



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Génie civil
Structures

Réf. : S55

Présenté et soutenu par :
HARCH Nassima

Le : samedi 23 juin 2018

ETUDE COMPARATIVE SUR LES CARACTERISTIQUES THERMIQUES DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Jury :

Dn.	MEZGHICHE Bouzidi	MCA	Université de Biskra	Président
Pr.	BOUAZIZ Ahmed	Pr	Université de Biskra	Examineur
Dn.	ABDELAZIZ Salim	MAA	Université de Biskra	Rapporteur

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude et sincères mots,

que je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, Ayache et El-khamsa,

Bien qu'aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect,

ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Ils ont sacrifié leur vie pour notre réussite, mes frères et moi

, et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

J'espère qu'un jour,

Je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour nous

que ALLAH leur prête bonheur et longue vie.

**Je dédie aussi ce travail à ma grand père Mohammed et mes
chères grands-mères : Djimaa et Chikha, que ALLAH ait**

pitié d'eux Inchaa ALLAH

A mes frères Salim et Aness

A toute ma famille

A mes amis qui m'ont énormément soutenu,

A mes collègue de promotion 2018 Génie civil de université

Mohammed Khider Biskra.

Et à tous ceux qui me sont chères.

HARCH NASSIMA

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord **Allah** le tout puissant qui m'a donné durant tous ces mois la santé, le courage, la volonté et la persévérance de mettre à terme cette mémoire.

Je souhaite avant tout à remercier mon encadreur :

Mr. ABDEIAZIZ SALIM

Pour le suivie et les précieux conseils qu'elle m'a fait part et pour la qualité de son encadrement, sa patience, sa gentillesse et ses encouragements patients et bienveillants qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

- Un grand merci à mes chers parents, j'aimerais qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude pour leur support et leur aide tant réconfortante.
- Je voudrais à remercier tous mes enseignants qui ont participé à ma formation durant mes cinq ans.
- Merci aux membres du jury pour leur entière disposition, qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail et de le juger.
- Je remercie du fond du cœur mes amies adorées pour leur soutien sans faille et pour leur amitié, **Yamina**, **Faiza**, **Jbtissem**, **Salima**, **Newara**, **Nadjwa**, **Somia**, **Sadda**, **Rimen**, **Kaoula**, **Jmen**, **Farida**,..... tout en leur souhaitant la réussite dans tout ce qu'ils entreprennent.

Que toutes personnes aient participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail accepte nos grands et sincères remerciements.

Merci.

HARCH NASSIMA

Résumé

La ville de Biskra est connue pour être une région très chaude pendant au moins 6 mois de l'année (mai à octobre). Ceci nécessite l'utilisation de système de construction et de matériaux adéquats.

Les matériaux de construction utilisés présentent souvent une mauvaise résistance thermique ce qui engendre d'énormes dépenses de la consommation énergétique de climatisation et de chauffage. Pour remédier à ce problème il est nécessaire d'installer des matériaux isolants ou de remplacer ces matériaux de construction par un autre matériau ayant une bonne isolation thermique et à faible consommation d'énergie.

Ce travail porte sur la comparaison entre des parois constituer de différents couches de matériaux. La méthodologie de ce travail porte sur le calcul de la résistance thermique et le coefficient de déperdition à l'aide d'outil de calcul 'Calculis'.

Les résultats ont montré que la résistance thermique d'une paroi à une relation inversement proportionnelle à la conductivité thermique et proportionnelle à l'épaisseur des différents composants de la paroi.

Les meilleurs matériaux pour l'isolation thermique sont les matériaux poreux qui ont une masse volumique faible: pierre poreuse, liège, polystyrène,...

La brique creuse en terre cuite représente la solution la plus économique. Elle peut être associée à des isolants en couches fines pour améliorer la résistance thermique.

Mots clés : Conductivité thermique, résistance thermique, calculis, isolation thermique, matériaux isolants, masse volumique.

Abstract

The city of Biskra is known to be a very hot region for at least 6 months of the year (May to October). This requires the use of proper construction system and materials.

The construction materials used often have poor thermal resistance, which generates huge expenses for energy consumption of air conditioning and heating. To remedy this problem it is necessary to install insulating materials or to replace these building materials with another material having good thermal insulation and low energy consumption.

This work deals with the comparison between walls constituting different layers of materials. The methodology of this work deals with the calculation of the thermal resistance and the coefficient of loss using calculation tool 'Calculis'.

The results showed that the thermal resistance of a wall has a relationship inversely proportional to the thermal conductivity and proportional to the thickness of the various components of the wall.

The best materials for thermal insulation are porous materials that have a low density: porous stone, cork, polystyrene, ...

Terracotta hollow brick is the most economical solution. It can be combined with insulators in thin layers to improve thermal resistance.

Key words : Thermal conductivity, thermal resistance, calculis, thermal insulation, insulating materials, densit

الملخص

من المعروف أن مدينة بسكرة منطقة ساخنة للغاية لمدة لا تقل عن 6 أشهر من السنة (من مايو إلى أكتوبر). هذا يتطلب استخدام نظام ومواد البناء المناسبة.

غالباً ما تكون مواد البناء المستخدمة مقاومة حرارية ضعيفة ، مما يولد نفقات ضخمة لاستهلاك الطاقة من تكييف الهواء والتدفئة. لمعالجة هذه المشكلة ، من الضروري تثبيت مواد عازلة أو استبدال مواد البناء هذه بمواد أخرى تتمتع بالعزل الحراري الجيد واستهلاك منخفض للطاقة.

يتناول هذا العمل المقارنة بين الجدران التي تشكل طبقات مختلفة من المواد. تتناول منهجية هذا العمل حساب المقاومة الحرارية ومعامل الخسارة باستخدام أداة الحساب "Calculus".

أظهرت النتائج أن المقاومة الحرارية للجدار لها علاقة عكسية مع الموصلية الحرارية ومنتاسبة مع سمك المكونات المختلفة للجدار.

أفضل المواد للعزل الحراري هي مواد مسامية ذات كثافة منخفضة: الحجر المسامي، الفلين، البوليسترين، ...

الطوب المجوف من الطين هو الحل الأكثر اقتصاداً. يمكن دمجه مع عوازل في طبقات رقيقة لتحسين المقاومة الحرارية.

الكلمات المفتاحية: الموصلية الحرارية، المقاومة الحرارية، الحساب، العزل الحراري، المواد العازلة، الكثافة.

Notation utilisées :

λ : conductivité thermique du matériau (W/m.K , W/m.°C)

ρ : masse volumique (kg/m³)

C : la capacité thermique (J/K)

E : Effusivité (W /m².K.s^{-1/2})

D, a: diffusivité (m² /s)

R_{th},R : résistance thermique.....(m²/k.W)

C_p : est la chaleur spécifique(KJ/m³.K), (J/kg.K)

U : Le coefficient de transmission thermique.....(W/m².K)

ϕ : flux thermique(W/cal.s)

m : masse(kg)

Q , ΔQ : quantité d'énergie(J, cal)

GW : La laine de verre

MW : La laine de roche

CG : Le verre cellulaire

EP : La perlite

PS : Le polystyrène

PSE : Le polystyrène expansé

XPS : Le polystyrène extrudé

HQE : Haute Qualité Environmental

SOMMAIRE

Dédicace	I
Remerciement	II
Résumé.....	III
Abstract	IV
الملخص.....	V
Notation utilisée	VI
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XII

CHAPITRE I : L'ISOLATION THERMIQUE DES BATIMENTS

I.1.INTRODUCTION.....	3
I.2.Le principe de l'isolation thermique	3
I.3.Les techniques d'isolation thermique dans le bâtiment	4
I.3.1. Isolation intégrée	4
I.3.2. Les autres solutions	4
a. L'isolation intégrée au matériau porteur	5
b. L'isolation par l'intérieur	5
c. L'isolation par l'extérieur	5
I.4.Les avantages de l'isolation thermique	5
I.4.1.L'avantage économique.....	6
I.4.2.L'intégrité structurale d'un bâtiment	6
I.4.3.L'empêchement de condensation de vapeur	6
I.5. Les isolants thermiques	6
I.5.1.Les isolants thermiques classiques.....	6
I.5.1.1.Les isolants minéraux.....	6
a. La laine de verre.	7
b. La laine de roche	7
c. Le verre cellulaire	7
d. La vermiculite	8
e. La perlite	8
f. L'argile expansée	9

I.5.1.2.Les isolants synthétiques	9
a. Le polystyrène	10
b. Le polyuréthane	10
I.5.1.3.Les isolants végétaux	11
a. La ouate de cellulose	11
b. La laine de bois	11
c. La laine de chanvre	12
d. Le liège expansé	13
e. Le lin	13
f.La laine de coton	13
g. La paille	13
h. Les fibres des noix de coco	14
i. Les roseaux	14
I.2.1.4.Les isolants d'origine animal	15
a. La laine de plume	15
b. La laine de mouton	15
I.2.2.Les avantages et inconvénients	16
I.2.3.Les isolants "nouvelle génération"	16
I.2.3.1. Les panneaux isolants sous vides.....	16
I.2.3.2.Les aérogels	17
I.2.4.Les isolants utilisés en Algérie	18
I.2.4.1.Polystyrène expansé	18
I.2.4.2.Mousses phénoliques	18
I.2.4.3 .Le liège expansé	19
I.2.4.4.Béton cellulaire autoclave.....	19

CHAPITRE II : LES PROPRIETES THERMIQUES

II.1.INTRODUCTION	20
II.2.Les grandeurs thermiques	20
II.2.1.La conductivité	20
II.2.2.La diffusivité thermique	22
II.2.3.L'effusivité thermique	22
II.2.4.La résistance thermique	22
II.2.5.La capacité thermique	22

II.2.6. La chaleur spécifique (massique) (C_p)	23
II.1.7.L'inertie thermique.....	24
II.2.8.Le déphasage thermique	24
II.2.9.Le coefficient de transmission thermique [U]	24
II.3.Le transfert thermique	24
II.3.1. Conduction	24
II.3.2.La convection	25
II.3.2.1.La convection libre	26
II.3.2.2.La convection forcée	26
II.3.3. Rayonnement	26
II.4.Les dispositifs de mesure des propriétés thermiques	27
II.4.1. Mesures en régime stationnaire	27
II.4.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée	28
II.4.1.2.Les disques de Lees	30
II.4.1.3. La méthode fluxmétrique	31
II.4.1.4.La méthode des boîtes	31
II.4.1.5.La méthode de la barre divisée	33
II.4.2.Méthodes en régime transitoire	34
II.4.2.1. Méthode du fil chaud	34
II.4.2.2.Méthode du plan chaud	35
II.4.2.3.Méthode du ruban chaud	37
II.4.2.4. Méthode Flash	37
II.4.2.5. Méthode du Hot Disk	38
II.5. Les logiciels de calcul	39
II.5.1.Logiciel de simulation thermique	39
II.5.1.1.CODYMUR	39
II.5.1.2.CODYBA	40
II.5.1.3.KoZiBu	40
II.5.2.Outil de calcul	41
II.5.2.1.Calculis	41
II.5.2.2.Outil de calcul automatique de résistance et de déphasage thermique.....	42

CHAPITRE IV : BASE DE DONNEES SUR LES PROPRIETES THERMIQUES

III.1 INTRODUCTION	43
III.2. Les bétons	43
III.3. Les mortiers	44
III.4. Les métaux	45
III.5. Le bois	46
III.6. Le liège	47
III.7. Air et eau	47
III.8. Brique de terre cuite	47
III.9. Les roches et les sols	48
III.10. Plâtre	49
III.11. Matières plastiques synthétiques compactes, mastic et produits d'étanchéité	50
III.11.1. Matières synthétiques compactes d'usage courant dans le bâtiment	50
III.11.2. Produits d'étanchéité	51
III.12. Le verre	53
III.13. Matériaux isolants	53
III.14. Quelques résultats des étudiants d'université de Biskra	55

CHAPITRE V : CALCUL LA RESISTANCE THERMIQUE

IV.1. INTRODUCTION	58
IV.2. Calcul des résistances thermiques et des déperditions	58
IV.2.1. Parois double	58
IV.2.1.1. Parois double en briques	58
IV.2.1.2. Parois double en deux matériaux	61
IV.2.2. Parois simples avec enduits	62
IV.2. 3. Parois triples	63
IV.3 Analyse des résultats	66

Liste des figures

CHAPITRE I		
N°	Titre	Page
Figure I.1	Isolation intérieur et extérieur des murs	5
Figure I.2	La laine de verre.	7
Figure I.3	La laine de roche	7
Figure I.4	Le verre cellulaire	8
Figure I.5	La vermiculite	8
Figure I.6	La perlite	9
Figure I.7	L'argile expansée	9
Figure I.8	Le polystyrène expansé	10
Figure I.9	Le polystyrène extrudé	10
Figure I.10	le polyuréthane	10
Figure I.11	L'ouate cellulaire	11
Figure I.12	La laine de bois	11
Figure I.13	La laine de chanvre	12
Figure I.14	Le liège	12
Figure I.15	Panneaux de liège	12
Figure I.16	Panneaux de lin	13
Figure I.17	La laine de coton	13
Figure I.18	La paille	13
Figure I.19	Les fibres des noix du coco	14
Figure I.20	Les roseaux	14
Figure I.21	La laine de plume	15
Figure I.22	La laine de mouton	15
Figure I.23	Panneaux isolants sous vide	17
Figure I.24	L'aérogel	17
CHAPITRE II		
Figure II.1	Représentation de flux thermique	21
Figure II.2	transfert de chaleur par conduction	25
Figure II.3	Transfer de la chaleur par convection	25
Figure II.4	Transfer de chaleur par rayonnement	27
Figure II.5	Principe de la plaque chaude gardée	29
Figure II.6	Mini-plaque chaude avec fluxmètre	29
Figure II.7	Principe du THASYS	30
Figure II.8	Principe de THISYS	30
Figure II.9	Principe de la méthode fluxmétrique	31
Figure II.10	Cellule de mesure EI700	32
Figure II.11	Schéma de principe méthode des boîtes	32
Figure II.12	schéma de principe la barre divisée	32
Figure II.13	Schéma de principe de la méthode du fil chaud	33
Figure II.14	Appareil CT-mètre	35

