

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Saad Dahleb Blida 1



Faculté des sciences
Département de physique
Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique
Option : physique appliquée

Thème :

**Détermination des propriétés thermique par la méthode Flash
Laser : Modèle analytique**

Présenté par :

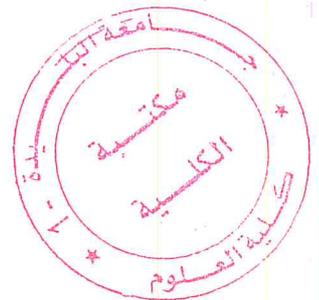
NEDJARI Fatiha

Soutenu le 15 / 10 / 2018 devant le jury composé de :

Mr BENAMAR. M. E Professeur. BLIDA1 Président

Mme MEBDOUA. Y. Directeur de Recherche CDTA Encadreur

Mr MEZIANE. M. C MAA BLIDA1 Examineur



Blida 1-2017/2018-

Remerciements

« Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de me donner l'occasion de poursuivre mes études à l'université de Blida 1 »

Ce travail a été mené au sein du laboratoire « FUNDAPL » du département de physique, faculté des sciences, Université de Blida 1.

*J'exprime mes sincères remerciements à Mme **MEBDOUA Yamina** pour accepte d'être le promotrice de mon mémoire*

*Mes remerciements vont également au Monsieur le professeur **BENAMAR Mohamed El Amine** directeur de laboratoire à l'Université de Blida 1, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon mémoire.*

*Je remercie chaleureusement Mr **MEZIANE Mohamed Cherif**, d'avoir accepté de participer au jury et pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce mémoire.*

*Je remercie Mme **MAADADI Sarah***

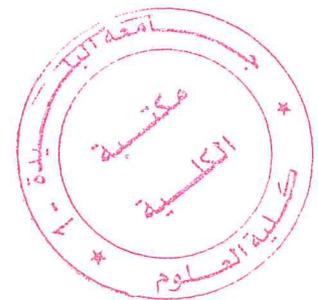
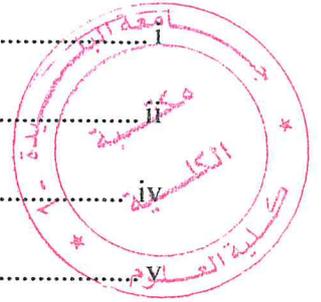


Table des matières

Remerciement	i
Sommaire	ii
Liste de figures	iv
Résumé	v
Liste des nomenclateurs	vi
Introduction générale	1

Chapitre I : Propriétés thermiques des matériaux

1. Introduction.....	2
2. Les Propriétés thermiques des matériaux :.....	2
2.1 Conductivité thermique :.....	2
2.2 Capacité thermique massique :.....	2
2.3 La diffusivité thermique :.....	2
3-Les matériaux :	3
3.1 Les céramiques :	3
3.2 Les métaux :	4
3.3 Les polymères :.....	5
4-Méthodes de mesure des propriétés thermique :.....	5
4-1.Méthodes en régime permanent:.....	5



4.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée:.....	6
4.1.2Méthode dite à flux radial ou cellule à cylindres coaxiaux :.....	6
4.2. Méthodes en régime quasi établi :.....	6
4.2.1. Méthode du fil chaud :.....	7
4.2.2. Méthodes de contact Sondes thermiques :.....	7
4.2.3la méthode flash laser :.....	7
5-Choix d'une méthode :.....	8
6-Conclusion :.....	8

Chapitre II : la méthode Flash Laser

1-Introduction :.....	10
2-Principe de fonctionnement d'un flash laser :.....	11
3-Dispositif :.....	13
4- Conclusion :.....	14

Chapitre III : développement analytique

1. Introduction:	15
2. théories de la méthode flash:	15
3. l'expression finale de la diffusivité thermique.....	20
Conclusion :.....	22
Liste de référence :	23

Liste des nomenclateurs

$[a]$: Diffusivité thermique

$[\rho]$: Densité

$[c_p]$: Chaleur spécifique

$[\lambda]$: Conductivité thermique

$[T]$: Température

$[B_n]$: Coefficient de la fonction de Fourier

$[T_{eq}]$: Température équivalent

$[\varphi]$: Flux de chaleur

Liste de figures

Figure1- : plaque céramique

Figure 2 : différents métaux

Figure 3 : polymère.

Figure 4: Modèle de la Méthode de la plaque chaude gardée

Figure 5: Modèle de la Méthode dite à flux radial ou cellule à cylindres coaxiaux

Figure 6: Modèle Méthodes du fil chaud

Figure 7: Modèle Méthodes de contact Sondes thermiques

Figure 8: Modèle thermique pour la méthode flash laser

Figure 10 : Principe de la méthode "Flash"

Figure 11 : Exemple de montage expérimental de méthode Flash-Laser

Figure12 ;La conduction thermique en absence de sources de chaleur dans le volume d'échantillon

Figure 13 : la fonction de Fourier, binaire, périodique $2L$

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en une étude théorique de la méthode dite « flash Laser » appliquée aux matériaux pour remonter à leurs propriétés thermiques, à savoir, la diffusivité thermique qui est fonction de la conductivité thermique et de la capacité calorifique du matériau.

L'évaluation de la diffusivité thermique est basée sur l'étude de la propagation de la chaleur dans l'échantillon traité. Le modèle analytique permettant de remonter à la diffusivité thermique a été développé dans ce travail en se basant sur la résolution de l'équation de la chaleur correspondant à la géométrie et au modèle de l'échantillon examiné.

الخلاصة :

يتألف العمل المقدم في هذه المذكرة من دراسة نظرية لما يسمى بطريقة " flash Laser " المطبقة على المواد لتحديد خصائصها الحرارية ، وهي الانتشار الحراري الذي هو دالة الموصلية الحرارية والقدرة الحرارية للمادة.

يعتمد تقييم الانتشار الحراري على دراسة انتشار الحرارة في العينة المعالجة. تم تطوير النموذج التحليلي للانتشار الحراري الصاعد في هذا العمل بناءً على حل المعادلة الحرارية.

Liste des nomenclateurs

$[a]$: Diffusivité thermique

$[\rho]$: Densité

$[c_p]$: Chaleur spécifique

$[\lambda]$: Conductivité thermique

$[T]$: Température

$[B_n]$: Coefficient de la fonction de Fourier

$[T_{eq}]$: Température équivalent

$[\varphi]$: Flux de chaleur

Introduction général

Les sciences des matériaux sont basées sur les propriétés d'un matériau, sa morphologie structurale et sa mise en service ceci constitue tous les matériaux qui nous entourent. La connaissance des phénomènes microscopiques (arrangement des atomes, cristallisation, formation de phases, ...etc.) permet aux scientifiques et industriels la possibilité d'élaborer des matériaux aux propriétés et aux fonctions souhaitées.

La conception d'un matériau implique des défauts (par exemple : précipités, atomes interstitiels, lacunes, dislocations, etc.) pour créer des matériaux avec les propriétés désirées.

