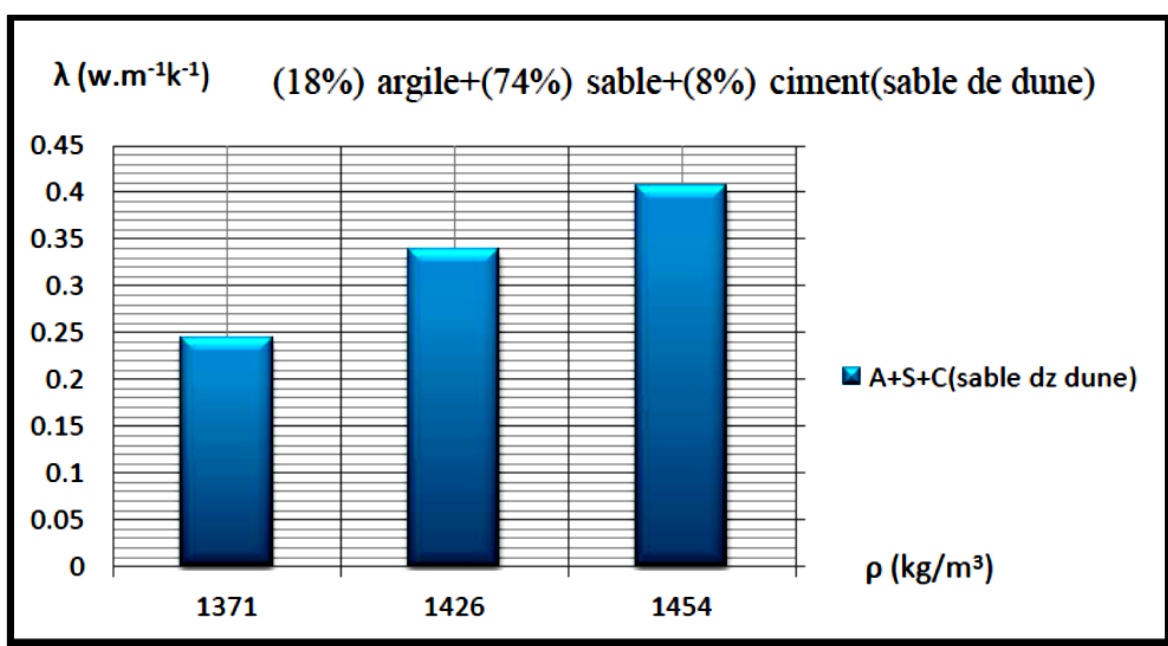


Figure IV.103 : la variation de la conductivité thermique on fonction de masse volumique [37].

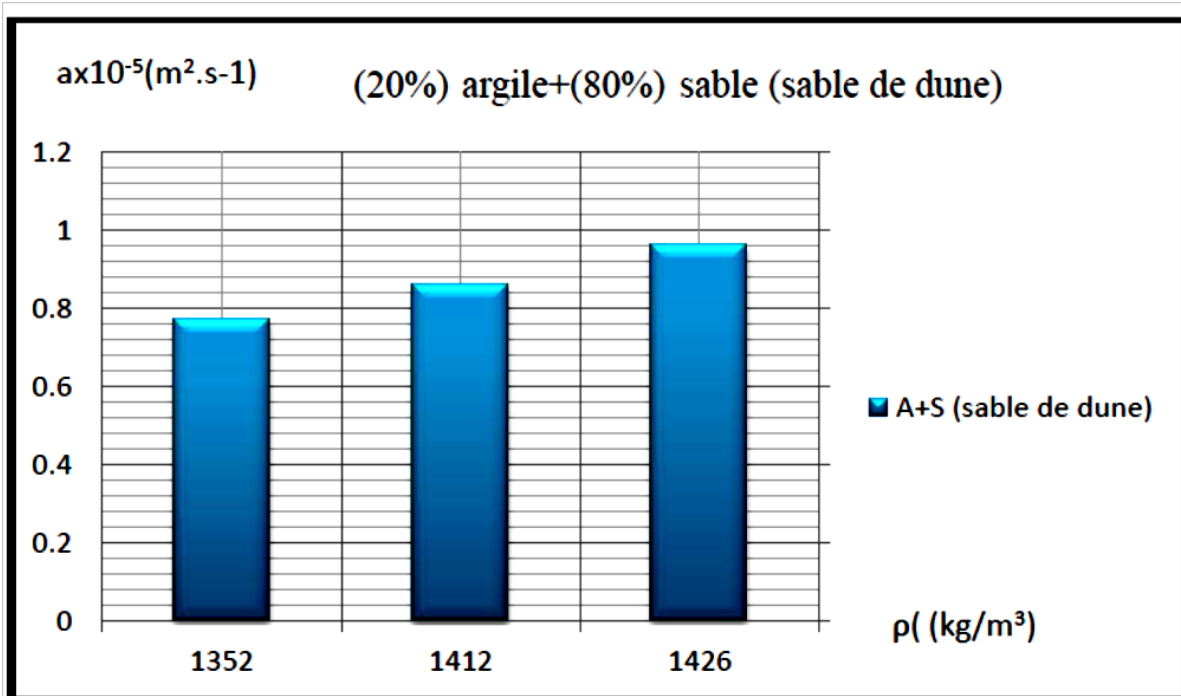
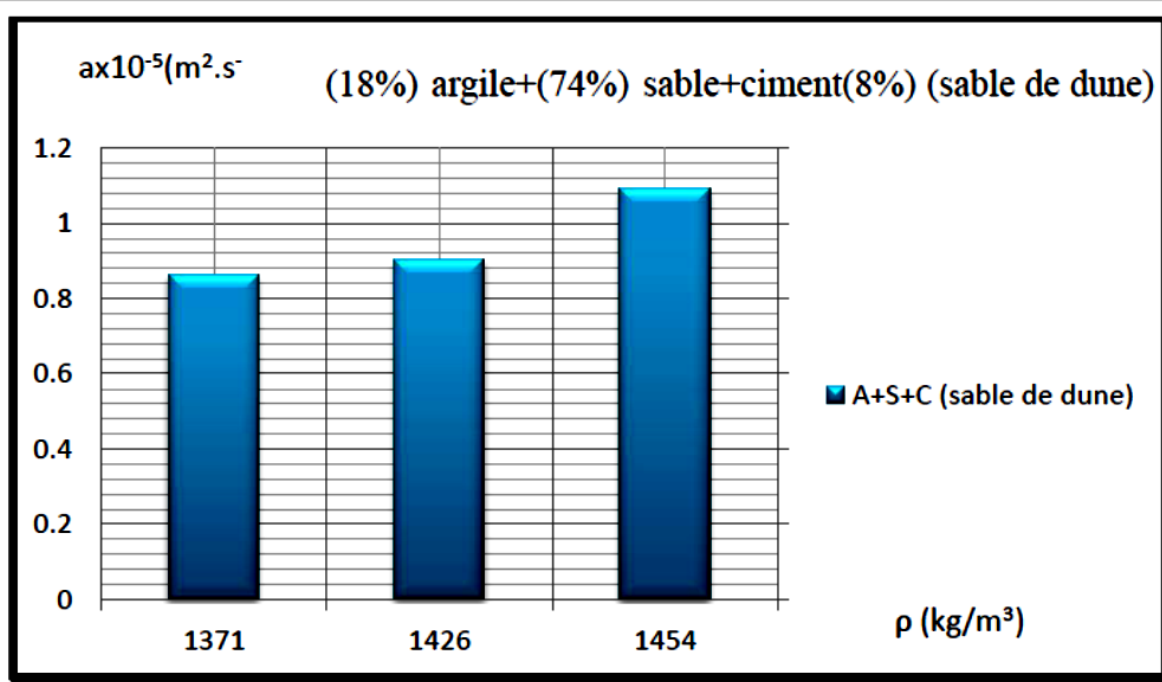