Figure II.15	Vue d'une sonde de type fil chaud	35
Figure II.16	Principe de base de méthode plan chaud	36
Figure II.17	Principe de la méthode Ruban chaud	37
Figure II.18	Schéma de principe la méthode flash.	38
Figure II.19	Dispositif de mesure des propriétés thermiques	38
Figure II.20	Écran d'accueil de CoDyMur	39
Figure II.21	Écran d'accueil de CODYBA	40
Figure II.22	L'interface de calculis	41
Figure II.23	L'interface de l'outil	42
Chapitre IV		
Figure IV.1	Schéma d'une paroi à trois couches	56

Liste de tableaux

Tableau	Titre	Page
CHAPITRE I		
Tableau I.1	Avantages et inconvénients des isolants	16
CHAPITRE III		
Tableau III.1	Conductivité thermique des bétons.	43
Tableau III.2	Conductivité thermique de mortier	44
Tableau III.3	Conductivité thermique des métaux.	44
Tableau III.4	La conductivité thermique de bois	45
Tableau III.5	La conductivité thermique de liège	46
Tableau III.6	la conductivité thermique de l'air et l'eau.	47
Tableau III.7	Les propriétés thermiques de brique terre cuite.	47
Tableau III.8	la conductivité thermique des roches	48
Tableau III.9	la conductivité thermique de sols	48
Tableau III.10	Conductivité thermique de plâtre	49
Tableau III.11	Les propriétés thermiques de matières synthétiques compactes d'usage courant dans le bâtiment.	50
Tableau III.12	Les propriétés thermiques des mastics	51
Tableau III.13	Les propriétés thermiques d'asphalte	52
Tableau III.14	Les propriétés thermiques de bitume	53
Tableau III.15	Conductivité thermique de verre.	55
Tableau III.16	.La conductivité thermique des matériaux isolants	55
Tableau III.17	Les propriétés thermiques des différents bétons.	56
Tableau III.18	Propriétés thermiques du mortier ordinaire et de tiges de palmier dattier	56
CHAPITRE VI		
Tableau VI.1	Effet de la nature de l'isolant sur la résistance thermique	57

Tableau VI.2	Effet de la nature de l'enduit sur la résistance thermique	58
Tableau VI.3	Effet de la nature de la paroi sur la résistance thermique.	59
Tableau VI.4	Effet de la nature du matériau sur la résistance thermique d'une paroi simple.	60
Tableau VI.5	Effet de l'épaisseur sur la résistance thermique d'une paroi simple	61
Tableau VI.6	Effet du dédoublement de l'isolant sur la résistance thermique d'une paroi en brique	62
Tableau VI.7	L'effet d'utilisation de deux isolants différents	63

Introduction générale

La conception des bâtiments est directement liée au contexte climatique et aux matériaux de construction. La prévision des performances énergétiques et thermiques d'un bâtiment dépend des propriétés des matériaux à utiliser.

Le problème de la consommation excessive d'énergie se présente fermement dans le sud d'Algérie, qui se caractérise par un climat désertique chaud et sec. Le climat de cette région est connu par deux saisons, froid intense de l'hiver qui, et une période estivale qui se caractérise par des températures élevées de mai à octobre, en plus du faible pourcentage d'humidité et de précipitations. Créer un environnement favorable thermiquement dans cette région, exige une grande consommation d'énergie aussi bien en été (la consommation d'énergie pour le refroidissement) ou en hiver (consommation d'énergie pour le chauffage) ce qui nécessite des dépenses élevées. Nous devons donc trouver des solutions qui permettront de réduire cette consommation au moindre coût. Parmi ces solutions l'isolation thermique.

La nature des parois est d'un niveau d'adaptation qui intéresse particulièrement la gestion du rayonnement solaire créant une barrière entre l'intérieur et l'extérieur qui modifie les échanges thermiques. Les matériaux qui les composent, leur épaisseur, leur revêtement et leur propriété thermo physique sont des facteurs principaux intervenant dans leur évaluation

La nécessité d'isoler thermiquement est surtout importante pour les parois qui sont soumises aux conditions climatiques extérieures d'une région aride ou semi-aride.

L'un des buts principaux de la construction des bâtiments est de mettre les occupants à l'abri des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités. L'isolation thermique doit répondre à ce but. Il s'agit de protéger les occupants de manière automatique et passive des facteurs climatiques.

Le concepteur doit aussi faire en sorte que la consommation d'énergie (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par les règlements et les possibilités financières des occupants. L'évolution des techniques et le développement de nouveaux matériaux de construction contribuent à l'amélioration du confort thermique des usagers des bâtiments.

Certains matériaux naturels encore mal connus peuvent entraîner une diminution des dépenses énergétiques des bâtiments par une meilleure qualité d'isolation et contribuer ainsi à la protection de l'environnement. Pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment et économiser de l'énergie, il est nécessaire de mettre en œuvre des matériaux particulièrement performants, apportant une bonne isolation thermique. En effet, une bonne isolation thermique entraîne le choix d'équipements de climatisation moins puissants donc plus économiques.

L'objectif de ce mémoire est de constituer une banque de données sur les caractéristiques thermiques des matériaux de construction et faire une étude comparative sur l'isolation des parois constituées de plusieurs couches.

Ce mémoire est structuré en deux parties :

La première partie (synthèse bibliographique) est composée de deux chapitres :

Le premier chapitre s'intéresse à l'isolation thermique des bâtiments, ses techniques d'isolation, ses avantages et inconvénients, les différents types des matériaux isolants et les matériaux les plus utilisés en Algérie.

Le deuxième chapitre est consacré aux propriétés thermiques, les dispositifs de mesure de la conductivité thermique et les logiciels et les outils de calcul.

La deuxième partie (validation) est composée également de deux chapitres :

Dans le troisième chapitre, on expose les résultats de récolte des données sur les caractéristiques thermiques des matériaux de construction.

Nous présentons dans le quatrième chapitre les résultats de calcul de la résistance thermique et du coefficient de déperdition des parois.

I.1.INTRODUCTION :

Pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment et économiser de l'énergie, il est nécessaire de mettre en œuvre des matériaux particulièrement performants, apportant une bonne isolation thermique. En effet, une bonne isolation thermique entraîne le choix d'équipements de climatisation moins puissants donc plus économiques.

Dans la plupart des cas, l'isolation est obtenue par l'emploi de matériaux spécifiques, qui, outre une bonne résistance à la transmission de la chaleur, doivent présenter d'autres qualités qui sont fonction des impératifs de mise en œuvre comme :

- la légèreté et le non hygroscopicité afin de conserver dans le temps ses qualités isolantes,
- une bonne résistance mécanique,
- une bonne tenue aux températures d'emploi,
- une absence d'effets nuisibles sur les matériaux en contact avec l'isolant. [59]

L'objectif de ce chapitre est de présenter une synthèse bibliographique sur l'isolation thermique dans le bâtiment et les composites naturelles. La première partie s'intéresse à l'isolation thermique, le principe d'isolation thermique, les techniques d'isolation thermique dans le bâtiment, l'isolation des parois et les avantages d'isolation thermique. La deuxième partie est dédiée à la présentation des matériaux isolants, ses types, ses avantages et inconvénients et les matériaux isolants utilisés en Algérie.

I.2. Le principe de l'isolation thermique :

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. L'isolation thermique est utilisée dans de nombreux domaines incluant notamment : le bâtiment (maintien d'une température de confort à l'intérieur des habitations), l'industrie, l'automobile, la chaîne du froid, la cuisine et le textile. [14]

Dès que deux éléments en contact possèdent des températures différentes, il se produit un échange de chaleur entre eux jusqu'à ce que leurs températures deviennent identiques. [72]

Le but de l'isolation est de freiner cet échange thermique et de permettre ainsi de garder les parois de l'habitation à une température la plus proche possible de celle de l'air intérieur. [33]

I.3. Les techniques d'isolation thermique dans le bâtiment

I.3.1 Isolation intégrée :

- Le bloc de coffrage isolant :

C'est un système de mur composé d'éléments en polystyrène expansé ou d'éléments mixtes béton/polystyrène expansé destiné à être empilés à sec et formant coffrage pour la mise en œuvre d'un voile armé ou non.

- Le petit élément à isolation intégrée :

Ce système est constitué de murs en petits éléments permettant la réalisation de murs maçonnés qui assurent simultanément des fonctions mécaniques et isolantes.

- Le système à isolation intégrée :

Dans ce cas on fait appel à des éléments coffrant de la hauteur d'un étage, pré conditionnés lors de la fabrication en usine. L'ossature est en béton.

- Éléments lourds en béton :

Ce système se compose d'éléments lourds en béton de grandes dimensions avec une âme en polystyrène expansé.

- Le panneau sandwich :

C'est un système constitué d'une peau extérieure décorative, d'un isolant par exemple le polystyrène expansé et d'une peau intérieure décorative ou non. Il s'agit d'éléments industrialisés de grande hauteur qui se mettent facilement en œuvre et qui apportent une bonne isolation. [59]

I.3.2. Les autres solutions :

D'autres matériaux entrent dans la composition d'éléments particulièrement isolants. Ce sont par exemple le granulats de verre, le chanvre (plante à fibres) et la terre cuite qui entrent dans la confection de briques spécifiques.

Avec le granulats de verre et le chanvre, qui est un bon isolant thermique et phonique difficilement inflammable, on confectionne un béton isolant. [59]

a. L'isolation intégrée au matériau porteur :

Cette solution utilise des matériaux qui intègrent un isolant dans leur structure, béton cellulaire, béton de chanvre, béton allégé, etc. Elle est généralement utilisée en construction neuve. Elle est performante et durable.

La recherche des conditions de confort de l'habitat passe par une meilleure connaissance des comportements hydrique et thermique des parois [72]

b. L'isolation par l'intérieure :

Consiste à isoler un bâtiment de l'intérieur en apposant un isolant derrière une cloison maçonnerie ou une ossature, procédé le plus utilisé par les constructeurs à cause de sa facilité de mise en œuvre. Son inconvénient est qu'il annule l'inertie thermique de de la paroi isolée et n'évite pas les ponts thermiques sur la maçonnerie. [52]

c. L'isolation par l'extérieur :

Consiste à installer l'isolant sur la surface extérieur du mur. C'est souvent la solution la plus couteuse mais aussi la plus performante. Elle constitue la meilleure isolation pour le confort d'été et d'hiver car elle permet de conserver l'inertie thermique forte des murs intérieurs et supprime les ponts thermiques. Un bon isolant est évidemment un mauvais conducteur de la chaleur. En générale les matériaux les plus légers sont de meilleurs isolants. Plus le matériau est dense, plus les atomes sont proches les uns des autres, ce qui signifie que le transfert d'énergie d'un atome à un autre est plus facile [22]

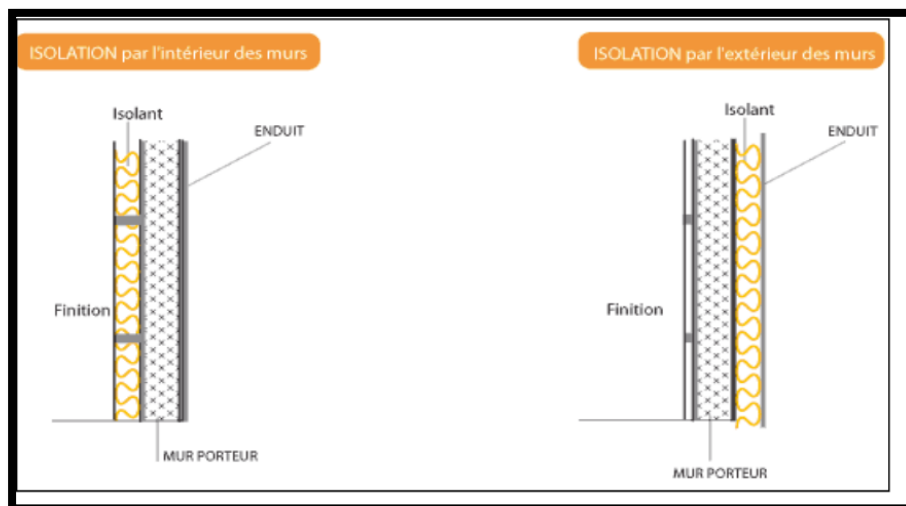


Figure I.1 : Isolation intérieure et extérieure des murs [22]

I.4. Les avantages de l'isolation thermique :

L'isolation thermique permet en même temps d'accroître votre confort et de réduire vos consommations d'énergie de chauffage. Mais ce n'est pas tout, l'isolation est également bénéfique pour l'environnement, car elle favorise la diminution des émissions de polluants. Ainsi, l'isolation thermique est intéressante en termes pratiques, économiques et écologiques. Elle permet aussi d'améliorer l'isolation acoustique. [6]

Il existe également plusieurs autres avantages de l'utilisation d'isolation thermique :

