



Université d'Abomey-Calavi

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energie Renouvelable

Rapport de Stage

Thème

**MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MATERIAUX
LOCAUX DE CONSTRUCTION : COMPARAISON DES RESULTATS
D'UN DISPOSITIF DU DISQUE DE LEE CONÇU AVEC CEUX DU
RUBAN CHAUD.**

Présenté par :

GBENONTIN Vigninou Bertrand

Encadré par:

Dr. FANNOU Jean-Louis Comlan
Maître-Assistant et Enseignant chercheur à l'EPAC

Sous la direction de :

Prof. Aristide Comlan HOUNGAN
Maître de conférences des Universités du CAMES

DEDICACES

Loué soit Dieu pour l'amour et la force qu'il nous accorde.

Je dédie ce travail :

A mon Père **M. Firmin GBENONTIN**, qui sans cesse se donne corps et âme pour le succès de notre vie. Papa, que l'Eternel vous accorde une longue vie afin de t'assurer que tu as atteint ton objectif.

A ma mère Mme **Léontine GBENONTIN** née **AGBANDE**, qui par son amour inconditionnel, son soutien moral et financier me réconforte dans les moments difficiles. Maman, recevez la grâce du Tout puissant et heureuse tu seras pour la vie.

A mon frère et à ma sœur **André** et **Monique**, que l'amour fraternel ne s'éteigne jamais en nous.

 A ma bien aimée **BEDE Glwadys**, merci pour tout le soutien.

GBENONTIN V. Bertrand

REMERCIEMENTS

« Je me sens le cœur ingrat par cela seul que la reconnaissance est un devoir »

J.J.ROUSSEAU.

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre reconnaissance envers toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Nos remerciements s'adressent particulièrement :

- ✚ Au Professeur Titulaire Mohamed SOUMANOU, Le Directeur de l'EPAC ;
- ✚ Au Professeur Titulaire Antoine VIANOU, Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (ED-SDI/EPA) ;
- ✚ Au Professeur Aristide HOUNGAN, Maître de Conférences, Coordonnateur Adjoint du Master de Recherche Energies Renouvelables et Efficacité Energétique, Directeur de l'Ecole Normale des Sciences de l'Enseignement Techniques (ENSET- LOKOSSA), notre Directeur de mémoire, qui a accepté nous accompagner en nous ouvrant les portes de son savoir et de son expérience ;
- ✚ Au Docteur FANNOU Jean-Louis Comlan, enseignant à l'EPAC, encadreur de ce mémoire, infiniment merci pour tous les efforts consentis et surtout pour l'immense soutien que vous avez été pour nous de par vos diverses contributions à la qualité de ce document et vos précieux conseils ;
- ✚ Au Professeur Clément AHOUANNOU, Maître de Conférences, Directeur Adjoint de l'EPAC, Coordonnateur du Master de Recherche Energies Renouvelables et Efficacité Energétique;
- ✚ Au Docteur QUENUM Alphonse, pour ses conseils et pour sa contribution;
- ✚ A l'ensemble du corps enseignant à qui nous devons notre formation ;
- ✚ A tout le personnel de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur ;
- ✚ A mes cousins et cousines, mes oncles et tantes des familles GBENONTIN et AGBANDE;
- ✚ A monsieur SACLA-AIDE Magloire, pour son soutien moral et financier ;

TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	vi
NOMENCLATURE.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
RESUME	1
ABSTRACT	2
INTRODUCTION GENERALE.....	3
PROBLEMATIQUE	5
OBJECTIFS DU TRAVAIL	6
QUESTIONS DE RECHERCHE.....	6
HYPOTHESE DE RECHERCHE.....	6
RESULTATS ATTENDUS	7
METHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	7
PLANNING.....	9
BUDGET	10
CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	11
1.1 Introduction.....	11
1.2 Transfert thermique	11
1.2.1 Conduction thermique	11
1.2.2 Convection thermique.....	12
1.2.3 Rayonnement thermique	13
1.3 Caractéristiques des matériaux et quelques matériaux de construction	14
1.3.1 Propriétés thermiques des matériaux.....	14
1.3.1.1 Conductivité thermique	15
1.3.1.2 Résistance thermique	15
1.3.1.3 Diffusivité thermique	15
1.3.1.4 Effusivité thermique	16
1.3.1.5 Emissivité.....	16
1.3.1.6 Capacité Thermique	16
1.3.1.7 Déphasage thermique	17
1.3.2 Matériaux de construction des Bâtiments	18
1.3.2.1 Bois	18

1.3.2.2	Terre	19
1.3.2.3	Béton	21
1.4	Synthèse bibliographique.....	21
1.5	Différents dispositifs de mesure de conductivité thermique.....	26
1.5.1	Régime permanent.....	26
1.5.1.1	Méthode de la plaque chaude gardée	27
1.5.1.2	Méthode de Boite.....	28
1.5.1.3	Méthode de Searle (bon Conducteur de chaleur tel que les métaux).....	30
1.5.1.4	Méthode à flux radial	31
1.5.1.5	Méthode du disque de Lee.....	32
1.5.2	Régime transitoire	33
1.5.2.1	Fil chaud.....	34
1.5.2.2	Méthode du plan chaud	36
1.5.2.3	Ruban chaud.....	38
1.5.2.4	Hot disk.....	39
1.5.2.5	Méthode flash	41
1.5.2.6	Tri-couche.....	43
1.6	Choix d'une méthode	43
1.7	Conclusion	46
	CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES DU DISQUE	47
	DE LEE ET DU RUBAN CHAUD.....	47
2.1	Introduction.....	47
2.2	Conception et réalisation du dispositif de disque de Lee	47
2.2.1	Chambre à vapeur	48
2.2.2	Disques en Cuivre	48
2.2.3	Bouilleur	49
2.2.4	Support de « l'ensemble disques en cuivre- isolant-chambre à vapeur »	52
2.2.5	Tuyau de vapeur.....	52
2.2.6	Plaque chauffante ou rechaud ou gaz.....	53
2.3	Montage du dispositif conçu	53
2.4	Difficultés rencontrées	54
2.5	Expérimentations avec les dispositifs du disque de LEE et du ruban chaud.....	55
2.5.1	Expérimentations sur le dispositif du disque de Lee.....	55
2.5.1.1	Matériaux caractérisés	55
2.5.1.2	Procédure du disque de Lee.....	57
2.5.1.3	Protocole expérimental du dispositif du disque de Lee.....	60

2.6	Expérimentations sur le dispositif du ruban chaud.....	61
2.7	Incertitude sur la mesure de la conductivité thermique.....	62
2.7.1	L'incertitude de mesure réalisée dans le cas du dispositif du ruban chaud.	62
2.7.2	Incertitude de mesure réalisée dans le cas du ruban chaud.....	63
2.8	Conclusion	65
	CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	66
3.1	Introduction.....	66
3.2	Validation du dispositif du disque de Lee.....	66
3.2.1	Détermination de la pente de la courbe du refroidissement du plexiglas.....	66
3.2.2	Comparaison de la conductivité thermique calculée du plexiglas avec sa valeur standard	67
3.3	Mesure de la conductivité thermique des essences de bois avec dispositif conçu	68
3.3.1	Détermination de la pente de la courbe de refroidissement des deux essences de bois (Acajou et Kosso).....	68
3.3.1.1	Bois Acajou	68
3.3.1.2	Bois Kosso	69
3.4	Mesure de la conductivité thermique du bois Kosso avec dispositif du ruban chaud.....	69
3.4.1	Incertitude sur les deux coefficients de conductivité thermique.....	71
3.4.1.1	Cas du dispositif du ruban chaud	71
3.4.1.2	Cas du dispositif du disque de Lee	71
3.5	Comparaison des résultats du disque de Lee et ceux du ruban chaud.....	72
3.6	Conclusion	72
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	73
	BIBLIOGRAPHIE.....	74
	ANNEXE A : Coubes de refroidissement.....	77

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

PFSE	Projet de Fourniture de Services d'Énergie
DGE	Direction Général de l' Énergie
GEIC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
BTC	Brique de Terre Comprimée
TWD	Teak Wood Dust
BRS	Beach Ridge Sand
CPS	Coastal Plane Sand
SHR	Sandstone/Shale Hill Ridges
PVC	Polychlorure de vinyle
CTMAE	Caractérisation Thermophysique des Matériaux et Appropriation Énergétique

NOMENCLATURE

Notation	Définition	Unité
e	L'épaisseur d'un matériau	m
S	Surface	m^2
T_p	Température de paroi	K
T_∞	Température du milieu environnant la surface	K
T_f	Température du fluide	K
ϕ	Flux de chaleur transmis	W
ε_p	Facteur d'émission de la paroi	
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
λ	Conductivité thermique du matériau	W/K.m
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
$D(\tau)$	Fonction caractéristique du Hot Disk	
σ	Constante de Stefan	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
$\Delta\theta$	Différence de température	K
U	Tension appliquée aux bornes de la résistance chauffante R	V
R	Résistance	Ω
D	coefficient de déperdition thermique de la boîte B1	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Estimation du budget en FCFA de la réalisation de ce projet.....	10
Tableau 1.1 : Conductivité thermique de la terre cuite et du bois de différentes Tailles.....	23
Tableau 1.2 : Méthodes conseillées pour la mesure des propriétés thermiques d'un solide (en fonction de la conductivité).....	45
Tableau 2.1 : Composantes et outils.....	47
Tableau 3.1 : Paramètres de l'échantillon en plexiglas et valeurs mesurées.....	67
Tableau 3.2 : Paramètres de l'échantillon en Acajou et valeurs mesurées.....	68
Tableau 3.3 : Paramètres de l'échantillon en Kosso et valeurs mesurées.....	69
Tableau 3.4 : Différents paramètres pour évaluer l'incertitude.....	71
Tableau 3.5 : comparaison des résultats donnés par les deux dispositifs.....	72
Tableau A.1 : Température et temps de refroidissement dans le cas de Kosso.....	77
Tableau A.2 : Température et temps de refroidissement dans le cas d'Acajou.....	77
Tableau A.3 : Température et temps de refroidissement du plexiglas.....	78
Tableau A.4 : Epaisseurs et diamètre de l'échantillon en Kosso.....	78
Tableau A.5 : Epaisseurs et diamètre de l'échantillon en bois d'Acajou.....	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Mise en œuvre d'un transfert par conduction.....	11
Figure 1.2 : Conductivité thermique de différents matériaux (comparaison).....	12
Figure 1.3 : mise en œuvre d'un transfert par convection	13
Figure 1.4 : Mise en œuvre d'un transfert par rayonnement	14
Figure 1.5 : Graphique illustrant l'effet de déphasage des isolants.....	18
Figure 1.6 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée	28
Figure 1.7 : Schéma de principe de la méthode de boîte	29
Figure 1.8 : Schéma de principe de la méthode de Searle	31
Figure 1.9 : Schéma de principe de la méthode du disque de Lee.....	33
Figure 1.10.a : Schéma du montage dispositif du fil chaud.....	34
Figure 1.10.b : Vue d'une sonde de type fil du chaud.....	34
Figure 1.11 : Vue en coupe du fil chaud et de l'échantillon.....	35
Figure 1.12 : Illustration des limites de la zone linéaire de la température du fil chaud..	35
Figure 1.13 : Schéma du montage de la méthode du plan chaud.....	37
Figure 1.14 : Illustration des limites de la zone linéaire de température du plan chaud semi-infini.....	37
Figure 1.15 : Schéma du montage de de la méthode du ruban chaud	38
Figure 1.16 : Comparaison des trois modèles appliqués à une sonde de type ruban chaud.....	39
Figure 1.17 : Schéma de principe de la méthode du hot disk	
Figure 1.18 : Schéma de principe de la méthode flash	41
Figure 1.19 : Courbe théorique de la température réduite de la face arrière.	42
Figure 1.20 : Schéma de principe de la méthode de la tricouche	43
Figure 2.1 : Chambre à vapeur.....	48
Figure 2.2 : Disque en Cuivre de diamètre 50 mm et d'épaisseur 10 mm	49
Figure 2.3 : Générateur de vapeur.....	49
Figure 2.4 : Développement de la partie cylindrique du bouilleur	50
Figure 2.5 : Base de la partie conique du bouilleur	50
Figure 2.6 : Schéma illustrant le calcul des différentes dimensions d'un tronc de cône	51

Figure 2.7 : Développement latéral de la partie conique du bouilleur.....	51
Figure 2.8 : Support de l'ensemble disques en cuivre-échantillon-chambre à vapeur..	52
Figure 2.9 : Tuyau PVC de canalisation de la vapeur	52
Figure 2.10 : foyer à gaz Oryx	53
Figure 2.11 : Montage du dispositif du disque de Lee.....	54
Figure 2.12a : Echantillons en bois.....	56
Figure 2.12b : Echantillon en plexiglas	56
Figure 2.14 : Illustration de la Chaleur entrée par conduction et celle transmise par l'échantillon en régime permanent.....	58
Figure 2.15 : Isolant-disque inférieur pour la mesure de la chaleur perdue (refroidissement)	59
Figure 2.16 : Courbe montrant le refroidissement du disque inférieur.....	61
Figure 2.17 : Dispositif expérimental du Ruban chaud	62
Figure 3.1 : Courbe de refroidissement dans le cas du plexiglas.....	66
Figure 3.2 : Courbe de refroidissement dans le cas d'Acajou	68
Figure 3.3 : Courbe de refroidissement dans le cas du Kosso	69
Figure 3.4 : Estimation de la conductivité thermique du Kosso lors du premier essai....	70
Figure 3.5 : Estimation de la conductivité thermique du Kosso lors du second essai....	70

RESUME

La conductivité thermique des matériaux de construction est une propriété importante pour l'ingénierie et pour l'analyse des matériaux isolants. Dans ce présent travail la conductivité thermique du bois de Kosso et du bois d'acajou ont été déterminées par le dispositif du disque de Lee. Les résultats ont été ensuite comparés à ceux obtenus par le dispositif du ruban chaud. Pour faire ce travail, le dispositif du disque de Lee a été conçu et validé expérimentalement. Pour les deux essences de bois testées, il ressort de l'analyse des données que les conductivités thermiques du bois Kosso (mesure à l'air libre avec une teneur en eau de 13%) et du bois d'acajou (bois sec) obtenues par la méthode du disque de Lee, sont respectivement, $(0,128 \pm 0,005)W. m^{-1}K^{-1}$ et $(0,120 \pm 0,009)W. m^{-1}K^{-1}$ contre respectivement $(0,123 \pm 0,001) W. m^{-1}. K^{-1}$ et $(0,134 \pm 0,004) m^{-1}K^{-1}$ obtenues par la méthode du ruban chaud. Ces résultats montrent que le dispositif conçu peut être utilisé pour la mesure de la conductivité thermique des matériaux isolants.

Mots clé : Conductivité thermique, disque de Lee, ruban chaud

ABSTRACT

The thermal conductivity of building materials is an important property for engineering and for the analysis of insulating materials. In this work the thermal conductivity of Kosso wood and mahogany wood was determined by the device of Lee's disk. The results were then compared to those obtained by the hot ribbon device. To do this work, Lee's disk device was designed and experimentally validated. For the two tested species of wood, the analysis of the data shows that the thermal conductivities of Kosso wood (measured in the open air with a water content of 13%) and mahogany wood (dry wood) obtained by the apparatus of Lee's disc, respectively, are $(0.128 \pm 0.005)W.m^{-1}K^{-1}$ and $(0.120 \pm 0.009)W.m^{-1}K^{-1}$, against respectively $(0,123 \pm 0,001)W.m^{-1}.K^{-1}$ and $(0,134 \pm 0,004) m^{-1}K^{-1}$, obtained by the hot strip method. These results show, the device designed can be used to measure the thermal conductivity of the bad conductor.

Key words: Thermal conductivity, Lee's disc, hot strip

INTRODUCTION GENERALE

Les études récentes ont montré que le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur d'énergie (43 % de la consommation globale d'énergie) et est en outre, responsable de 25 % des émissions des gaz à effet de serre [1]. A cela s'ajoute la hausse drastique du coût des matériaux conventionnels de construction dont la mise en œuvre demande une forte consommation d'énergie avec un impact négatif sur le confort thermique et l'environnement. Dans le souci de répondre à ces exigences à la fois économique, énergétique et environnementale, les concepteurs de bâtiments ont inscrit leur réflexion dans le cadre de la réduction du coût de construction des logements, du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale. Ainsi, diverses techniques d'élaboration de nouveaux matériaux améliorés tels que les matériaux à base de matières végétales et des déchets ménagers, agricoles et industriels ont été développées. De plus dans le cadre de la mise en œuvre du PFSE, la Direction Générale de l'Énergie (DGE) du Ministère de l'Énergie, de Recherches Pétrolières et Minières, de l'Eau et du Développement des Énergies Renouvelables du Bénin, a initié un projet d'élaboration de code d'efficacité énergétique [2]. Il s'agit de normes de conception et d'exploitation applicables aux bâtiments publics sur l'ensemble du territoire du Bénin et qui concerne entre autres l'amélioration des caractéristiques thermiques des matériaux et le choix des matériaux appropriés. La caractérisation des matériaux, par différentes méthodes de mesure, a fait l'objet de nombreuses études, M. Filali [3] a présenté plusieurs méthodes et modèles pour déterminer la conductivité thermique. De plus Mustapha BOUMHAOUT [4] ont travaillé sur la conductivité thermique des matériaux de construction de différentes tailles par la méthode des boîtes. Ce travail a pour objectifs de mettre en place dans notre laboratoire le dispositif de disque de LEE, le valider et de l'utiliser pour déterminer la conductivité thermique de quelques matériaux locaux de construction et d'en faire la comparaison avec les résultats obtenus avec d'autres méthodes. Pour mieux rendre compte de notre travail, nous avons subdivisé ce document en trois chapitres.

Le premier chapitre présente la revue bibliographique, les différents dispositifs expérimentaux de mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction et la justification du choix de ce nouveau dispositif du type de disque de LEE.

Le deuxième chapitre est réservé à l'étude détaillée de la réalisation du dispositif du type du disque de LEE pour la mesure de la conductivité thermique et à l'expérimentation de ce dernier pour sa validation.

Quant au troisième chapitre, il est consacré à la présentation des résultats qui débouchera sur l'étude comparative des résultats obtenus par le dispositif mise en place et ceux du ruban chaud.

Et enfin une conclusion suivie de perspectives achèvera ce document.

PROBLEMATIQUE

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), l'Agence internationale de l'énergie et l'Union européenne s'accordent à reconnaître que la priorité des priorités pour sauver le climat est de mettre en œuvre une politique d'efficacité énergétique beaucoup plus ambitieuse qu'elle ne l'est aujourd'hui. La maîtrise de la demande d'énergie constitue l'outil le plus efficace pour lutter contre le dérèglement climatique. C'est aussi le meilleur moyen de répondre aux enjeux énergétiques et de réduction de la facture croissante de l'énergie pour nos États. De plus, des études menées par Knauf Insulation démontrent que la mise en place d'une isolation thermique (en fonction, par exemple, du niveau d'isolation ou de la typologie constructive du bâtiment) dans l'enveloppe du bâtiment est la mesure d'efficacité énergétique qui contribue le plus à réduire la demande énergétique de climatisation (chauffage en hiver et réfrigération en été) et à réduire entre 20 et 60% des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. En outre le code d'Efficacité Energétique du Benin [2] traite des Normes thermiques minimales pour l'enveloppe du bâtiment et il ressort de ce code des valeurs du coefficient de transmission thermique (toiture, mur ou plancher) qu'il faut respecter pour assurer un certain confort et abaisser la consommation énergétique. C'est pour aider les concepteurs et les constructeurs des bâtiments à avoir des valeurs des conductivités thermiques des matériaux de construction utilisés au BENIN ou de disposer d'un dispositif de mesure de conductivité thermique que nous nous sommes intéressées à notre sujet de recherche dont le thème est intitulé :« **Mesure de la conductivité thermique des matériaux locaux de construction : comparaison des résultats d'un dispositif du disque de LEE conçu et ceux du ruban chaud** »

OBJECTIFS DU TRAVAIL

L'objectif général de ce travail est la mise en place d'un dispositif expérimental de type de disque de Lee pour mesurer la conductivité thermique de quelques matériaux locaux de construction au Bénin.