Figure IV.104 : la variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique [37].



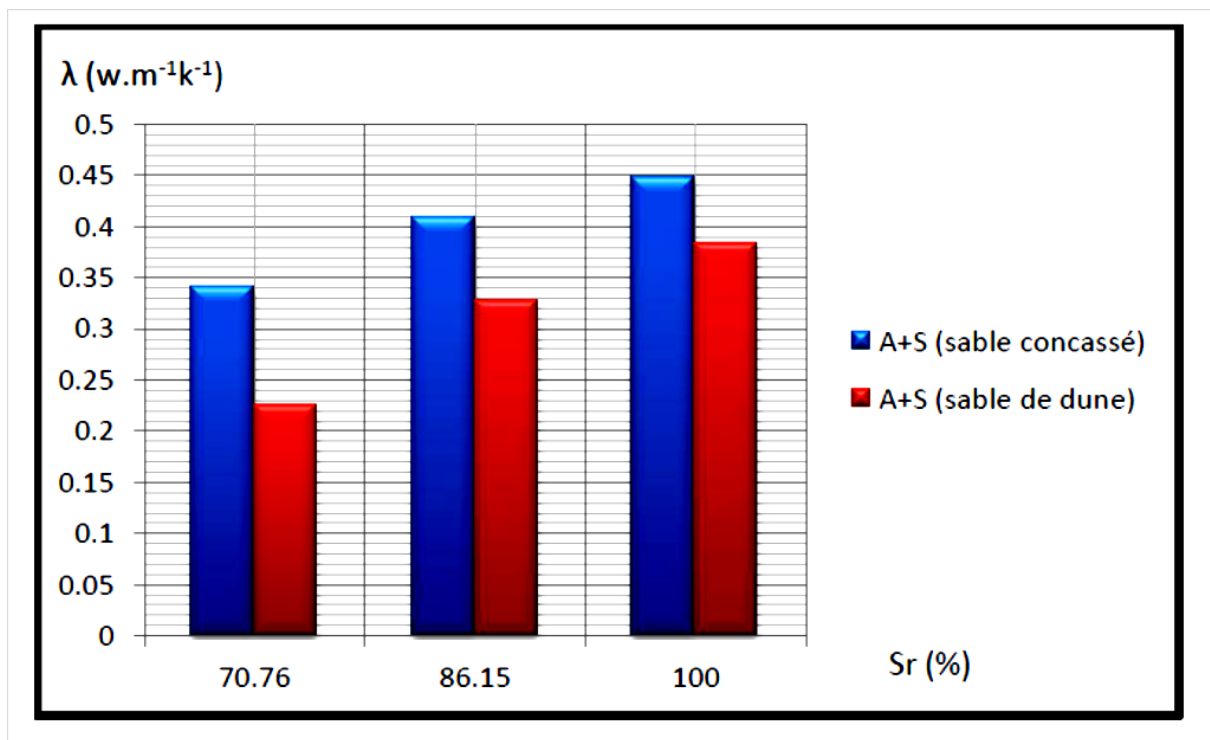
**Figure IV.105 :** la variation de la diffusivité thermique on fonction de masse volumique [37].

A partir ces résultats on observe l'évolution de conductivité thermique avec l'augmentation de masse volumique, donc on peut dire que la relation entre la masse volumique et la conductivité thermique est presque linéaire.

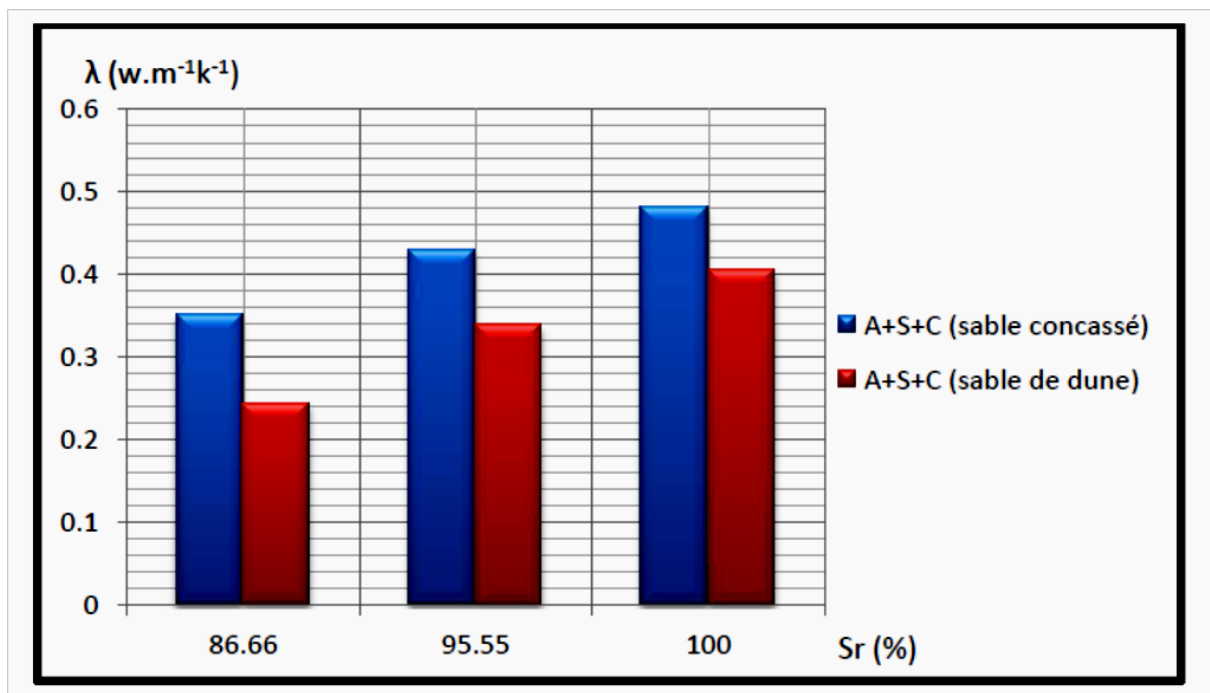
**Tableau IV.07:** propriété thermo physique d'un bloc de terre d'argile (sable de dune) [37].