I.4.1.L'avantage économique :

Des économies d'énergie importantes peuvent être atteintes à l'aide d'utilisation d'isolation thermique, avec peu de dépenses en capital. Il réduit les coûts d'exploitation de l'énergie. [22]
Elle permet de réduire les déperditions de chaleur, de réaliser des économies de chauffage. [33]

I.4.2.L'intégrité structurale d'un bâtiment :

Les fortes variations de température peuvent causer des mouvements thermiques indésirables, ce qui pourrait endommager la structure du bâtiment. La préservation des bâtiments avec des fluctuations minimales de température contribue à la préservation de l'intégrité des structures de bâtiments. Ceci peut être réalisé par l'utilisation d'une isolation thermique appropriée en augmentant ainsi la durée de vie des structures du bâtiment. [22]

I.4.3.L'empêchement de condensation de vapeur :

La bonne installation de l'isolation thermique aide à prévenir la condensation de vapeur sur la surface de bâtiment. Cependant, il faut faire attention à éviter les effets néfastes de la structure du bâtiment dommageable, qui peuvent résulter de mauvaise installation de matériaux d'isolation ou une mauvaise conception. En plus, les pare-vapeurs sont généralement utilisés pour empêcher la pénétration d'humidité dans un isolant à basse température. [52]

I.4.4.La Protection contre le feu :

Si le matériau isolant approprié est choisi et correctement installé, il peut aider à retarder la chaleur et à empêcher l'immigration de flamme dans la construction en cas d'incendie [52]

I.5. Les isolants thermiques :**I.5.1.Les isolants thermiques classiques :**

Il existe une variété d'isolants thermiques utilisés dans les divers domaines. Ils se classifient selon leurs origines comme suit :

I.5.1.1.Les isolants minéraux :

Les isolants qui font partie de cette catégorie sont issues de matériaux minéraux. La laine de verre et laine de roche ; sont aujourd'hui, les isolants les plus utilisés. Ce sont des fibres artificielles de la famille des silicates. Ils présentent de bonnes performances d'isolation mais leur tenue dans le temps est loin d'être excellente. Sur le plan environnemental, leur coût énergétique est élevé. [70]

a. La laine de verre :

La laine de verre est élaborée à partir de silice (sable), de verre de récupération, par fusion, fibrage et polymérisation. Elle est symbolisée par l'abréviation GW (Glass Wool). La laine de verre est composée à 90% de fibres, de moins de 5 % de liants organiques et de moins de 1% d'huile minérale pour limiter les poussières et l'absorption d'eau. Elle offre une inertie et un déphasage faible. [29]



Figure I.2 : la laine de verre. [55]

b. La laine de roche :

La laine de roche (MW) est fabriquée à partir d'une ressource abondante, le basalte (roche volcanique) de fondant et de coke, les performances thermiques sont bonnes. [30]

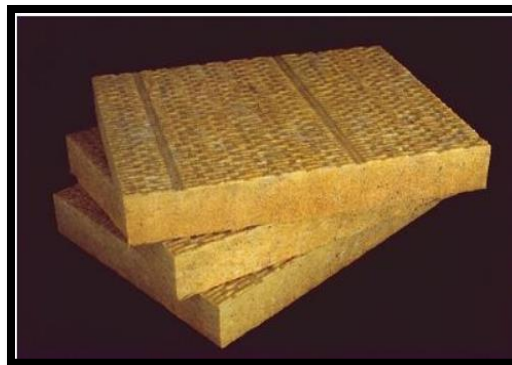


Figure I.3 : la laine de roche. [39]

c. Le verre cellulaire :

Le verre cellulaire (CG) est composé de millions de cellules fermées remplies de gaz inerte. Son origine est du sable ou calcin (verre recyclé).

Sa conductivité thermique varie de 0.038 à 0.055 W/m.K.



Figure I.4 : le verre cellulaire. [36]

d. La vermiculite :

La vermiculite est une roche micacée. [32] C'est un minéral de la famille des micas, assez gourmands en énergie lors de sa fabrication. Matériau incombustible, imputrescible et non toxique, il peut être utilisé soit en vrac soit en panneaux. [7]

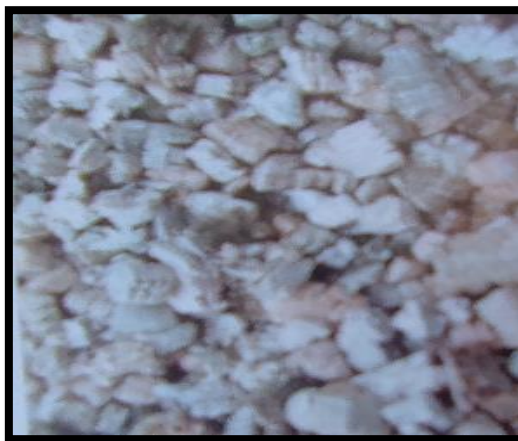


Figure I.5 : la vermiculite. [29]

e. La perlite

La perlite (EP) est une roche volcanique siliceuse. Cette roche abondante peut être exploitée industriellement. Le minerai est concassé et chauffé à 1200°C. La perlite est hydrophile, très durable et écologique, ses performances thermiques est moyenne

Sa conductivité thermique varie de 0.05 à 0.06 (W /m.K). [29]



Figure I.6 : la perlite [54]

f. L'argile expansée :

L'argile expansée est fabriquée à partir d'argile naturelle brute, qui est séchée réduite en poudre puis mélangée à de l'eau. Le mélange est chauffé à 1200 °C dans un four cylindrique tournant. L'extraction du gaz des billes de 1 à 10 mm de diamètre produit leur expansion.[54] Ses performances thermiques sont plutôt faibles, l'affaiblissement acoustique permis par l'argile expansé est correct, pour les bruits aériens comme pour les bruits d'impact. [29]

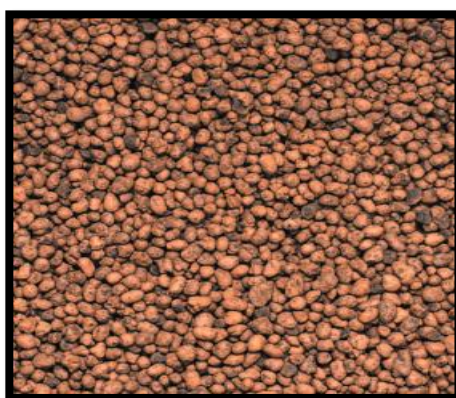


Figure I.7 : l'argile expansée [32]

I.5.1.2. Les isolants synthétiques :

Cette catégorie d'isolant est produite à partir du processus de synthèse des produit hydrocarbures ou de quelques alliages métalliques. Les polystyrènes expansés sont les isolants synthétiques les plus utilisés ; ils sont obtenus à partir d'hydrocarbures expansés à la vapeur d'eau et au pentane. Leur utilisation en panneaux dans la construction des parois d'immeubles est très recommandée. En deuxième position s'affiche la mousse polyuréthane obtenu à l'aide de catalyseurs et d'agents propulseurs à base d'iso cyanates. Ils trouvent leur utilisation dans l'isolation des murs extérieurs. [7]

a. Le polystyrène :

Le polystyrène (PS) est issu d'un dérivé de raffinage du pétrole, peut être présenté sous deux formes :

- ✓ Le polystyrène expansé (PSE) : est obtenu par polymérisation des billes de styrène qui en sont issues avec de l'eau et du gaz pentane [22]. Il est caractérisé par une grande légèreté, une résistance mécanique élevée mais il est fragile au feu. Sa conductivité est très faible (entre 0.029 et 0.038 w/m.K).[28]
- ✓ Le polystyrène extrudé (XPS) : est obtenu après polymérisation du styrène par extrusion sous pression d'une pâte de fusion grâce à un gaz lourd [22]. Les performances thermiques de XPS sont légèrement meilleurs que celles du PSE (0.029 à 0.037 W/m.K) [30] .

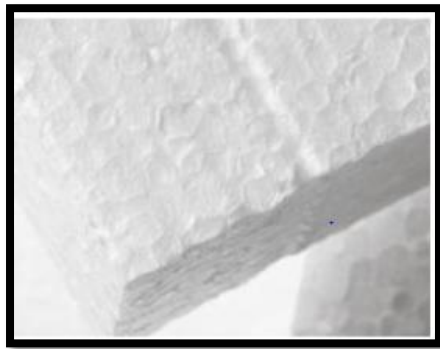


Figure I.8 : le polystyrène expansé.[55]



Figure I.9: le polystyrène extrudé.[50]

b. Le polyuréthane

Les mousses de polyuréthanes sont obtenues par catalyse et expansion à partir d'un mélange d'isocyanate, de polyol, et d'un gaz expanseur (CO₂) avec ajout de stabilisant et d'ignifugeants. On obtient des mousses dures à cellules fermées, peu compressibles et avec un très bon pouvoir isolant. Vu son déplorable bilan environnemental, l'utilisation du polyuréthane n'est pas compatible avec une approche écologique de la construction. [35]



Figure I.10 : le polyuréthane. [34]

I.5.1.3. Les isolants végétaux :

Cette catégorie d'isolant répondant aux principaux critères éco construction, elle s'inscrit tout à fait dans la philosophie HQE (Haute Qualité Environnementale). Peu énergivores au moment de leur fabrication, biodégradables, ces matériaux se présentent sous diverses formes : vrac, laine, conglomérat, rouleaux, panneaux. Leur coût encore élevé devrait sous la demande constante des prescripteurs avoir tendance à baisser sérieusement à moyen terme. [7]

a. La ouate de cellulose :

La ouate de cellulose issue de recyclage du papier. Elle est fabriquée à partir de journaux recyclés et de déchets de coupes de papier neuf d'imprimerie, son coefficient de conductivité λ est entre 0.038 et 0.043W/m.K [30].

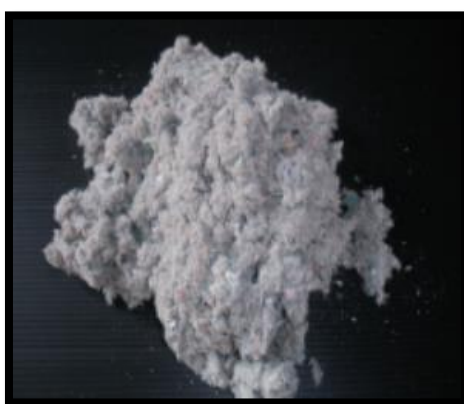


Figure I.11 : l'ouate cellulaire. [53]

b. La laine de bois :

La laine de bois est souple et résiliente et sa pose est facile et saine. On préférera les produits dont la fibre est non traitée chimiquement et collée avec sa propre résine. En outre elle peut réguler l'humidité de l'air intérieur. [68]

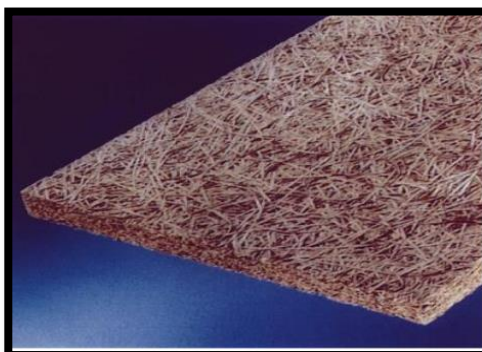


Figure I.12 : la laine de bois. [39]

c. La laine de chanvre :

Le chanvre est une plante annuelle cultivée, elle présente deux types de fibres : longue pour les tissus, cordage, papeterie et les isolants en laine de chanvre (panneaux semi rigides et rouleaux) et courte pour les granulats chènevotte [70].

La laine de chanvre affiche un coefficient de conductivité thermique λ de 0.039 à 0.042 ce qui situe dans la moyenne des isolants fibreux [30].



Figure I.13 : la laine de chanvre [36]

d. Le liège expansé :

Le chêne liège est présent en méditerranée occidentale depuis 60 millions d'années. Il existe deux sortes de lièges, mâle et femelle.

Pour l'isolation, c'est le liège mâle et le déchet de liège femelle qui sont utilisés. Pour la conductivité, le liège expansé en tant que panneaux varie de 0.035 à 0.045 W/m.K et granulats entre 0.043 et 0.055 W/m.K. Pour le liège aggloméré, λ est entre 0.044 et 0.049 W/m.K. Le liège offre également de bonne capacité d'isolation acoustique [29]



Figure I.14 : le liège. [34]



Figure I.15 : panneaux de liège. [36]

e. Le lin :

Il s'agit d'une plante annuelle à petites feuilles et jolies fleurs bleu violacé de 1 m de hauteur. Elle est très sensible aux conditions de sol, de climat et de mauvaises herbes. C'est un matériau très écologique. Son coefficient de conductivité est entre 0,037 et 0,040 W/m.K. [25]

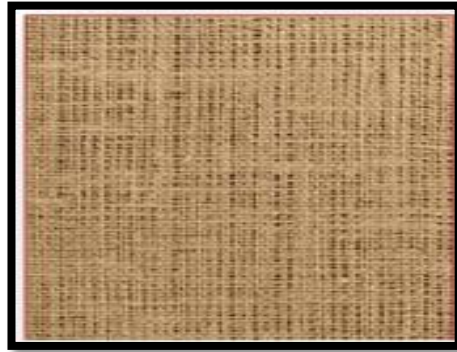


Figure 1.16 : Panneaux de lin. [25]

f. La laine de coton :

Le cotonnier de culture est un arbuste à croissance rapide, elle peut atteindre 1.5 m. Elle est polluante. Il est préférable d'utiliser le coton recyclé pour des raisons écologiques. Il est très perméable à la vapeur d'eau. La laine de coton est un bon régulateur hygrométrique. Elle offre une véritable source du confort pour l'habitat. Sa conductivité thermique varie de 0.037 à 0.040 W/m.K [28].