De façon spécifique, il s'agira de :

- ✓ Présenter les différents dispositifs expérimentaux de mesure de la conductivité thermique en justifiant le choix d'un nouvel appareillage de mesure ;
- ✓ Construire et valider le dispositif de type de disque de LEE;
- ✓ Déterminer les coefficients de conductivité thermique de quelques matériaux locaux de construction à l'aide du nouveau dispositif installé au laboratoire;
- ✓ Comparer la méthode de disque de LEE par rapport à celle du ruban chaud, seule méthode fonctionnelle dans notre laboratoire et les résultats obtenus avec les deux méthodes

QUESTIONS DE RECHERCHE

- ✓ Quelle différence existe-il entre les différents dispositifs de mesure de conductivité thermique ?
- ✓ Quels sont les coefficients de conductivité thermique de quelques matériaux de construction au Bénin ?
- ✓ Quels sont les avantages du dispositif de disque de Lee construit par rapport à ceux du ruban chaud

HYPOTHESE DE RECHERCHE

La présente étude a été principalement motivée par les hypothèses ci-après qui pourront se justifier par les résultats à établir dans le cadre des évaluations attendues. Il s'agit de ce qui suit :

- ✓ Il existe plusieurs types de dispositifs expérimentaux de mesure de conductivités thermique avec chacun sa particularité
- ✓ Les coefficients de conductivité thermiques de quelques matériaux isolants de construction du Benin varient d'une essence à une autre

- ✓ Le dispositif de type de disque de Lee est plus précis que le dispositif du ruban chaud

RESULTATS ATTENDUS

- ✓ Les différents dispositifs expérimentaux de mesure de conductivité thermique sont présentés
- ✓ Les coefficients de conductivité thermiques de quelques matériaux isolants de construction sont évalués
- ✓ Les avantages du dispositif de type de disque de Lee par rapport au dispositif du ruban chaud sont connus

METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Pour atteindre les objectifs poursuivis, la méthodologie adoptée est la suivante

 *Démarche pour atteindre chaque objectif*

Objectif 1 : Présentation des différents dispositifs expérimentaux de mesure de la conductivité thermique

Cette étape a été réalisée à travers des recherches documentaires et à la compilation des différents travaux portant sur la caractérisation thermique des matériaux particulièrement les travaux qui concernent les dispositifs expérimentaux de mesure de la conductivité thermique des matériaux.

Objectif 2 : Détermination des coefficients de conductivité thermique de quelques matériaux locaux de construction

Pour déterminer les coefficients de la conductivité thermique des matériaux nous avons parcouru les étapes suivantes :

- Nous avons conçu et fabriqué le dispositif expérimental du type disque de Lee
- Nous avons sélectionné et préparé les échantillons des matériaux dont on veut connaître les conductivités thermiques
- Nous sommes passés à l'expérimentation

- Les données recueillies sont ensuite traitées avec des logiciels adéquats et utilisées pour le calcul des différents coefficients de conductivité thermique. Des formules et des graphes sont utilisés pour la détermination du coefficient de conductivité thermique des matériaux sélectionnés.

Objectif 3 : Comparaison les avantages du dispositif de type de disque de LEE par rapport à ceux du ruban chaud

Pour atteindre cet objectif nous avons :

- Nous avons testé la précision du dispositif construit
- Les coefficients de conductivité thermique des différents matériaux retenus ont été mesurés par le dispositif du ruban chaud
- Les précisions des deux dispositifs ont été comparées sans oublier le temps d'expérimentation.

Phase finale

Elle sera consacrée aux résolutions des problèmes, aux analyses et interprétations des résultats obtenus ; et à la rédaction proprement dite du mémoire de master recherche. Des recommandations et propositions pertinentes sortiront de l'étude comparative des dispositifs expérimentaux de type **disque de Lee** et du **ruban chaud** pour la caractérisation thermique de quelques matériaux de construction au Bénin.

PLANNING

	Mois															
	1				2				3				4			
	Semaines															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Recherche de la documentation	EE															
Conception du dispositif			E													
Fabrication du dispositif					EO											
Expérimentation								E								
Traitement des données										E						
Rédaction du Mémoire												E				
Relecture du rapport															T	
Remise du rapport																E

EE : Etudiant et Encadreur T : Tous

E : Etudiant EO : Etudiant et l'ouvrier

BUDGET

Tableau 1: Estimation du budget en FCFA de la réalisation de ce projet

Description	Quantité	Prix Unitaire	Montant
Barre de Cuivre (diamètre 70 mm et longueur 150mm)	1	15000	15000
Barre d'Aluminium (diamètre 80mm longueur 80mm)	1	15000	15000
Tôle Inox (épaisseur 3mm surface ½ m ²)	1	25000	25000
Gaz Oryx	1	25000	25000
Pied en Acier (diamètre 8mm, longueur 300 mm)	3	6000	18000
Disque en Acier (diamètre 100mm, épaisseur 8mm)	1	10000	10000
Durite (diamètre intérieur 4 mm longueur ½ m)	1	5000	5000
Confection des échantillons	3	15000	15000
Thermocouple	2	30000	60000
Main d'œuvre + transport			70000
TOTAL HT		258 000	

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Il sera question dans ce chapitre de présenter quelques matériaux utilisés dans la construction des bâtiments. Ensuite nous aborderons les différents transferts de chaleur qui se produisent au niveau d'un matériau et nous finirons par la présentation de quelques différents dispositifs de mesure de la conductivité thermique.

1.2 Transfert thermique

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons : Le transfert de chaleur par conduction, le transfert de chaleur par convection et transfert de chaleur par rayonnement.

1.2.1 Conduction thermique

Ce transport de chaleur se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, mais tranquille (absence de remous) en présence d'un gradient de température. Le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque. Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Ce type de transfert est largement dominant à l'intérieur des matériaux solides. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Joseph Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)$$

(1.1)

Avec λ la conductivité thermique et $\vec{\varphi}$ la densité surfacique de flux de chaleur.

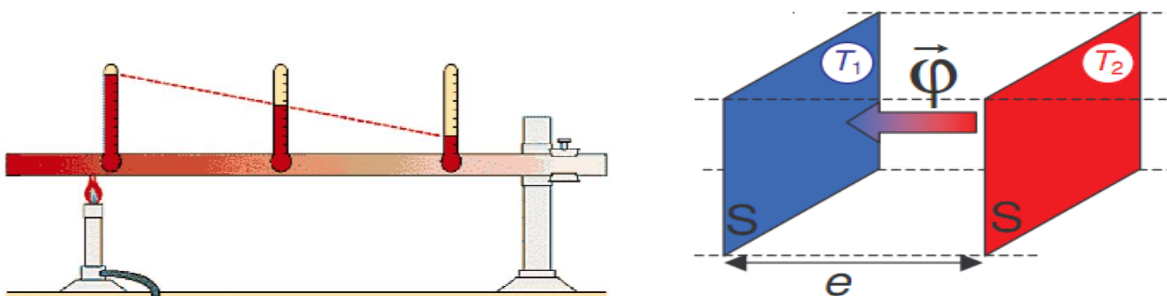
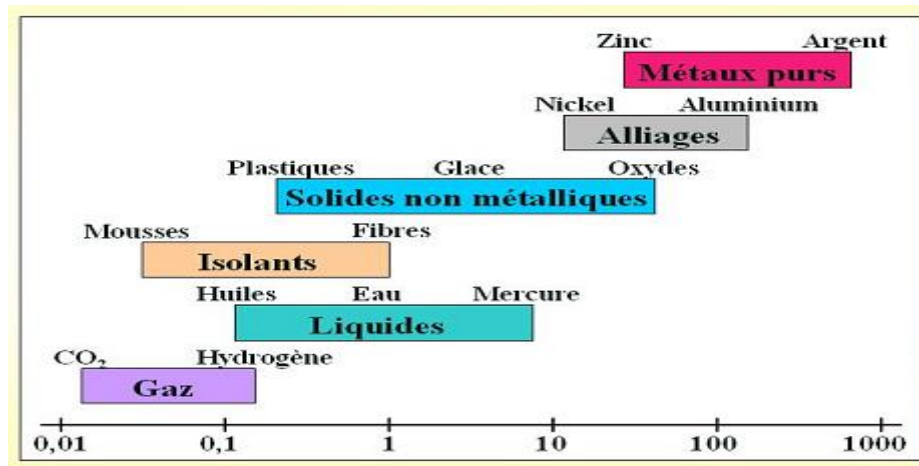


Figure 1.1 : Mise en œuvre d'un transfert par conduction [5]

La conductivité thermique notée λ s'exprime en $W/m \cdot K$ 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 la chaleur. Figure 1.1.2 illustre les valeurs de conductivité thermique pour différents matériaux et divers états de la matière dans des conditions normales de température et de pression.



Conductivité thermique (W/m.K)

Figure 1.2 : Conductivité thermique de différents matériaux (comparaison) [21]

1.2.2 Convection thermique

Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide (ou agrégats) ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques (on parle alors de convection forcée). Lorsqu'un fluide est en écoulement, une partie du transfert de chaleur dans le fluide se fait également par conduction et, dans le cas d'un fluide transparent, un transfert de chaleur par rayonnement peut accompagner les deux transferts précédents. Ce mode transfert est régi par la loi de NEWTON :

$$\phi = h S (T_p - T_f) \quad (1.2)$$

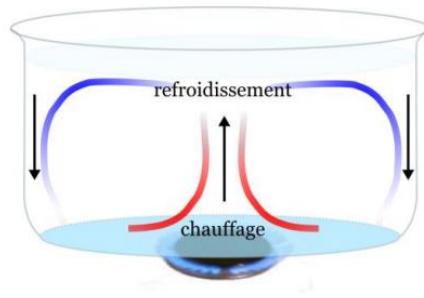


Figure 1.3 : Mise en œuvre d'un transfert par convection

1.2.3 Rayonnement thermique

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchi, une autre transmise à travers le corps (dit diathermique si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Si on place dans une enceinte deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques. Cet échange de chaleur est désigné habituellement sous le nom de rayonnement. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques. Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'appareil de transfert. Nous pouvons dire dès à présent, qu'aux températures ordinaires, le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente. En outre, signalons que certains transferts thermiques sont accompagnés d'un transfert de matière entre deux phases. Le flux de chaleur transféré en présence d'un changement de phase dépend de la nature et des propriétés physico-chimiques des phases en présence. C'est le cas de l'ébullition, de la condensation, mais aussi des problèmes d'humidification, de séchage, de cristallisation, etc. il faut dire aussi que dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

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

(1.3)

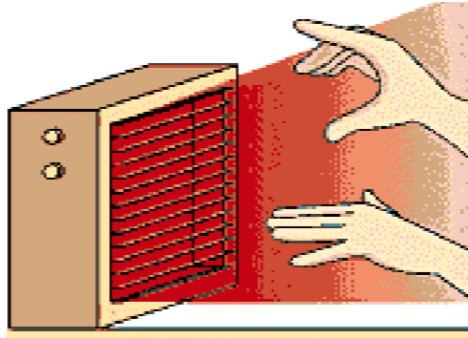


Figure 1.4 : Mise en œuvre d'un transfert par rayonnement

1.3 Caractéristiques des matériaux et quelques matériaux de construction

Il existe de nombreux matériaux de construction aux caractéristiques très diverses qu'il faut prendre en compte afin de réaliser une construction durable, économique du point de vue de la consommation d'énergie et respectueuse de son environnement depuis sa construction jusqu'à sa destruction. Nous présentons dans cette partie les différentes caractéristiques des matériaux et donnons quelques matériaux de constructions utilisées.

1.3.1 Propriétés thermiques des matériaux

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou plusieurs types d'échange thermique. Elles expriment le comportement du matériau soumis aux transferts stationnaires : conductivité thermique, résistance thermique, émissivité, ou des transferts dynamiques : diffusivité thermique et effusivité thermique. Ces propriétés se rapportent aussi à la capacité du matériau à absorber de l'énergie thermique. Cette énergie thermique peut être absorbée pour élever la température du matériau ou pour le transformer (changement des propriétés physiques ou d'état du matériau) : capacité thermique, enthalpie de fusion, coefficient de dilatation thermique. Ces différentes propriétés thermiques sont dépendantes de la nature du matériau et de sa température ainsi donc pour la mesure de ces propriétés il faut la mesure de la température et la connaissance de la nature du matériau.

1.3.1.1 Conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique est le flux de chaleur traversant un matériau d'épaisseur un mètre, pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces entrante et sortante. Elle s'exprime en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. La conductivité thermique propre à chaque matériau permet de quantifier le pouvoir isolant des parois, c'est-à-dire leur aptitude à s'opposer au passage des calories contenues dans l'air. Plus la conductivité thermique d'un matériau est grande, plus ce matériau sera conducteur et plus la conductivité est faible, plus il sera isolant. C'est une donnée essentielle pour la détermination de la performance thermique d'un produit ou d'une paroi.

1.3.1.2 Résistance thermique (R)

La résistance thermique est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en $m^{-2} \cdot K \cdot W^{-1}$.

$$R = \frac{e}{\lambda} \text{ ce qui donne } R = \frac{\Delta T}{\varphi} \quad (1.4)$$

De cette relation on dira qu'une paroi est plus isolante lorsque sa résistance est élevée. Cette grandeur est particulièrement utilisée dans les applications d'isolation thermique.

1.3.1.3 Diffusivité thermique (a)

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 termes de vitesse). Elle s'exprime en $m^2 \cdot s^{-1}$. Cette grandeur croît avec la conductivité et décroît avec la capacité thermique. Cette grandeur peut être reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (1.5)$$

Plus la diffusivité est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau : le temps entre le moment où elle atteint l'autre face (déphasage) s'en trouve augmenté

1.3.1.4 Effusivité thermique (b)

L'effusivité thermique est la racine carrée du produit de la conductivité thermique λ , de la masse volumique ρ et de la capacité thermique massique C_p

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p} \quad (1.6)$$

La valeur de cette propriété permet de quantifier l'aptitude d'un matériau à changer de température (plus ou moins rapidement) lorsqu'il reçoit un apport d'énergie thermique de manière non uniforme. Deux phénomènes se conjuguent alors simultanément : l'énergie absorbée localement en fonction de la capacité thermique du matériau et cette énergie est transférée aux régions voisines en fonction de la conductivité thermique du matériau.

1.3.1.5 Emissivité (ϵ)

L'émissivité d'un matériau (d'une surface) renseigne sur son aptitude à émettre un rayonnement. Elle s'exprime sous la forme du rapport entre la quantité d'énergie émise par la surface (luminance L) et l'énergie émise par un corps noir (luminance L_0) porté à la même température.

$$\epsilon = \frac{L}{L_0} \quad (1.2.4)$$

1.3.1.6 Capacité Thermique (C)

La capacité thermique traduit l'aptitude du matériau à absorber une quantité de chaleur (Q) et à s'échauffer (élévation de sa température) de ΔT

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1.7)$$

Dans la pratique, et pour définir une propriété du matériau indépendante de sa masse (m), on utilise la capacité thermique massique c qui s'exprime en $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ (La chaleur massique représente la capacité d'un matériau à emmagasiner de la chaleur et à la restituer). Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus la quantité de

chaleur à lui apporter pour élever sa température est importante. Autrement dit, plus grande est sa capacité de stockage des calories avant que sa température ne s'élève.

1.3.1.7 Déphasage thermique

Le déphasage thermique d'un matériau représente le temps de transfert d'un flux de chaleur à travers le matériau. Pour la paroi extérieure d'un bâtiment par exemple, le déphasage thermique sera égal à l'intervalle de temps entre le moment où la température à l'extérieur atteint son maximum et le moment où la température à l'intérieur du bâtiment atteint son maximum. Cette grandeur caractérisant la capacité d'un matériau à retarder les variations de température, prend tout son sens dans une étude réalisée par l'Ecole Supérieure du Bois de Nantes sur cinq matériaux au même pouvoir isolant. Le déphasage thermique dépend de la conductivité, de la densité, de la chaleur spécifique et de l'épaisseur du matériau en question.

$$\eta = \frac{e}{v} = \frac{T}{2\pi} e \sqrt{\frac{\rho C}{\lambda T}} \quad (1.8)$$

Avec

v : La vitesse de transfert du flux de chaleur à travers le matériau, en (m/h)

e : Épaisseur du matériau exprimé en m

η : Déphasage en (h)

T : Période du cycle des variations de température en (h)

λ : Conductivité thermique en (W/m.K)

C : Chaleur spécifique en (Wh/kg.K)

En considérant que la période du cycle des variations de température correspond à 24h, on obtient :

$$\eta = 1,38e \sqrt{\frac{\rho C}{\lambda}} \quad (1.8a)$$

En considérant la diffusivité a , on a :

$$\eta = \frac{1,38e}{\sqrt{a}} \quad (1.8b)$$

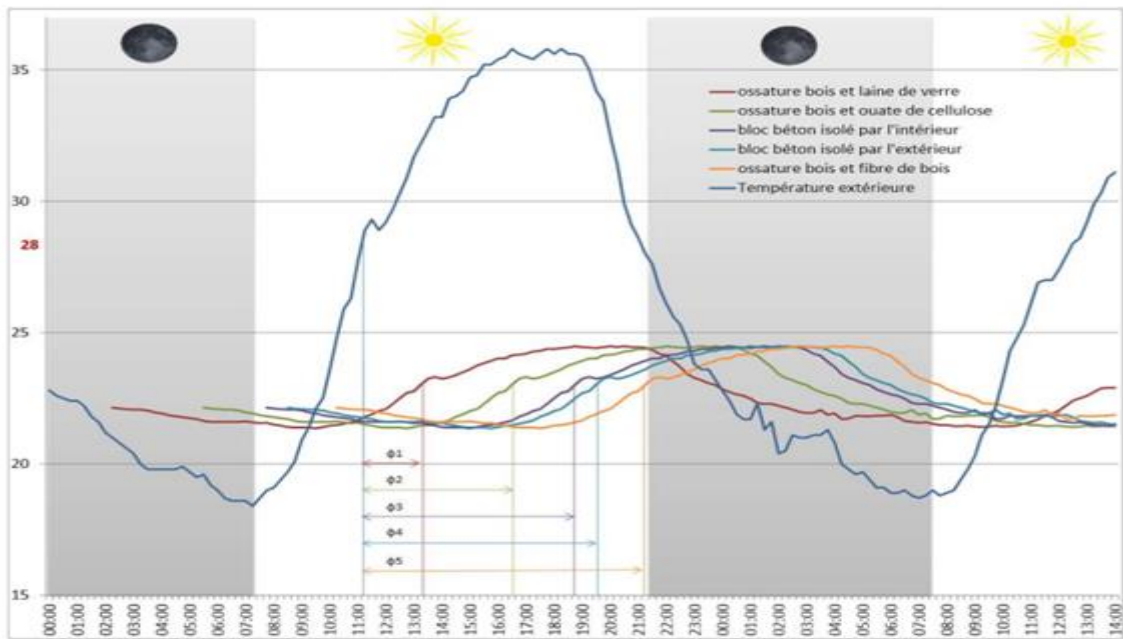


Figure 1.5 : Graphique illustrant l'effet de déphasage des isolants [6]

De toutes les propriétés présentées celle qui fera l'objet de notre travail est la conductivité thermique.

1.3.2 Matériaux de construction des Bâtiments

Les matériaux de construction sont déterminants car ils recouvrent la quasi-totalité de la construction et représentent la barrière entre l'intérieur habitable et le milieu extérieur. Classiquement, on utilise des matériaux à base de ciment or le procédé de fabrication classique du ciment consomme beaucoup d'énergie et produit des déchets toxiques. Cependant, il existe des alternatives telles que le bois ou la brique qui présentent elles aussi des qualités remarquables. De plus les matériaux de construction peuvent être classés en deux catégories, les matériaux traditionnels d'origine naturelle tels que la pierre, la terre crue, le bois, et les matériaux modernes composites dont le plus utilisé est le béton. [23]

1.3.2.1 Bois

Le bois est très utilisé au Bénin pour la construction des bâtiments. Soit pour la réalisation des portes, des fenêtres, des charpentes, des plafonds et même des fois pour toute l'enveloppe du bâtiment. Il existe diverses essences de bois à différentes propriétés thermique et mécanique. Les fibres de certains de ces bois sont utilisés par certains

auteurs pour doper les mortiers de ciment afin d'améliorer les caractéristiques thermophysiques de ces derniers [7]. De plus d'autres essences de bois sont plus conducteurs de chaleur que d'autres c'est le cas de Borassus Aéthiopum qui est plus conducteur de chaleur que le teck [8]. Enfin pour éviter la surchauffe dans une maison fraîche l'été et conserver sa chaleur l'hiver, il faut une bonne isolation et un bon déphasage. Afin de ne pas dépenser de l'énergie électrique en climatisation, le meilleur compromis est le bois.