	e (m)	Sr (%)	$\lambda$ (w.m <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> )	a (m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	R (m <sup>2</sup> k/w)	Cp (j.kg <sup>-1</sup> .k <sup>-1</sup> )	E (js <sup>(1/2)</sup> m <sup>2</sup> k <sup>-1</sup> )
(20%) argile + (80%) sable	0,04	100	0,38	0,96 x 10 <sup>-5</sup>	1,426 x 10 <sup>3</sup>	1,804	0,277x10 <sup>2</sup>	122,51
		97,4	0,32	0,86 x 10 <sup>-5</sup>	1,412 x 10 <sup>3</sup>	2,143	0,263x10 <sup>2</sup>	109,01
		82,8	0,22	0,77 x 10 <sup>-5</sup>	1,352 x 10 <sup>3</sup>	3,117	0,211x10 <sup>2</sup>	79,22
(18%) argile+(74%) sable + (18%) ciment	0,04	100	0,406	1,09 x 10 <sup>-5</sup>	1,454 x 10 <sup>3</sup>	1,689	0,256x10 <sup>2</sup>	122,93
		95,55	0,338	0,9 x 10 <sup>-5</sup>	1,426x10 <sup>3</sup>	2,029	0,263x10 <sup>2</sup>	112,58
		86,66	0,243	0,86 x 10 <sup>-5</sup>	1,371x10 <sup>3</sup>	2,822	0,206x10 <sup>2</sup>	82,84

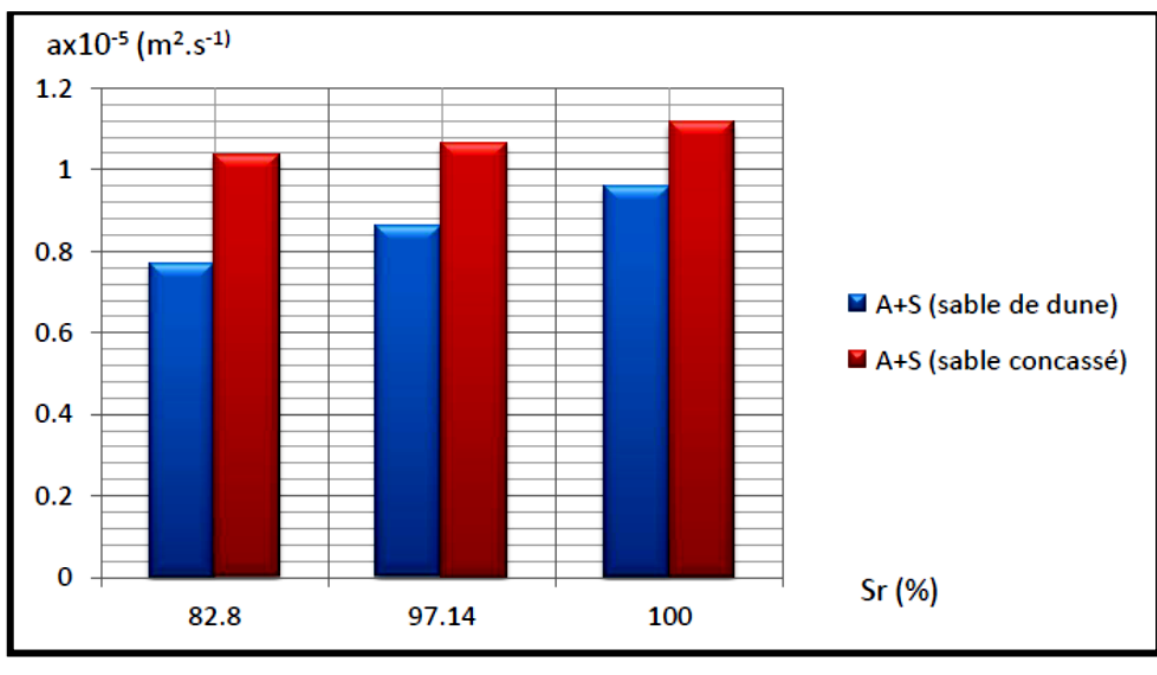
## IV.3.3). comparaison entre les deux types de sables



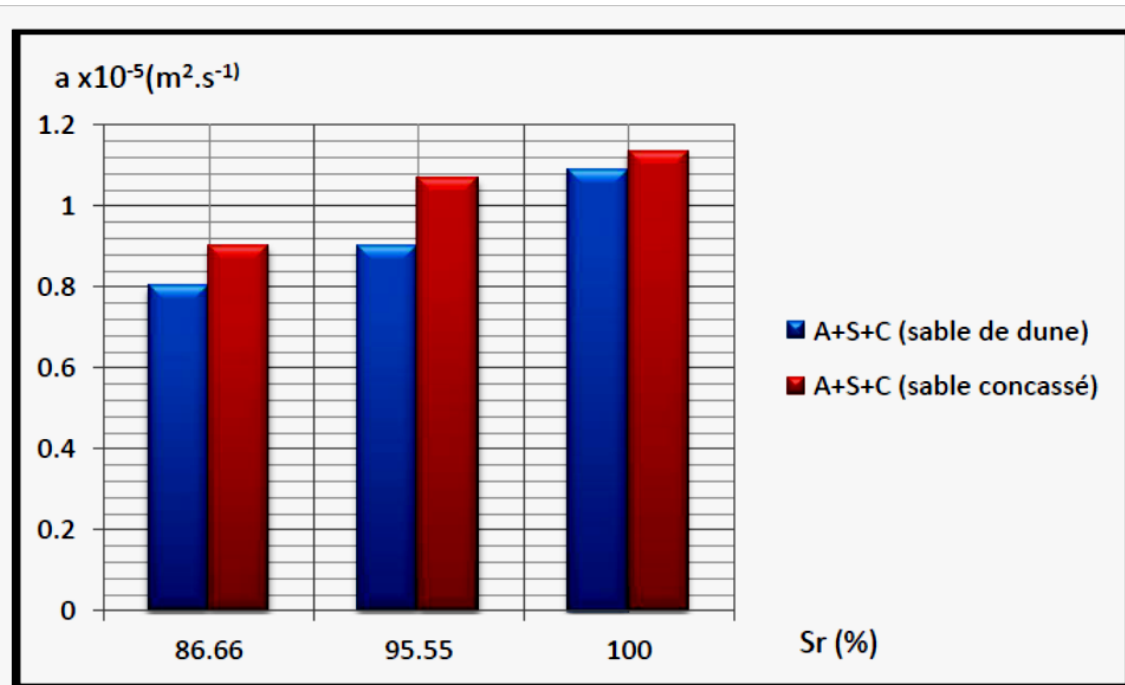
**Figure IV.106:** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile + (80%) sable)[37].