Figure 1.17 : la laine de coton [25]

g. La paille :

La paille est la tige de blé, seigle, triticale ou lavande compactée en ballots rectangulaires [37] Elle est le plus souvent utilisée sous forme de bottes de paille comprimées (ballots superposés) qui sont empilées et recouvertes de panneaux ou d'un enduit. Sa conductivité thermique est de l'ordre de $0,055 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La compression de la paille ainsi que l'ajout d'un enduit (chaux) améliore sa tenue au feu.

La paille reste toutefois un matériau facilement "attaquable" par les rongeurs et les insectes, surtout lors de la pose. [54]



Figure I.18 : la paille [37]

h. Les fibres des noix de coco :

Les fibres de coco sont des fibres multicellulaires dures issues de la bourre entourant la coque de noix de cocotier. C'est un épais mésocarpe fibreux composé en majeure partie en cellulose. Il est un produit écologique. Sa performance thermique varie de 0.037 à 0.045 W/m.K. [29]



Figure I.19 : les fibres des noix du coco [25]

i. Les roseaux :

Ils sont utilisés en rénovation, les panneaux des roseaux sont plus employés pour l'isolation extérieure des habitations. C'est une solution naturelle et écologique. Sa conductivité est de 0.056W/m.K. [28]



Figure I.20 : les roseaux. [25]

I.5.1.4. Les isolants d'origine animal :**a. La laine de plume :**

Constitué à 70% de plumes, 10% de laine et 20% de fibres textiles thermo fusibles, l'isolant de plume associe performance, sante et respect de l'environnement. les plumes sont traites à 150°C et débarrassées de toute substance allergène. la souplesse du matériau est favorable à l'isolation acoustique. [68]



Figure I.21 : la laine de plume. [68]

b. La laine de mouton :

Les produits de tonte sont d'abord lavés au savon et à la soude pour les débarrasser des impuretés et surtout du suint, sécrétion de l'épiderme de l'animal. La laine reçoit ensuite un traitement insecticide et un traitement contre le feu, principalement à base de sels de bore. Puis elle est cardée et texturée au moyen de fibres thermo fusibles (polyester), ou sur un canevas en polypropylène [38].

Sa conductivité thermique varie de 0.035 à 0.042 W/m.K. [28]



Figure I.22 : la laine de mouton [39] .

I.5.2. Les avantages et inconvénients :

L'application des différents isolants thermiques dans les divers domaines de construction a mis en jeu, la nécessité de faire un choix adéquat de l'isolant à utiliser en se basant sur ses qualités d'isolation présentées ainsi que l'ensemble des inconvénients. Dans le tableau ci-dessous, une récapitulation des principaux avantages et inconvénients de chaque origine d'isolant sont explicitement énumérées. [70]

Tableau I.1 : avantages et inconvénients des isolants

Isolants	Avantages	Inconvénients
Isolants minéraux	-Disponibilité -Cout faible (prix revient)	-Ressource non renouvelable -Difficilement recyclable
Isolants synthétiques	- Bonne performance thermique - Cout admissible - Dégagement des gaz toxiques	- Ressource non renouvelable - Non recyclable
Isolants d'origine végétaux	-Ressource renouvelable - Bon pouvoir hygroscopique - Sans effet sur la santé - Facilité de pose	-Cout élevée - Disponibilité limitée
Isolants d'origine d'animaux	-Matériau durable -Bon pouvoir hygroscopique	-Cout élevé -Disponibilité limitée

I.5.3. Les isolants "nouvelle génération" :

Par plus d'amélioration, la nouvelle génération d'isolant par une épaisseur raisonnable, a une performance bien meilleure que celle classique.

I.5.3.1. Les panneaux isolants sous vides :

Les panneaux isolants sous vides (PIV) (Figure I.23) font peu à peu leur entrée dans le bâtiment. Ils constituent une amélioration de la technique des aérogels, puisque leur cœur se compose d'un matériau à cellules nanométriques. Une enveloppe protectrice étanche à l'air et à l'eau entoure ce cœur, ce qui permet de faire le vide (à une pression d'environ 10 millibars).

Les matériaux nano poreux utilisés ont une porosité élevée de l'ordre de 90 %.

L'avantage des PIV est leur très faible conductivité thermique comprise entre 0,0042 et 0,0050 W.m⁻¹.K⁻¹ ce qui représente une performance 10 fois supérieure à celle d'un isolant classique (laine minérale par exemple).

On peut les caractériser de super isolants (1 cm de PIV est équivalent à 6 cm de polystyrène expansé ou à 9 cm de laine minérale). [54]



Figure I.23 : panneaux isolants sous vide. [54]

I.5.3.2. Les aérogels :

Mis au point en 1931 par un chimiste Américain, le procédé de fabrication a été développé par la NASA pour l'isolation des satellites. Il consiste à extraire l'eau d'un gel de silice et à la remplacer par de l'air.

Les aérogels présentent des caractéristiques d'isolation exceptionnelles, composés de 99.8% d'air, ils sont extrêmement légers et plus proches de l'apparence d'un nuage de poussière que d'un matériau isolant classique ; ils possèdent un excellent coefficient de conductivité thermique, entre $0.011 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $0.013 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A titre de comparaison, il est trois fois plus isolant que la laine de verre. [8]



Figure I.24 : l'aérogel [54].

I.6. Les isolants utilisés en Algérie :**I.6.1. Polystyrène expansé :**

Il est réalisé à l'usine de SONATRACH à EL-ANNASER-Alger, dans la variante moulée en blocs. Le polystyrène c'est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires.

Les propriétés remarquables du polystyrène sont notamment :

- Sa faible masse volumique située généralement, suivant les applications, entre 10 et 30 kg/m³,
- Son pouvoir isolant thermique,
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs),
- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, ...). [7]

I.6.2. Mousses phénoliques :

Elles sont fabriquées dans les usines SONATRACH d' EL-ASNAM en plaques rigides, la résine phénolique est obtenue par condensation à chaud est intimement mélangée à un agent d'expansion, un catalyseur et à d'autres additifs et provoque une exotherme qui gazéifie, le moussage progresse pendant la réaction de gélification et le durcissement ne se produit qu'à la fin l'expansion.

Les plaques en mousse phénolique ont plus d'avantages par rapport à quelques mousses notamment en ce qui concerne la tenue au feu et la toxicité des fumées.

Les principales propriétés des plaques mousses phénoliques :

- Tenue au feu
- Résistance à l'usure :
- Stabilité dimensionnelle à la température
- Résistance mécanique :
- Durabilité
- Diffusion aux vapeurs

Les plaques en mousses phénoliques sont utilisées pour l'isolation des plafonds et des cloisons et portes, et pour l'isolation des réfrigérateurs, l'isolation des tuyaux pour le transport isotherme. [7]

I.6.3 .Le liège expansé :

Le liège est le produit de la récolte de l'écorce du chêne liège qui pousse dans les régions méditerranéennes. Les principaux producteurs sont le Portugal, l'Espagne et le Maroc, ce matériau est fabriqué à Jijel à la Société Nationale des industries des lièges et du bois et compose en plusieurs couches la première couche l'écorce appelé «mâle» a une dure irrégulière et est réservée à l'isolation et autre couches appelées «femelles» sont utilisées pour fabrication des bouchons ou de revêtement sols. [24]

I.6.4.Béton cellulaire autoclave :

Les matériaux de construction peuvent être classés en deux catégories, les matériaux traditionnels d'origine naturelle telle que la pierre, la terre crue, le bois, et les matériaux modernes composites dont le plus utilisé est le béton, les produits de béton cellulaire autoclave se fabriquent dans l'usine de S. N. M. C. C'est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment et d'eau. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Le béton cellulaire autoclave est un matériau silico calcaire obtenu à l'autoclave d'un mélange de sable siliceux, de chaux et de ciment, et du dégagement gazeux (addition, ou moment du gâchage, de poudre d'aluminium). [24]

II.1.INTRODUCTION :

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux.

Certaines de ces propriétés représentent les capacités d'un corps à propager ou à stocker de la chaleur. [66]

Les caractéristiques thermiques : telles que la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique (D) et la chaleur spécifique volumique (C) sont mesurées en utilisant des dispositifs de mesures, soit en régime transitoire, soit en régime stationnaire.

Dans ce chapitre, nous donnons brièvement quelques rappels sur les propriétés thermiques, les modes de transfert thermique, les dispositifs de mesures des propriétés thermiques, et quelques logiciels et outils qui permettent de calculer la résistance thermique des parois.

II.2.Les grandeurs thermiques :

Elles sont généralement décrites par des notions telles que la conductivité thermique (W/m.K) et la diffusivité thermique (m^2/s).

Plus la conductivité d'un matériau est faible plus son pouvoir d'isolation est important. De plus, la diffusivité thermique qui est fonction de la conductivité, la masse volumique et la chaleur spécifique du matériau représente la vitesse à laquelle la température de surface d'un matériau varie. [3]

II.2.1.La conductivité :

La conductivité thermique est la grandeur qui caractérise la diffusion de la chaleur dans les milieux sans mouvement macroscopique de matière. La diffusion de la chaleur s'effectue des parties chaudes vers les parties froides. [3]

La conductivité thermique est la grandeur caractéristique en termes d'isolation thermique. Il est connu que plus un matériau est conducteur de chaleur, et plus sa conductivité est grande. [72] Elle a un caractère intrinsèque du matériau et sa valeur ne dépend pas de la surface de la paroi. [2]

Elle est toujours positive et elle correspond à la densité du flux thermique traversant, en régime stationnaire, un corps homogène soumis à un gradient de température de 1 Kelvin (ou 1°C) par mètre (Figure II.1). Elle s'exprime dans le système international par (W/m.K).

La conductivité dépend essentiellement de la nature du matériau et la température.

La conductivité thermique (constante de proportionnalité) « λ » indique la résistance d'un corps qu'oppose au flux de chaleur. [20]

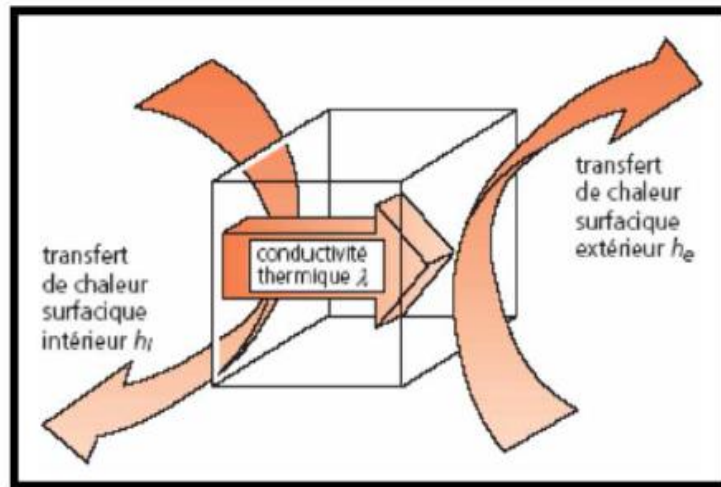


Figure II.1 : Représentation de flux thermique. [20]

Dans le bâtiment, un matériau est considéré comme isolant thermique si $\lambda < 0,12 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Cette conductivité croît avec :

- la masse volumique du matériau (plus il y a d'air et plus le transfert de chaleur est freiné) ;
- l'humidité dans le matériau (l'eau contenue dans les pores favorise le transfert de chaleur plus que l'air)
- la température du matériau. [54]

On constate que parmi les solides, les métaux sont beaucoup plus conducteurs que les composés non métalliques à l'exception du graphite (utilisé dans certains échangeurs de chaleur). L'acier inoxydable est moins conducteur que la plupart des autres métaux et alliages. Parmi les liquides : Le mercure se détache nettement.

Les métaux fondus sont de bons conducteurs ce qui explique par exemple l'utilisation de sels de sodium comme fluide caloporteur pour le refroidissement des réacteurs nucléaires. Sauf pour les métaux fondus : **$\lambda \text{ des gaz} < \lambda \text{ des liquides} < \lambda \text{ des solides}$** [12]

Les facteurs influençant la conductivité thermique d'un matériau sont :

- Son poids volumique.
- Sa teneur en eau.
- La taille de ses pores d'air.
- La nature du solide les renfermant. [17]

II.2.2. La diffusivité thermique :

Correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers les matériaux. [17]

La diffusivité thermique représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'un matériau. Ce paramètre caractérise la cinétique de réponse du milieu à une perturbation thermique. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et inversement proportionnelle à la chaleur spécifique et à la masse volumique. [47]

Elle s'exprime selon l'équation suivante :

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{en m}^2/\text{s}) \quad (\text{II.1})$$

Avec : λ : conductivité thermique en W/m.°C

ρ : masse volumique en kg /m³

c_p : chaleur spécifique en kj /kg.°C [21] .

II.2.3. L'effusivité thermique :

L'effusivité d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle indique la capacité des matériaux à absorber (ou constituer) plus au moins rapidement un rapport de chaleur. L'effusivité caractérise la sensation chaud ou de froid que donne un matériau. Elle est donné par :

$$E = \sqrt{\lambda \rho C} \quad (\text{II.2})$$

Avec : λ : conductivité thermique du matériau en W/m.K

ρ : masse volumique du matériau en kg /m³

C : la capacité thermique du matériau en J /kg.K

À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau, l'effusivité décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur.