1.3.2.2 Terre

La terre est l'un des plus anciens matériaux (6000 av. J.C.) de construction sur notre planète et l'un des plus largement répandue. Souvent assimilé au "matériau du pauvre", dénigré par les populations et les autorités, la terre est cependant est l'un des matériaux de construction les plus nobles qui soient. Comme toute autre matériau de construction la terre doit faire l'objet d'une optimisation grâce aux multiples connaissances acquises actuellement en géotechnique et en science des matériaux. Certaines insuffisances peuvent amener à décider de la nécessité de stabiliser la terre avant son utilisation. Il existe des stabilisants classiques : le ciment, la chaux, les pouzzolanes ; des stabilisants chimiques de base de bitume et de paraffine; des déchets industriels : cendres volantes; des stabilisants d'origine animale et d'origine végétale.

➤ Technique de mise en œuvre

La terre peut être mise en œuvre suivant des techniques variées dans la construction. En dehors des anciennes techniques traditionnelles d'adobe et de pisé, on distingue des briques de terre comprimée, cuite ou stabilisée.

- *Terre stabilisée*

Suivant l'usage que l'on veut en faire, il peut être utile voire nécessaire de stabiliser la terre. Une brique de terre comprimée non stabilisée a de très bonnes propriétés d'échanges thermiques et hygrométriques et une résistance suffisante à la compression pour pouvoir être utilisée telle quelle dans la construction. Dans les régions pluvieuses il est nécessaire de stabiliser les briques de terre car l'humidité qu'elles contiennent entraîne leur émiettement. Par exemple [9] a utilisé la chaux aérienne pour la stabilisation de la brique de terre afin d'améliorer la performance mécanique de cette dernière. La stabilisation est un ensemble de procédés visant à

améliorer les caractéristiques de la terre, en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité. Elle doit permettre de réduire le volume des vides entre les particules solides, de colmater les vides que l'on peut supprimer, de créer des liens ou d'améliorer les résistances mécaniques. Il existe dans la littérature plusieurs techniques de stabilisation des briques de terre. On distingue entre autres : la stabilisation mécanique, chimique, physique, au ciment, par cuisson et la réticulation géo-polymérique.

- *Terre crue*

La terre crue, matière première disponible, est d'une mise en œuvre aisée et peu coûteuse (techniques de construction en pisé ou torchis et briques de terre crue). Ceci justifiait son utilisation dans le passé, mais ce matériau économique a été peu à peu remplacé par d'autres plus performants et plus chers dans les pays industrialisés. L'utilisation de la terre est devenue l'apanage des pays en voie de développement.

- *Terre comprimée*

Elle consiste à comprimer la terre dans un moule de la taille d'une brique, en bois ou en acier, par un martelage continu. Le bloc de terre comprimée est une forme modernisée de cette technique. La compression à la machine a remplacé les dames manuelles. La Brique de Terre Comprimée (BTC) est produite à l'aide de terre très légèrement humide comprimée à l'aide d'une presse manuelle, hydraulique ou mécanique. La terre peut être stabilisée avec 3 à 10 % de ciment ou de chaux afin d'améliorer sa performance mécanique et son imperméabilité à l'eau. Les blocs de terre comprimée non stabilisés (ou stabilisés par l'ajout d'une faible quantité de liant hydraulique du type ciment ou chaux) sont des matériaux dotés d'excellentes performances thermiques. Des fibres peuvent également être ajoutées pour augmenter leur capacité d'isolation.

- *Terre cuite*

Les briques de terre cuite sont obtenues à partir de mélange de terre et notamment d'argile. Ce mélange est ensuite moulé ou extrudé pour obtenir la forme et éventuellement les alvéoles du produit fini. Le produit est découpé à la hauteur et à la longueur voulue. Et pour finir il sèche dans des étuves. Ce procédé est tout à fait respectueux de l'environnement. Il existe différents types de briques en terre cuite : la brique alvéolaire, la brique pleine, les plaquettes. Ces briques sont de bons isolants et

les déchets issus de leur fabrication peuvent être valorisés ou recyclés dans le procédé. Elle sert de matériau de construction présentant des qualités de rigidité et de tenue mécanique. Dans la littérature la conductivité thermique de la terre cuite varie entre 0,55 et 0,60 $W.m^{-1}.K^{-1}$ et on peut obtenir $\lambda = 0,37 W.m^{-1}.K^{-1}$ pour un tesson allégé par incorporation de sciure de bois ou de polystyrène. Sa forte inertie permet une bonne régulation de température et préserve la fraîcheur des locaux. Incombustible, il ne dégage pas de gaz toxiques en cas d'incendie. De plus, il est non polluant et résout les problèmes de recyclage. Ce matériau a fait l'objet d'une étude par [4] précisément sur la mesure de sa conductivité thermique.

1.3.2.3 Béton

Il existe différents type de bétons tels que le béton de chanvre, béton cellulaire et le béton normal. Ces différents bétons ont chacun leur particularité. [10] a montré que lorsqu'on passe d'une paroi en béton de chanvre à celle du béton cellulaire, de la brique ou du béton normal (avec une même épaisseur), la densité de flux entrant moyenne (W/m^2) augmente de 3,22 ; 5,88 et 8,24 fois respectivement. En ce qui concerne le déphasage, il est de 10 heures pour le béton de chanvre comparé à 5,5 ; 6 et à 7 heures pour le béton cellulaire, la brique et le béton normal respectivement.

Le béton de chambre est un matériau composite obtenu en mélangeant un liant à base de chaux, des particules végétales et de l'eau. Un tel béton de chanvre sera principalement utilisé comme matériau de remplissage des murs, étant un bon isolant thermique.

1.4 Synthèse bibliographique

L'une des caractéristiques thermiques des matériaux de construction est la conductivité thermique ainsi plusieurs auteurs ont travaillé sur la mesure de ce paramètre en utilisant différentes méthodes. Dans cette partie nous ferons une synthèse bibliographique des différents travaux qui ont rapport avec la détermination de la conductivité thermique.

En 2014, Ramesh Chandra Mohapatra et al., ont travaillé sur la détermination de coefficients de conductivité thermique des composites époxy remplis de poussière de bois de teck (TWD) à différentes fractions volumiques en utilisant le

dispositif de disque du Lee. Les résultats issus de cette étude montrent que pour chaque taille de TWD, les valeurs de conductivité thermique des composites diminuent avec l'augmentation de la teneur en charge ce qui implique que les composites renforcés d'époxy ont de bonnes propriétés d'isolation. Dans ce travail également la conductivité thermique du composite avec une taille de particule de 150 μm à 35,9% de la fraction volumique du bois de teck a été comparée par rapport aux composites avec 200 μm et 250 μm de poussière de bois de teck et il ressort que le composite de 150 μm à 35,9% présentait la conductivité thermique la plus faible. Enfin les résultats expérimentaux du composite de 150 μm ont été comparés aux modèles théoriques (le modèle de règle de mélange, modèle de Russel, le modèle de Maxwell Bachir et Selenew) et les erreurs associées aux quatre modèles précédents se situent respectivement dans la plage de 20,14 à 84%, de 74 à 111,84%, de 79,13 à 115,79% et de 60,13 à 102% [11]

En 2012, M. Alam et al., ont travaillé sur Lee's and Charlton's Method for Investigation of Thermal Conductivity of Insulating Materials. Dans ce présent travail, les conductivités thermiques des matériaux isolants ont été déterminées expérimentalement en utilisant le dispositif de disque de Lee et Charlton par la technique du régime stationnaire. Les coefficients de conductivité thermique des matériaux isolants ont été déterminés et ont été par la suite comparés aux valeurs fournies par la littérature. Il ressort de cette étude que le dispositif de disque de Lee donne des résultats plus précis pour les isolateurs. Dans cette expérience les coefficients de conductivité thermique obtenues par ce dispositif de disque de Lee pour le verre borosilicaté, le caoutchouc styrène-butadiène et la feuille d'aluminium recouverte de mousse et de polyoléfine sont respectivement de 0,797WmK, 0,3023 W / m.K et 0,057 W / m.K. Enfin les résultats expérimentaux obtenus montrent qu'il a un écart de (9-30)% de ces derniers par rapport aux valeurs de la littérature[12].

En 2014, Mustapha BOUMHAOUT et al., ont travaillé sur la mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction de différentes tailles par la méthode des boîtes. Les matériaux étudiés dans ce travail sont le bois et la terre

cuite et le matériau porteur est le polystyrène expansé. Les résultats de cette expérimentation ont été comparés avec ceux obtenus avec la méthode de fil chaud.

Tableau 1.1 : Conductivité thermique de la terre cuite et du bois de différentes tailles. [4]

Bois de différentes tailles			
taille	λ (W/m.K) méthode des boites	λ (W/m.K) méthode du fil chaud	λ (W/m.K) littérature
(26,4 × 26,4)	0,19 ± 0,01	0,21 ± 0,02	0,18 – 0,20
(20,7 × 10,8)	0,19 ± 0,05		
(15,2 × 8,95)	0,17 ± 0,02		
terre cuite			
(18,6 × 9,15)	0,6 ± 0,05	0,52 ± 0,07	0,55 – 0,60

En 2014, Paul Philip et al., ont travaillé sur la conception du dispositif du disque de Lee modifié pour la mesure de la conductivité thermique d'un mauvais conducteur thermique (isolant) sous la forme d'un disque plat . Dans ce travail pour la conception du dispositif, les composants utilisés ont été choisis en raison de leur capacité à supporter des niveaux de tension et de températures élevées ainsi le dispositif de disque de Lee conçu est équipé de divers types d'appareils électriques et de sondes. Le dispositif de mesure conçu a été utilisé par la suite pour tester la conductivité thermique de certains matériaux isolants. Ainsi les résultats obtenus ont été analysés pour valider l'efficacité du dispositif du disque de Lee modifié. La différence entre les valeurs obtenues et celles données par d'autres méthodes se situe entre 1% -8% [13].

M Ngaram et al en 2016, ont travaillé sur la conductivité thermique d'Adobe mélangé avec Quartz en vue de leur disponibilité en tant que matériaux de construction. Dans cette étude il a été utilisé le dispositif du disque de Lee pour la mesure de la conductivité thermique d'Adobe mélangé au quartz. Pour l'expérimentation, des disques ont été fabriqués à partir des gravures Adobe-Quartz ce qui a permis d'obtenir des valeurs de conductivité thermique comprises entre $0.57\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ et $0.91\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Ces valeurs

obtenues ont aidé à identifier Adobe-Quartz comme un des matériaux d'ingénierie utilisé dans la construction des bâtiments pour l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment (réduction de la température des bâtiments) sans consommation d'énergie électrique. L'objectif de ce travail est d'étudier l'intérêt d'utiliser d'Adobe-Quartz pour la l'amélioration de la performance thermique et la réduction de la consommation d'énergie électrique des bâtiments pendant le climat aride chaud (Mubi, État d'Adamawa, au Nigeria). Il ressort de cette étude que la réduction de la consommation d'énergie électrique a été obtenue en transformant l'Adobe-Quartz en briques utilisées comme agrégats dans les murs[14].

En 2012, Vitalis C. Ozebo et al., ont travaillé sur la détermination au laboratoire de la conductivité thermique d'un type de roche granitique du Nigeria en utilisant un dispositif de disque Lee. Cet article étudie la conductivité thermique du granite en raison de sa disponibilité et de son utilisation dans le bâtiment et la construction. Pour déterminer les conductivités thermiques, il a été fabriqué à partir de gravillons de granite liés au ciment des disques qui ont servi à l'expérimentation. Ces disques de même diamètre mais d'épaisseur variées étaient comprimés sous différentes pressions. Les valeurs de la conductivité thermique obtenues à la suite de cette expérimentation étaient comprises de 0,18 et 0,43 $Wm^{-1}K^{-1}$. Ces résultats indiquent que le granite est un isolant thermique et qu'il existe un coefficient de corrélation de 0,78 entre la pression de compression et la conductivité thermique. Ceci indique que le granite poreux de faible densité sera un isolant thermique approprié lorsqu'il est utilisé comme agrégat dans les murs et les tuiles [15].

En 2012, Samuel T. Ebong et al ., Ont travaillé sur la mesure de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique de trois importants sites géomorphologique de Akwa Ibom au Nigeria. La conductivité thermique (k) et la capacité calorifique spécifique (C) de certains échantillons prélevés sur trois reliefs majeurs de l'État d'Akwa Ibom, au Nigeria; (BRS, CPS et SHR) ont été mesurés à l'aide du dispositif de disc de Lee (conductivité thermique) et du calorimètre (chaleur spécifique). A la fin de l'expérimentation, les résultats renseignent qu'une augmentation de la chaleur spécifique des échantillons de SHR et de BRS entraine la diminution de la conductivité thermique

et que la conductivité des échantillons de sol a un grand effet sur les cultures et sur les travaux de construction [16].

En 2015, Parth J. Patel et al, ont travaillé sur la synthèse bibliographique des différentes méthodes de mesure de la conductivité thermique. Ce travail a consisté à présenter les différentes méthodes de mesure de la conductivité thermique des matériaux [17].

En 2014, Armand Ayihaou DJOSSOU, a travaillé sur l'étude des variations des propriétés thermophysiques et de la durabilité, en fonction de l'humidité des éco-matériaux de construction au Bénin. Ce travail a consisté d'abord à expérimenter la méthode du régime régulier pour la mesure de la diffusivité thermique de la latérite stabilisée en fonction de la teneur en eau. Ensuite à la mise en place d'une nouvelle méthode dénommée ruban chaud pour la détermination de l'effusivité et de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau et en sciure de bois des briques de terre stabilisée et allégée. Cette étude a révélé que le comportement des matériaux de construction est fortement influencé par la teneur en eau. Cette même étude révèle que pour améliorer les caractéristiques thermiques du matériau (briques de terre stabilisée et allégée) il faut lui incorporer une quantité modérée de sciure[18].

Chakirou A .TOUKOUROU et al., ont travaillé sur la détermination des caractéristiques physiques et thermiques du matériau composite terre-ciment-paille (CTCP). Ce travail a consisté à faire varier les pourcentages de ciment et de paille constituant le matériau à étudier et à utiliser la méthode du plan chaud asymétrique pour déterminer la conductivité thermique du matériau et les paramètres thermiques tels que l'effusivité, la diffusivité et la capacité calorifique sont déduits. Cette méthode procède par une modélisation quadripolaire unidimensionnelle (1D). Il ressort de cette étude que le Bloc de terre comprimé stabilisé à 10% de ciment et incorporant 2% de paille présente de meilleures performances thermiques et par conséquent présente un bon confort thermique.

En 2014, AHOUANNOU C. et al. , ont travaillé sur la détermination des propriétés thermiques du bois Borassus Aéthiopum (palmier rônier) exploité au Bénin. Les propriétés telles que la masse volumique, la chaleur massique spécifique et la diffusivité thermique ont été mesurées et ont permis d'estimer la conductivité et l'effusivité

thermiques de l'espèce de bois. La méthode dite du régime régulier est utilisée pour la mesure de la diffusivité (a); tandis que les valeurs de la conductivité thermique (λ) et l'effusivité thermiques (E) sont déduites dans les trois directions à partir de corrélations théoriques [8].

La synthèse bibliographique que nous venons de parcourir montre que beaucoup de travaux ont été effectués sur la mesure de la conductivité thermique et le dispositif de disque de Lee est aussi utilisé pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux isolant mais aucune étude ne s'est intéressée à la fois à la fabrication du dispositif de disque de Lee et à la comparaison des résultats d'expérimentation donnés par le dispositif du ruban chaud et ceux du disque de Lee.

1.5 Différents dispositifs de mesure de conductivité thermique

La mesure de la conductivité thermique est d'une grande importance quand on désire étudier les échanges de chaleur dans un système. De nombreux dispositifs expérimentaux utilisés pour mesurer la conductivité thermique des matériaux ont été proposés par différents auteurs. Dans ce chapitre il s'agit de donner un aperçu des différentes méthodes existantes de mesure de la conductivité thermique car il existe différentes méthodes [19] pour déterminer les propriétés thermiques des matériaux. Elles partent cependant du même principe : on applique une perturbation thermique sur un échantillon et on mesure la réponse du matériau en différents points et/ou en fonction du temps. La classification entre les méthodes en régime permanent et celles en régime transitoire est couramment employée

1.5.1 Régime permanent

Ce mode de fonctionnement est bien adapté à la mesure des conductivités thermiques des milieux isolants. Dans les régime permanents, il n'y a aucune variation de température en n'importe quel point du système en fonction du temps; c'est uniquement la loi de Fourier qui s'applique. Le milieu est supposé en équilibre thermique, et on le soumet à un flux stationnaire en fonction du temps. La température est mesurée en certains points de l'échantillon et les grandeurs thermiques associées sont obtenues à partir de la loi de Fourier et des conditions aux limites appliquées. Les méthodes en régime permanent nécessitent un long temps de manipulation et la variation

de l'humidité entraîne des résultats entachés d'erreurs. De plus le régime permanent permet d'obtenir des mesures d'une grande précision mais si le matériau a une conductivité très faible il faut un long processus pour atteindre l'équilibre [10]. Enfin Ces méthodes de mesure des propriétés thermiques en régime stationnaire sont les premières techniques de mesure développées et demeurent largement utilisées grâce à leurs mises en place expérimentales aisées et leurs développements théoriques simples comparées aux autres méthodes de mesure.

$$q_n = k_n \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.4.1)$$

1.5.1.1 La méthode de la plaque chaude gardée

C'est une méthode de mesure stationnaire de la conductivité thermique des matériaux isolants (faible conductivité thermique)

Les plaques extérieures en matériau très conducteur (cuivre, aluminium) sont maintenues à température constante par circulation d'un fluide issu d'un bain thermostaté. Une plaque chauffante délivre une puissance de chauffe φ_0 uniforme et constante qui est transmise aux plaques extérieures à travers les échantillons dont on veut mesurer la conductivité thermique. On s'assure du transfert 1D dans la zone centrale de mesure en entourant la zone chauffée par un anneau de garde auquel on fournit un flux φ_1 tel que la température de l'anneau soit égale à la température de la plaque chauffante. On s'assure ainsi également que tout le flux φ_0 passe à travers l'échantillon. Le flux φ_1 est supérieur au flux φ_0 pour compenser les pertes latérales convectives. L'anneau de garde et la plaque chauffante sont séparés par une mince couche d'air. Des thermocouples sont placés sur les deux faces des échantillons pour en mesurer les écarts de température $\Delta T \downarrow$ et $\Delta T \uparrow$.

L'expression de la conductivité est donnée par :

$$\lambda = \frac{e\varphi}{S(\Delta T \downarrow + \Delta T \uparrow)} \quad (1.4.2)$$

Où S est la surface de la plaque chauffante.

Cette méthode n'est applicable qu'aux isolants pour lesquels on peut négliger les résistances de contacts par rapport à la résistance du matériau. Ils permettent par ailleurs d'obtenir des écarts de température entre les deux faces relativement importants donc mesurables avec une bonne précision. On peut utiliser de la graisse conductrice pour diminuer les résistances de contact entre les échantillons et les plaques. Cette méthode est difficilement applicable à haute température et le résultat peut être biaisé par les pertes latérales si la surface de l'échantillon est insuffisante par rapport à l'épaisseur. Cette méthode permet d'obtenir la précision maximale de mesure de conductivité thermique ($\pm 1\%$), mais un temps de mesure de 1 à 3 jours par essai et le montage technique est délicat.