La connaissance de ces propriétés est aussi un domaine recherche qui met en œuvre aussi bien des outils expérimentaux que théorique.

C'est dans ce contexte que le travail de ce mémoire s'inscrit. Nous nous intéressons à introduire les méthodes expérimentales permettant de remonter aux propriétés thermique d'un matériau, et nous développons ensuite un modèle analytique adapté à une méthode de mesure.

Il existe plusieurs méthodes de mesure des propriétés thermiques, nous choisissons dans ce travail la méthode la méthode flash laser considérée comme l'une des méthodes les plus utilisées compte tenu des ses avantages avérés, cette méthode a été conçue pour la première fois par Parker [1]

la méthode flash est une méthode d'impulsion dans laquelle, on soumet la face avant de l'échantillon à une impulsion thermique courte, et puis, une analyse de l'évolution de la température dans le temps le temps (thermogramme) sur la face arrière de l'échantillon est enregistrée. Le système a été développé pour réduire un. [2-8].

Ce mémoire est présenté en trois chapitres, le premier chapitre consiste en une étude bibliographique sur les techniques de mesure des propriétés thermiques. Nous présentons par la suite la méthode Flash laser choisi dans ce travail. Le chapitre 3 présente le développement analytique utilisé comme modèle de mesure dans la méthode de Flash Laser.

Chapitre I

Chapitre 1 : Propriétés thermiques des matériaux

1. Introduction: Ce chapitre se propose dans un premier temps d'énoncer quelques généralités sur les propriétés thermiques des matériaux, ensuite nous présentons quelques méthodes de mesure des propriétés thermiques des matériaux.

2. Les Propriétés thermiques des matériaux :

Les propriétés thermiques et les propriétés physiques des matériaux sont des paramètres essentiels. Ils décrivent le comportement des matériaux soumis à des transferts thermiques (conductivité thermique, diffusivité thermique, capacité calorifique [1].

2.1 Conductivité thermique : La conductivité thermique notée λ s'exprime en

$$w. (m^{-1}). (K^{-1})$$

et correspond au flux de chaleur traversant un mètre de matériau soumis à un écart de température de 1 kelvin entre la face entrante et la face sortante. Plus la conductivité thermique est grande, plus le matériau sera un bon conducteur de chaleur [2].

2.2 Capacité thermique massique : La capacité thermique massique notée C s'exprime

$$\text{en } J. (kg^{-1}). (K^{-1})$$

Elle traduit l'aptitude d'un matériau à absorber de la chaleur et à s'échauffer et intervient dans les problèmes thermiques instationnaires.

$$C = \frac{1}{m} * \frac{dQ}{dT}$$

2.3 La diffusivité thermique : La diffusivité thermique notée α et s'exprime en $m^2 .s^{-1}$ est la grandeur qui régit le comportement thermique d'un matériau en régime transitoire, elle caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur plus ou moins rapidement. Cette grandeur peut être reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$$

3-Les matériaux Il y a trois grandes familles de matériaux : Métaux (Fe, Al, Cu, ..) ,I Céramiques (Al₂O₃, Si₃N₄, SiC, etc.) Verres, Organiques Polymères (Thermoplastiques, Élastomères etc.)

3.1 Les céramiques : Le mot céramique désigne essentiellement les poteries, porcelaine, brique. Il représente actuellement l'ensemble des matériaux inorganique non métallique [3]. Les céramiques sont à base d'oxydes ou des composés chimique. La structure et la microstructure sont définies lors du cycle d'élaboration, qui transforme des matières premières le plus souvent pulvérulentes en un matériau dense, idéalement exempt de pores [5].

Ce sont des poly cristaux qui sont fabriqués par frittage d'un mélange d'oxydes et que leur procédé de fabrication peut être modulé comme leur composition afin d'ajuster leurs performances diélectriques, mécaniques et piézoélectriques. Les propriétés des céramiques vont dépendre de leur microstructure, c'est à dire la morphologie, la nature des phases présente et la qualité de la surface [6]. Les principales utilisations de ces matériaux concernent toute l'instrumentation électroacoustique: émission et détection des ultrasons, microphones, télécommandes, générateurs d'impulsion, [3].



Figure1- : plaque céramique.[3].

3.2. Les métaux : Les métaux sont des éléments chimiques capables de conduire l'électricité et la chaleur, qui présentent une luminosité caractéristique et qui, à l'exception du mercure, sont solides à la température normale.

Le concept est utilisé pour désigner des éléments purs ou des alliages ayant des caractéristiques métalliques. Parmi les différences avec les non-métaux, il y a lieu de mentionner que les métaux ont une faible énergie d'ionisation ainsi qu'une faible électronégativité.

Les métaux sont tenaces (ils peuvent recevoir des forces soudaines sans se briser/casser), ductiles (on peut en faire des fils ou des câbles), malléables (ils deviennent des feuilles/lames lorsqu'ils sont comprimés) et ont une bonne résistance mécanique (ils résistent aux efforts de traction, de flexion, de torsion et de compression sans se déformer).

Il y a des métaux qui apparaissent sous la forme d'éléments primaires (le cuivre, l'or, l'argent), tandis que d'autres peuvent être obtenus à partir des oxydes, des sulfures, des carbonates ou des phosphates. Les métaux sont très souvent utilisés dans l'industrie car ils offrent une grande stabilité et ont une grande protection contre la corrosion.

Au début on utilisait ceux qui étaient faciles à trouver à l'état pur, mais les autres ont commencé à être utilisés progressivement (ceux qui étaient obtenus à partir de l'utilisation de fours). [7]. [8]. [9]. [10].

L'utilisation du minerai de cuivre avec de l'étain a contribué à créer l'alliage connu sous le nom de bronze, qui a donné naissance à une nouvelle ère historique (l'âge du bronze).

Aujourd'hui, on peut distinguer entre les différents types de métaux, y compris les métaux précieux (ceux que l'on trouve à l'état naturel sans nécessité de les combiner avec d'autres pour former des composés) et les métaux lourds (ceux qui présentent une haute densité et ont une certaine toxicité). [11].



Figure 2 : différents métaux. [8].

3.3. Les polymères : On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales et appelées monomères reliées par des liaisons covalentes [12] donc qui regroupe toute matériau formées par la répétition d'un très grand nombre n de petites molécules de faible masse moléculaire appelées monomères qui liés entre eux par des liaisons primaires sachant que le monomère est une molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore comportant des fonctions réactives à ses extrémités. [13]. L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation. La réaction de polymérisation est également utilisée par les organismes vivants [14], Il existe plusieurs modes de classification des polymères que peuvent être classés selon divers critères, selon leur nature chimique : On distingue,

Polymères minéraux comme Polymères organiques, Polymères mixtes, et Selon l'origine comme Les polymères naturels, Les polymères artificiels : (dérivés des polymères naturels).