**Figure IV.107 :** la variation de la conductivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable +(8%)ciment) [37].



**Figure IV.108 :** la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((20%) argile +(80%)sable) [37].



**Figure IV.109 :** la variation de la diffusivité thermique on fonction de taux de saturation ((18%) argile + (74%) sable +(8%) ciment) [37].

La conductivité prend la valeur 0,481 dans l'échantillon contient le sable concassé et 0,406 de le l'échantillon contient le sable de dune a l'état de saturation et la valeur 0,35 et 0,243 pour l'état moine de saturation.

L'observation de ces résultats obtenus montré que la conductivité thermique d'échantillon de sable concassé est supérieure à l'échantillon de sable de dune, il est une meilleure isolation thermique que l'autre. Cette différence dépende a le type de sable utilisé d'une.

D'après sa on conclure que la conductivité thermique d'un béton d'argile croit avec l'augmentation de diamètre de granulat, donc la conductivité thermique de sable concassé supérieure de la conductivité de sable de dune. Ceci est atteint Côté et Konrad (2008) et de Wakao et Kato (1969) [36].

Qu'ils sont démontré que 'pour des petits diamètres de particules, i.e.  $d_p < 10$  mm, la forme des particules a un effet notable sur la conductivité thermique. En effet, À Est .plus élevée pour des particules concassées que pour des particules arrondies.

On observe que la diffusivité thermique prendre le même comportement que la conductivité thermique, donc il Ya une forte relation entre ces deux grandeur thermophysique cette forte liaison se voit sur le fait que la croissante de la conductivité thermique facilite la conduction d'énergie à travers l'échantillon.

On observe que la chaleur massique et l'effusivité thermique croit avec l'augmentation de taux de saturation en eau mais la résistance thermique évolue dans le sens opposé. Donc on peut dire que pus les propriétés thermiques telles que la chaleur massique et l'effusivité thermique faible, et plus la résistance thermique élevé plus le matériau isolant.

#### **IV.5). Conclusion**

On conclure que la conductivité et la diffusivité thermique croit avec l'augmentation de taux de saturation et la masse volumique, ainsi que la chaleur spécifique et l'effusivité thermique croit avec l'élévation de taux de saturation.

D'après les résultats obtenus on dit que le bloc de terre qui contient le sable de dune a une bonne isolation thermique que le bloc qui contient le sable concassé. En générale le béton d'argile a une bon isolation thermique, pour cela nous conseillons de revenir à la construction par des matériaux locaux qui assurer le confort thermique et diminue la consommation d'énergie dans le bâtiment.



**Parti 02 : Résultats de la température de sol****V.1). Introduction**

Dans cette partie, nous comparons les résultats de simulation avec les résultats expérimentales que nous avons obtenues à l'aide de l'appareil 175T2, que nous avons placé dans une zone connue des propriétés physiques du sol à une profondeur de 1 m en utilisant un tube et en plaçant l'appareil de sorte que nous choisissons une période( janvier - février - mars )voir les photosV.01.Une étude l'évolution de la température du sol Et ambiante a été faite.



**Photos V.01.** L'appareille de 175T2

V.2 Présentation graphique des résultats

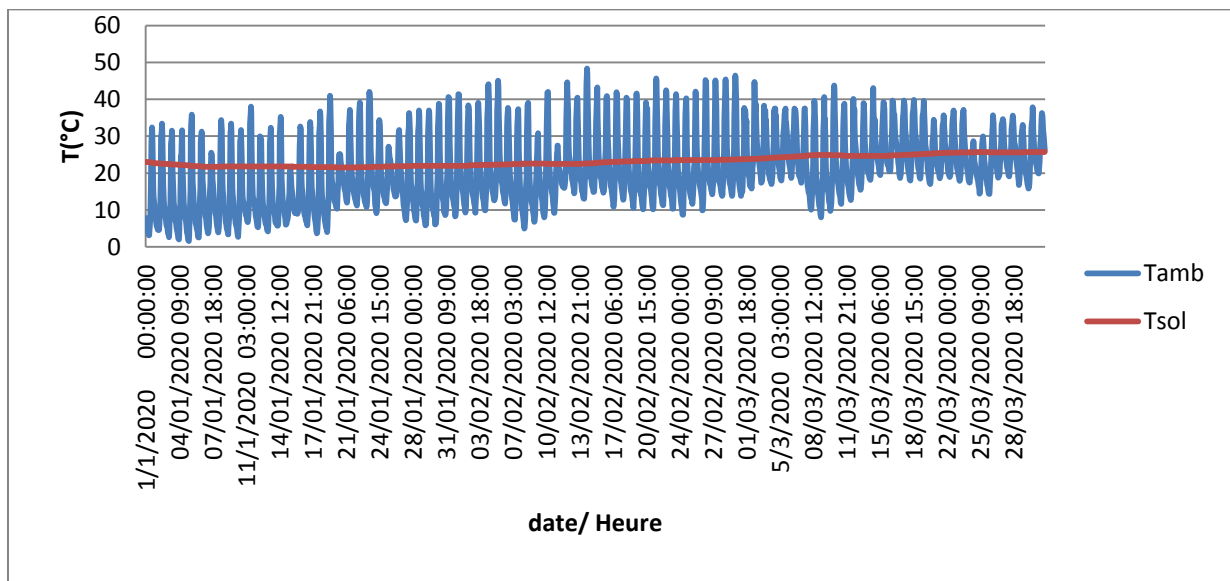


Figure V.1 Evolution de température ambiante et température de sol, mois (janvier, Février, Mars)