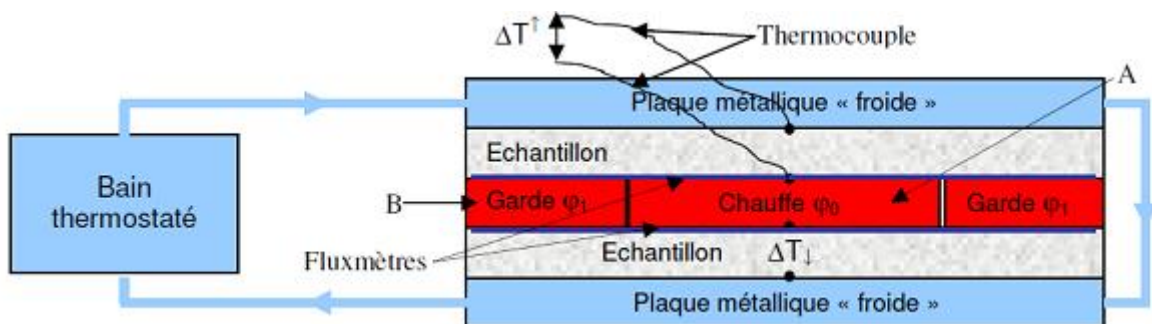


Figure 1.6 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée [20]

1.5.1.2 La méthode de Boite

Elle a été mise au point par le laboratoire d'études thermiques et solaires de l'Université Claude Bernard Lyon I en France. La méthode des boîtes est une technique qui permet de déterminer la conductivité thermique en régime permanent couramment utilisée pour la caractérisation thermophysique des matériaux de construction.

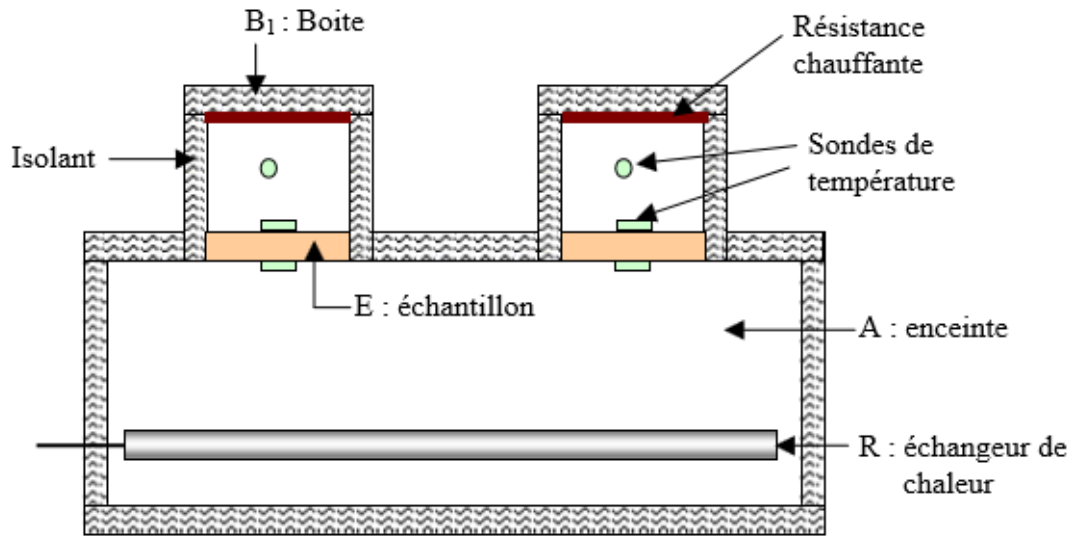


Figure 1.7: Schéma de principe de la méthode de boîte [21, 10]

Une grande enceinte notée A, très bien isolée, est maintenue à une température très faible grâce à un échangeur basse température relié à un cryostat. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E. Les capteurs de température sont des thermosondes à résistances. En régime permanent, les mesures du flux de chaleur émis par C et des températures sur les faces supérieure et inférieure de E permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon. Le système de chauffage est maintenu pendant une certaine durée. On observe l'évolution des températures T_c et T_f des faces chaude et froide de l'échantillon. Lorsque ces températures se stabilisent (variation de l'ordre de $1/10^{\circ}$ de degré en une heure) on considère que l'on a atteint le régime permanent. La précision de ce dispositif est donné par

On fait le bilan thermique en écrivant que le flux φ_j émis par la résistance (effet Joule) est égal au flux traversant l'échantillon φ_c auquel s'ajoutent les pertes φ_d thermiques à travers la paroi de la boîte. [4]

$$\varphi_j = \frac{U^2}{R} \quad (1.9a)$$

$$\varphi_d = D(\theta_b - \theta_a) \quad (1.9b)$$

$$\varphi_c = \frac{\lambda S}{e} (T_c - T_f) \quad (1.9c)$$

On obtient l'expression de la conductivité thermique sous la forme:

$$\lambda = \frac{e}{S(\theta_c - \theta_f)} \left[\frac{U^2}{R} - D(T_b - T_a) \right] \quad [4],[22],[23] \quad (1.9d)$$

Avec

S : Surface utile de l'échantillon (m^2)

T_b : Température de la boîte (K)

T_a : Température ambiante (K)

T_c : Température de la face chaude de l'échantillon (K)

T_f : Température de la face froide de l'échantillon (K)

U : Tension d'alimentation de la plaque chauffante (V)

D : Coefficient de déperdition thermique de la boîte B1

1.5.1.3 Méthode de Searle (bon Conducteur de chaleur tel que les métaux)

C'est un dispositif qui permet de mesurer en régime permanent la conductivité thermique des matériaux bon conducteur de chaleur tel que les métaux (aluminium, Zinc, Cuivre, Fer, etc.). On applique à l'un des bouts de la barre du matériau à caractériser un flux de chaleur (effet joule, ou vapeur d'eau). On refroidit l'autre bout de la barre à l'aide d'un système d'alimentation permanente en eau froide. Les résultats donnés par cette méthodes selon [24] ont une tolérance de $\pm 0,1$ par rapport aux valeurs théoriques.

En régime permanent, Le taux de transfert de chaleur entre les thermomètres 1 et 2 sur une distance d sera donné par :

$$\frac{Q}{t} = \frac{\lambda S(T_1 - T_2)}{x} \quad (1.10a)$$

Où

x : Longueur du matériau à caractériser

S : Section du matériau à caractériser

T_1 et T_2 : Températures mesurées par les thermomètres T1 and T2 respectivement.

Si m_e grammes d'eau coulent à travers la barre du matériau à caractériser par seconde et T_3 et T_4 sont respectivement les températures en régime permanent à l'entrée et à sa sortie de l'eau mesurées par les thermomètres T_3 et T_4 . La quantité d'énergie absorbée par l'eau est donnée par :

$$Q = m_e c(T_3 - T_4) \quad (1.10b)$$

A partir des équations (1) et (2), nous avons :

$$\lambda = \frac{4m_e c(T_3 - T_4)x \times t}{\pi d^2(T_1 - T_2)} \quad [24] \quad (1.10c)$$

Une simple insertion des valeurs obtenues expérimentalement peut être effectuée pour calculer la conductivité thermique du métal en question.

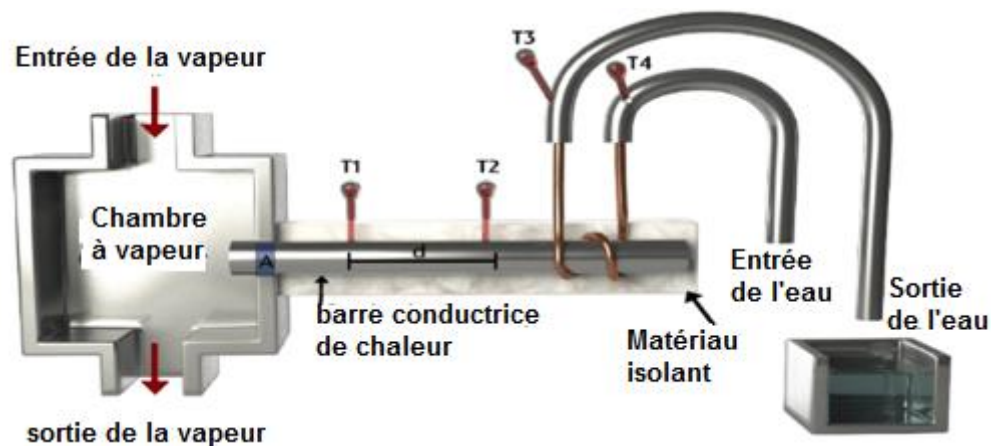


Figure 1.8 : Schéma de principe de la méthode de Searle

1.5.1.4 Méthode à flux radial

Le principe de la méthode dite à flux radial est en de nombreux points similaires à celle de la méthode de la plaque gardée. La principale différence réside dans la géométrie du modèle, qui sera cylindrique. Il est utilisé pour la mesure de la conductivité

des matériaux granulaires ou pulvérulents. Dans ce dispositif le matériau à caractériser est placé entre deux cylindres, à bases circulaires, concentriques de rayon R_1 et R_2 et de hauteur H . Le flux de chaleur est créé par effet joule dans le cylindre intérieur ; quant au cylindre extérieur, il est refroidi par une circulation d'eau. Cela permet finalement d'obtenir en régime permanent, une équation qui exprime la conductivité thermique en fonction du flux thermique imposé, des températures de surfaces et des paramètres géométriques :

$$\lambda = \frac{\phi \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}{2\pi H \Delta T} \quad (1.11)$$

Cette méthode permet des temps de mesure beaucoup plus court (15 min à deux heures) pour une précision allant de $\pm 3\%$ à $\pm 5\%$ seront la performance des appareils présents sur le marché.

1.5.1.5 Méthode du disque de Lee

Nous parlons brièvement de la méthode du disque de Lee à ce niveau car il sera développé davantage dans les chapitres qui suivent.

La méthode du disque de Lee permet de déterminer une valeur effective de la conductivité thermique λ d'un mauvais conducteur de chaleur comme le verre, le carton, le bois etc. Le matériau mauvais conducteur de chaleur (matériau isolant) à tester, de diamètre D et d'épaisseur e , est inséré entre deux disques identiques de mêmes matériaux bons conducteurs de chaleur. L'ensemble tout surmonté d'une chambre à vapeur. La chambre à vapeur, le matériau à caractériser et les disques métalliques ont le même diamètre.

L'appareil de Lee et Charlton (1896) est celui dans lequel le mauvais conducteur (le matériau isolant) est employé sous la forme d'un disque et sa conductivité thermique est mesurée en appliquant la loi de refroidissement de Newton.

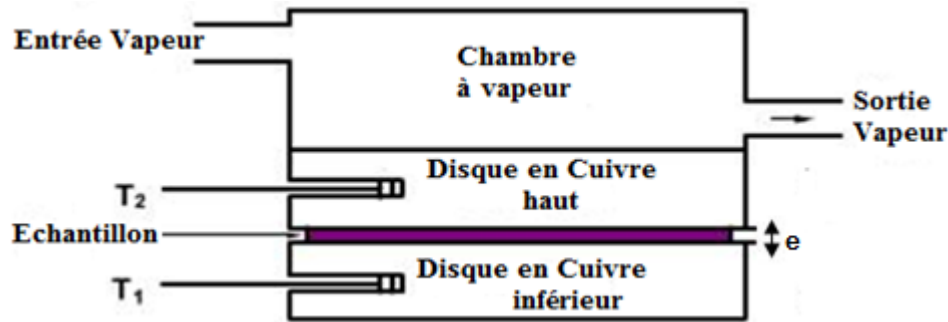


Figure 1.9 : Schéma de principe de la méthode du disque de Lee

L'équation permettant de calculer la conductivité du matériau isolant est donnée par [13]

$$\lambda = \frac{mc \frac{dT}{dt}}{S \frac{T_2 - T_1}{e}} \quad (1.12)$$

m : Masse du disque métallique

c : Chaleur spécifique du disque métallique

λ : Conductivité thermique de l'échantillon

$S = \frac{\pi}{4} d^2$: Surface de base du disque

$T_2 - T_1$: Différence de température entre les échantillons

e : Épaisseur de l'échantillon

$\frac{dT}{dt}$: Vitesse de refroidissement du disque métallique à T_2 .

1.5.2 Régime transitoire

Dans ce régime, soit la température n'a pas atteint une valeur d'équilibre, ou soit elle varie périodiquement dans le temps. Ces méthodes sont également plus rapides mais moins précises qu'en régime permanent [25]. En effet, dans les régimes transitoires, la température d'un point quelconque du système varie en fonction du temps, et la loi de conservation de l'énergie s'écrit [20]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.13)$$

Ainsi, l'équation de l'énergie est fonction de la conductivité, la capacité thermique et la densité en plus du temps, ce qui rend l'étude de l'évolution des transferts de chaleur avant la mise en équilibre beaucoup plus délicate.

1.5.2.1 Fil chaud

Le principe de la méthode consiste à placer un fil chauffant entre les surfaces planes de deux échantillons du matériau à caractériser. On applique un échelon de flux de chaleur constant ($\varphi = 0$ si $t < t_0$ ou $\varphi = \varphi_0$ si $t > t_0$) au fil chauffant et on relève l'élévation de sa température. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide, on peut considérer que le transfert au centre de l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de :

- La conductivité thermique λ_1 ,
- La capacité thermique $(mc)_s$ de l'ensemble sonde + fil chauffant et
- La résistance de contact R_c à l'interface sonde/échantillon,

qui minimisent l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales.

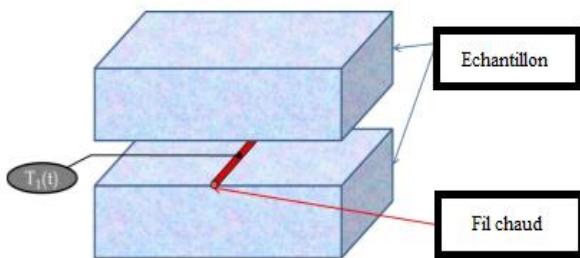


Figure 1.10 a : schéma du montage dispositif du fil chaud [26]



Figure 1.10 b : Vue d'une sonde de type fil chaud [8]

L'expression de $T_1(t)$ au temps de long est donnée par [10][27] :

$$T_1(t) - T_1(t = 0) = \frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left[R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right] \quad (1.14)$$

Avec $\gamma = 0,57721$ la constante d'Euler

On remonte à la conductivité thermique de l'échantillon en traçant la variation de température du fil chaud ($T_1(t) - T_1(t = 0)$) au cours du temps, en fonction de $\ln(t)$ pour être plus précis. La courbe obtenue représente une droite dont la pente $\frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L}$ donne accès à la conductivité thermique λ [2][26]. Cette conductivité est donnée par :

$$\lambda = \frac{\varphi_0}{4\pi * L * \text{tang}(\theta)} \quad (1.15)$$

Avec :

L : Longueur du fil (m)

φ_0 : Flux linéaire traversant le fil (W/m)

θ : Angle déterminé à partir du thermogramme de monté en température.

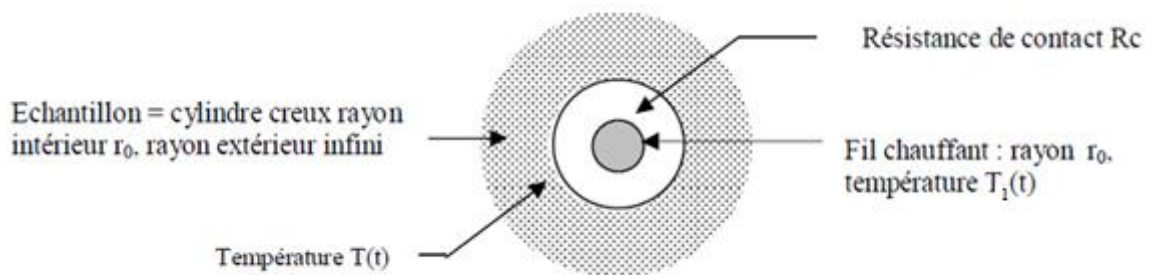


Figure 1.11 : Une vue en coupe du fil chaud et de l'échantillon [18][10]

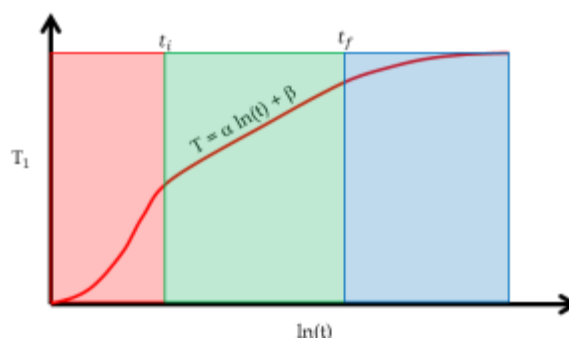


Figure 1.12 : Illustration des limites de la zone linéaire de la température du fil chaud [26].

1.5.2.2 Méthode du plan chaud

La méthode du plan chaud permet de déterminer l'effusivité thermique du matériau.

Le principe est le suivant :

- un flux de chaleur uniforme (φ_1) est imposé, d'une résistance chauffante, à l'interface de deux échantillons symétriques d'épaisseur quelconque et d'extension infinie dans la direction perpendiculaire à l'interface. Les échantillons sont assimilables à un milieu semi infini. Par ailleurs, les faces latérales des deux échantillons sont isolées et le transfert peut être considéré comme unidirectionnel. L'évolution de la température $T_s(t)$ de la résistance chauffante est mesurée dans le plan du chauffage par un thermocouple. Le comportement asymptotique aux temps longs, du thermogramme ainsi obtenu, est proportionnel à la racine carrée du temps, le coefficient de proportionnalité (β) étant directement relié à l'effusivité (E) des échantillons [28]. Le comportement aux temps courts est influencé par l'inertie thermique de la sonde (élément chauffant + thermocouple) et par la résistance de contact sonde-milieu.
- On applique ensuite une méthode d'optimisation de paramètres pour calculer les valeurs de :
 - l'effusivité thermique $E = \sqrt{\lambda\rho c}$ et la conductivité thermique λ_1 du matériau à caractériser,
 - la capacitance thermique (mc)s de l'ensemble sonde + résistance chauffante,
 - les résistances de contact R_{c1} à l'interface sonde/échantillon et R_{c2} à l'interface échantillon / matériau connu, qui minimisent l'écart entre les courbes $T_s(t)$ théoriques et expérimentales.

Si on fait recours à [18][27], l'expression de $T_s(t)$ au temps long est donnée par :

$$T_s(t) - T_0(t = 0) = \frac{2\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}}\sqrt{t} + \varphi_0 \left[R_c - \frac{(mc)_s}{2(ES)^2} \right] \quad (1.16)$$

En traçant $T_s(t) - T_s(t = 0)$ en fonction de \sqrt{t} qui est une droite de pente $\frac{2\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}}$, on détermine de façon analytique l'effusivité thermique E .

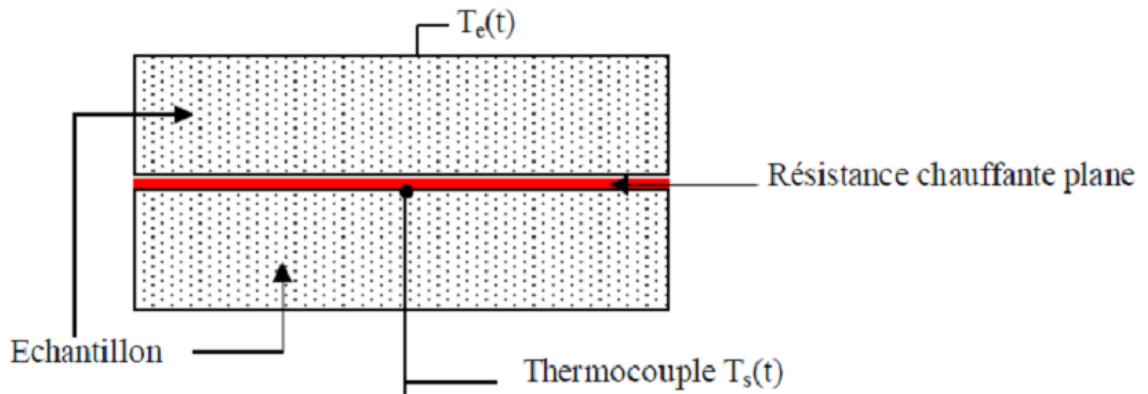


Figure 1.13 : Schéma de principe de la méthode du plan chaud symétrique [18]

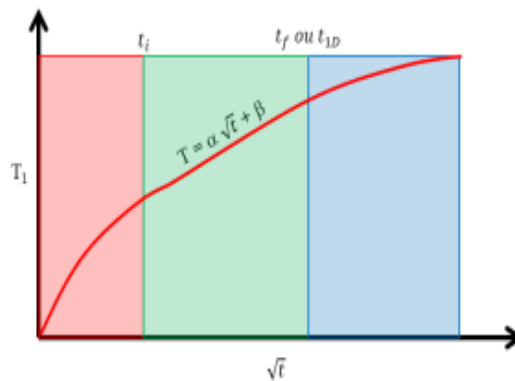


Figure 1.14 : Illustration des limites de la zone linéaire de température du plan chaud [26]

En plus de cette approche plus traditionnelle de la méthode du plan chaud, on peut enregistrer les thermogrammes aux temps longs pour lesquels, éventuellement un régime permanent caractérisé par un différentiel de température $\Delta T = T_1 - T_2$ entre les deux faces du matériau à caractériser s'instaure. Il s'ensuit les relations ci-dessous, qui permettent de calculer, l'effusivité (E), la conductivité thermique (λ_1) et la capacité calorifique c [28]:

$$E = \frac{\varphi_1}{\beta\sqrt{\pi}} \quad (1.17a)$$

$$k_1 = \frac{\varphi_1 L}{\Delta T} \quad (1.17b)$$

$$c = \frac{\lambda_1^2}{E_1^2} \quad (1.17c)$$

Il faut veiller à ce que la densité de flux thermique soit très en dessous des flux critiques d'ignition ou bien permettre que les temps d'expérimentation soient courts pour maintenir constante la teneur en eau des matériaux sinon du fait de l'hygroscopicité du bois et des panneaux isolants, on assistera à un essai destructif et qui ce entraine le séchage des matériaux.