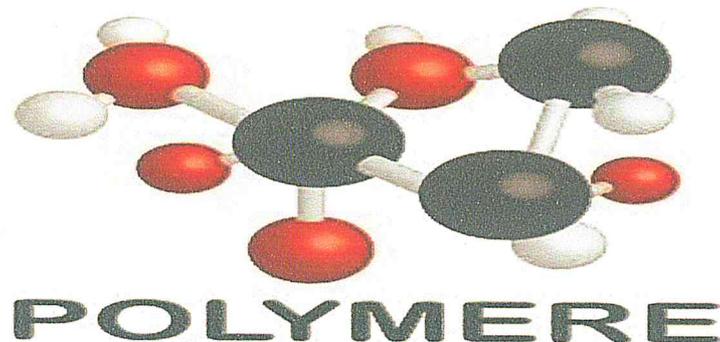


Figure 3 : polymère. [13].

4-Méthodes de mesure des propriétés thermiques : il existe plusieurs paramètres de classement des méthodes de mesure. Le type de mesure, la géométrie, La forme de la perturbation et le régime dans ce travail, nous avons choisi a classification par régime pour plus de simplification.[15].

4-1.Méthodes en régime permanent

De façon générale, les méthodes en régime permanent se basent sur un modèle unidirectionnel et stationnaire : on s'affranchit de la dépendance temporelle présente dans l'équation de la chaleur en partant du principe que le système a atteint une situation d'équilibre [13].

4.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée : La méthode de la plaque chaude gardée est la méthode stationnaire la plus utilisée pour mesurer la conductivité thermique des isolants ($\lambda < 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [14..15]. Elle est notamment employée pour la mesure de propriétés thermiques des matériaux isolants [16]

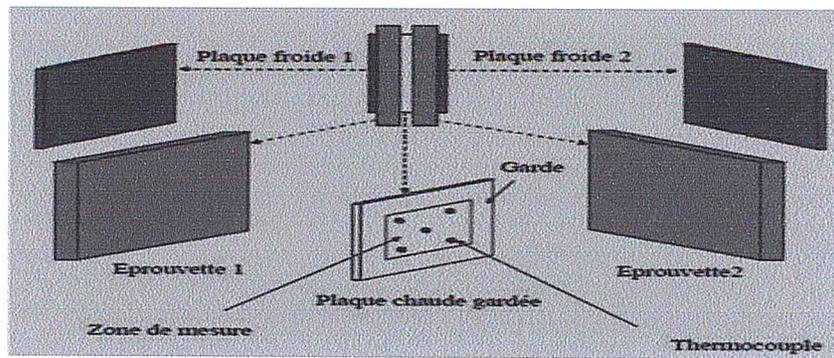


Figure 4: Modèle de la Méthode de la plaque chaude gardée [32].

4.1.2. Méthode dite à flux radial ou cellule à cylindres coaxiaux : Le principe de la méthode dite à flux radial est, en de nombreux points, similaires à celle présentée précédemment. La principale différence réside dans la géométrie du modèle, qui sera cylindrique. Pour introduire la méthode, étudions la répartition de température dans un cylindre [17].

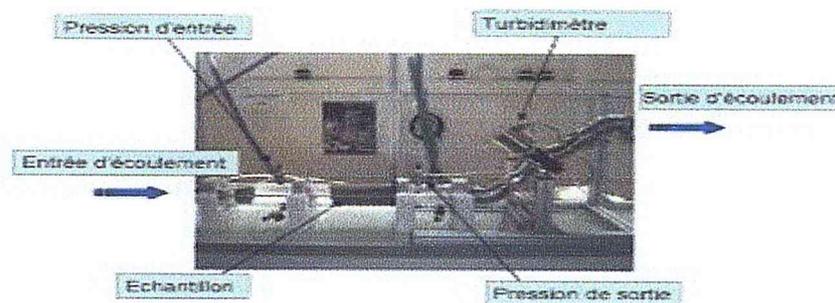


Figure 5: Modèle de la Méthode dite à flux radial ou cellule à cylindres coaxiaux.[32].

4.2. Méthodes en régime quasi établi

Les méthodes en régime quasi-établi sont dépendantes du temps. Par ailleurs, elles permettent, contrairement aux méthodes en régime permanent, d'évaluer des paramètres comme la diffusivité thermique et la capacité thermique.

4.2.1. Méthode du fil chaud : La méthode du fil chaud est la méthode de référence pour la mesure de conductivité thermique des liquides et des gaz [16.17]. Cette méthode a été initialement introduite pour des mesures sur les liquides non conducteurs mais a progressivement été adaptée pour la caractérisation de liquides en général, de gaz et même de solides [19, 18].

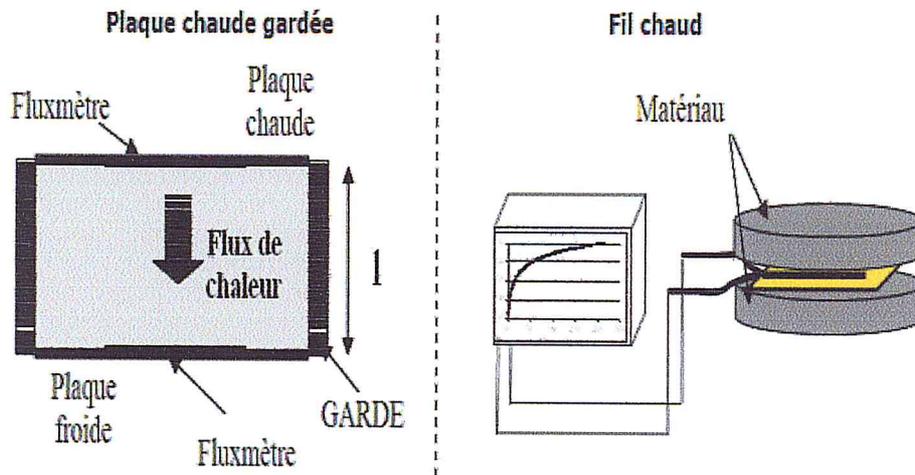


Figure 6: Modèle Méthodes du fil chaud[32].

4.2.2. Méthodes de contact, Sondes thermiques : Une manière simple d'apporter une perturbation à un corps initialement à l'équilibre est de le mettre directement en contact avec un corps à une température différente ou avec une source de chaleur (soit en le pressant mécaniquement contre le corps, soit en l'insérant entre deux corps identiques) [20].

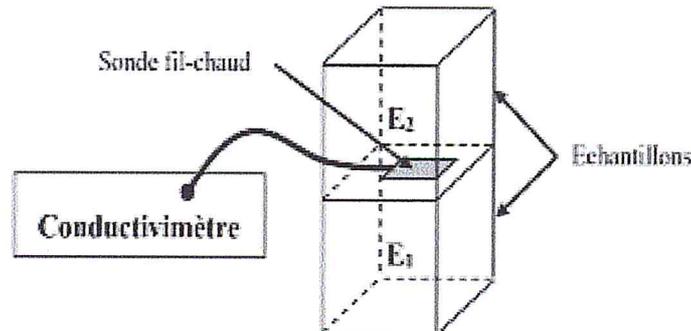


Figure 7: Modèle Méthodes de contact Sondes thermiques[32].