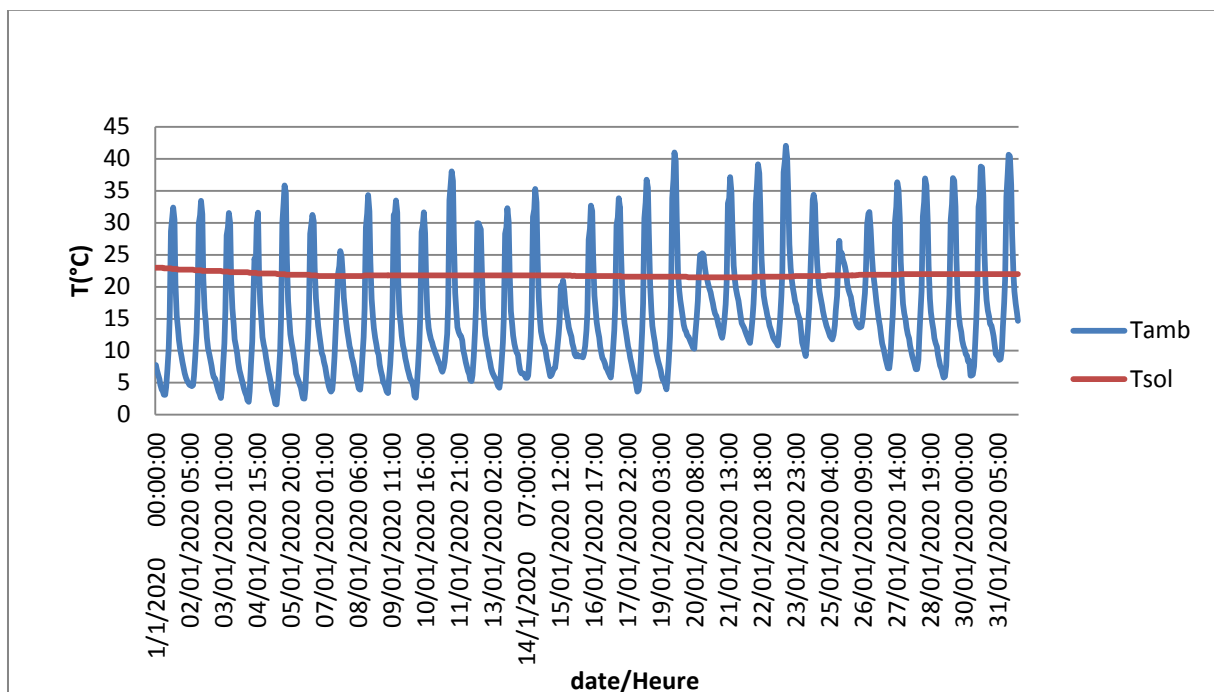


Figure V.2 Evolution de Température ambiante et Température de sol du mois janvier

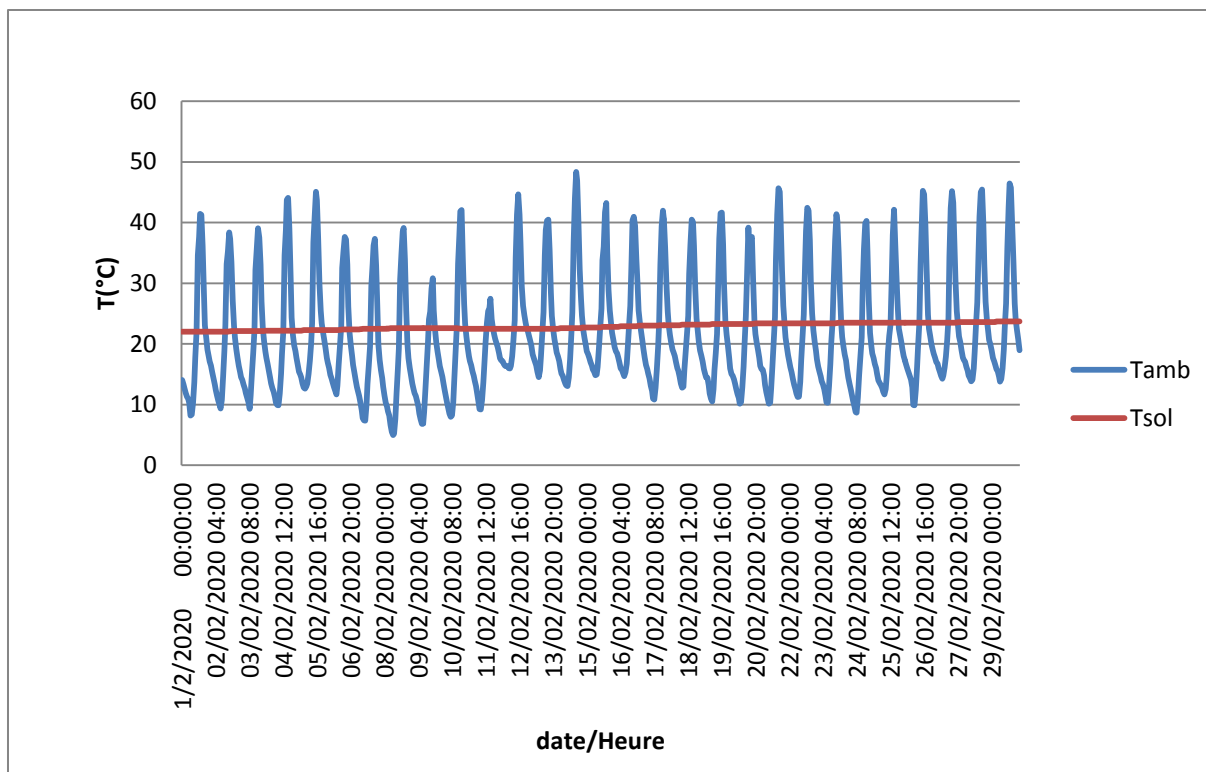


Figure V.3 Evolution de Température ambiante et Température de sol du mois Février