Ainsi une effusivité élevée limite les valeurs du gradient de température. [13]

II.2.4. La résistance thermique :

La résistance thermique (R) est fonction de la conductivité thermique du matériau et de son épaisseur :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

R_{th} : la résistance thermique ($m^2.K/W$) ;

e : l'épaisseur du matériau (m) ;

λ : la conductivité thermique ($W/m.K$)

Plus la valeur de R_{th} est importante plus la paroi est isolante.

On peut augmenter R_{th} en augmentant l'épaisseur du matériau. [54]

La résistance thermique d'une paroi s'obtient en additionnant la résistance thermique de chaque couche de matériau utilisé ou de l'éventuelle lame d'air. La résistance thermique d'une paroi est calculée à partir du coefficient d'échange superficiel entre l'ambiance extérieure ou intérieure et la paroi. Elle correspond à la somme des quantités de chaleurs transmises par convection et/ou rayonnement pour une surface de paroi et durée donnée pour l'écart d'1 Kelvin entre la température de la surface décrite et celle de la paroi . [52]

II.2.5. La capacité thermique :

La capacité thermique d'un matériau est la quantité de chaleur mise en réserve lorsque sa température augmente de ($1^\circ C$) ou (1K). [27]

C'est une grandeur extensive, plus la quantité de matière est importante plus la capacité thermique est grande

$$C = C_p \cdot m \quad (II.4)$$

Où :

C : est la capacité thermique

C_p : est la chaleur spécifique

m : est la masse en kg.[36]

II.1.6. La chaleur spécifique (massique) (C_p)

La chaleur spécifique est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance. Cette quantité d'énergie est absorbée ou restituée par des réactions endothermiques ou exothermiques pour des transformations physiques chimiques dans le matériau [62]

La chaleur spécifique calculé à partir à la relation (II.5)

$$C_p = \frac{\lambda}{\rho a} \quad (II.5)$$

a : étant la diffusivité thermique du matériau. [67]

II.2.7. L'inertie thermique :

C'est la capacité du matériau à emmagasiner une certaine quantité de chaleur. Elle mesure la quantité de la chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1m³ de matériau, cette quantité de chaleur se trouvant stockée dans le matériau. C'est un critère de choix très important. Sa valeur est d'autant plus élevée que le matériau est plus dense. [6]

II.2.8. Le déphasage thermique :

Une des conséquences de l'inertie thermique, Le déphasage (exprimé en heures) est le décalage entre le moment où le matériau est soumis à une source de chaleur et le moment où il restitue la chaleur de l'autre côté du matériau.

En faisant varier l'épaisseur du matériau, on fait varier le déphasage. Plus un matériau est isolant ou à inertie thermique importante, plus il déphase. [6]

II.2.9. Le coefficient de transmission thermique [U] :

Le coefficient de transmission calorifique U caractérise les déperditions thermiques d'un matériau ou d'une paroi. C'est l'inverse de la résistance thermique (R). Plus U est faible, plus la paroi est isolante.

Il est exprimé en watt par mètre carré degré Celsius [W/m².°C] ou degré kelvin [W/m².°K]. [36]

$$U = \frac{1}{R} \quad (\text{II.6})$$

II.3. Le transfert thermique :

Le transfert de chaleur correspond à une transmission de l'énergie d'une zone vers une autre.

Il se fait spontanément d'un corps chaud vers un corps plus froid. [6]

Ce transfert a lieu sous trois formes, la conduction sous l'effet d'un gradient de température, la convection et le rayonnement. [41]

II.3.1. Conduction :

La conduction est définie par le transfert de chaleur sans déplacement de matière, elle est le seul mode de transfert de chaleur à l'intérieur d'un solide.

La capacité à diriger le sens de chaleur est défini par la conductivité thermique et la différence de température.

La conduction est effectuée des régions chaudes vers les régions froides. [HAZ2018]

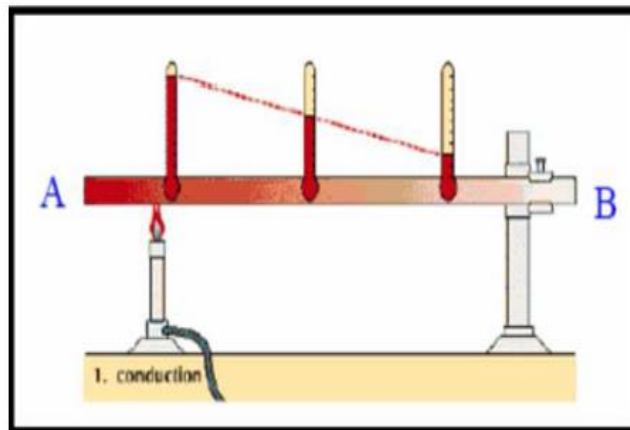


Figure II.2 : Transfert de chaleur par conduction. [58]

II.3.2. La convection :

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement. [18]

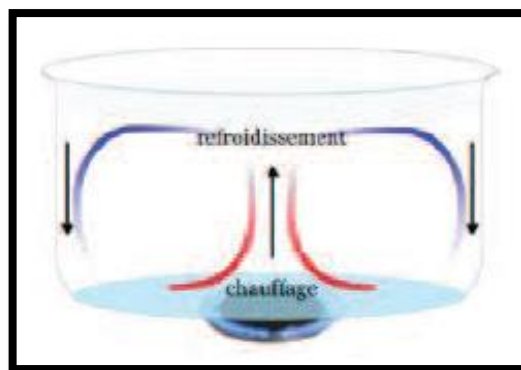


Figure II.3 : Transfert de la chaleur par convection. [58]

On a l'habitude de distinguer deux formes de convection :

- ✓ La convection libre,
- ✓ La convection forcée.

II.3.2.1. La convection libre :

Au contact d'un corps chaud, la température d'un fluide s'élève dès les premières couches voisines créant un gradient de température ainsi qu'une différence de masse volumique (le fluide se dilatant son poids volumique diminue) le fluide chauffé a donc tendance à s'élever par rapport au fluide environnant (poussée d'Archimède). Un écoulement se met donc en place au sein du fluide, le fluide chaud étant remplacé par du fluide froid cet écoulement se maintient tant que la source de chaleur existe. [38]

II.3.2.2. La convection forcée

Elle se manifeste quand le mouvement du fluide est une conséquence des actions extérieures imposées. Dans ce cas, le champ de température est convecté par un écoulement extérieur imposé. On ignore le couplage réciproque entre le champ de vitesses et celui de la température, étant donné le fort couplage entre le mouvement de fluide, le transfert de masse et le transfert de chaleur, les différents régimes d'écoulement se traduisent par l'existence de deux régimes de convection :

- Le régime laminaire caractérisé par le fait que le champ de température demeure régulier.
- Le régime turbulent caractérisé par le fait que le champ de température admet des fluctuations aléatoires, dans l'espace et dans le temps. [16]

II.3.3. Rayonnement :

Le rayonnement est un échange d'énergie à distance. On peut distinguer deux grandes familles de phénomènes radiatifs dans les bâtiments. Les premiers ont pour origine le soleil ou les appareils d'éclairage ; ce sont des sources de rayonnement visible.

Les seconds proviennent des écarts de température entre les surfaces des solides et ont lieu dans le domaine du rayonnement infrarouge. Dans les deux cas, le rayonnement subit des réflexions, des transmissions et des absorptions. Chaque surface solide susceptible de recevoir du rayonnement est caractérisée par des facteurs de réflexion, de transmission et d'absorption qui dépendent de la nature du matériau et de l'état de surface. Des valeurs distinctes caractérisent le comportement de la surface vis-à-vis du rayonnement visible ou infrarouge, ainsi que pour le rayonnement direct ou diffus. Les caractéristiques d'un matériau pour le

rayonnement diffusant obtenues par intégration des caractéristiques spéculaires pour toutes les incidences possibles. On admet couramment que ces mêmes caractéristiques sont indépendantes de la fréquence du rayonnement dans chacune des bandes infrarouge et visible. [51]

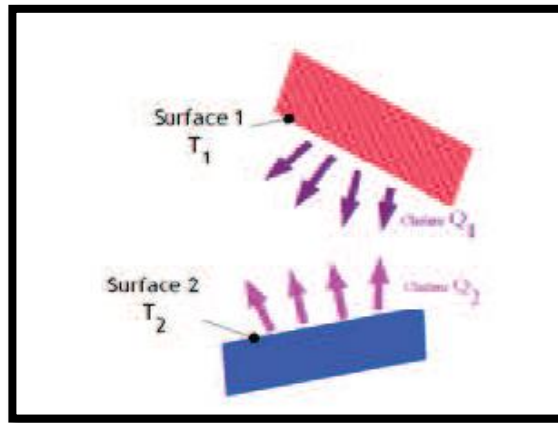


Figure II.4 : Transfer de chaleur par rayonnement. [58]

II.4. Les dispositifs de mesure des propriétés thermiques :

Il existe plusieurs méthodes de mesure des propriétés thermiques des matériaux.

La classification la plus naturelle se fait en deux grands groupes : les méthodes de mesure en régime permanent et les méthodes de mesure en régime variable (ou transitoire).

Dans les premières, le temps n'intervient pas. Ces méthodes permettent uniquement de mesurer la conductivité thermique. Dans les secondes, les mesures sont effectuées en fonction du temps et permettent l'identification des trois paramètres : conductivité, chaleur spécifique et diffusivité. Les méthodes en régime permanent sont complexes en raison des appareillages compliqués, des conditions de mesure strictes et du long temps nécessaire pour établir un gradient de température permanent traversant l'échantillon. Les méthodes en régime variable sont actuellement les plus utilisées. Elles consistent à appliquer sur un échantillon à l'équilibre une perturbation thermique, et à mesurer une ou plusieurs températures (ou flux) en fonction du temps. [62]

II.4.1. Mesures en régime stationnaire :

Les 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. Ces techniques permettent de remonter à une seule propriété thermique qui est la conductivité thermique (λ), en mesurant le flux de chaleur traversant un matériau et

deux températures sur ses faces ou dans son épaisseur. En supposant que le transfert de chaleur est monodimensionnel dans l'échantillon, la conductivité thermique est donnée par la loi de Fourier (équation (II.9)) :

$$\lambda = \frac{Qe}{A(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (II.9)$$

Où Q : est le flux thermique total traversant le matériau [W],

A : l'aire de la surface perpendiculaire au passage du flux [m²],

T₁ et T₂ : deux mesures de température en deux points du matériau distant de e [m].

Le champ d'application de ces méthodes est limité.

Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes : la méthode de la plaque chaude la méthode de la barre la méthode des boites, et la méthode du flux radial.

D'une façon générale, ces méthodes de mesure présentent des difficultés expérimentales tel que :

- L'existence de résistance de contact.
- Les fuites axiales et radiales.
- Les difficultés de mesure de la température surtout celles de la surface.

Ces méthodes de mesure ne sont pas destinées à mesurer toutes les grandeurs physiques. En effet, avec ces méthodes seules la conductivité thermique et la résistance de contact sont mesurées, limitant ainsi leurs champs d'application. [15]

II.4.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée :

C'est une expérience en régime permanent (ISO 8302) où l'on impose à un échantillon plan un flux de chaleur unidirectionnel, et on mesure la différence de température aux bornes de l'échantillon. Cette méthode repose sur l'utilisation d'une plaque de faible épaisseur par rapport aux dimensions traverses de l'échantillon. Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure (II.6)

Dans la méthode de la plaque chaude gardée, on utilise une garde active pour minimiser les pertes latérales aux extrémités de l'échantillon (conditions aux limites).

Le transfert est unidirectionnel et est assuré par un enroulement résistif.

A l'aide de thermocouples disposés de part et d'autre de l'échantillon étudié, la température est ainsi mesurée.

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que : $T_1 - T_2 = R\phi$, ou $R = \frac{e}{\lambda S}$

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants.

Ce type de méthode est difficile à mettre en œuvre et pose beaucoup de problèmes d'ordre expérimentaux comme :

- Atteindre le régime permanent qui est particulièrement long et peut atteindre une durée de 24h.
- Obtenir un flux unidirectionnel dans l'échantillon.
- Mesure de ce flux et les températures avec précision.

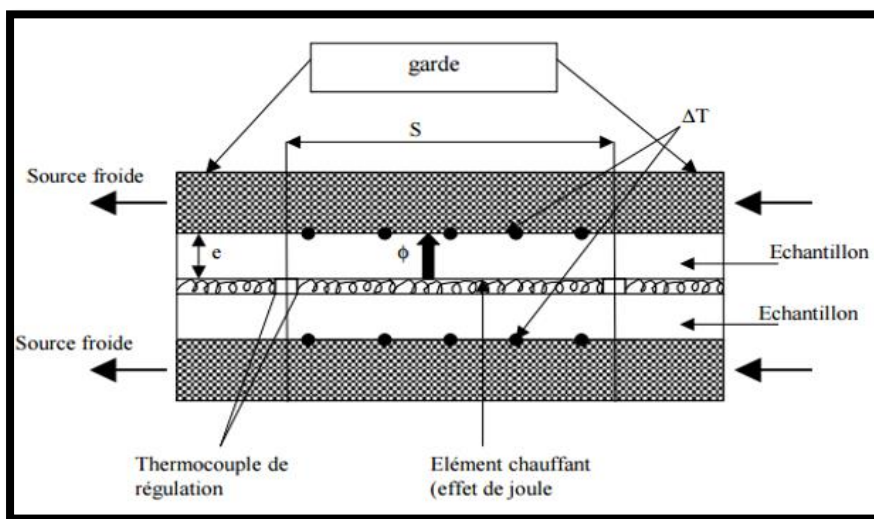


Figure II.5 : Principe de la plaque chaude gardée. [26]

Une autre extension de cette méthode a été développée, et qui fait appel à l'utilisation de mesures du flux unidirectionnel par deux fluxmètres.