4.2.3. La méthode flash laser : La méthode flash laser classe de méthodes de métrologie. Mesure la diffusivité thermique, qui, à condition de connaître la capacité calorifique et la masse volumique, permet de remonter à la conductivité thermique. C'est aujourd'hui la plus connue et la plus utilisée dans ce domaine

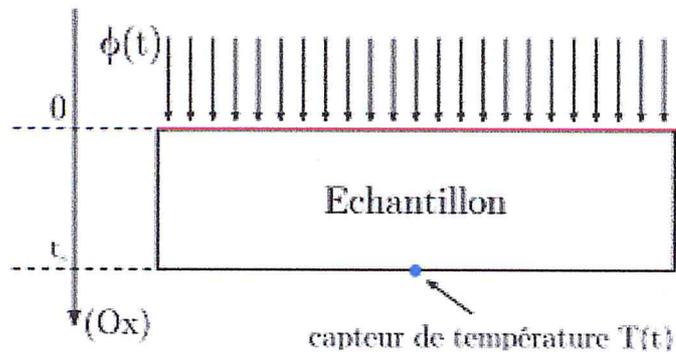


Figure 8: Modèle thermique pour la méthode flash laser[32].

Considère que l'échantillon est perturbé de manière homogène sur sa face avant par une impulsion supposée infiniment courte. La propagation se fait dans l'échantillon de manière unidirectionnelle et adiabatique. La température est mesurée en face arrière. Le problème peut se mettre en l'équation de la façon suivante

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = D \frac{(\partial^2)T(x,t)}{\partial x^2} \dots\dots\dots(1) \quad I$$

5-Choix d'une méthode : les méthodes pour mesure les caractérisations de propriétés thermique, montre qu'il n'existe pas de solution unique adaptée à toutes les problématiques. Le choix de la méthode doit répondre aux besoins spécifiques des travaux. Certaines méthodes permettent de mesurer la conductivité thermique.

Dans ce travail la méthode flash laser a été choisie c'est une méthode rapide environ 6 minutes lorsque la température désirée est atteinte

6-Conclusion : Ce chapitre regroupe les concepts généraux des propriétés thermiques des matériaux. La deuxième partie du chapitre a été consacrée aux différentes techniques de la mesure des propriétés thermique et le choix de la méthode.

Chapitre II

Chapitre 2 : La méthode flash laser

1-Introduction

La méthode flash laser mesure la diffusivité thermique, à condition de connaître la capacité calorifique et la masse volumique, elle permet de remonter à la conductivité thermique. Cette méthode initialement introduite en 1961 par Parker dans un article paru dans le journal de physique appliquée [21,22], a énormément évolué et évolue toujours dans les laboratoires de recherche afin de s'adapter aux besoins. Il y a des applications industrielles (méthode de contrôle basée sur une mesure relative de diffusivité thermique), permettant le contrôle non destructif de films (épaisseur, défaut de délaminage,). Cette méthode est dite «impulsionnelle» car la perturbation qui vient déséquilibrer le système est une impulsion de très courte durée. L'impulsion est générée grâce à un canon à électrons, un laser ou une lampe flash ce qui a donné le nom à la méthode. Il est supposé que la chaleur générée en surface se propage par conduction sans perte dans l'échantillon. [23].

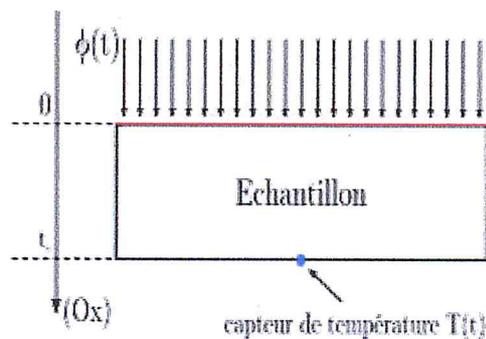


Figure 9 : Model thermique pour la méthode flash [32].

Modèle utilisé pour la méthode flash. Une impulsion énergétique vient chauffer la face de l'échantillon..

Le modèle laser flash de Parker considère que l'échantillon est perturbé de manière homogène sur sa face par une impulsion supposée infiniment courte.

La propagation se fait dans l'échantillon de manière unidirectionnelle et adiabatique. La température est mesurée en face arrière. Le problème peut se mettre en équation de la façon suivante [24] :

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \rho \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad x = T(x,t) = \frac{\phi}{\lambda} \sigma(t) x = cts \dots\dots\dots(1) \quad \Pi$$

$$T < 0 \quad T(x,t) = T_0$$

Où ϕ est la densité surfacique d'énergie de l'impulsion, t_s l'épaisseur de l'échantillon. La résolution de cette équation conduit à l'évolution spatiale et temporelle de la température dans l'échantillon :

$$T(x,t) = \frac{\phi}{(\rho c_p) t_s} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi}{t_s} x\right) e\left(-\frac{n^2 \pi^2 \rho}{t^2} t\right) \right) \dots\dots\dots(2) \quad \Pi$$

L'énergie apportée par l'impulsion diffuse dans l'échantillon jusqu'à obtenir une température homogène[25]..

$$T_{lim} = \phi / \rho c_p t_s \dots\dots\dots(3) \quad \Pi$$

La plus commune est celle qui utilise le temps de mi-montée de déterminer la diffusivité thermique :

$$T\left(t = \frac{t}{2}\right) = \frac{T_{lim}}{2} \quad , \quad \rho \times \frac{t}{t^2} = 0.139$$

2-Principe de fonctionnement d'un flash laser

Une Méthode en régime variable, pour ce type d'analyse, l'échantillon doit se présenter sous la forme d'un disque parfaitement circulaire (un échantillon plan cylindrique et de petites dimensions par une brève impulsion thermique sur sa face avant) pour accommoder la géométrie du porte-échantillon. Nous avons 2 porte-échantillons dont le diamètre est de $25 \pm 0,5$ mm pour un et de $12,5 \pm 0,5$ mm pour l'autre. L'épaisseur de l'échantillon est préférablement entre 3 et 5 mm [26.27].

Pour effectuer une mesure, la surface inférieure d'un échantillon plan parallèle est chauffée par un bref pulse d'énergie. Le changement de température résultant sur la surface supérieure est alors mesuré avec un détecteur infrarouge. Plus la diffusivité thermique de l'échantillon est grande, plus le signal augmente rapidement.