1.5.2.3 Ruban chaud

Le ruban chaud est une méthode développée au laboratoire de TREFLE de L'ENSAM et qui permet de mesurer à la fois la conductivité et l'effusivité thermique d'un matériau en régime transitoire à partir d'un seul enregistrement de thermogramme. Il est une généralisation de la méthode du plan chaud, en considérant une source de chaleur dont une des dimensions est inférieure à la dimension de l'échantillon à caractériser. Le choix du rapport entre la demi-longueur de l'échantillon L et la demi-largeur du ruban chaud b est déterminant. Il est remarquable que si $b \rightarrow L$, le système tend vers le plan chaud et si $b \ll L$, le système tend vers le fil chaud. Le principe de la méthode du ruban chaud est justement de se placer dans des conditions telles que le compromis entre ces deux extrêmes permette de bénéficier des avantages des deux méthodes (fil chaud et plan chaud).

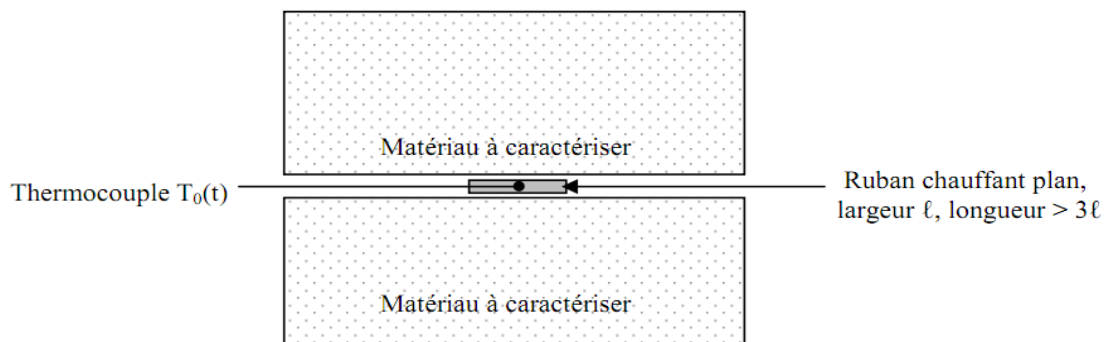


Figure 1.15 : Schéma du montage de la méthode du ruban chaud

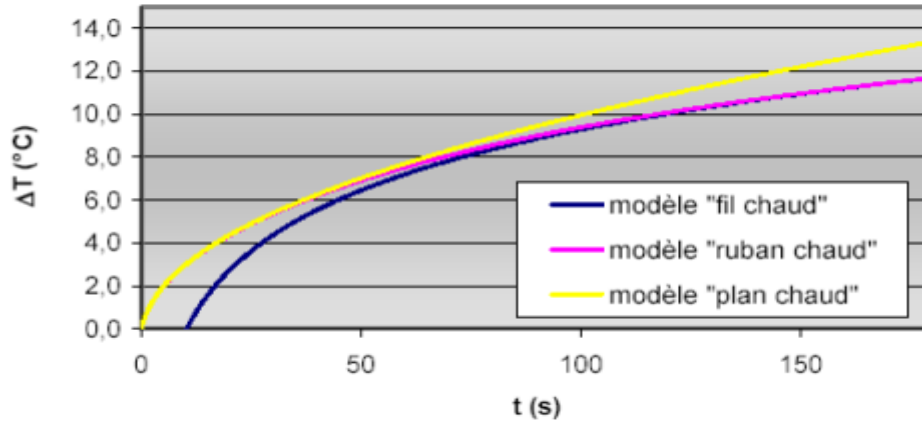


Figure 1.16 : Comparaison des trois modèles appliqués à une sonde de type ruban chaud [10]

Lorsque la résistance de contact et la masse de la résistance chauffante et du thermocouple sont négligés, la température de la sonde peut s'écrire selon [10] :

$$T_s(0,0,t) = \frac{2\phi\sqrt{at}}{\lambda\sqrt{\pi}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{b}{2\sqrt{at}}\right) - \frac{b}{2\sqrt{at}} E_i\left(-\frac{b^2}{4at}\right) \right] \quad (1.18)$$

Avec : $E_i(-x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$

Le terme $\frac{2\phi\sqrt{at}}{\lambda\sqrt{\pi}}$ représente l'évolution de la température du plan chaud si on néglige sa masse et la résistance de contact.

1.5.2.4 Hot disk

. C'est une méthode en régime transitoire et dans la méthode du hot disk, l'élément chauffant est une sonde de forme cylindrique constituée d'une résistance de platine sous forme d'un ruban enroulé en spirale sur un support en matière plastique. Celle-ci est insérée entre les surfaces de deux échantillons du même matériau à caractériser ou entre l'échantillon à caractériser et un autre matériau connu. Les dimensions des échantillons doivent être suffisamment grandes devant celles du disque pour que l'hypothèse du milieu semi-infini soit valable. Le système qui est à l'équilibre thermique avec le milieu ambiant est soumis à l'instant initial à un flux de chaleur de puissance sous la forme d'un échelon. La résistance de platine est utilisée à la fois pour produire un flux de chaleur et pour mesurer la température moyenne $\bar{T}(t)$ du disque. Il a été montré que cette élévation de la température moyenne peut être décrite avec une bonne précision par les expressions suivantes [20][26]:

$$\bar{T}(t) = \varphi_0 \left(\pi^{\frac{3}{2}} r \lambda \right) D(\tau) \quad (1.19)$$

Avec :

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

$$D(\tau) = [m(m+1)]^{-2} \int_0^\tau \sigma^{-2} d\sigma \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(-\frac{k^2 + l^2}{4m^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{kl}{2m^2\sigma^2}\right) \right]$$

Avec

m : Nombre de spires

I_0 : Fonction de Bessel modifiée

Si l'espace entre les spires devient très petit, cette solution tend vers :

$$D(\tau) = \int_0^\tau \sigma^{-2} d\sigma \int_0^1 v dv \int_0^1 u du \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{4\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{uv}{2\sigma^2}\right)$$

Une très légère correction sur le temps permet d'obtenir une concordance parfaite entre les deux expressions. L'estimation des paramètres doit être réalisée entre t_{min} et t_{max} tels que :

$t_{min} \geq \frac{e_s^2}{a_s}$ et $t_{max} \leq 1,1 \frac{r^2}{a_s}$ où e_s et a_s sont respectivement l'épaisseur et la diffusivité thermique de la sonde. Dans cette zone, la température n'est plus sensible à la perturbation créée par la sonde et les sensibilités à la diffusivité thermique a et à la conductivité thermique λ sont décorrélées ce qui permet de les estimer séparément [20].

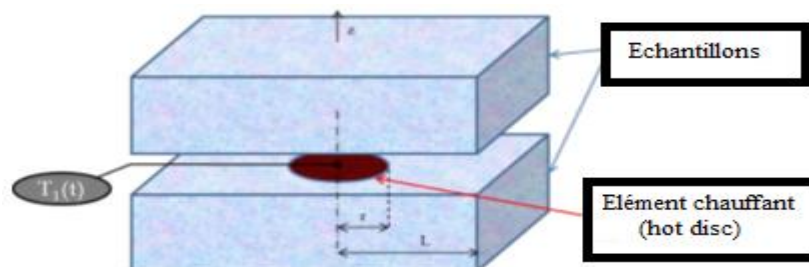


Figure 1.17 : Schéma de principe de la méthode du hot disk

La variation de la température de la source en fonction de $D(\tau)$ est représentée par une droite de pente $\varphi_0 \left(\pi^{\frac{3}{2}} r \lambda \right)$ permettant de remonter directement à l'expression de la conductivité thermique.

1.5.2.5 Méthode flash

Cette méthode permet d'estimer la diffusivité thermique des solides. Son schéma de principe est décrit à la figure 1.4.11.1. On envoie sur l'une des faces d'un échantillon à faces parallèles un flux lumineux de forte puissance pendant un temps très court. Un thermocouple en contact avec la face arrière permet d'enregistrer l'élévation de sa température à partir du moment où la face avant a reçu le flash. Une modélisation des transferts de chaleur dans l'échantillon a permis à plusieurs auteurs de proposer des méthodes d'estimation de la diffusivité thermique à partir du thermogramme expérimental. La simplicité de certaines de ces méthodes a rendu la méthode flash très populaire, un certain nombre de précautions expérimentales doivent toutefois être respectées pour atteindre une bonne précision.

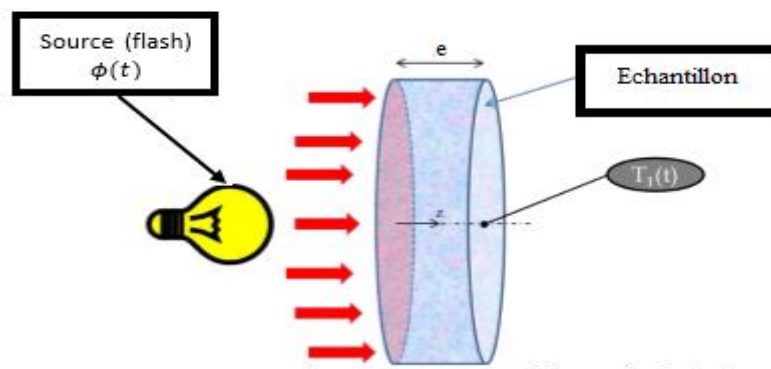


Figure 1.18 : Schéma de principe de la méthode flash [26]

L'analyse du thermogramme expérimental enregistré sur la face non irradiée permet de déterminer, en utilisant des techniques de dépouillement déjà existantes, la diffusivité thermique de l'échantillon.

Voici quelques techniques de dépouillement [20] [29]:

- Modèle de Parker (Parker, 1961)

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 $T_1(t)$ de la face arrière soit égale à la moitié de la température maximale atteinte T_{1m} .

$$a = \frac{1,38e^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (1.20)$$

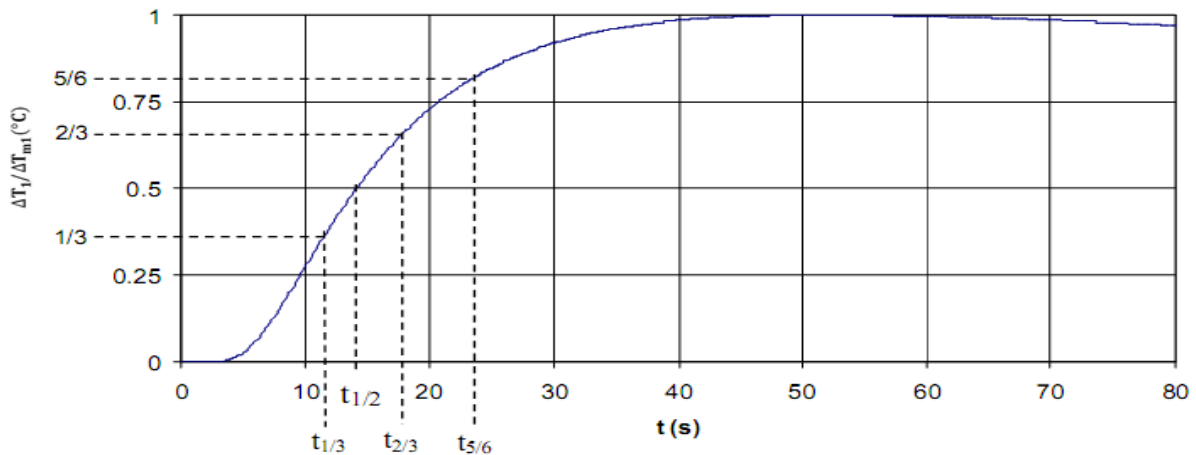


Figure 1.19 : Courbe théorique de la température réduite de la face arrière.

- Modèle des temps partiels

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 thermogramme représentés sur la Figure 1.19. La diffusivité thermique peut être obtenue par les formules suivantes (Degiovanni, 1977) :

$$a = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left(1,131 - 1,222 \frac{t_{2/3}}{t_{5/6}} \right) \quad (1.21)$$

Avec

e : L'épaisseur de l'échantillon en m ,

t_ρ : Le st le temps écoulé depuis l'excitation pour que la température de la face arrière s'élève de ρ fois son élévation maximale au cours de l'expérience.

Cette méthode flash se repose sur deux conditions qui excluent les matériaux très légers et les milieux poreux car il faut que le flux lumineux envoyé sur la face avant soit absorbé par la surface et ne « pénètre » pas dans l'échantillon et qu'on arrive aussi à

mesurer en face arrière une grandeur proportionnelle à l'élévation de température. Or il est très difficile de mesurer la température de surface d'un milieu très léger, la solution du thermocouple est inapplicable dans ce cas. De plus dans le cas d'un milieu poreux, le flash envoyé sur la face avant n'est pas absorbé intégralement au niveau de la surface, une partie pénètre dans la masse de l'échantillon à travers la porosité et fausse la mesure.

1.5.2.6 Tri-couche

La méthode de la tri-couche est une technique de mesure de la conductivité et de la diffusivité thermique conçue spécialement pour les matériaux isolants très légers. Le matériau à caractériser généralement de forme cylindrique, est inséré entre deux disques de faible épaisseur environ 0,4 mm comme indiqué sur la figure 1.4.12. Deux thermocouples dont les fils ont un diamètre de 0,05 mm sont soudés aux surfaces externes de chaque plateau avec un système à contacts séparés. Le disque en partie inférieure posé sur le matériau isolant est soumis à un échelon de flux de chaleur à partir d'une sonde de même surface que les disques et on enregistre les températures des disques. Une pression est appliquée en partie supérieure au système pour minimiser les résistances de contact. La surface du disque supérieur échange par convection et par rayonnement avec l'air ambiant.

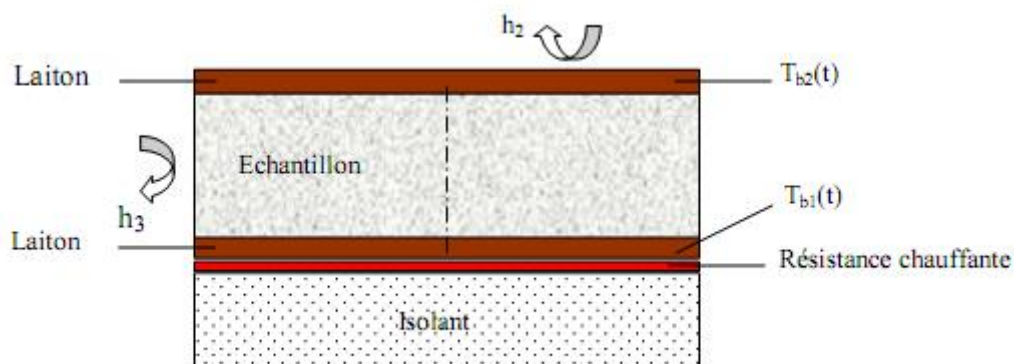


Figure 1.20 : Schéma de principe de la méthode de la tricouche [20]

1.6 Choix d'une méthode

Le nombre important de méthodes existantes pour la caractérisation de propriétés thermo-physiques, 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 menés. Pour cela, il est nécessaire de se baser sur les différents critères. Le

premier critère à prendre en compte est la nature des propriétés que l'on souhaite caractériser. En effet, certaines méthodes permettront de mesurer directement la conductivité thermique (méthode en régime permanent) alors que d'autres s'attacheront à caractériser des propriétés comme la diffusivité thermique ou l'effusivité thermique. Il sera alors nécessaire de compléter ces dernières par des mesures de capacité calorifique, par calorimétrie différentielle ou autres, pour connaître la conductivité thermique.

Le deuxième critère est l'état de la matière à caractériser (solide, liquide, gaz, poudre, fibre, etc.) et les conditions dans lesquelles on souhaite le faire (température, pression, humidité, etc.). Certaines méthodes seront très bien adaptées à la mesure sur les solides et difficiles dans le cas des liquides (plaque chaude gardée). De plus, un grand nombre de travaux académiques étudient la variation des propriétés thermophysique en fonction de la température ou de la pression. Ce type de mesures nécessite la plupart du temps des instruments adaptés.

Un dernier critère important, étroitement lié au précédent est le type de conducteur thermique : isolants thermiques ou bons conducteurs thermiques. Par exemple, les isolants thermiques pourront être caractérisés par la méthode de la plaque chaude gardée, qui ne permettra pas, en revanche, de caractériser des bons conducteurs thermiques. Cela étant, il est à noter que la méthode du fil chaud permet de couvrir une très large gamme de conductivités thermiques : des isolants thermiques (gaz) jusqu'à des bons conducteurs. Par ailleurs, il est toujours souhaitable de confronter plusieurs mesures du même paramètre avec deux méthodes différentes pour s'assurer de la cohérence des résultats. Par exemple pour un matériau conducteur, la méthode Flash et la calorimétrie permettent de mesurer a et c , d'où l'on peut déduire la valeur de λ . Une mesure de la conductivité thermique de λ par la méthode du fil chaud conduisant à une valeur proche de la première permet alors de valider les résultats obtenus pour a et c . On trouvera dans le tableau un récapitulatif des méthodes de mesures préconisées pour la mesure des propriétés thermiques en fonction de la gamme de conductivité thermique.

Tableau 1.2 : Méthodes conseillées pour la mesure des propriétés thermiques d'un solide (en fonction de la conductivité)

Gamme de conductivité ((W. m ⁻¹ . K ⁻¹))	Méthodes conseillées	Grandeurs mesurés	Remarques
$\lambda > 5$	Flash Calorimétrie différentielle Fil chaud	a c λ	Condition milieu semi-infini à vérifier
$5 > \lambda > 0,5$	Plan chaud centré face arrière isolée Flash Calorimétrie différentielle Fil chaud Hot disk	$\lambda, \rho c$ a c λ λ, a	Condition du transfert 1D à vérifier Condition milieu semi-infini à vérifier Faible précision sur la valeur de a
$0,5 > \lambda > 0,05$	Plan chaud centré T _{arrière} constant Ruban chaud permanent Calorimétrie différentielle Plaque chaude gardée Mini-plaque chaude Flash Fil chaud Hot disk	$\lambda, \rho c$ λ c λ λ a λ λ, a	Condition du transfert 1D à vérifier Adapté aux matériaux anisotropes Faible précision sur la valeur de a
$\lambda < 0,05$	Calorimétrie différentielle Plaque chaude gardée Plan chaud centré T _{arrière} constant Ruban chaud permanent Tricouche Fil chaud Hot disk	c λ $\lambda, \rho c$ λ $\lambda, \rho c$ λ λ, a	Condition du transfert 1D à vérifier Adapté aux matériaux anisotropes Adapté aux échantillons de faibles dimensions Faible précision sur la valeur de a

La méthode du disque de Lee est une méthode simple et efficace pour calculer les conductivités thermiques des matériaux isolants. N'importe qui peut opérer et assembler un appareil de disque de Lee, car la plupart de ces composants sont abordables. De plus la technique du disque de Lee selon [23] est d'une simplicité expérimentale. Actuellement dans notre laboratoire il n'y a qu'un seul dispositif de mesure de conductivité qui est fonctionnel et selon [18] cette méthode ne donne pas un résultat de l'Effusivité thermique concluant pour une plaque en plexiglass de 4 mm or le dispositif de disque de Lee que nous allons concevoir est capable de donner un résultat concluant pour des matériaux isolants de très faibles épaisseur. De plus ce dispositif conçu pour la mesure de la conductivité thermique des isolants permettra à notre laboratoire de disposer d'un autre dispositif de mesure de conductivité thermique des isolants, conçus localement. En outre ceci pourra être dupliqué pour permettre aux étudiants de s'habituer à une expérimentation de mesure de conductivité thermique car ce dispositif est facile et ne comporte pas de grandes formules et les quelques-unes qu'elle comporte sont manipulables par tous.