La figure (II.7) montre en exemple des mesures du flux traversant l'échantillon donné par la moyenne du flux entrant et sortant. [26]

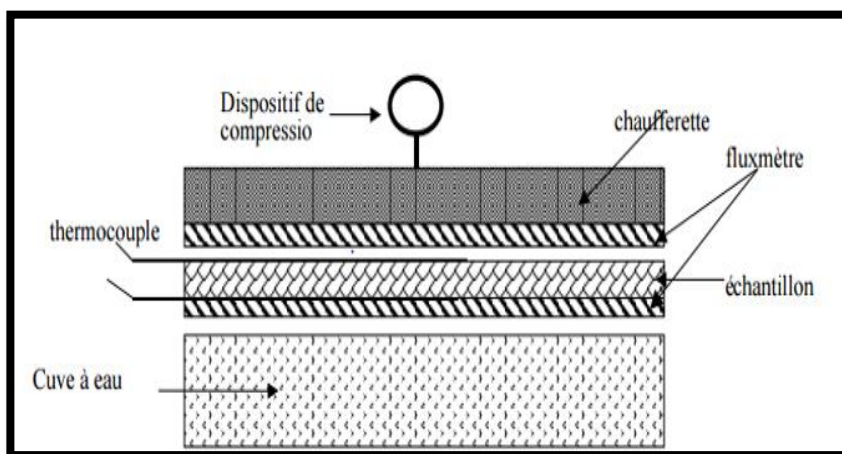


Figure II.6 : mini-plaque chaude avec fluxmètre. [26]

II.4.1.2. Les disques de Lees :

L'utilisation des méthodes stationnaires pour la mesure de la conductivité thermique a débuté bien avant l'introduction de la plaque chaude gardée avec les disques de Lees et les premiers travaux de Poensgen. Cette méthode se base sur la mesure des transferts de chaleur dans un empilement de disques alternant échantillon et éléments chauffant. La première version de ce montage date de 1898. Les mesures de conductivité sont faites en utilisant deux appareils commerciaux de mesures de conductivité thermique de marque THISYS et THASYS commercialisés par HUKSEFLUX®. [15] Le principe de fonctionnement des deux appareils est présenté sur les Figure II.8. et Figure II.9 :

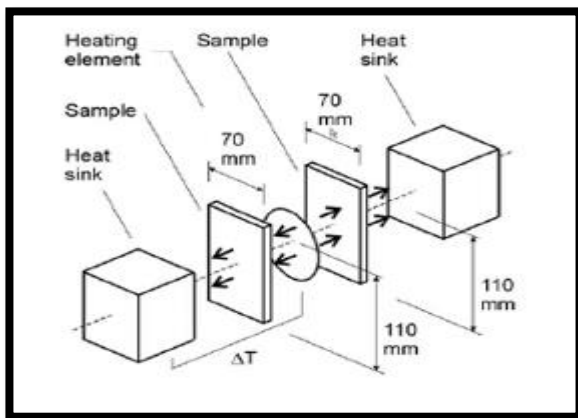


Figure II.7 : principe du THASYS. [15]

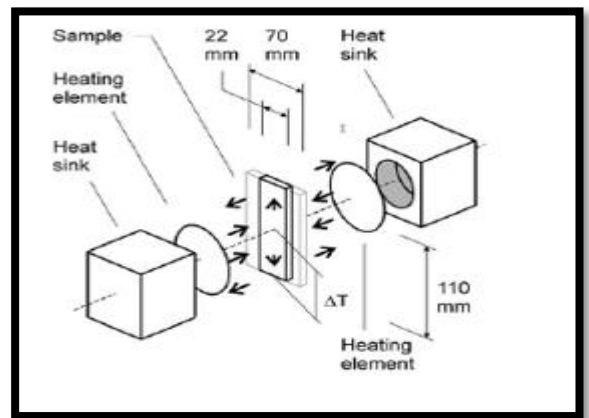


Figure II.8 : principe de THISYS. [15]

Les deux appareils ont deux principes de mesure différents :

Dans le cas du THASYS, un élément chauffant fin est inséré entre deux échantillons identiques. L'ensemble est pris en sandwich entre deux dissipateurs de chaleur. En faisant l'hypothèse que le flux de chaleur généré par l'élément chauffant passe en totalité et de façon symétrique dans les deux dissipateurs, la conductivité thermique est mesurée à partir de la mesure des températures chaudes et froides.

Le principe du fonctionnement du THISYS est différent : L'échantillon est entouré par deux éléments chauffant fins dont les faces arrière sont isolées par des évidements remplis d'air. Le flux thermique généré par les éléments chauffants passe dans le plan de l'échantillon avant de passer dans les dissipateurs thermiques. Cette technique permet de mesurer la conductivité thermique des matériaux anisotropes. L'erreur annoncée par le constructeur sur la mesure de la conductivité thermique est de 6%. [15]

II.4.1.3. La méthode fluxmétrique :

La méthode fluxmétrique est identique sur le principe à la méthode de la plaque chaude gardée à savoir l'établissement en régime permanent d'une densité de flux thermique unidirectionnelle et uniforme dans l'espace.

L'échantillon est placé entre une plaque chaude et une plaque froide, la mesure se fait grâce à un fluxmètre sur une des faces de l'échantillon (figure II.10).

Cette mesure est plus rapide mais moins précise que la plaque chaude gardée de ce fait elle permet d'avoir une bonne estimation de la conductivité thermique [46].

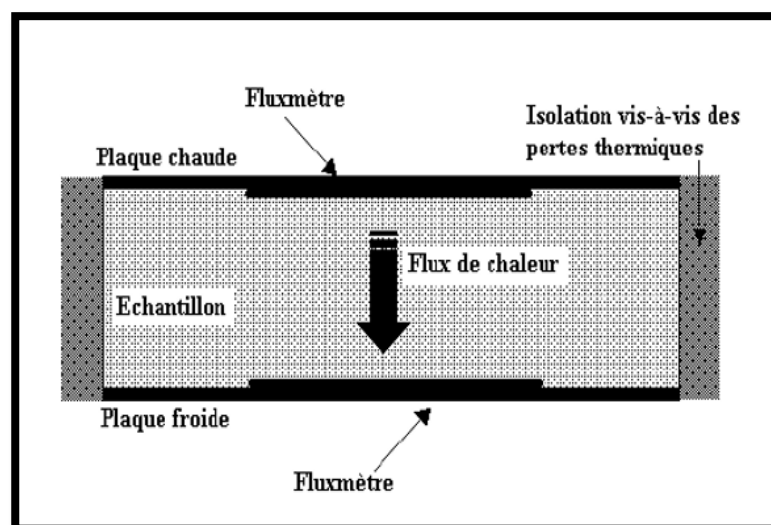


Figure II.9 : principe de la méthode fluxmétrique. [46]

II.4.1.4. La méthode des boîtes :

Le dispositif utilisé au laboratoire est une cellule de mesure conçue spécialement pour déterminer simultanément, par la méthode dite "des boîtes" du régime permanent et transitoire, la conductivité thermique et la diffusivité en peu de temps (environ trois heures) de deux échantillons. Ces deux méthodes du régime permanent et celle du régime transitoire sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique et la diffusivité thermique respectivement.

La chaleur massique et l'effusivité thermique, du matériau en question, sont également calculées.

Ce dispositif (figure II.11) s'agit de EI700 qui contient deux boîtes, une pour la conductivité et l'autre pour la diffusivité thermique. [11]



Figure II.10 : Cellule de mesure EI700.[11]

Le principe de cette méthode, mise au point par le Laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'Université Claude Bernard de Lyon, est schématisé sur la figure (II.12)

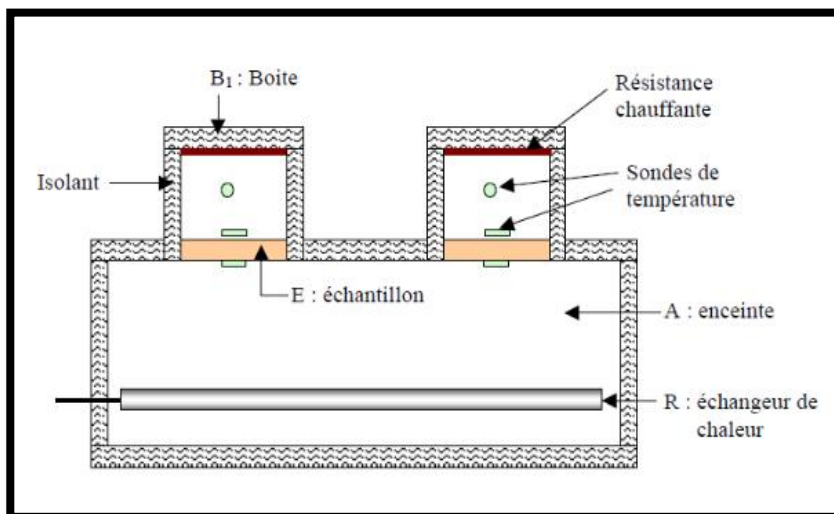


Figure II.11 : schéma de principe méthode des boîtes

L'enceinte A est maintenue à une température plus basse que les deux boîtes grâce à un échangeur basse température R. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E. Les températures sur les faces supérieure et inférieure de l'échantillon E et le flux de chaleur émis par la résistance chauffante sont mesurées et permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon. La stabilisation des températures TC et TF des faces chaude et froide de l'échantillon, nous conduit à conclure que le régime permanent est atteint (variation de l'ordre du 1/10e de degré en une heure). Le temps nécessaire à atteindre est de 4 à 7 heures.

Cette méthode présente quelques inconvénients :

- Elle est surtout appropriée à des matériaux homogènes dont la conductivité thermique n'excède pas la valeur de $W/m \cdot ^\circ C$
- Pour des températures élevées les résultats deviennent moins précis.
- Durant les mesures un phénomène de séchage s'opère, ce qui influence la teneur en humidité des échantillons. [41]

II.4.1.5. La méthode de la barre divisée :

Un montage existant au laboratoire PROMES, permet de caractériser les matériaux au départ à la température ambiante. Dans un appareil à barre divisée, l'échantillon est inséré dans une pile expérimentale entre deux blocs conducteurs. Un flux de chaleur q est apporté sur une des extrémités de la pile expérimentale, tandis qu'un flux de chaleur est prélevé sur l'autre extrémité. [73]

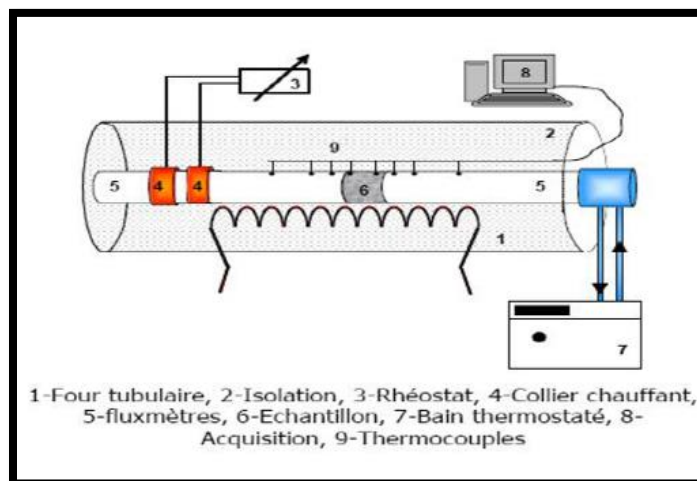


Figure II.12 : schéma de principe la barre divisée. [73]

En dépit de leurs formulations théoriques simples et leurs mises en œuvre expérimentales relativement aisées, les méthodes de caractérisation en régime stationnaire présentent plusieurs inconvénients de taille :

- Mesure d'une seule propriété thermique : la conductivité
- Temps de mise en régime stationnaire très long (quelques heures)
- Echantillons de dimensions importantes
- Sources d'erreurs importantes dues aux pertes thermiques
- Sources d'erreur sur les dimensions de l'échantillon
- Présence d'interface générant des résistances thermiques de contact. [73]

II.4.2. Méthodes en régime transitoire :

Elles sont plus utilisées que celles en régime stationnaire et elles permettent d'identifier plusieurs grandeurs (conductivité, diffusivité, effusivité). [46] Le principe de mesure s'appuie sur un modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées. Ces méthodes constituent un progrès incontestables dans la caractérisation thermo physique des milieux et donnent de bons résultats de mesures. En contreparties de ses bons résultats, ces méthodes présentent un défaut dû à un grand nombre de limitations liées aux difficultés d'analyse des données obtenues, problème de mise au point de matériaux à étudier, et au problème de l'évaluation de la précision de la méthode. [26]

II.4.2.1. Méthode du fil chaud :

La méthode a été décrite en 1888 par Schiermacher, mais sa première application pratique a été signalé en 1949 par Van der Held et Van Drunnen, qui l'a utilisé pour mesurer la diffusivité thermique du liquide. [71] La méthode du fil chaud permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif. [11]

Elle consiste donc, à placer une sonde chauffante entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser, d'épaisseurs supposées infinies et initialement isothermes, à l'exemple de la méthode du fil chaud que montre la Figure (II.14).