α : Diffusivité thermique

ρ : Densité

c_p : Chaleur spécifique

λ : Conductivité thermique

T: Température

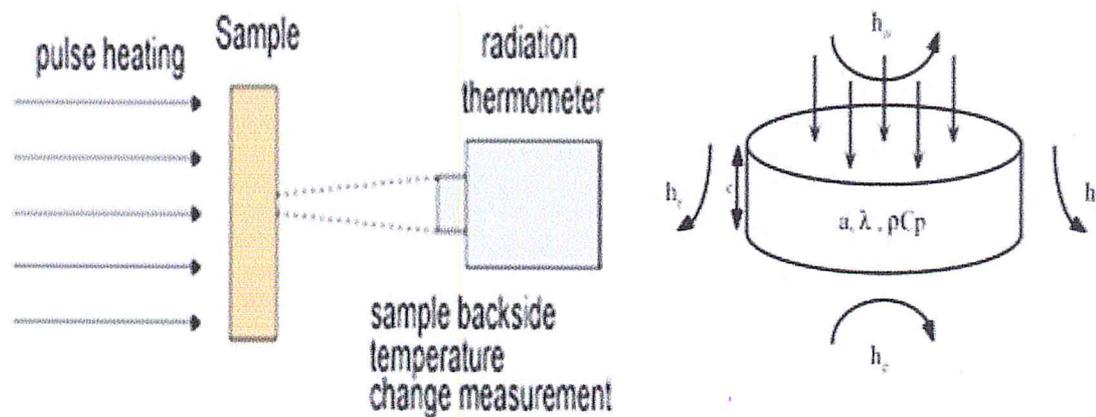


Figure 10 : Principe de la méthode "Flash"[8].

Une pièce cylindrique de rayon r , de conductivité thermique λ , de capacité thermique massique c , de masse volumique ρ et d'épaisseur très petite la température uniforme $T(t)$ au sein de la pièce à un instant donné, La pièce est chauffée uniformément par une source de puissance P mise en route à l'instant $t = 0$.

La face avant de ce disque est irradiée par une impulsion laser qui engendre un réchauffement du côté ciblé. L'évolution de la température dans le temps est enregistrée sur la face arrière du disque à l'aide d'un senseur optique.

L'acquisition des données doit se faire rapidement tout comme le transfert thermique se fait au travers du disque De plus, en connaissant la densité du matériau et la chaleur spécifique que l'on peut mesurer par calorimétrie à balayage différentielle peut calculer la conductivité thermique de ce matériau[28]

La mesure ensuite sa réponse en température soit de côté de la face irradiée, on parle ainsi de technique "face avant", soit sur la face opposée, il s'agit alors d'une technique de type "facearrière". L'échantillon est supposé homogène, isotrope et opaque. Ses propriétés thermiques sont également supposées constantes au cours de l'expérience (faible élévation de température)

3-Dispositif : La conception d'un appareil de mesure basé sur la méthode flash doit répondre à des exigences techniques bien particulières afin de se rapprocher le plus possible de la théorie.

L'installation de mesure par méthode flash comprend : une source d'énergie, une enceinte de mesure permettant de porter l'échantillon dans les conditions désirées, un détecteur thermoélectrique, une chaîne d'acquisition et de traitement de données, un micro-ordinateur de contrôle et de commande de l'ensemble des éléments de la chaîne de mesure.[29].

La mesure des variations de température en faces avant ou arrière, peut être réalisée à l'aide de thermocouples ou de détecteurs de rayonnement infrarouge. Les thermocouples sont utilisés en général pour les basses températures et des matériaux épais. Cependant pour l'étude en régimes transitoires rapides, ou dans les conditions de hautes températures, l'utilisation de détecteurs infrarouges est préconisée. Le choix du détecteur s'effectuant suivant la gamme de température de travail[30].

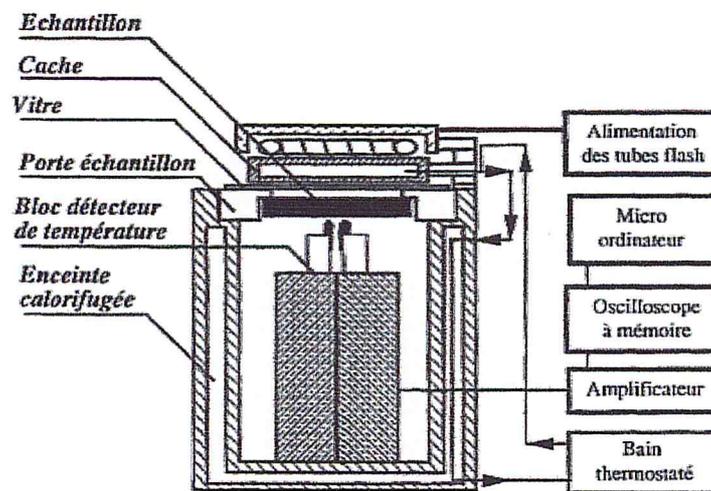


Figure 11 : Exemple de montage expérimental de méthode Flash-Laser.[29].

- **Alimentation flash :** Celle-ci doit être capable d'émettre l'impulsion lumineuse avec une durée d'impulsion idéal en pleine largeur à mi - hauteur. L'échantillon doit être irradié uniformément par l'impulsion lumineuse.

Lorsqu'un laser impulsionnel est utilisé pour l'impulsion lumineuse, le profil du faisceau direct est irrégulier en raison de l'oscillation multi-mode. Dans ce cas, le faisceau doit être converti en une optique d'homogénéisation à faisceau uniforme [31].

- **Enceinte régulée en température :** une enceinte capable de créer un climat avec une température, chaque appareil de sa fabrication est en adéquation parfaite avec les très hautes

exigences des essais de stabilité, chaque unité se caractérise par l'homogénéité parfaite de la température et la stabilité des paramètres sur tout l'espace utile [29].

- **Détecteur de température** : La mesure de la température de surface de la face arrière peut être effectuée soit à l'aide de couples thermoélectriques, soit par l'utilisation de détecteurs quantiques de rayonnement [33].

4- Conclusion :

La méthode Flash est une méthode employée couramment pour la caractérisation thermique de matériaux, C'est aujourd'hui la plus connue et la plus utilisée pour des résultats rapides de la conductivité thermique d'échantillons de petites dimensions. Beaucoup de travaux ont eu lieu sur cette méthode. Une importante partie de traitement numérique intervient alors pour remonter à la diffusivité thermique, notamment le développement de modèles plus complexes prenant en compte les pertes thermiques convection radiatives ou encore la durée non négligeable de l'impulsion

Chapitre III

Chapitre III : Développement analytique

1. Introduction :

La technique de Flash laser est une méthode relativement simple qui permet la détermination des propriétés thermo-physiques des matériaux: la diffusivité thermique α , la capacité calorifique C_p (chaleur spécifique) et la conductivité thermique K .