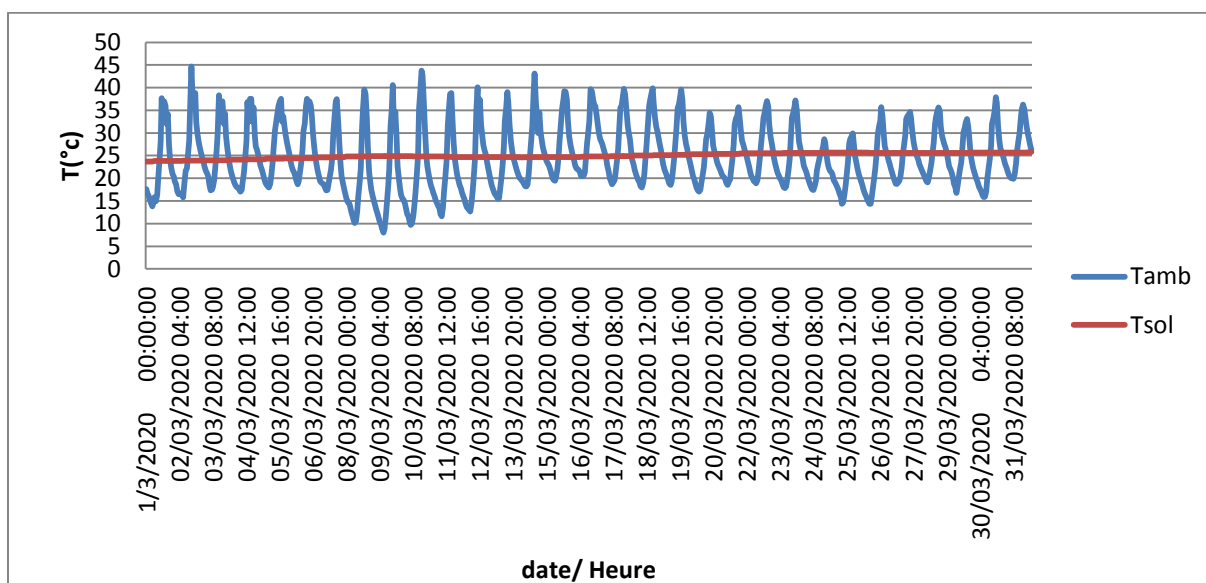
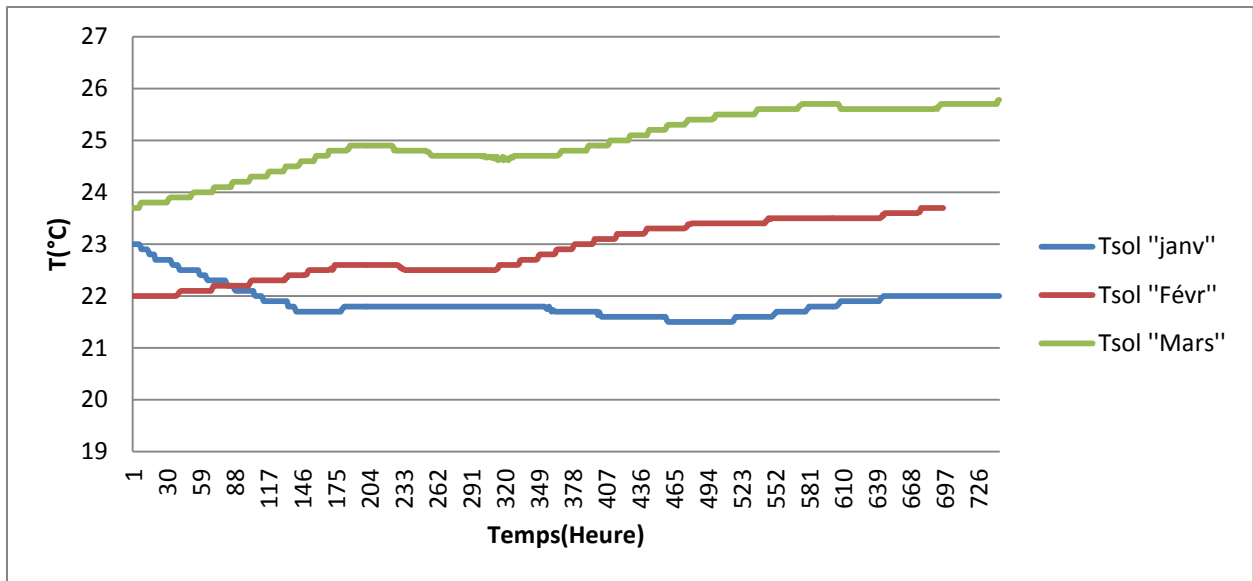


Figure V.4 Evolution de Température ambiante et Température de sol du mois Mars



**Figure V.5** Evolution de Température de sol du 3 mois

### V.3 Discussion les résultats

Les Figure sont des courbes qui représentent les évolutions de la température de sol en fonction de temps pour les trois mois janvier, Février et Mars.

D'après les figures V.2, V.3 et V.4 Nous remarquons que la Température du sol reste presque constant, Au moment où nous avons enregistré des changements remarquables de température ambiante .

En comparant les trois mois étudiés ci-dessus sur une période horaire, on constate que la température moyenne du sol à 1 m de profondeur varie entre 21,5°C et 23°C avec une amplitude de 1,5°C pour le mois de janvier et entre 22°C et 23,7°C avec une amplitude de 1,7°C pour le mois de février. En revanche, celle de mois de mars varie entre 23,7°C et 25,7°C avec une amplitude de 2°C (Fig. V.5).

Nous notons **Figure. V.5** que la Température de sol est importante et diminue au mois de janvier, tandis qu'au mois de février de mars il augmente et que ce changement est dû au changement de l'atmosphère environnante et de la zone dans laquelle l'étude a été menée.

## V.4 Validation

Pour valider notre résultats expérimentaux on a fait une comparaison celle avec les résultats de simulation.