Ensuite on applique un flux de chaleur constant à la sonde chauffante et on relève l'évolution de la température de cette sonde. On considère que le transfert de chaleur autour de la sonde et au centre de l'échantillon est radial. Par une modélisation de l'évolution de la température à ce lieu, on estime la caractéristique thermique du matériau.

Les méthodes à sonde sont très adaptées à des matériaux très diffusifs. [73]

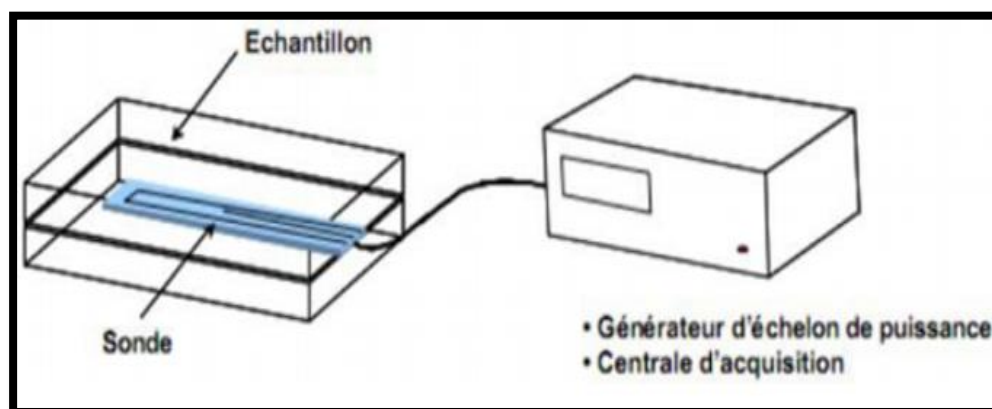


Figure II.13. Schéma de principe de la méthode du fil chaud. [73]

La technique de fil chaud par **CT-mètre** Norme de référence NF EN 993-15 a été élaborée dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux homogènes et isotropes. Le principe de fonctionnement consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée.

Le CT-mètre (figure II.15) se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester, et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite. [45]



Figure II.14 : appareil CT-mètre.

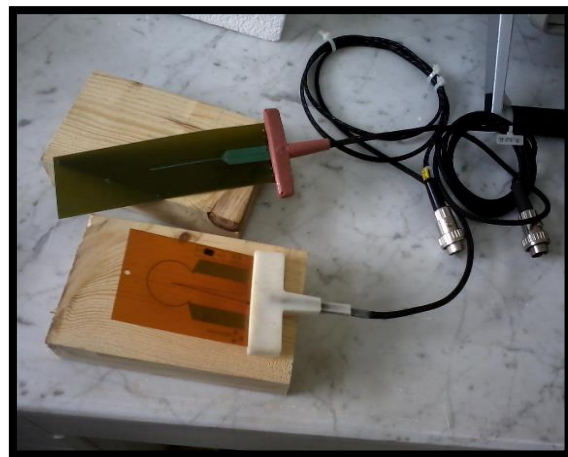


Figure II.15 : vue d'une sonde de type fil chaud.

II.4.2.2. Méthode du plan chaud :

La méthode du plan chaud est une extension de la méthode du fil chaud à une géométrie plane. Elle permet d'identifier l'effusivité thermique d'un matériau. [11]

La méthode du plan chaud est une méthode de mesure dynamique à sonde plane dont le principe consiste à solliciter thermiquement un échantillon, et à observer la réponse thermique au cours du temps.

Par l'intermédiaire d'un modèle simple de transfert, on remonte ensuite aux propriétés thermiques recherchées

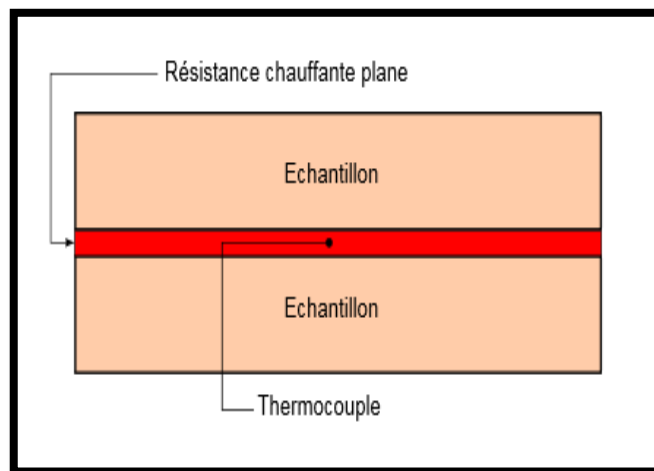


Figure II.16 : Principe de base de méthode plan chaud.

La figure (II.17) présente un schéma de principe du dispositif de plan chaud.

Une sollicitation à flux constant de type échelon est appliquée à une résistance chauffante (sonde plane) placée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Pour éliminer les échanges avec l'environnement, l'association de deux échantillons identiques superposés qui emprisonnent la sonde est indispensable. Pour ce montage, on appelle "face arrière", la face externe d'un des deux échantillons et "face avant" le plan où se situe la sonde à l'interface des deux isolants.

Lorsque la perturbation thermique n'affecte pas la température $T_{ar}(t)$ de la face arrière de l'échantillon pendant la durée de l'expérience, l'hypothèse du milieu semi-infini est valide, on utilise dans ce cas la méthode du plan chaud semi-infini.

L'évolution de la température $T_{av}(t)$ en face avant est mesurée à l'aide d'un thermocouple placé au centre de la résistance chauffante. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de trouver l'évolution théorique de la température au centre de l'échantillon en face avant.

Une méthode d'estimation de paramètres permet d'estimer l'effusivité thermique minimisant l'écart entre les courbes $T_{av}(t)$ théorique et expérimentale. L'identification simultanée de l'effusivité et de la conductivité thermique devient possible lorsque l'on se place en milieu fini tout en gardant une sollicitation échelon.

Il faut noter que l'hypothèse du milieu semi-infini est souvent adaptée pour les isolants thermiques compte tenu de leur faible diffusivité thermique.

Pour des matériaux fortement diffusifs, il faut des échantillons avec des épaisseurs importantes pour respecter cette hypothèse. [69]

II.4.2.3. Méthode du ruban chaud :

Le ruban chaud correspond à une géométrie intermédiaire entre celle du fil chaud, celle du plan chaud et celle du plan chaud utilisé pour la mesure de l'effusivité des matériaux.

Un ruban chaud peut tout simplement être obtenu avec une bande métallique résistive insérée entre les deux échantillons à caractériser (Figure II.18).

Le suivi de la température est effectué à l'aide de :

Soit la mesure locale de la température au centre du ruban ; soit la mesure de la température moyenne du ruban par la mesure de la résistance du ruban. [1]

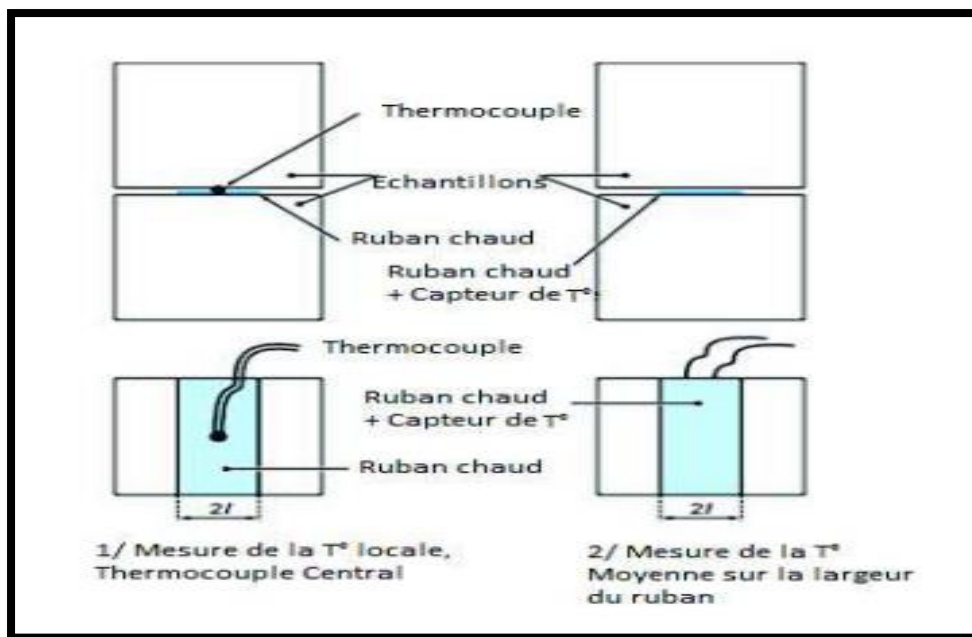


Figure II.17 : Principe de la méthode Ruban chaud. [1]

II.4.2.4. Méthode Flash

La méthode flash est l'une des méthodes les plus utilisées pour la caractérisation thermique des matériaux grâce à sa capacité de s'adapter aux mesures sur une large gamme de diffusivités thermiques sur une plage de température pouvant aller de -100°C à 3000°C . [73]

Cette méthode permet d'estimer la diffusivité thermique des solides. Son schéma de principe est décrit sur la figure (II.19). 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. [45]

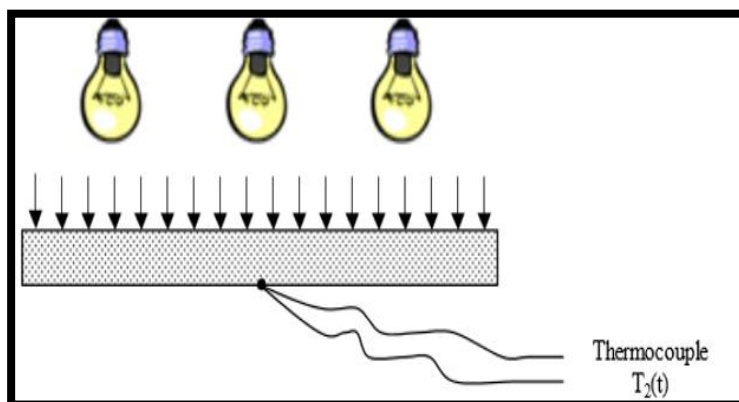


Figure II.18 : Schéma de principe la méthode flash.

II.4.2.5. Méthode du Hot Disk :

Le dispositif de Hot Disk TPS 1500 de thermo concept est utilisé pour déterminer les caractéristiques thermiques : la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur volumique. La connaissance de ces propriétés est nécessaire pour l'analyse et la modélisation des transferts de chaleur des bétons étudiés. Le dispositif est composé d'une centrale d'acquisition automatique de données, de sondes de type mica ou kapton, d'un four de 5 litres pouvant atteindre 1200°C et d'un ordinateur de mesure (figure II.20).

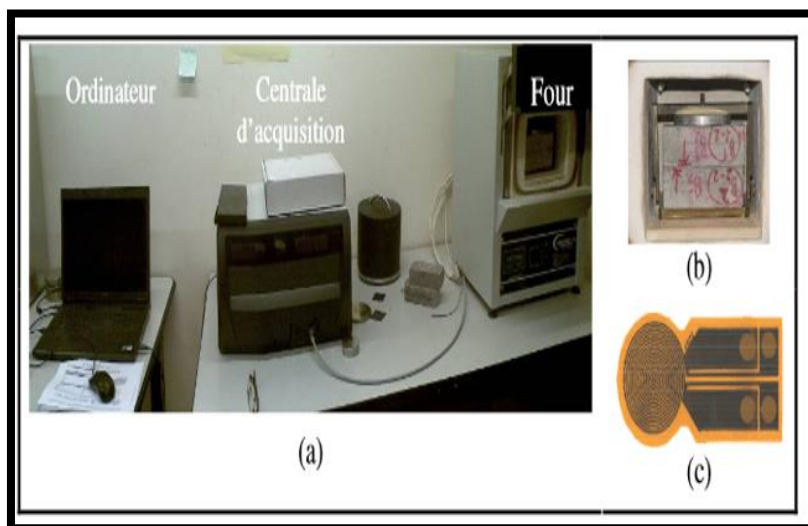


Figure II.19 : dispositif de mesure des propriétés thermiques (a) ; paire d'échantillons dans le four (b) ; sonde (type Mika)(c)

La sonde de type mica est utilisée pour la mesure des propriétés thermiques à chaud. Cette sonde est insérée entre deux échantillons. Chaque échantillon est préalablement préparé de

façon à obtenir une face suffisamment plane pour assurer un bon contact entre l'échantillon et la sonde. [62]

Les principaux avantages de la technique du Hot disk sont les suivants :

- Large plage de conductivité thermique, de 0,005 W / (m K) à 500 W / (m K);
- Large éventail de types de matériaux, de liquide, de gel à solide.
- Préparation facile d'échantillons ;
- Non destructif ;
- Une grande précision. [71]

II.5. Les logiciels de calcul :

II.5.1. Logiciel de simulation thermique :

II.5.1.1. CODYMUR (COmportement DYnamique d'un MUR)

CODYMUR permet l'étude en régime variable du comportement thermique 1D d'une paroi. Il a été réalisé par le CETHIL en 2002 et diffusé principalement pour des utilisations pédagogiques. Les sorties sont traduites en terme d'énergie consommée, ainsi qu'en puissance instantanée pour faciliter les comparaisons entre différentes solutions.

D'autre part, sont intégrées des fonctionnalités liées à l'ensoleillement afin de considérer les évolutions réelles sur une façade orientée des apports réels. Il est également possible de simuler la paroi avec des données climatiques représentatif de conditions estivales et hivernales pour différents sites français.