1.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les différents transferts thermiques qui se produisent au niveau des matériaux et chacun de ces transferts a sa spécificité. De plus certaines propriétés thermiques des matériaux ont été passées en peine fin. Ces propriétés nous renseignent nous certains matériaux transmettent de la chaleur plus que d'autres, tandis qu'il en existe qui émet plus de rayonnement que d'autres et enfin d'autres ont la capacité à retarder les variations de température. Ensuite quelques travaux réalisés au niveau de la mesure de la conductivité thermique ont été présentés et il ressort qu'aucune étude ne s'est penchée à la fois à la conception du dispositif du disque de Lee et à la comparaison des résultats donnés par ce dernier et ceux du ruban chaud. Enfin des dispositifs de mesure de la conductivité thermique ont été présentés et il ressort que les dispositifs fonctionnant en régime permanent mesurent uniquement la conductivité thermique tandis que ceux du régime transitoire donnent accès à deux paramètres

CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES DU DISQUE DE LEE ET DU RUBAN CHAUD

2.1 Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre au matériel et aux méthodes expérimentales du dispositif du disque de Lee et celui du ruban chaud. Pour cela nous sommes passés d'abord à la conception du disque de Lee. Ensuite nous avons élaboré les échantillons à caractériser. Enfin nous avons présenté les lois physiques et les formules mathématiques qui régissent les expérimentations avant la présentation des protocoles expérimentaux.

2.2 Conception et réalisation du dispositif de disque de Lee

La cotation des différentes composantes du dispositif du disque de Lee est présentée l'annexe du document. Le dispositif du disque de Lee conçu est constitué des éléments suivants :

Tableau 2.1 : Composantes et outils

Composantes	Matières
Chambre à vapeur	Cuivre
Disque haut et Disque inférieur	Cuivre
Générateur de vapeur ou bouillier	Tôle Inox
Echantillons	Plexiglas, Acajou, Kosso.
Tuyau	PVC
Plaque chauffante	
Deux thermocouples	
Support	Acier
3 Pièces isolement	Bois
Outils	
Un pied à coulisse	
Une balance	
Un chronomètre	

2.2.1 Chambre à vapeur

La chambre vapeur à vapeur est constituée de deux orifices dont l'un permet de faire entrer de la vapeur à l'intérieur de ce dernier et l'autre orifice représente la sortie de la vapeur. Cette chambre est fabriquée en cuivre à cause de sa conductivité thermique. Car cette chambre devra transmettre de la chaleur au disque haut en Cuivre. Il faut noter qu'au début nous avons retenu l'aluminium à cause de sa densité (plus léger que le cuivre) mais compte tenu de la complication d'avoir un matériau en aluminium de bonne qualité et du parc machines nous avons dû abandonner l'aluminium. Cette pièce étant de forme cylindrique nous avons usiné la matière première dont le diamètre est 50 mm aux dimensions idoines. Il faut noter que la chambre a été construite en deux parties à savoir une partie taraudée et une partie fileté (couvercle). En ce qui concerne les deux orifices, n'ayant pas à la portée de main un matériau en cuivre de diamètre 14 mm nous avons dû chercher un matériau en Acier. La machine ayant servi à la fabrication de cette pièce est un tour.



Figure 2.1 : Chambre à vapeur

2.2.2 Disques en Cuivre

Nous avons fabriqué deux disques à savoir le disque haut et le disque bas qui sont en Cuivre. Le disque haut étant en contact avec la base de la chambre à vapeur est usiné à une épaisseur de 10 mm et au même diamètre que celui de la chambre à vapeur (50 mm). Ces dimensions ne sont pas loin de celle utilisées par [13]. Ce disque est en Cuivre car il doit transmettre la chaleur reçue de la chambre à vapeur au matériau à caractériser. De plus afin de mesurer la température au niveau du disque nous avons réalisé un trou dans lequel est placé le thermocouple. Le disque bas est réalisé de la même manière que

le disque bas et a les mêmes caractéristiques que ce dernier. L'usinage de ces deux pièces sont fait sur une machine tour. Une balance électronique de marque SARTORIUS BP 3100S - norme ISO 9001, avec une charge maximale de 3100 g \pm 1% a été utilisée pour faire la mesure de la masse des disques en Cuivre.



Figure 2.2 : Disque en Cuivre de diamètre 50 mm et d'épaisseur 10 mm

2.2.3 Bouilleur

Le Bouilleur en Acier inox , est de forme cylindro-conique et est réalisée avec une cintreuse et un poste à souder. Avant toute fabrication il a fallu decomposer la pièce en deux grandes parties pour ensuite calculé les dimensions de la feuille de tôle d'inox dont ona besoin avant de passer au tracage et enfin au soudage.



Figure 2.3. : Générateur de vapeur

La partie cylindrique de rayon 150 mn et de hauteur 250 mn. Pour la réaliser nous avons fait le traçage de sa base circulaire et de surface latérale sur une feuille de tôle après cette étape nous avons découpé ces derniers avant de cintrer le développement de sa surface latérale.

Le calcul des dimensions de la surface latérale du cylindre est donné par :

$h = 250 \text{ mn}$ $L = \pi \times (D - e)$ avec $e = 3 \text{ mn}$ et $D = 150 \text{ mn}$ on trouve dans
notre cas $L = 461 \text{ mn}$

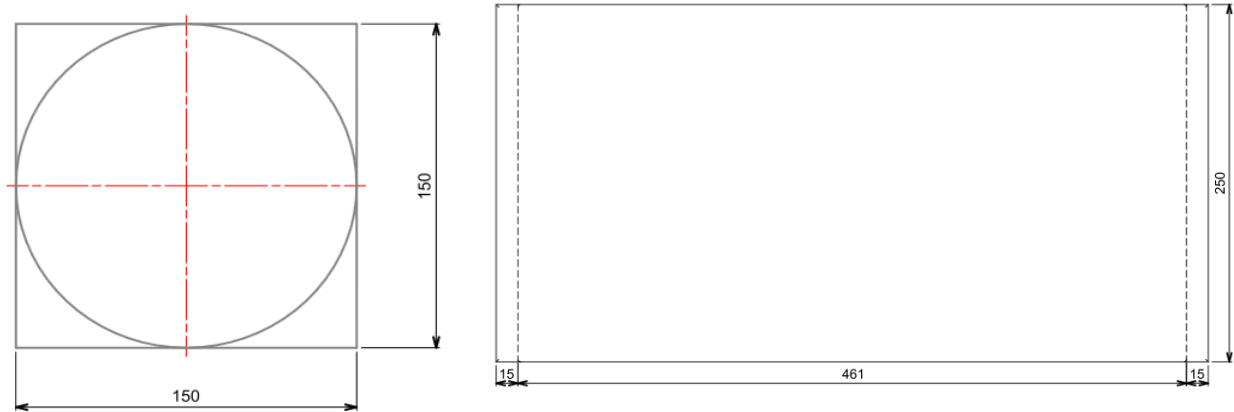


Figure 2.4 : Développement de la partie cylindrique du bouilleur

La partie tronconique a pour hauteur $H = 50 \text{ mn}$ et pour grand et petits rayon respectivement $R = 75$ et $r = 40 \text{ mn}$. Pour la réaliser nous avons fait le traçage de sa base circulaire et de surface latérale sur une feuille de tôle après cette étape nous avons découpé ces derniers avant de rouler le développement de sa surface latérale.

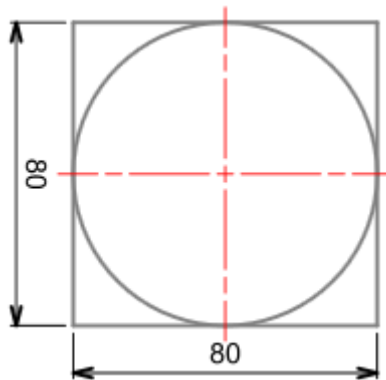


Figure 2.5 : Base de la partie conique du bouilleur

Le calcul des dimensions de la surface latérale du tronc de cône est donné par :

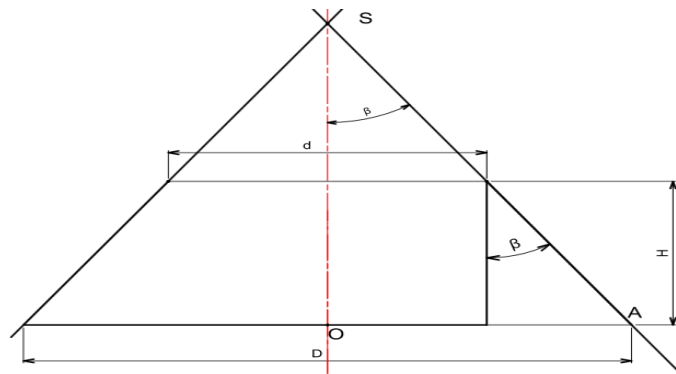


Figure 2.6 : Schéma illustrant le calcul des différentes dimensions d'un tronc de cône

$$\tan \beta = \frac{D-d}{2H} \quad \text{et} \quad SA = \frac{D}{2 \times \sin \beta} \quad \text{avec} \quad D = 147 \text{ mm} \quad d = 77 \quad H = 50 \text{ mm}$$

$$\beta = 35^\circ \quad \text{et} \quad SA = 128,14 \text{ mm}$$

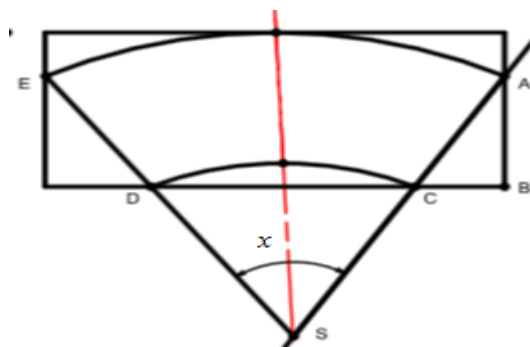


Figure 2.7 : Développement latéral de la partie conique du bouilleur

$$x = \frac{360 \times R_0}{R_1} \quad \text{avec} \quad R_0 = 73,5 \quad \text{et} \quad R_1 = 128$$

$$x = 206^\circ$$

$$CA = 61 \text{ mm} \quad SC = 67 \text{ mm}$$

$$AB = 14 \text{ mm} \quad BC = 59,5 \text{ mm}$$

Après avoir obtenu la forme cylindrique et la forme conique à l'aide d'une rouleuse nous sommes passés à la soudure afin d'obtenir la chambre à vapeur.

2.2.4 Support de « l'ensemble disques en cuivre- isolant-chambre à vapeur »

L'ensemble chambre à vapeur et les deux disques est en materiau cuivre et pèse ainsi donc il faut un support qui pourra resister aux efforts fournis par cet ensemble sans qu'il ait un échange de chaleur entre ce dernier et le support ou dans le pis des cas l'échange sera minimisé. Ce support concu en acier comporte trois pieds et un disque ayant trois trous taraudés dans lesquels sont vissés les trois pieds. Entre l'ensemble chambre à vapeur-disque en cuivre et le support se trouvent trois isolants de peites dimensions pour les isoler.



Figure 2.8 : Support de l'ensemble disques en cuivre-échantillon -chambre à vapeur

2.2.5 Tuyau de vapeur

Il s'agit ici du tuyau de prise de vapeur, entre le bouilleur et la chambre à vapeur . Il est indispensable d'isoler le tuyau pour ne pas gaspiller immédiatement l'énergie que l'on vient de recueillir. Pour cela nous avons cherché dans le commerce local un tuyau souple qui ferait l'affaire .



Figure 2.9 : Tuyau PVC de canalisation de la vapeur

2.2.6 Plaque chauffante ou rechaud ou gaz

La plaque chauffante fournit l'énergie nécessaire permettant de chauffer l'eau contenant dans le bouilleur ceci pour la production de la vapeur. cette plaque est en acier indéformable avec éléments chauffants répartis sur toute la surface et la plus haute température est atteinte très rapidement si l'on enclenche la puissance maximale. Son carter extérieur émaillé résiste aux hautes températures et aux éléments corrosifs. Cette plaque chauffante fonctionnera avec un système hybride (SBEE et le Solaire). Ceci permettra qu'en cas de coupure du réseau électrique de la SBEE l'expérimentation puisse continuer. Lors de l'expérimentation cette plaque chauffante nous a fait défaut ainsi nous avons dû utiliser un foyer à gaz Oryx.



Figure 2.10 : Foyer à Gaz Oryx

2.3 Montage du dispositif conçu

Le Montage du dispositif se fait de la façon suivante :

Le bouilleur est posé sur une plaque chauffante (un foyer à gaz), le disque inférieur en cuivre est placé sur le support. Ensuite l'échantillon est mis sur le disque inférieur avant que le disque supérieur en cuivre ne soit posé sur lui. On dépose ensuite la chambre à vapeur sur le disque supérieur. Enfin le tuyau est placé entre l'orifice de sortie de la vapeur au niveau du bouilleur et l'orifice d'entrée de la vapeur dans la chambre à vapeur.



Figure 2.11 : Montage du dispositif expérimental du disque de Lee

2.4 Difficultés rencontrées

Les difficultés sont liées à la disponibilité du parc machines et des matières premières qui serviront à la fabrication de dispositif. Puisque nous avons fabriqué le dispositif dans un atelier mécanique privé il a fallu des fois attendre que les machines soient libre avant d’avoir accès cela. Dans le pire des cas nous perdons des journées à attendre que les machines soient libres. En ce qui concerne les matières premières, nous avons prévu utiliser pour la fabrication de la chambre à vapeur un matériau en aluminium et pour les deux disques (inferieur et supérieur) un matériau en cuivre. Dans un premier temps nous avons commandé à un premier fondeur le coulage du matériau en aluminium en lui remettant l’avance mais notre constat est qu’il s’est porté disparu en nous faisant perdre du temps. Nous avons pu trouver un autre fondeur qui nous a fait le coulage du matériau mais à notre grande surprise les matériaux utilisés étaient un mélange d’aluminium et autres ce qui a rendu l’usinage au tour difficile et l’état de surface de la pièce ne nous permettra pas d’avoir un résultat fiable au cours de l’expérimentation. Pour pallier à cet état de chose nous avons dû revoir notre conception et cette fois-ci la chambre à vapeur est réalisée avec un matériau en cuivre. Toujours en qui concerne la matière première, le cuivre à utiliser devrait avoir un diamètre minium de 100 mm mais ce que nous avons trouvé avait un diamètre de 50 mm nous avons dû à nouveau réadapter notre conception à cet existant.

2.5 Expérimentations avec les dispositifs du disque de LEE et du ruban chaud

Nous avons présenté la procédure expérimentale du dispositif de disque de Lee et celle du ruban. Ensuite nous avons testé le dispositif du disque de Lee conçu ceci pour sa validation. Enfin nous avons sélectionné certaines essences de bois (Kosso et Acajou) utilisées dans les constructions de bâtiments au Bénin dont nous avons mesurée leur conductivité thermique respective sur le dispositif de disque de Lee. Quant au dispositif du ruban seul la conductivité du Kosso a été mesurée

2.5.1 Expérimentations sur le dispositif du disque de Lee

2.5.1.1 Matériaux caractérisés

Les matériaux retenus pour être caractérisés sont du Kosso et de l'acajou puisqu'ils ont fait l'objet de nombreuses études, même dans le laboratoire (CTMAE) où nous avons effectué notre expérimentation. De plus ce sont des matériaux qui sont utilisés dans les constructions des bâtiments tant au niveau des portes que des charpente etc. Les échantillons utilisés ont été usinés à peu près au même diamètre disque Lee (50 mm) et 3 mm d'épaisseur. Les surfaces des échantillons étaient également lisses pour de bons contacts thermiques. Il faut noter que le taux de transfert d'énergie à travers l'échantillon peut être augmenté en gardant une petite épaisseur et une grande section. Garder l'épaisseur petite signifie que l'appareil atteindra un état stable rapidement. Pour la deuxième méthode c'est-à-dire celle du ruban chaud, nous avons fabriqué aussi deux échantillons issues de deux essences de bois (Kosso et Acajou) sous forme d'un parallélépipède rectangle de dimensions $(50 \times 30 \times 0,3)mm^3$. Cette forme obtenue sera utilisée pour l'expérimentation au niveau du ruban chaud étant donné que nous voulons comparer les résultats données par ce dernier et ceux du dispositif du disque de Lee. Il faut dire que les matériaux étant de forme circulaire la fabrication a été un peu difficile et nous a retardé un peu en ce qui concerne l'expérimentations du dispositif.



Figure 2.12a : Echantillons en bois



Figure 2.12b : Echantillon en plexiglas

Notre étude ne s'intéressera pas la conductivité des matériaux humides car pour tester un échantillon sec, il est recommandé utiliser la méthode du régime permanent. Dans le cas de matériaux humides, la méthode transitoire est plus appropriée [6]. C'est pour cette raison nous avons utilisé une étuve ventilée, de marque MEMMERT D06060 ayant une plage de températures de 30 à 225°C et d'un registre de ventilation calibré de 0 à 6, pour déterminer la masse anhydre des échantillons, afin de déduire la teneur en eau moyenne des échantillons pendant les essais. La balance utilisée pour la mesure de la masse des disques en cuivre est utilisé aussi ici pour mesurer la masse avant et après les essais au niveau de l'étuve.