. Cette méthode consiste à soumettre la face avant d'un échantillon ayant des faces parallèles à une impulsion de chaleur à court terme en utilisant des lampes à haute puissance (lampes flash) ou lasers et observer l'évolution temporelle de la température à un point sur le côté arrière en utilisant un exemple de thermocouple ou un détecteur de rayonnement (photodiode infrarouge). Cette méthode, assez simple, très répandue dans les laboratoires de métrologie [34]

2. Théories de la méthode flash

2.1. La partie de conduction thermique:

La conduction thermique en absence de sources de chaleur dans le volume d'échantillon est représentée par la figure suivante :

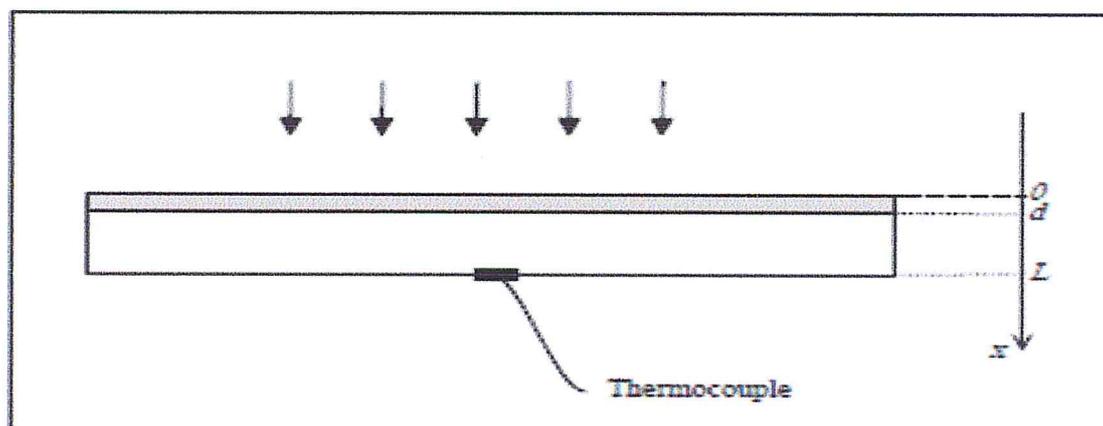


Figure12 ;La conduction thermique en absence de sources de chaleur dans le volume d'échantillon

$$\nabla^2 T(x, r, \varphi, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots \text{III} \quad (1)$$

Où α est la diffusivité thermique

$\frac{\partial T}{\partial t}$: variation dans le temps de la température du matériau, Ks^{-1}

∇^2 : Laplacien de la température du matériau, m^{-2}

Alors trouvons comment on peut obtenir l'équation 1

On a l'équation de la chaleur dans une dimension est sous la forme suivante:

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \dot{q} = \varphi c_p \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots \text{III} \quad (2)$$

Comme nous le savons, il n'y a pas de source de chaleur donc :

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] = \varphi c_p \frac{\partial T}{\partial t} \dots \dots \dots \text{III} \quad (3)$$

$$\nabla^2 T(x) = \frac{\varphi c_p}{\lambda} \frac{dT}{dt} \dots \dots \dots \text{III} \quad (4)$$

Enfin nous avons l'expression de l'équation (1) et nous pouvons définir α la diffusivité thermique comme : $\frac{\varphi c_p}{\lambda}$ et son unité est $\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}} \right]$.

L'échantillon peut être considéré comme une plaque infinie limitée par le plan $x = 0$ et $x = L$.

En supposant que l'absorption de chaleur ait lieu sans perte de chaleur dans la couche mince isolée thermiquement (d'épaisseur g) près de la surface de l'échantillon et que la température de cette couche à la forme de la fonction de Dirac delta et la valeur suivante : $Q/(\rho c_p g)$ (Où Q représente l'impulsion d'énergie rayonnante [cal/cm^2]), g est une profondeur, ρ est la densité en [g/cm^3] et C_p est la capacité calorifique en [$\text{Cal}/\text{g}^\circ\text{C}$]).

Maintenant nous allons résoudre l'équation de la chaleur:

$$\nabla^2 T(x, r, \varphi, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

L'équation de la diffusion est une équation différentielle partielle. En physique, elle décrit le comportement du mouvement collectif des microparticules dans un matériau résultant du mouvement aléatoire.

Nous cherchons de connaître le champ de température $T(x; t)$ dans l'échantillon. Pour écrire l'équation vérifiée par $T(x; t)$, puis chercher la solution de cette équation sous la forme: $T(x; t) = T_i + f(x)g(t)$ et déterminer les formes générales des fonctions $f(x)$ et $g(t)$ dans lesquelles il reste des constantes à déterminer.

Ainsi, en réinjectant la solution recherchée dans l'équation de la diffusion, nous trouvons ce qui suit :
trouve :

$$f(x)g'(t) = \alpha \cdot f''(x)g(t) = cst$$

Où la magnitude est une constante indépendante de x et t puisque les termes de droite et de gauche dépendent des deux variables différentes.

En suivant le signe de la constante, nous avons différentes solutions de la fonction $f(x)$ (trigonométriques ou exponentielles).

Quel que soit le signe, la fonction $g(t)$ a la forme suivante: $g(t) = D \exp(cst, t)$

Maintenant si $cst \geq 0$ $g(t)$ diverge exponentiellement et si $cst < 0$, $g(t)$ tend vers le 0 exponentiellement. Étant donné que l'échantillon reçoit une quantité finie de chaleur, seule la deuxième possibilité a une signification physique. La constante a nécessairement un signe négatif et peut être écrite sous la forme suivante: $-K^2\alpha$

Nous ne concluons que la forme générale pour $f(x)$ et $g(t)$:

$$f(x) = B \cos(Kx) + C \sin(Kx) \dots \dots \dots \text{III.} \quad (5)$$

$$g(x) = D \exp(-K^2\alpha t) \dots \dots \dots \text{III.} \quad (6)$$

Les faces avant et arrière étant isolées thermiquement, on peut écrire que le flux de chaleur est nul à $x = 0$ et $x = L$. ou on a: $\frac{\rightarrow}{jth} (M, t) = -\lambda \frac{\rightarrow}{grad} (T) = -\lambda f'(x)g(t)ux$

Et $f'(x) = KB\sin(Kx) + CK\cos(Kx)$

on peut écrire donc la condition au limite:

$$f'(0) = CK = 0 \text{ and } f'(L) = -KB \sin(KL) = 0$$

Nous concluons donc que $C = 0$ et les valeurs quantifiées possibles pour la variable K

$$K_n = \frac{n\pi}{L}$$

Enfin nous concluons que la solution générale est écrite sous cette forme:

$$T(x, t) = T_i + B_n \cos\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left[-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right] \dots \text{III} \quad (7)$$

Nous utilisons le théorème de superposition (linéarité de l'équation de diffusion) et on trouve la solution sous la forme