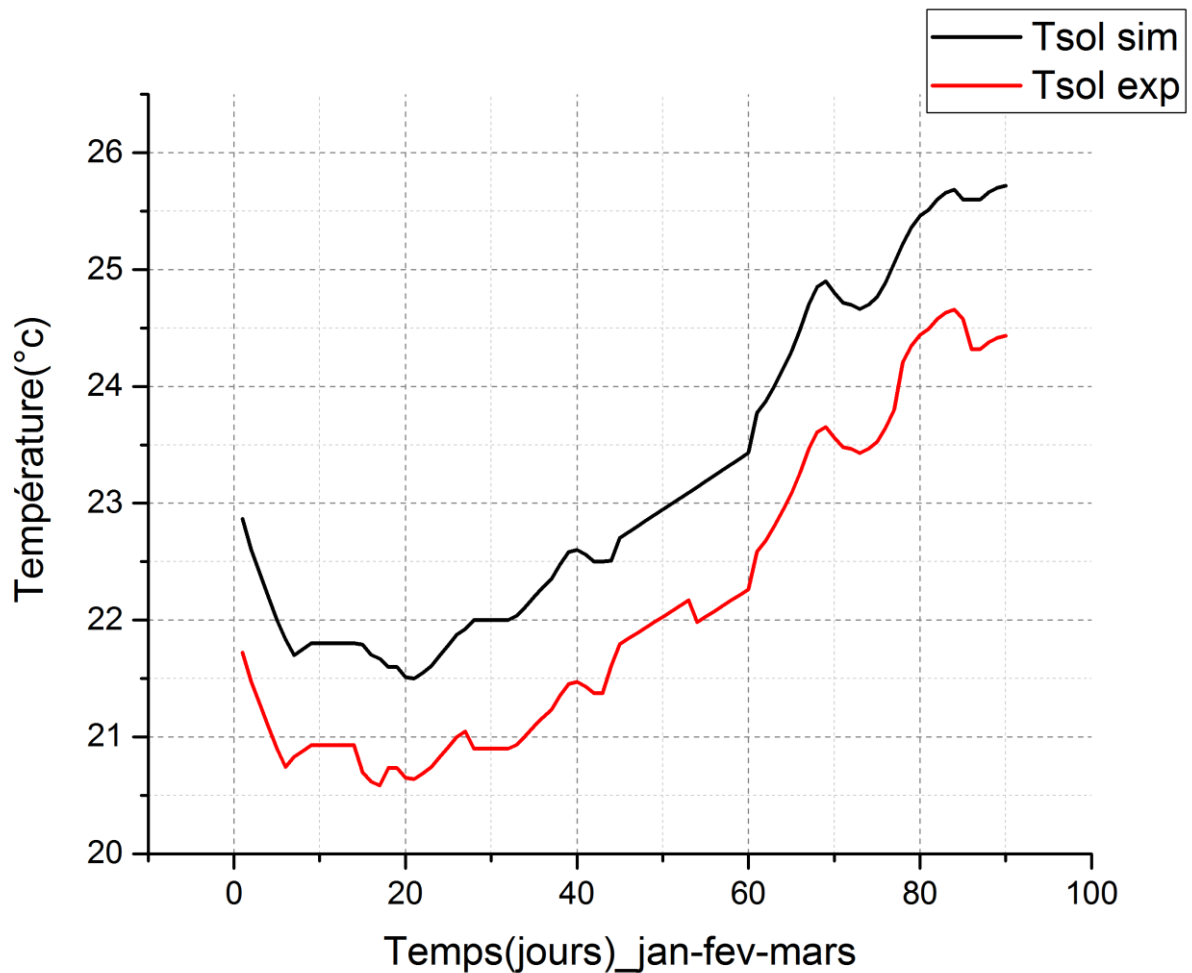


Figure V.6 Température du sol prévue et mesurée

## V.5 Discussion les résultats

La figure est une courbe graphique représentant la simulation et l'expérimentale des changements de température du sol en termes de temps, de sorte que l'on remarque que les changements de Tsolsim sont supérieurs à Tsol exp, et on remarque que Tsol exp a démarré à une température de  $T_{sol\ exp} = 21,7(^{\circ}C)$  par rapport à  $T_{sol\ sim} = 22,9(^{\circ}C)$ , et on note que les

deux courbes sont dans un mouvement variable jusqu'à atteindre  $T_{\text{sol sim}} = 25.6$  (°C) et  $T_{\text{sol exp}} = 24.6$  (°C). Ceci est dû aux changements de température ambiante dans la zone.

Les températures du sol prévues et mesurées à des profondeurs de 1 m du mois de janvier, février et mars, sont présentées sur le **Fig. V.6**. Nous remarquons, un accord entre les valeurs mesurées et prédites avec une précision variant entre 0.75 et 1.12 C a été trouvée.

Il est à noter que les erreurs entre les prévisions et les mesures des températures sont causées par les propriétés thermiques du sol qu'ils ont utilisées dans la simulation qui peuvent être différentes par rapport aux propriétés thermiques du sol réel au site de l'expérience.

## V.6 Conclusion

Enfin, nous concluons que les résultats obtenus à partir des résultats expérimentaux de l'évolution de la température du sol et de l'étude numérique sont quasiment constants, ce qui signifie qu'il existe un lien entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux.

Conclusion générale

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Les travaux de cette étude visent à estimer la température du sol pour la région d'Adrar dans les conditions météorologiques environnantes.

Nous avons fait une étude pratique à l'aide de l'appareil **175T2** en choisissant une profondeur de 1 m, et nous avons choisi un mois (janvier - février - mars) pour mettre l'appareil et enregistrer les résultats, ainsi qu'une étude numérique utilisant le programme Fortran, qui était basé sur certaines propriétés physiques du sol.

Ce travail vise également une étude expérimentale de l'évolution de la température du sol d'une part et une étude numérique d'autre part, et les résultats obtenus montrent que la température du sol reste quasiment constante tout au long de trois mois, ce qui signifie qu'il existe un lien entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux, et cette étude est considérée comme la première expérience que nous ayons faite. À l'Université d'Adrar, c'était presque une expérience réussie, nous recommandons donc

- Déterminer les propriétés physiques du sol de site qui vous avez étudié, ainsi que la profondeur.



# REFERENCES

## Références

---

### Références

- [1] **BOUVENOT A.**, « Transferts de chaleur », Edition 2010.
- [2] **Dr TAYEB OUKSEL.** Cours TRANSFERTS THERMIQUES. 3<sup>ème</sup> année licence énergétique. Université labri Ben M'hidi .2016-2017
- [3] **YVES J.**, « transferts thermiques », Ecole des mines Nancy, Edition 2012.
- [4] **YVES J.**, « Théorie et pratique de la métrologie thermique » Ecole des mines Nancy, Edition 2008.
- [5] **Fiche Thermique** « Isolation thermique », Mairie de Paris, Edition Novembre 2009.
- [6] **SAINT G.**, « Introduction à la thermique de bâtiment », Edition 2012.
- [7] **CLONED J.**, « Les matériaux isolantes thermiques pour le bâtiment », Centre d'animation régional en matériaux avancé, Mai 2010.
- [8] **REME**, « Guide maghrébin des matériaux d'isolation thermique de bâtiment », Edition 2010.
- [9] **Dr TAYEB OUKSEL.** Cours TRANSFERTS THERMIQUES. 3<sup>ème</sup> année licence énergétique. Université labri Ben M'hidi .2016-2017
- [10] **M. Benhammou1 et B. Draoui**, " Modélisation de la température en profondeur du sol pour la région d'Adrar - Effet de la nature du sol", Revue des Energies Renouvelables Vol.14, N°2, pp. 219-228, 2011.
- [11] **Taoufik MNASRI, Rached BEN YOUNES, Atef MAZIOUD, Jean. Félix DURASTANTI**, " Etude du coefficient de transfert d'un échangeur bi tubulaire enterré en régime instationnaire", Congrès Français de Thermique, SFT 2007.
- [12] **M.S. Guellouz et G. Arfaoui**, " Potentiel de la géothermie de surface pour le chauffage et la climatisation en Tunisie ", Revue des Energies Renouvelables CICME'08 Sousse, pp. 143-151, 2008.
- [13] **S. Ouali, A. Khellaf et K. Baddari**, " Etude géothermique du Sud de l'Algérie", Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4, pp. 297-306, 2006.
- [14] **Yacine AHMOUDA.** Etude numérique des phénomènes d'écoulement et d'échanges thermiques dans un échangeur eau/sol enterré de forme U.2014
- [15] **Nahi, Karim**, Application de la simulation numérique dans l'étude technique de la Géothermie par nappes horizontale de tuyauterie appliquée à un projet immobilier mixte de Commerces, bureaux et hôtel, à finalité spécialisée en énergies renouvelables ,2016-2017  
<http://hdl.handle.net/2268.2/3369>