Figure 2.13a : Echantillons à tester à l'étuve



Figure 2.13b : Prise de la masse d'un échantillon à tester

Afin de s'assurer de la fiabilité du dispositif expérimental conçu et de l'applicabilité effective de la méthode du disque de LEE, nous avons d'abord déterminé expérimentalement la conductivité thermique d'un échantillon de plexiglas pris comme matériau de référence faiblement conducteur de chaleur, dont les propriétés thermophysiques sont bien connues. Pour y parvenir, nous avons usiné une éprouvette de plexiglas ayant la forme d'un disque d'épaisseur 5mm et de diamètre 50 mm. Les

dimensions retenues pour ces matériaux à caractériser sont proche de celle utilisées par [18, 20]. Les éprouvettes à tester sont présentées à la figure 2.2.1

La formule suivante a servi à calculer la teneur massique en eau de chaque échantillon :

$$W_e = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

Avec

W_e : La teneur en eau de l'échantillon (%)

m_h : La masse humide de l'échantillon (kg)

m_s : La masse sèche de l'échantillon (kg)

2.5.1.2 Procédure du disque de Lee.

2.5.1.2.1 Théorie

L'expérience du Disque de Lee détermine une valeur effective de la conductivité thermique λ d'un isolant comme le verre, le carton, etc. un matériau isolant de diamètre d et d'épaisseur e est placé entre deux disques de même conductivité thermique (du même métal) et on permet à l'installation de parvenir au régime permanent, de sorte que la chaleur perdue par le disque inférieur à la convection soit la même que le flux de chaleur à travers le matériau isolant. La température du disque supérieure T_1 et celle du disque inférieure T_2 sont enregistrées. Le matériau isolant est retiré et le disque métallique inférieur peut chauffer jusqu'à la température supérieure à T_2 . Finalement, la chambre à vapeur et le disque supérieur sont retirés et peut être remplacés par un disque fait d'un bon isolant. Le disque métallique inférieur est ensuite laissé refroidir le disque inférieur vers la température ambiante T_a . La température du disque métallique inférieur est enregistrée lors du refroidissement. Ce dispositif est régi par les équations suivantes :

A l'état stationnaire, la quantité de chaleur (Q) transmise par conduction à travers l'échantillon est donné par :

$$Q = \lambda \cdot A \frac{T_2 - T_1}{e} \quad (2.2)$$

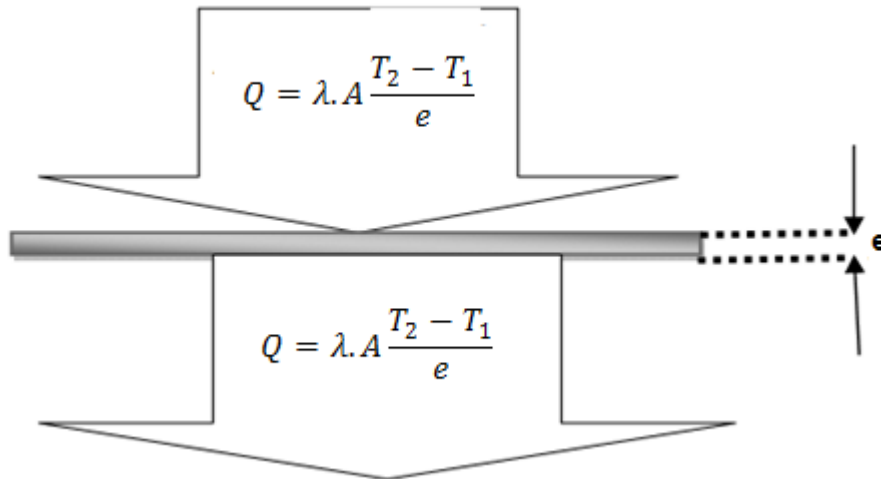


Figure 2.14 : Illustration de la chaleur entrée par conduction et celle transmise par l'échantillon en régime permanent

Les températures T_2 et T_1 mesurées par les thermocouples 1 et 2 sont constantes lorsque l'appareil est en régime permanent. Ensuite, la vitesse de la chaleur à travers le disque en cuivre doit être égale à la vitesse de perte de chaleur due au refroidissement du fond du disque [23] par convection d'air. En mesurant à quelle vitesse le disque en cuivre se refroidit à la température constante T_2 , la chaleur perdue par le disque en cuivre peut être déterminée. Il est montré à la Figure 2.2.4 si le disque se refroidit à un rythme $\frac{dT}{dt}$ alors :

$$Q = mc \times \left(\frac{dT}{dt}\right)_{T_2} \quad (2.3)$$

Avec

m = Masse du disque inférieur (kg);

c = Chaleur spécifique du disque inférieur ($JKg^{-1}K^{-1}$);

Q = Chaleur perdue;

dT = variation de température au cours du refroidissement du disque ;

dt = différence de temps pour variation de température

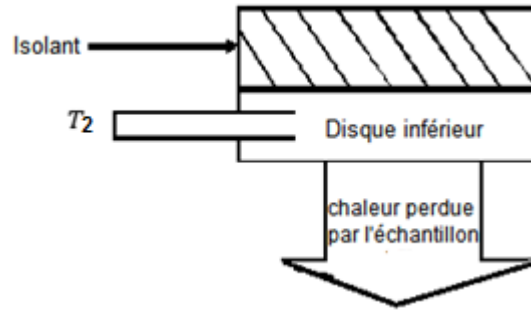


Figure 2.15 : Isolant -disque inférieur pour le refroidissement [30]

En mesurant $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T_2}$ et $(T_2 - T_1)$ par le dispositif on peut déterminer la conductivité la conductivité thermique λ de l'échantillon

De (2.4.2) et (2.4.3) on a :

$$\lambda \cdot A \frac{T_2 - T_1}{e} = mc \times \left(\frac{dT}{dt}\right)_{T_2} \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{mc e}{A(T_2 - T_1)} \left(\frac{dT}{dt}\right)_{T_2} \quad (2.5)$$

Supposons que $T = f(t)$

$$\frac{dT}{dt} = f'(t)$$

En régime permanent, $T = T_2$

$$T_2 = f(t_2)$$

$$t_2 = f^{-1}(T_2)$$

Alors

$$\left.\frac{dT}{dt}\right|_{T=T_2} = f'(t)|_{t=t_2} = f^{-1}(T_2)$$

Dans la suite de notre travail nous ferons une régression exponentielle de la température en ce qui concerne les courbes de refroidissement qui nous donneront accès à $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{T_2}$

Soit $T = \alpha e^{-\beta t}$

α et β sont les paramètres de la courbe de régression et nous avons ensuite :

$$f'(t_2) = -\alpha\beta e^{-\ln\left(\frac{\alpha}{T_2}\right)}$$

$$\lambda = \frac{4m.c.e.\beta.T_2}{\frac{\pi d^2}{4}(T_1 - T_2)} \quad (2.6)$$

2.5.1.3 Protocole expérimental du dispositif du disque de Lee

Le protocole expérimental pour la mesure des matériaux isolants sur le dispositif de disque de LEE est le suivant :

- Verser de l'eau dans le bouilleur un peu en dessous de son orifice de sortie de vapeur et poser le bouilleur sur la plaque chauffant qui sera mise sous tension pour la production de vapeur ;
- Prendre la masse du disque métallique en Cuivre à l'aide d'une balance et noter aussi sa chaleur spécifique. Mesurer le diamètre de l'échantillon à caractériser à l'aide d'un pied à coulisse si c'est possible calculer sa surface : $S = \pi r^2$
- Mesurer l'épaisseur de l'échantillon à caractériser à l'aide du pied à coulisse à 5 différentes parties puis prendre la valeur moyenne de cette épaisseur.
- Le montage du dispositif expérimental est montré à la figure 2.1.11. Le contact thermique de l'échantillon avec les disques métalliques ici en cuivre est amélioré avec de la pâte thermique.
- La vapeur passe du bouilleur d'eau éloigné à travers un tuyau pour entrer dans la chambre de vapeur par l'orifice d'entrée fait sur cette dernière. L'appareil est isolé de la chaleur du bouilleur. Les températures T_1 et T_2 des disques métalliques (disque supérieur et disque inférieur) sont surveillées respectivement. Quand ces températures sont sur le point de devenir stables, T_1 et T_2 sont enregistrées à un intervalle de 5 minutes jusqu'à ce qu'elles restent constants c'est la partie stable de l'expérimentation.
- Enlever le disque métallique supérieur et l'isolant, la chambre à vapeur est posée maintenant directement sur le disque métallique inférieur. Attendre que la température du disque inférieure s'élève de 7°C au-dessus de sa température du régime permanent du disque inférieur en cuivre.

- Retirer la chambre à vapeur et attendre pendant 2 à 3 minutes pour que la distribution de la chaleur soit uniforme au-dessus du disque
- placer un matériau isolant sur le disque inférieur. Le disque métallique est ensuite laissé refroidir. Lors du refroidissement, la température du disque métallique est enregistrée toutes les 30 secondes jusqu'à ce que la température tombe à environ 5-10 °C de celle de l'état stable, ce qui permet de tracer la courbe de refroidissement du disque en cuivre inférieur.
- Utiliser les données précédemment notées pour tracer la courbe de refroidissement avec le temps de refroidissement en abscisse et la température du disque métallique inférieur en ordonnée. On trace la tangente à cette courbe à la température constante T_2 . La pente de cette tangente donne le taux de refroidissement à cette température stable T_2 .

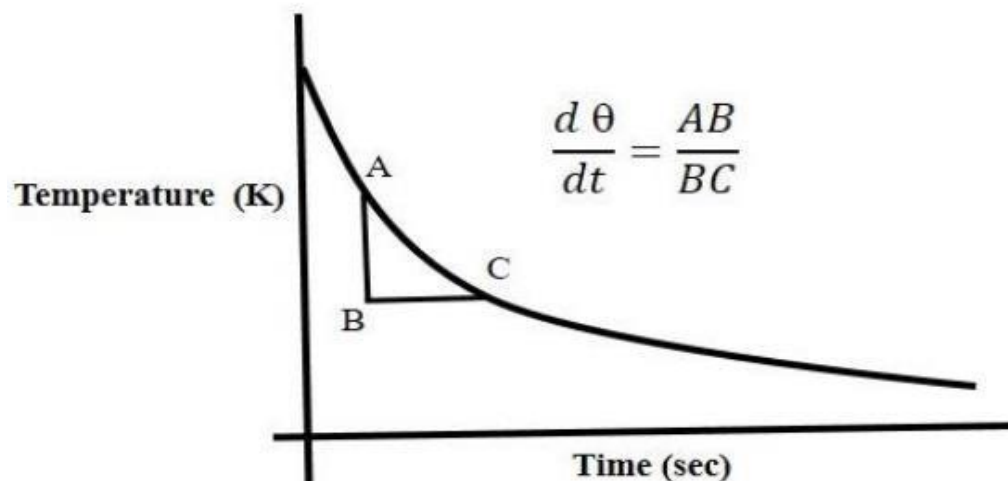


Figure 2.16 : Courbe montrant le refroidissement du disque inférieur [30]

2.6 Expérimentations sur le dispositif du ruban chaud

Le dispositif du ruban chaud est étudié de façon plus détaillée par [18] mais nous allons décrire brièvement la réalisation pratique des mesures au niveau de ce dernier.

Le dispositif du ruban chaud expérimenté dans notre travail est constitué d'une résistance chauffante plate rectangulaire de 5 cm de long et 1,5 cm de large, d'un enregistreur de température et d'une alimentation stabilisée. L'élément chauffant est du type "minko" d'épaisseur $e_s = 0,22$ mm et de résistance électrique $R_e = 43,4$. On fixe

au centre de la résistance un thermocouple fin de diamètre de l'ordre de 0,1 mm. L'alimentation stabilisée permet d'imposer un flux constant aux bornes de l'élément chauffant. A l'aide du thermocouple et de l'enregistreur, on relève l'élévation de température au centre du ruban. La figure 2.17, présente une vue du dispositif expérimental ruban chaud utilisé. L'enregistrement est fait tous les secondes ($dt = 1s$).

On remonte à la conductivité thermique de l'échantillon en traçant la variation de température du fil chaud ($T_s(t) - T_s(t = 0)$) au cours du temps, en fonction de $\ln(t)$. La courbe obtenue représente une droite dont la pente $\frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L}$. De plus le ruban est soumis à une tension de 6V ce qui donne $\varphi_0 = \frac{U^2}{R}$



Figure 2.17 : Dispositif expérimental du chaud

Dans le chapitre suivant, au niveau du dispositif du ruban chaud, nous ne présenterons que le résultat des mesures qui ont conduit à l'estimation de la conductivité thermique du Kosso. La conductivité thermique du bois d'Acajou quant à elle sera choisie dans [27] puisqu'il a fait l'objet d'une étude dans cet article.

2.7 Incertitude sur la mesure de la conductivité thermique

2.7.1 L'incertitude de mesure réalisée dans le cas du dispositif du ruban chaud.

Nous évaluerons l'incertitude sur les mesures à ce niveau par la formule (2.7)

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^3 (\lambda_i - \bar{\lambda})^2 \right] \quad (2.7)$$

2.7.2 Incertitude de mesure réalisée dans le cas du ruban chaud

Nous allons quantifier ces erreurs par l'utilisation de la formule de la propagation des incertitudes. En se basant sur l'expression de la conductivité thermique donnée par la relation (2.4.6)

$$\text{Nous avons} \quad \lambda = k \frac{e \cdot \beta \cdot T_2}{d^2(T_1 - T_2)} \quad \text{avec} \quad k = \frac{4mc}{\pi}$$

$$\text{Soit} \quad \lambda = f(e, \beta, T_1, T_2, d)$$

$$u_c^2 = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial e}\right)^2 u^2(e) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \beta}\right)^2 u^2(\beta) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_1}\right)^2 u^2(T_1) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_2}\right)^2 u^2(T_2) + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial d}\right)^2 u^2(d) \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial e}\right)^2 = \left(\frac{k\beta T_2}{d^2(T_1 - T_2)}\right)^2 \quad (2.8a)$$

$$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial d}\right)^2 = \left(\frac{-2ke\beta T_2}{d^3(T_1 - T_2)}\right)^2 \quad (2.8b)$$

$$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_1}\right)^2 = \left(\frac{ke\beta T_2}{d^2(T_2 - T_1)^2}\right)^2 \quad (2.8c)$$

$$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_2}\right)^2 = \left(\frac{ke\beta T_1}{d^2(T_1 - T_2)^2}\right)^2 \quad (2.8d)$$

$$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial \beta}\right)^2 = \left(\frac{ke T_2}{d^2(T_1 - T_2)}\right)^2 \quad (2.8e)$$

$$T = \alpha e^{-\beta t}$$

$$\ln(T) = -\beta t + \ln(\alpha)$$

Posons $y = \ln(T)$ on a donc $y = -\beta t + \ln(\alpha)$

$$S_{y/\beta}^2 = \frac{\sum_1^{n_1} (y_i - y_{pi})^2}{n_1 - 2} \quad (2.8f)$$

$$S_{y/\beta}^2 = \frac{\sum_1^{n_1} ((\ln(T))_{exp} - \ln(T)_{mod})^2}{n_1 - 2} \quad (2.8g)$$

Cherchons maintenant les incertitudes type sur chaque variable.

Les incertitudes types sur les épaisseurs et sur les diamètres des échantillons sont évaluées de la manière suivante sont évaluées par la relation :

$$u(e) = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2 \right]} \quad (2.8h)$$

$$u(d) = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]} \quad (2.8i)$$

Nous avons utilisé deux thermocouple de type k. Ainsi $u(T_2) = u(T_1)$. Les thermocouples inutilisés sont de type K. D'après les différents fabricants, ceux-ci ont une précision de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ de la température en $^\circ\text{C}$.

$$u(T_1) = \frac{Préc_{Th}}{\sqrt{3}} \quad (2.8k)$$

L'erreur type commis sur β est :

$$u^2(\beta) = \frac{(S_{y/\beta})^2}{\sum_1^{n_1} (t_i - \bar{t}_i)^2} \quad (2.8l)$$

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons conçu et fabriqué les différents composants du dispositif du disque de Lee et il en ressort que le parc machine nous a fait beaucoup défaut ce qui nous a retardé dans notre réalisation. Ensuite le dispositif du disque de Lee est ensuite assemblé et a donné accès à l'expérimentation. De plus il a été présenté de façon succincte la procédure expérimentale du dispositif du ruban chaud. Les matériaux testés sont le plexiglass, le bois Kosso et le bois d'Acajou. Les résultats de ces expérimentations sont présentés dans le chapitre 3. Ces matériaux que ce soit les bois ou le plexiglass ont été usinés dans un atelier mécanique et dans une scierie.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre nous présentons les résultats des différentes expériences réalisées. De façon spécifique nous allons donner les résultats de la validation du dispositif du disque de Lee. Les résultats de la mesure de la conductivité thermique du bois Kosso et d’Acajou au niveau du disque de Lee et du ruban chaud seront présentés. Enfin nous allons faire des analyses qui déboucheront sur une étude comparative des différents résultats donnés par les deux dispositifs.

3.2 Validation du dispositif du disque de Lee

Le matériau de référence utilisé pour valider ce dispositif du disque de Lee est du plexiglas

3.2.1 Détermination de la pente de la courbe du refroidissement du plexiglas

Nous allons tracer la courbe du refroidissement du disque bas dans le cas du Plexiglass. Cette courbe subira une régression exponentielle. L’équation de la courbe de régression nous a donné des paramètres qui nous permis de déterminer le taux de refroidissement.

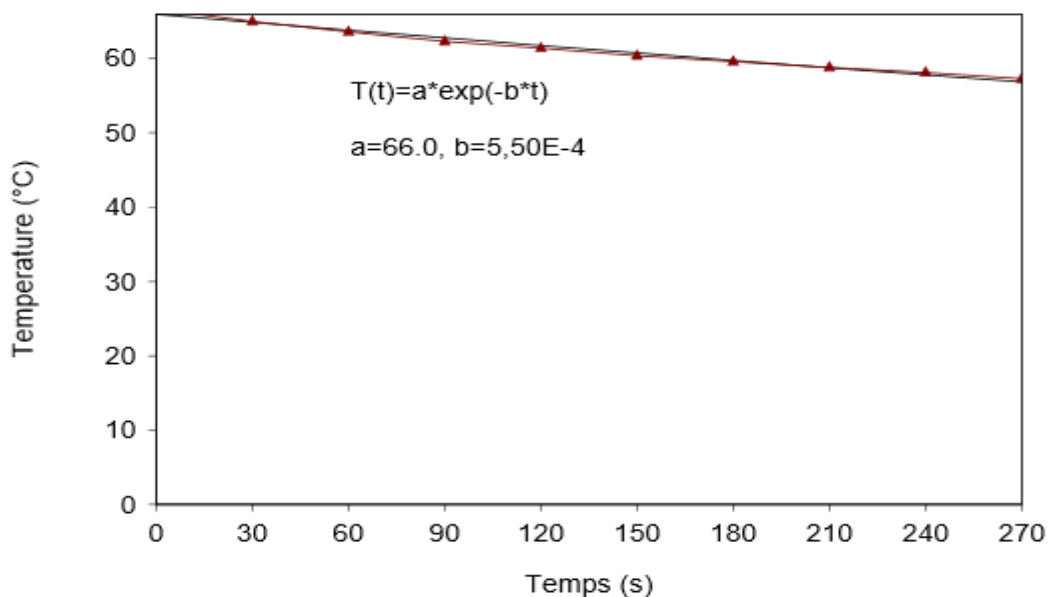


Figure 3.1 : Courbe de refroidissement dans le cas du plexiglas

Tableau 3.1 : Paramètres de l'échantillon en plexiglas et valeurs mesurées

Masse du disque inférieur (<i>kg</i>)					0,1773
Chaleur spécifique du disque $Jkg^{-1}K^{-1}$					385
Surface de la section du disque (m^2)					0,0019625
Paramètre d'ajustement de la courbe		L'épaisseur de l'échantillon ($\times 10^{-3} m$)	Température du régime permanent ($^{\circ}C$)		Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$)
α	β	e	T_1	T_2	λ
66	0,00055	4	92,5	64 ,4	0,183

3.2.2 Comparaison de la conductivité thermique calculée du plexiglas avec sa valeur standard

La valeur de la conductivité thermique du plexiglas calculée à partir des mesures réalisées sur le dispositif du disque de Lee est très proche de celle fournie par la littérature soit $0,183 Wm^{-1}K^{-1}$) calculée contre $0.184 Wm^{-1}K^{-1}$ donnée par la littérature. Autrement dire l'erreur relative commise par ce dispositif par rapport à la valeur de la littérature est d'environ 0,5% .Cette valeur justifie la validité du dispositif expérimental du disque de Lee mise en place. Il faut signaler que les essais ont été réalisés trois fois et la variabilité obtenue était quasi nulle.