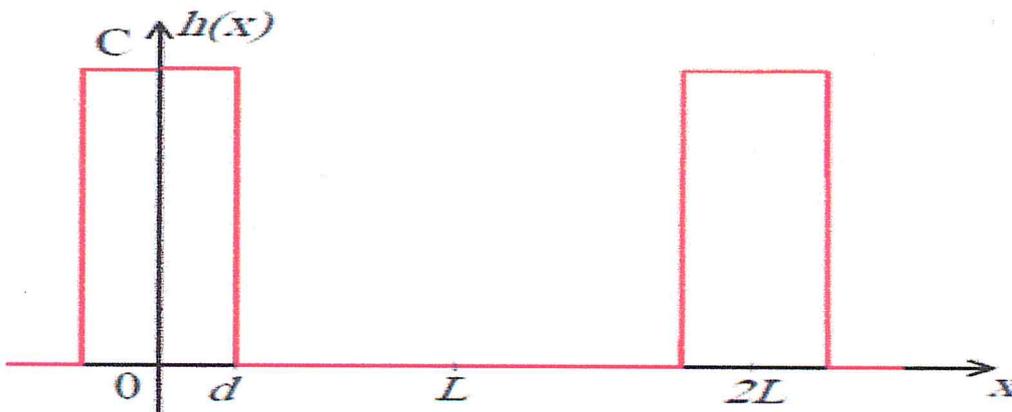


Figure 13 : la fonction de Fourier, binaire, périodique 2L

$$T(x, t) = T_i + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \exp\left[-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t\right] \dots \text{III} \quad (8)$$

Vérifions la condition initiale: $T(x; t = 0) = \Delta T_0 + T_i$ pour $0 \leq x \leq d$ et

Pour $T(x; t = 0) = T_i$ pour $d \leq x \leq L$

$$\text{Ou } T(x; t) = T_i + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos\left(\frac{n\pi}{L} x\right)$$

Dans l'expression de $T(x; 0)$, le terme $\sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos\left(\frac{n\pi}{L}x\right)$ correspond au développement de la fonction de Fourier, binaire, périodique $2L$ (voir figure 2) et les harmoniques qui sont données par les coefficients B_n

$$h(x) = \sum_{n=0}^{\infty} D_n \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \dots \text{III} \quad (9)$$

$$D_n = 2D_0 \frac{\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)}{\frac{n\pi d}{L}} \dots \text{III} \quad (10)$$

$$D_0 = \frac{d}{L} C \dots \text{III} \quad (11)$$

Pour déterminer le coefficient B_n , il suffit d'identifier cette dernière fonction $T(x; 0)$ à la fonction $X \rightarrow h(x)$ définie dans la déclaration avec $C = \Delta T_0$

Nous concluons que:

$$B_0 = \frac{d}{L} \Delta T_0 \quad \text{et} \quad B_n = 2 \frac{d}{L} \Delta T_0 \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{L}\right)}{\frac{n\pi d}{L}}$$

On arrive finalement au champ de température recherché:

$$T(x, t) = T_i \frac{d}{L} \Delta T_0 \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} 2 \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{L}\right)}{\frac{n\pi d}{L}} \cos\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \exp\left(-D_{th} \left(\frac{n\pi}{L}x\right)^2 t\right) \right] \dots \text{III} \quad (12)$$

Si on suppose que l'épaisseur d est suffisamment petite, il est suffisant pour effectuer des calculs à l'ordre le plus bas non nul en d/L , on trouve :

$$T(x, t) = T_i + \frac{d}{L} \Delta T_0 \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} 2 (-1)^n \exp\left(-D_{th} \left(\frac{n\pi}{L}x\right)^2 t\right) \right]$$

Puisque

$$\frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{L}\right)}{\frac{n\pi d}{L}} \simeq 1 \dots \text{III} \quad (13)$$

Finalement :

$$T(x, t) = T_i + (T_{eq} + T_0) \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} 2 (-1)^n \exp\left(-D_{th} \left(\frac{n\pi}{L}x\right)^2 t\right) \right] \dots \text{III} \quad (14)$$

$$T(x, t) = \frac{Q}{\rho C_p g} \left[1 + \sum_{n=0}^{\infty} 2 (-1)^n \exp \left(-D_{th} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 t \right) \right] \dots \text{III} \quad (15)$$

Remarque: maintenant nous allons faire une équivalence entre le premier terme:

$$Ti + (Teq - T0) \dots \dots \dots a \quad \text{Et} \frac{Q}{\rho C_p g} \dots \dots \dots b$$

Si on applique l'analyse dimensionnelle entre a et b

$$\frac{Q}{\rho C_p g} = \frac{[cal/cm^2]}{[g/cm^3][cal/g^\circ C][cm]} = [^\circ C]$$

Cette dernière équation représente la température, alors on peut conclure que a et b sont identiques. [35]

2.2. L'expression finale de la diffusivité thermique :

Nous citons *Wojtatowicz et Rozniakowski* (sur l'application du LFM pour des matériaux différents 1899). Dans le cas où l'impulsion d'énergie est instantanée et uniforme, le flux de chaleur est unidimensionnelle, les pertes de chaleur superficielles sont négligeables et les propriétés du matériau sont indépendantes de la température, la température de la surface arrière est fonction uniquement un nombre de Fourier:

$$F_0 = \frac{at}{L^2} \dots \dots \dots \text{III} \quad (16)$$

La relation suivante donne l'expression de la température sans dimension $\theta(x; F_0)$ qui n'a qu'une composante axiale:

$$\theta(L, t) = \frac{T(L,t)}{T_{max}} = f \left(\frac{at}{L^2} \right) \dots \dots \dots \text{III} \quad (17)$$

Ce qui nous donnera la diffusivité thermique:

$$\alpha = L^2 t^{-1} f^{(-1)}(\theta(t)) \dots \dots \dots \text{III} \quad (18)$$

Où $f^{(-1)}$ représente la fonction inverse de la fonction f définie par la série:

$$f(F_0) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \pi^2 F_0) \dots \dots \dots \text{III} \quad (19)$$

La Fonction f (-1) n'apas une forme analytique et peut être obtenu par exemple par interpolation numérique des valeurs tabulées [z,f (z)] 1 ou en utilisant des approximations polynomiales. Par exemple, quand $\Theta=0.5$ on a $f^{(-1)}(0; 5) = 0.139$

$$\alpha = L^2(t_{1/2})^{-1} f^{-1}(0.5) \simeq 0.139L^2(t_{1/2})^{-1}$$

Où $t_{1/2}$ est le temps pendant lequel la température de la surface arrière augmente jusqu'à la moitié de sa valeur maximale, (T_{\max}) Cette relation est la base de la Méthode Flash Laser proposée par Parker et al. La température de la surface arrière est surveillée dans un seul endroit, souvent au point où l'axe optique traverse l'échantillon.[36][37]