## Références

---

- [16] **ORFI, J., GALANIS, N. et NGUYEN, C.T.**, « Développement simultané Hydrodynamique et thermique d'un écoulement laminaire dans un tube incliné en régime de convection mixte », *Revue Générale de Thermique*, Vol 1. 36, P. 83-92. (1997)
- [17] Stéphane Thiers, ' Bilans énergétique et environnementaux des bâtiments à énergie positive' thèse de doctorat, L'école national des mines Paris, 2008.
- [18] M.Rahachi et Al ' 'Etude d'une nouvelle technique de mesure des températures dans le sol'', article-revue Gén therm-Elsevier, Paris (1997) P (851-860)
- [19] laborationnotionnels de métrologie et d'essais, les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologique, article LNE ,2010
- [20] **Pierre MOUKAM** « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment ; pour obtenir le grand de docteur d'université ; Spécialité, Energétique – Génie Civil » **10-12-2004**
- [21] cellule de mesure de conductivité EI700 ,2007.
- [22] **Nassima sotehi**, caractéristique thermique des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation, thèse doctorat ,2010.
- [23] **Hakkom soumia**, étude de caractéristiques thermiques et mécanique des briques en terre crute traditionnelles dans les régions de la wilaya d'Ouargla, mémoire magister ,2015
- [24] **Z. CHELGHOUM et A. BELHAMRI** « Analyse des propriétés thermiques des matériaux de construction utilisent dans la ville de Tamanrasset»
- [25] **Mekhermehe Abdessalam** : contrubition à l'étude des propriétés mécaniques et thermique des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des ksours sahariennes, mémoire magister, université Ouargla, 2012
- [26] **pro.A.Mermoud** : cour de physique du sol« Régime thermique du sol », école polytechnique, janvier 2006
- [27] **Belloufi Yousef**, « Modélisation d'un échangeur air-Sol dont le but de rafraichissement des locaux», Master ,2012
- [28] **Hans Dieter Baehr, Karl Stephan**. Heat and Transfer. 2 nd Edition Springer – Verlag Berlin Heidelberg (2006) Germany

## Références

---

- [29] **Stephane Thiers, Bruno Peuportier.** Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth- to – air heat exchanger in France. *Solar Energy* 82 (2008) 820-831
- [30] **Stéphane Thiers** «Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines, (2008), Paris, France.
- [31] **Benhammou Mohammed,** Analyse et caractérisation d'un système géothermique de rafraichissement approprié aux logements bâtis au sud Algérien, thèse doctorat, 2015
- [32] **Sayeh Menhoudj,** Study of the energy performance of an earth-Air heat exchanger for refreshing buildings in Algeria, *Energy and Buildings* 158 (2018) 1602–1612
- [33] **Djamel Belatrche,** Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates, *international journal of hydrogen energy* xxx ( 2 0 1 6 ) 1 e7
- [34] **CHEBANA Abdel basset,** Contribution à l'étude de la convection forcée à l'intérieur d'un échangeur en « U » à usage géothermique, Magister, 2015-2016
- [35] **F .Al-Ajmi,** The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, *Building and Environment* 41 (2006) 235 - 244
- [36] **Marie-Hélène Fillion :** mesure de la conductivité thermique étude la perméabilité intrinsèque d'assemblages de cailloux, 2008.
- [37] **Bendahir, F et Elfodda, K:** Caractérisation thermo-physique des matériaux locaux a base d'argile, 2017

## Résumé :

Vu le développement industriel et socioéconomique que connaissent plusieurs pays en voie de développement entre autres, l'Algérie, la demande en énergie est en pleine croissance. Les énergies conventionnelles d'origine fossile sont très polluantes et en voie de disparition dans quelques décennies. De ce fait, le recours aux énergies renouvelables est une bonne alternative, car ces énergies sont très économiques disponibles en permanence et conservatrices de l'environnement. Une de ces énergies est la géothermie qui consiste à extraire les calories emmagasinées dans le sol, soit pour la production du chauffage dans les saisons froides, soit pour la production du froid dans les saisons chaudes. Le but de ce travail est une étude expérimentale de l'évolution de la température de sol d'un part et une étude numérique d'autre part.

Les résultats obtenus nous indiquent que la température de sol reste presque constant durant toute l'année par rapport la variation de la température extérieure ainsi un bon raccord entre les résultats de simulation et les résultats expérimentales.

**Mots clés:** Géothermie - Modélisation - Température du sol - expérimentales.

## Abstract :

Given the industrial and socioeconomic development experienced by several developing countries including Algeria, the demand for energy is growing. Conventional fossil fuels are very polluting and endangered in a few decades. Therefore, the use of renewable energies is a good alternative, because these energies are very economical available permanently and conservative of the environment. One of these energies is geothermal energy, which consists of extracting the calories stored in the ground, either for the production of heating in the cold seasons, or for the production of cold in the hot seasons. The goal of this work is an experimental study of the evolution of soil temperature on the one hand and a numerical study on the other.

The results obtained indicate that the soil temperature remains almost constant throughout the year with respect to the variation in the outside temperature, thus a good connection between the simulation results and the experimental results.

**Keywords:** Geothermal energy - Modeling - Soil temperature - experimental.

:

## الملخص

بالنظر إلى التنمية الصناعية والاجتماعية والاقتصادية التي شهدتها العديد من البلدان النامية بما في ذلك الجزائر، فإن الطلب على الطاقة أخذ في الازدياد. الوقود الأحفوري التقليدي ملوث للغاية ومعرض للخطر في غضون بضعة عقود. لذلك فإن استخدام الطاقات المتجددة هو بديل جيد ، لأن هذه الطاقات اقتصادية للغاية ومتوفرة بشكل دائم ومحافظة على البيئة. إحدى هذه الطاقات هي الطاقة الحرارية الأرضية، والتي تتكون من استخراج السرعات الحرارية المخزنة في الأرض، إما لإنتاج التدفئة في المواسم الباردة، أو لإنتاج البرودة في المواسم الحارة. الهدف من هذا العمل هو دراسة تجريبية لتطور درجة حرارة التربة من جهة ودراسة عددية من جهة أخرى.

تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن درجة حرارة التربة تظل ثابتة تقريبًا على مدار العام فيما يتعلق

بالتباين في درجة الحرارة الخارجية، وبالتالي وجود صلة جيدة بين نتائج المحاكاة والنتائج التجريبية.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الحرارية الأرضية - النمذجة - درجة حرارة التربة - التجريبية