3.3 Mesure de la conductivité thermique des essences de bois avec dispositif conçu

3.3.1 Détermination de la pente de la courbe de refroidissement des deux essences de bois (Acajou et Kosso)

3.3.1.1 Bois Acajou

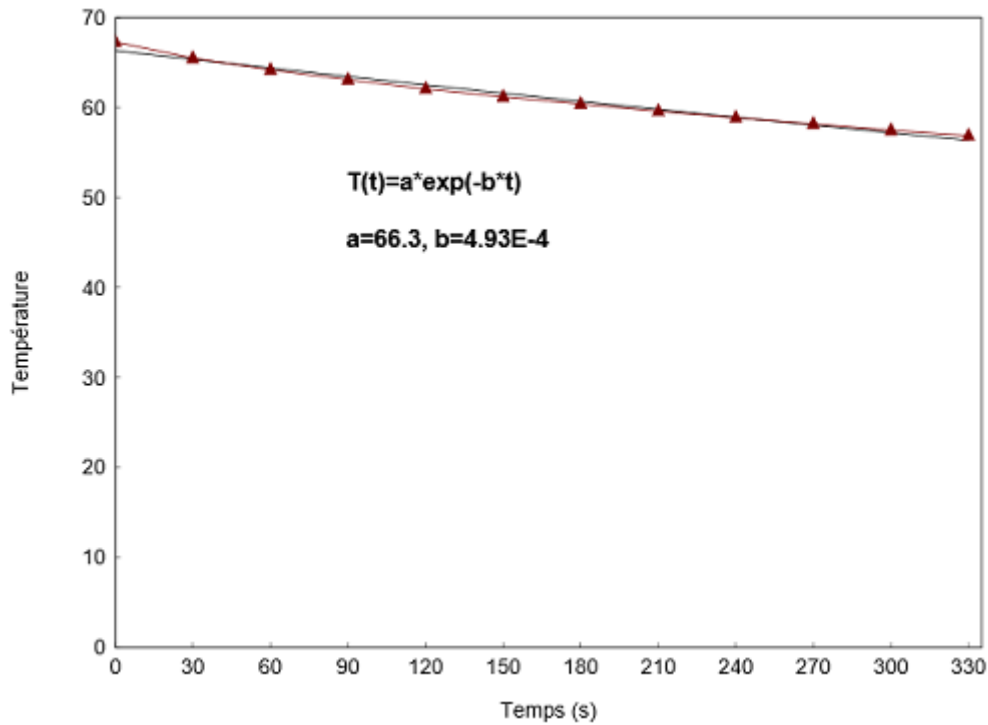


Figure 3.2 : Courbe de refroidissement dans le cas d'Acajou

Tableau 3.2 : Paramètres de l'échantillon en Acajou et valeurs mesurées

Masse du disque inférieur (kg)					0,1773
Chaleur spécifique du disque $Jkg^{-1}K^{-1}$					385
Surface de la section du disque (m^2)					0,0019625
Paramètre de d'ajustement de la courbe		L'épaisseur de l'échantillon ($\times 10^{-3}$ m)	Température du régime permanent ($^{\circ}C$)		Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$)
α	β	e	T_1	T_2	λ
66,3	0,000493	3,2	91,4	62,5	0,12

Diamètre de l'échantillon $d_{Acaj} = 5$ cm

3.3.1.2 Bois Kosso

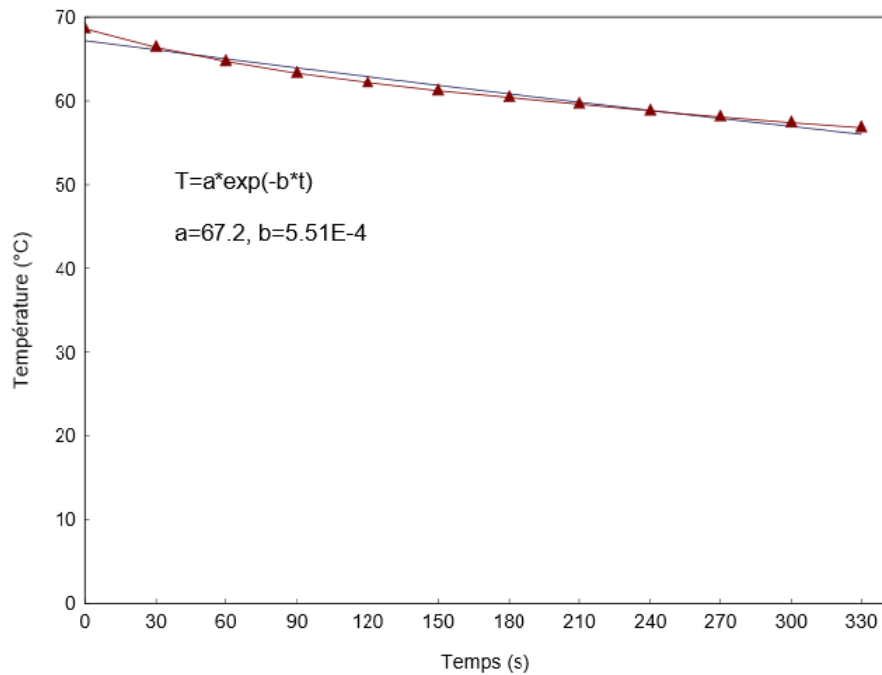


Figure 3.3 : Courbe de refroidissement dans le cas de Kosso

Tableau 3.3 : Paramètres de l'échantillon en Kosso et valeurs mesurées

Masse du disque inférieur (<i>kg</i>)					0,1773
Chaleur spécifique du disque $Jkg^{-1}K^{-1}$					385
Surface de la section du disque (m^2)					0,0019625
Paramètre d'ajustement de la courbe		L'épaisseur de l'échantillon ($\times 10^{-3} m$)	Température du régime permanent (°C)		Conductivité thermique ($Wm^{-1}K^{-1}$)
α	β	e	T_1	T_2	λ
67,2	0,000551	2,75	90,7	64,2	0,128

Il faut noter que chacune des trois expérimentations ont duré moyennement 2h30

3.4 Mesure de la conductivité thermique du bois Kosso avec dispositif du ruban chaud

Nous présentons les courbes de trois essais successifs de mesures de conductivité thermique du bois Kosso(13% d'humidité), qui ont été réalisés avec le dispositif du ruban chaud.

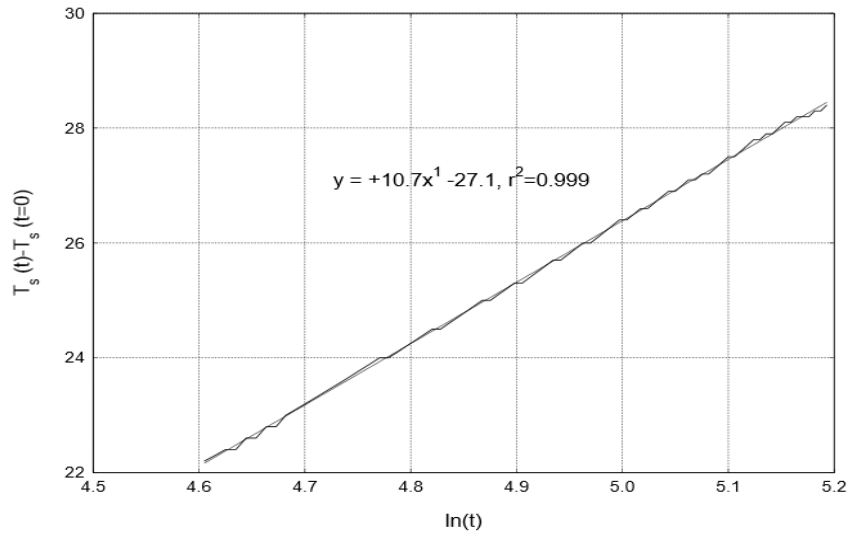


Figure 3.4 : Estimation de la conductivité thermique du Kosso lors du premier essai

$\varphi_0 = \frac{6^2}{43,4} = 0,83$ et la pente est 10,4 on obtient $\lambda_1 = 0,124 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$

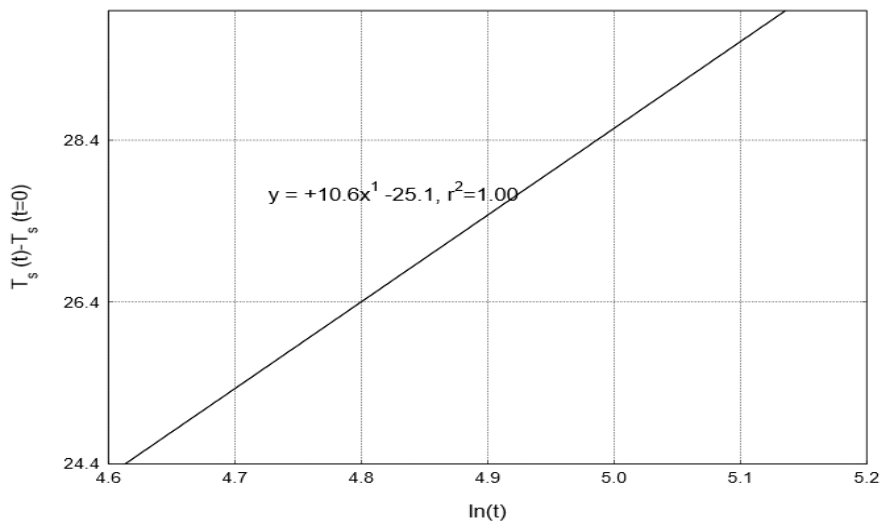


Figure 3.5 : Estimation de la conductivité thermique du Kosso lors du second essai

On trouve de la même : $\lambda_2 = 0,125 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$ car la pente est égale à 10,6

De la même manière on trouve $\lambda_3 = 0.122 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$

Enfin on a :

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3} \text{ ce qui donne } \bar{\lambda} = 0,1236 \text{ W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Après la réalisation des mesures de conductivité thermique avec les deux dispositifs il a été constaté que la durée d'expérimentation du disque de Lee est en moyenne de 2h30 tandis que celui du ruban chaud est d'environ 3 min.

3.4.1 Incertitude sur les deux coefficients de conductivité thermique

3.4.1.1 Cas du dispositif du ruban chaud

- **Bois Kosso**

L'écart-type est donné par la formule :

$$\sigma_{\bar{\lambda}_K}^2 = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{3-1} (0,124 - 0,1236)^2 + (0,125 - 0,1236)^2 + (0,125 - 0,122)^2 \right]$$

$$\sigma_{\bar{\lambda}_K} = \pm 0,001$$

La conductivité thermique $\bar{\lambda}_{Kru} = 0,1236 \pm 0,001$ (W/m⁻¹K⁻¹)

La conductivité du bois d'Acajou est tiré de [27]

soit $\bar{\lambda}_{Aru} = 0,134 \pm 0,004$ (W/m⁻¹K⁻¹)

3.4.1.2 Cas du dispositif du disque de Lee

Les valeurs des différentes expressions pour l'estimation de l'incertitude dans le cas du disque de Lee sont consignées dans le tableau suivant.

Tableau 3.4 : différents paramètres pour évaluer l'incertitude

Echantillons	$u^2(e)$	$u^2(d)$	$u^2(T_1)$	$u^2(T_2)$	$u^2(\beta)$
Kosso	1,06E-08	6,34E-08	0,00333333	0,00333333	8,94053E-10
Acajou	5,84E-08	1,186E-07	0,00333333	0,00333333	3,91206E-10
Echantillons	$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial e}\right)^2$	$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial d}\right)^2$	$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_1}\right)^2$	$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial T_2}\right)^2$	$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial \beta}\right)^2$
Kosso	2227,20	29,44	0,01767511	0,03527822	240
Acajou	1375,23	22,53	0,01759086	0,03011689	240,70

Du tableau ci- dessous on a :

$$\lambda_{ko} = 0,128 \pm 0,005 \text{ pour le bois de Kosso}$$

$$\lambda_{Aj} = 0,12 \pm 0,009 \text{ pour le bois d'Acajou}$$

3.5 Comparaison des résultats du disque de Lee et ceux du ruban chaud

Le tableau suivant présente les résultats des conductivités thermiques des différents matériaux

Tableau 3.5 comparaison des résultats donnés par les deux dispositifs

<i>Conductivité thermique λ ($W/m^{-1}K^{-1}$)</i>		
	Dispositif du disque de Lee	Dispositif du ruban chaud
<i>Acajou</i>	0,12 \pm 0,009	0,134 \pm 0,004 [27]
<i>Kosso</i>	0,128 \pm 0,005	0,123 \pm 0,001

3.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté dans un premier temps les résultats des mesures réalisées sur le dispositif du disque de Lee avec pour matériaux à tester, le plexiglas pris comme matériau de référence. La valeur de la conductivité thermique estimée de ce dernier est très proche de celle donnée par la littérature ce qui a conduit à la validation du dispositif. Ensuite les résultats de l'estimation de la conductivité thermique du bois Kosso et du bois d'acajou donnés par les deux dispositifs ont été comparés.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

L'objectif fondamental de ce travail était de mesurer la conductivité thermique de quelques matériaux locaux de construction avec un dispositif de mesure de conductivité de type de disque de Lee et de comparer ses résultats à ceux du ruban chaud. Pour cela, nous avons conçu et réalisé un nouveau dispositif de mesure de conductivité thermique (disque de Lee). L'estimation de la valeur du coefficient de la conductivité thermique du plexiglas par le dispositif conçu donne un résultat concluant ($0,183 \text{ (W/m}^{-1}\text{K}^{-1})$ pour le dispositif conçu contre $0,184 \text{ (W/m}^{-1}\text{K}^{-1})$ dans la littérature). Ce dispositif validé a été utilisé pour la mesure du coefficient de la conductivité thermiques du bois Kosso et celle du bois d'Acajou afin de faire une comparaison des résultats donnés avec ceux du dispositif du ruban chaud. Les résultats donnés par le dispositif du disque de Lee sont proche de ceux du ruban. En dehors des valeurs de la conductivité thermique obtenues, ce travail révèle que la durée d'expérimentations au niveau du disque de Lee est d'environ 2h30 contre environ 3 min pour celle du ruban chaud. De plus ce travail que nous venons de réaliser, outre la contribution scientifique qu'il apporte, présente un intérêt académique puisque ce nouveau dispositif pourra être dupliqué pour servir à l'initiation des étudiants pour la mesure d'un paramètre thermophysique (dispositif simple et à la portée de tous ceux qui disposent d'une petite connaissance en thermique). Enfin nous souhaiterions que ce travail fasse l'objet d'une autre étude afin que les mesures soient automatisées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Sotehi, “Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L’isolation,” Université Mentouri - Constantine, 2010.
- [2] DGE, “Rapport d’Élaboration du code d’efficacité énergétique : Normes relatives aux bâtiments publics,” Cotonou, 2011.
- [3] M. Filali, “Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures ” pp. 1–211, 2006.
- [4] M. BOUMHAOUT, L. BOUKHATTEM, H. HAMDI, B. BENHAMOU, and F. A. NOUH, “Mesure de la conductivite thermique des materiaux de construction de differentes tailles par la methode des boites,” vol. 700, pp. 21–22, 2014.
- [5] F. Le Frious, “Les propriétés thermiques des matériaux et les références métrologiques,” *LNE/DRST*, pp. 1–17.
- [6] ECOLE SUPERIEURE DU BOIS, *Le Déphasage Thermique Pour lutter contre la surchauffe*. 2012.
- [7] S. O. G. Ossen, B. D. Apovo, and C. Ahouannou, “Caractérisation thermique des mortiers de ciment dopés en fibres de coco par la méthode du plan chaud asymétrique à une mesure de température,” vol. 12, no. 6, pp. 119–129, 2016.
- [8] C. AHOUANNOU *et al.*, “Détermination expérimentale et approches simplifiées de modélisation des propriétés thermo-physiques du bois borassus (palmier ronier) experimental approachesthermo-physical properties of wood borassus,” vol. 16, no. 2, pp. 189–201, 2014.
- [9] A. K. Salima, “Performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi- arides : cas de Timimoune,” 2012.
- [10] P. Meukam, “valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l’isolation thermique de batiàments,” Université de Yaoundé I, 2004.
- [11] R. C. Mohapatra, A. Mishra, and B. B. Choudhury, “Experimental study on thermal conductivity of teak wood dust reinforced epoxy composite using Lee ’ s apparatus method,” vol. 2, no. 6, pp. 98–103, 2014.

- [12] M. Alam, S. Rahman, P. K. Halder, A. Raquib, and M. Hasan, “Lee ’ s and Charlton ’ s Method for Investigation of Thermal Conductivity of Insulating Materials,” vol. 3, no. 1, pp. 53–60, 2012.
- [13] P. Philip and L. Fagbenle, “Design of Lee’s disc electrical method for determining thermal conductivity of a poor conductor in the form of a flat disc,” vol. 9, no. 2, pp. 335–343, 2014.
- [14] S. . Ngaram, B. A. Gabriel, H. P. , Wante, and Y. Khalid, H, “Using Adobe (Clay Soil) Mixed with Quartz (Sharp sand) to determine the Thermal Comfort of Residential Building in Mubi, Adamawa State, Nigeria.,” vol. 1, no. 1, pp. 28–42, 2016.
- [15] V. C. Ozebo, O. Odusote, and O. Sulaimon, “Laboratory Determination of the Thermal Conductivity of a Typical Nigerian Granite Rock.,” *Pacific J. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 119–122, 2012.
- [16] S. T. Ebong, E. S. Attai, and E. O. Joshua, “Measurement of Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Three Major Geomorphological Units in Akwa Ibom State , Nigeria,” vol. 12, no. 2, pp. 1–7, 2016.
- [17] P. J. Patel, “A Review of Different Methods of Measurement of Thermal Conductivity,” vol. 2, no. 12, pp. 133–138, 2015.
- [18] A. A. Djossou, “Etude des variations des proprietes thermophysiques et de la durabilite, en fonction de l’humidite des eco-materiaux de construction au benin,” Université d’Abomey-Calav, 2014.
- [19] F. DE PONTE and S. KLARSELD, “Conductivité thermique des isolants,” Techniques de l’Ingénieur, traité Mesures et Contrôle - Doc. R 2 930, 2002. .
- [20] Y. Jannot, “Théorie et pratique de la métrologie thermique,” 2011.
- [21] M. Z. Bessenouci, E. N. B. Triki, and S. K. A. Abene, “Approches théoriques de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l’aide d ’ une modélisation des matériaux poreux,” vol. 14, pp. 427–440, 2011.

- [22] P. Meukam, A. Noumowe, Y. Jannot, and R. Duval, “Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l’isolation thermique de bâtiment,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 36, no. 261, pp. 453–460, 2003.
- [23] M. Tlijani, “Contribution à la caractérisation thermo physique de matériaux bio isolants : Valorisation des déchets de bois de palmier,” 2016.
- [24] P. . USHIE, J. E. OSANG0, J. U. OJAR, T. DANIEL, E. B. ETTAH, and S. I. ALOZIE, “Determination of thermal conductivity of some materials using Searle’s bar and Ingen Housz experimental methods ,” *Int. J. Adv. Res. IJOAR .ORG*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2014.
- [25] A. elie KAEMMERLEN, “Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du batiment,” Université Henri-Poincaré, Nancy 1.
- [26] V. FÉLIX, “Caractérisation Thermique de Matériaux Isolants Légers Application à des Aérogels de Faible Poids Moléculaire Composition,” INPL, Vandœuvre-lès-Nancy, 2011.
- [27] A. C. HOUNGAN, C. AWANTO, A. A. Djossou, and M. ANJORIN, “Measurement of Thermal Effusivity and Thermal Conductivity at Various Water Content for Two Tropical Wood Species,” *ELSEVIER*, vol. 127, pp. 48–55, 2015.
- [28] D. Y. K. Toguyeni, J.D.Bathiebo, and J. Koulidiati, “Etude expérimentale, par la méthode du plan chaud, des propriétés thermophysiques d’un bois tropical et d’un panneau isolant formulé avec des intrants locaux,” *J. Soc. Ouest-Afr. Chim. Code*, 2011.
- [29] D. Zhao, X. Qian, X. Gu, S. A. Jajja, and R. Yang, “Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials,” pp. 1–64.
- [30] Anon, “Lee’s Disc Apparatus. VALUE @ Amrita (Virtual and Accessible Laboratories Universalizing Education) – Physical Sciences, Virtual and Heat Thermodynamics Lab, Powered by Amrita Virtual Lab Collaborative Platform (NME ICT Initiative of MHRD),” p. 6, 201

ANNEXE A : Coubes de refroidissement

Tableau A.1 : Température et temps de refroidissement dans le cas de Kosso

Temps en seconde (S)	Température en degré Celsius (°C)
0	68,6
30	66,4
60	64,7
90	63,3
120	62,2
150	61,2
180	60,4
210	59,6
240	58,8
270	58,1
300	57,4
330	56,8

Tableau A.2 : Température et temps de refroidissement dans le cas d'Acajou

Temps en seconde (s)	Température en degré Celsius (°C)
0	67,3
30	65,5
60	64,2
90	63,1
120	62,1
150	61,2
180	60,4
210	59,6
240	58,9
270	58,2
300	57,5
330	56,9

Tableau A.3 : Température et temps de refroidissement du plexiglas

Temps en seconde (S)	Température en degré Celsius (°C)
0	66,7
30	65
60	63,6
90	62,3
120	61,4
150	60,4
180	59,6
210	58,8
240	58,1
270	57,3

Tableau A.4 : Epaisseurs et diamètre de l'échantillon en Kosso

Essais i	e_i	d_i
1	2,8	50
2	2,7	49,3
3	2,4	48,7
4	2,9	49
5	3	48,7

Tableau A.5 : Epaisseurs et diamètre de l'échantillon en bois d'Acajou

Essais i	e_i	d_i
1	2,6	49,4
2	4	50,2
3	3,6	51,3
4	3,4	49,8
5	3	49,5