3. Conclusion

- La méthode flash laser permet la détermination des propriétés thermo-physiques des matériaux:
- Dans le cas où le diamètre de l'échantillon est suffisamment grand par rapport au diamètre de la région chauffée, nous avons le flux de chaleur bidimensionnel. En supposant que les propriétés thermiques du matériau sont anisotropes et que les pertes de chaleur de la surface sont linéairement dépendant de la température, la température adimensionnelle Θ peut être représentée comme une superposition de deux composantes radiale φ et axiale ϑ . Où $t_{1/2}$ est le temps pendant lequel la température de la surface arrière augmente jusqu'à moitié de sa valeur maximale, (T_{\max}) Cette relation est basique pour la Méthode Flash Laser standard axiale proposé par Parker et al. 1 dans laquelle la température de la surface arrière est surveillée à un endroit, souvent au point où l'axe optique traverse l'échantillon.
- Dans le cas où le diamètre de l'échantillon est suffisamment grand par rapport au diamètre de la région chauffée, nous avons flux de chaleur bidimensionnel. En supposant qu'il existe une anisotropie des propriétés thermiques du matériau et que les pertes de chaleur la surface sont linéairement dépendant avec la température, la température sans dimension Θ peut être décrit et comme une superposition de deux composantes radiale φ et axiale ϑ

Conclusion général

Pour déterminer Les propriétés thermiques et les propriétés physiques des matériaux il 'y beaucoup des Méthodes Une Méthode en régime variable es de mesure dans ce travail nous avons choisis la méthode flash laser relativement simple qui permet la détermination des propriétés thermo-physiques des matériaux: la diffusivité thermique α , la capacité calorifique C_p (chaleur spécifique) et la conductivité thermique K

Le modèle développé (flash laser) permet de remonter à la diffusivité thermique à partir de la résolution de l'équation de chaleur dans le cas qu'étudier L'échantillon peut être considéré comme une plaque infinie

Références bibliographie

- [1] F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman, and A. Lavine. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley and Sons, 2006. 6, 9, 12
- [2] B. Eyglunent. Manuel de thermique : Théorie et pratique. Editions Hermes, 1997.7
- [3] J. Pierre et R. Pierre, Chimie Industrielle, (1998).
- [4] P. Pierre, J. Leblond et Paul. H. E. Meijer, Physique de Transition de Phase, (1999).
- [5] F. Jean-Marie Haussonne, Céramiques pour Composants Electroniques, (1996).
- [6] C. Benhamideche, Thèse de Magister, Université de Constantine, (1998).
- [7] E. Ezzdine - S. Yotte -P. Malaurent -D. Breysse, Apport des propriétés de transfert thermique sur la connaissance de l'état de dégradation de la pierre. 25e rencontres de l'AUGC Bordeaux, 23-25 mai 2007.
- [8] Abderrahim Samaouali, Larbi Laanab, Mohamed Boukalouch, Yves Geraud Porosity and mineralogy evolution during the decay process involved in the Chellah monument stones, Environ Earth Sci (2010) 59:1171–1181, 2009
- [9] Mohamed rhzioual berrada, Identification des caractéristiques thermophysiques des principaux matériaux locaux de construction au Maroc application à la valorisation du stérile de phosphate. Thèse de doctorat, Université Mohammed V- Rabat Maroc 2000
- [10] Abdelmajid EL BOUARDI, Hassan EZBAKHE, Taib AJZOUL, Volker WITTEWER, PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES LORS DE CHANGEMENT DE STRUCTURE GRANULAIRE - COMPACT. MESURES ET IDENTIFICATIONS; APPLICATION AUX MATÉRIAUX A MATRICE DÉFORMABLE ET
- [11] Définition de métaux - Concept et Sens <http://lesdefinitions.fr/metaux>
- [12] Burgess, S. and Greig, D. J. Phys. (C) 1975, 8, 1637
- [13] Décret no 2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions, Ministère de l'écologie , de l'énergie du

développement durable et de la mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat.

- [14] M. Siu and C. Bulik. National bureau of standards line-heat-source guarded-hot-plate apparatus. Review of scientific instrument, 52(11) :17091716, 1981. 13
- [15] ASTM C177 04. Standard test method for steady-state heat ux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. Annual book of ASTM Standards, 4 :2142, 2008. 13
- [16] American National Standards Institute. Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus. 1991. 13
- [17] W. Woodside. Analysis of errors due to edge heat loss in guarded hot plates. ASTM, STP 217 :4962, 1957. 14
- [18] B. Le Neindre. Mesure de la conductivité thermique des liquides et des gaz. (R2920). 15, 22
- [19] R. Zarr. Uncertainty analysis of thermal transmission properties determined by ASTM C177-04. Journal of testing and evaluation, 38(2) :110, 2010. 15
- [20] J. E. S. Venart. A simple radial heat flow apparatus for fluid thermal conductivity measurements. Journal of scientific instruments, 4 :727731, 1967. 15, 16
- [21]. W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, and G. L. Abbott, J. Appl. Phys. 32:1679 (1961).
- [22]. Benjamin REMY, Alain DEGIOVANNI Châlons en Champagne, 13 et 14 décembre 2007 Congrès National de Thermographie THERMOGRAM' 2007
- [23] A.B. Taylor et R.E. Donaldson, Thermal Diffusivity Measurement by a Radial Heat Flow Method, J. Appl. Phys., 46 (1975), 4584-4589.
- [24] M. Lachi et A. Degiovanni, Détermination des diffusivités thermiques des matériaux anisotropes par méthode Flash bidirectionnelle, J. Phys. III, France 1 (1991), 2027-2046.
- [25] K. Katayama, A Transient Method of Simultaneous Measurement of Thermal Properties Using a Plane Heat Source, Bulletin of JSME, 12 (1969), 865-872.

- [26] A. Kavianipour et J.V. Beck, Thermal Property Estimation Utilizing The Laplace Transform With Application to Asphaltic Pavement, Int. J. Heat Mass Transfer, 20 (1977), 259-267.
- [27] D. Hadisaroyo, J.C. Batsale et A. Degiovanni, Un appareillage simple pour la mesure de la diffusivité thermique de plaques minces, J. Phys. III, France 2 (1992), 111-128.
- [28] D. G. Cahill. Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K : the 3 ω method. Review of scientific instrument, 61(2) :802808, 1990. 28, 30, 36, 38
- [29] M.goundouz these de magister methode de flash université mohamed bou garra bou mardes
- [30] Conduction of heat in solids, H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, 2nd Ed. Clarendon 1990
- [31].C. Gobbé, J. Gounot et M. BazinL.E.P.T.-ENSAM, URA CNRS 873, 33405 Talence Cedex, France (Reçu le 22 juin 1989, révisé le 4 septembre 1989, accepté le 8 septembre 1989)
- [32] Sébastien Gauthier THÈSE de doctorat Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3 ω Université Montpellier II 2012
- [34]. B. Hay, J-R. Filtz, and J-C. Batsale. Mesure de la diusivité thermique par laméthode fash. Techniques de l'ingénieur, (R 2955). 24
- [35] P. Andersson and G. Bäckstörm. A transient hot wire thermal conductivity appa-ratus for uids. Review of scientific instruments, 47(2) :204209, 1975. 18
- [36] J. Fourier. Théorie analytique de la chaleur. Firmin Didot père et ls, 1822. 6
- [37] J. J. Healy, J. J. De Groot, and J. Kestin. The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity. Physica C, 82 :392408, 1976. 18