CoDyMur réalise le calcul des températures au sein de la paroi ainsi que des flux aux surfaces, et cela en fonction du temps. Les résultats permettent d'analyser l'influence de certains paramètres comme la constitution de la paroi (épaisseurs, matériaux utilisés pour les couches ou les positions respectives de celles-ci), les ambiances thermiques de part et d'autre de la paroi. [49]

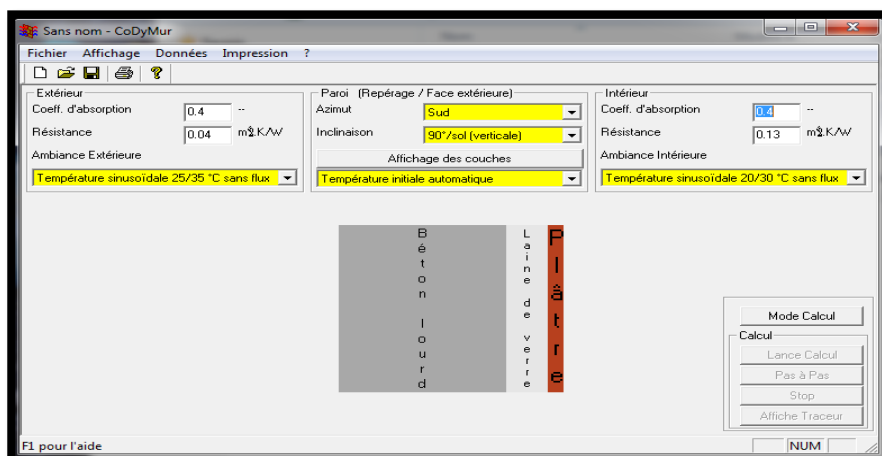


Figure II.20 : Écran d'accueil de CoDyMur.

II.5.1.2. CODYBA :

CoDyBa est un outil de simulation conçu afin de prévoir le COmportement DYnamique des BATiments. Il analyse l'influence des paramètres comme la régulation, l'inertie et l'orientation du bâtiment. [23]

CoDyBa demeure un outil efficace dans la mesure où il permet de faire varier les différents paramètres indépendants du modèle de bâtiment et d'évaluer leur influence. A ses fonctions précédemment citées. Le logiciel CoDyBa est utilisé pour analyser en régime dynamique les performances thermiques et hydriques d'un bâtiment lorsque celui-ci est soumis à des conditions climatiques variées. [4]

Il permet d'établir des études de chauffage et de refroidissement d'air ou de ventilation en laissant à l'utilisateur la possibilité de faire varier les éléments liés à la géométrie des zones ainsi que les choix des matériaux d'isolation [67]

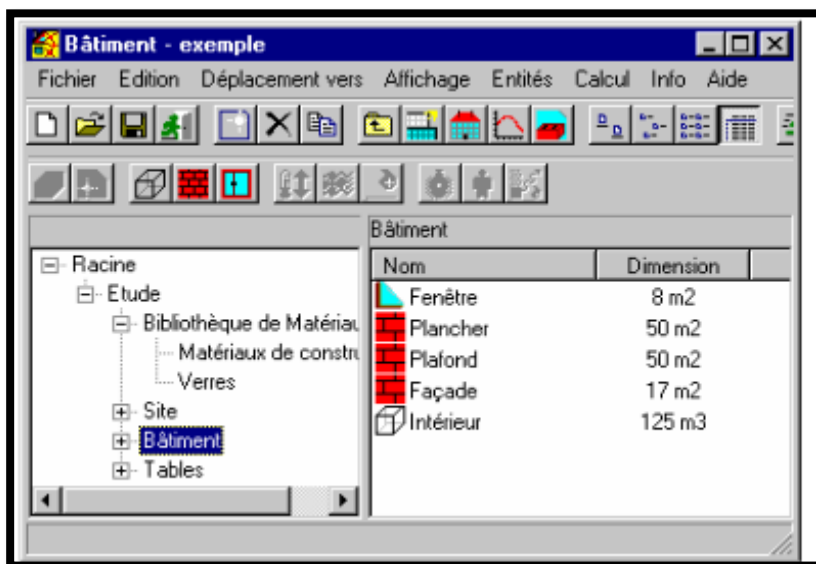


Figure II .21 : Écran d'accueil de CODYBA [64]

II.5.1.3. KoZiBu :

KoZiBu est le successeur du logiciel CoDyBa [CDB]. CoDyBa était un logiciel, développé conjointement par le CETHIL (Centre Thermal INSA-Lyon [CET]) et un ingénieur indépendant [JNL], sans aucune aide de l'Etat. Il est destiné aux bureaux d'études, aux organismes d'enseignement et de recherche.

KoZiBu est un logiciel utilisé pour déterminer les flux de chaleur dans un bâtiment. Il permet d'estimer les puissances de chauffage ou de refroidissement instantanées nécessaires pour maintenir un point de consigne donné, ou de calculer les températures intérieures lorsque le

système de chauffage ou de refroidissement est insuffisant. L'humidité est traitée de la même manière. L'outil vise à mener des études de stratégie de chauffage et de refroidissement, de climatisation ou de ventilation, de matériaux isolants à installer. L'occupation de la chambre est incluse. KoZiBu ne permet pas d'étudier le comportement dynamique d'un ensemble de composants technologiques : l'objectif principal est de prévoir la consommation d'énergie et la plage d'évolution de la température. [63]

II.5.2. Outil de calcul :

II.5.2.1. Calculis :

Est un outil de calcul la résistance thermique d'un paroi permet d'évaluer de manière rapide la résistance thermique d'un paroi d'un matériau selon les composition de parois est ses épaisseur et ses coefficient de conductivité λ

CALCULER FACILEMENT avec **Calculis** Calculer à propos

Calculons la résistance d'une paroi composée de 5 couches maximum :

couche 1 :
- pas de cloison - e₁ : m ; λ_1^* : 0

couche 2 :
- pas de cloison - e₂ : m ; λ_2^* : 0

couche 3 :
- pas de cloison - e₃ : m ; λ_3^* : 0

couche 4 :
- pas de cloison - e₄ : m ; λ_4^* : 0

couche 5 :
- pas de cloison - e₅ : m ; λ_5^* : 0

* Si vous renseignez la valeur λ (lambda), c'est celle-ci qui sera prise en compte

Figure II.22 : l'interface de calculis.

Cette outil permet d'ajouter d'autre matériaux à condition la connaissance de la conductivité des matériaux

II.5.2.2. Outil de calcul automatique de résistance et de déphasage thermique

Cet outil permet d'évaluer de manière rapide :

- La durée de déphasage thermique (en heures) d'un matériau selon son épaisseur et ses caractéristiques techniques.
- L'épaisseur de matériau nécessaire pour atteindre un niveau d'isolation demandé.
- La résistance thermique obtenue d'un matériau selon son épaisseur et ses caractéristiques techniques. [65]

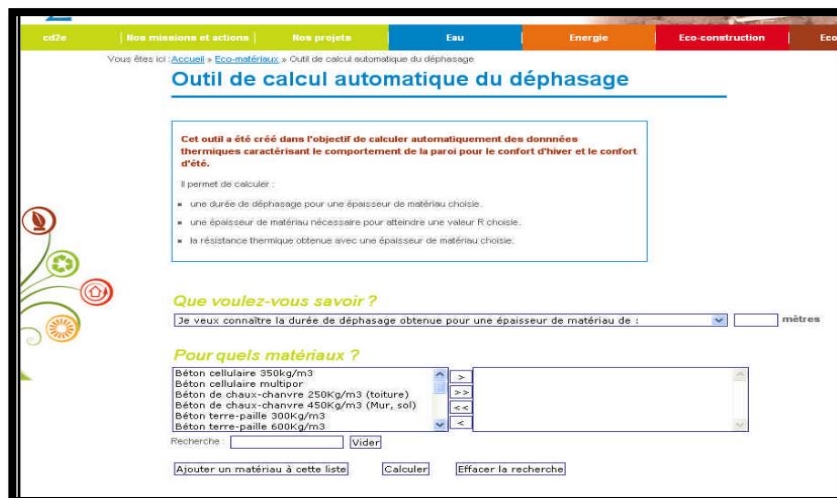


Figure II.24 : l'interface de l'outil

III.1.INTRODUCTION :

Les données sur les caractéristiques thermiques des matériaux sont dispersées dans différents ouvrages et documents techniques, ce qui rend leurs utilisations parfois fastidieuses.

Dans ce chapitre nous essayons de récolter le maximum de données sur les caractéristiques thermiques des matériaux de construction pour constituer une base (banque) de données qui peut être utilisée par les utilisateurs potentiels : étudiants, concepteurs, calculateurs,...

III.2.Les bétons :

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment et d'eau. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Il existe plusieurs types de bétons qui se différencient par les constituants (matrice, granulats lourd ou légers), par la masse volumique et par les techniques de fabrication et de mise en œuvre. [67]

D'après [19] on a :

Tableau III.1 : conductivité thermique des bétons.

Matériaux	Composition	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Béton traditionnel	Béton plein	2200 à 2500	1.75
	Béton caverneux	1700 à 2100	1.40
Béton de granulats légers	Pouzzolane ou laitier expansé	1700	0.52
	Cendre volantes	1100	0.35
	Ponce naturel	1000	0.46
Béton d'argile expansée	Plein sans fin d'argile expansée	1400 à 1600	0.85
	Caverneux sans fine d'argile expansée	800 à 1000	0.35
	Caverneux à faible dosage ciment	600 à 800	0.26
Béton cellulaire		800	0.33
		600	0.22
		400	0.16
Béton de bois	Copeaux de bois	450 à 650	0.16

- D'une façon générale, on remarque que la conductivité des bétons diminue avec la diminution de la masse volumique.
- La diminution de la masse volumique est obtenue soit en utilisant des granulats légers ou par incorporation de vides à l'intérieur de la masse de béton (béton caverneux, bétons cellulaire)

III.3. Les mortiers :

Le mortier est un des matériaux de construction, qui contient un liant (ciment ou plâtre ou chaux), des granulats fins dit charge (tel le sable, ce qui le distingue du béton) et de l'eau. En raison de sa granularité fine. [8]

D'après [29] on a :

Tableau III.2. Conductivité thermique de mortier

Matériaux	Masse volumique ρ (Kg/m ³)	Conductivité thermique λ (w/m.K)
Mortier de chaux	1800	0.87
Mortier bâtard	1900	1
Mortier de ciment	2200	1.40

- Comme pour les bétons, la conductivité thermique des mortiers diminue avec la diminution de la masse volumique.

III.4. Les métaux :

Dans la conception des bâtiments, l'acier est le métal le plus utilisée pour son résistance à la traction.

D'après [9] on a :

Tableau III.3. conductivité thermique des métaux.

Matériaux	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Acier	7780	52
Aluminium	2700	230
Cuivre	8930	380
Fer	7870	72
Plomb	11340	35
Zinc	7130	112

- Les métaux sont considérés comme les matériaux qui ont les plus fortes conductivités thermiques ;ce sont donc des conducteurs électriques et thermiques.
- Contrairement aux bétons et aux mortiers, la conductivité thermique des métaux n'est pas proportionnelle à la masse volumique. En effet, on remarque que le plomb qui a la plus grande masse volumique (11340 kg/m³) présente la conductivité thermique la plus faible (35 w/m.°C)

III.5. Le bois :

Le matériau bois est représenté par de très nombreuses essences indigènes ou exotiques, résineuses ou feuillues. Outre les caractéristiques de textures, de couleurs de résistance ou de durabilité, la disponibilité du matériau est à prendre en compte au moment du choix final.[69]

D'après [19] on a :

Tableau III.4.la conductivité thermique du bois .

Matériaux	Composition	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Bois naturel			
Bois naturel	Bois lourds Feuillus (chêne, hêtre dur, frêne, fruitier, pitchpin)	800 à 1000	0.29
	Feuillus (tilleul, bouleau, érable, frêne, chêne, hêtre, tendre)		0.23
	Résineux (pin Sylvester, pin maritime)		0.12
	Résineux (sapin, épicéa)		0.15
	Très léger	60 à 120	0.052
Bois – panneaux dérivées du bois			
Panneaux de fibres de bois	Durs et extra durs	900	0.2
	Tendre (isolants)	200/250	0.058
	Tendres spéciaux	250 à 300	0.065
Panneaux de fibres de cellulose		20	0.043
		100	0.035

Panneau de fibres végétales		20	0.040
		80	0.035
Panneau de particules (ligno-cellulosiques)	Pressés à plat	600 à 700	0.15
	Extrudés	600 à 700	0.16
Panneau (particule de lin)		700	0.14
		600	0.12
		500	0.1
		400	0.085
		300	0.078

D'après le tableau III.4 :

- D'une façon générale, la conductivité thermique du bois est proportionnelle à la masse volumique sauf pour certains types de panneaux (de cellulose et végétale).
- Le bois est un matériau très intéressant point de vue conductivité thermique car c'est une ressource renouvelable et non polluante.

III.6.Le liège :

Parmi les matériaux poreux utilisés dans l'isolation thermique et acoustique des bâtiments, le liège est un produit 100 % naturel et écologique. Le liège, seul matériau naturellement isolant possédant à la fois un tel pouvoir et une telle résistance mécanique, ajoute à ses qualités d'isolant thermique une caractéristique qui contribue au confort du cadre de vie : l'isolation phonique. [48]

D'après [19] on a :

Tableau III.5.la conductivité thermique de liège

Matériau	Composition	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Liège	Comprimé	500	0.1
	Expansé dur	100 150	0.043
	Expansé aggloméré au brai ou résine synthétique	150 /250	0.048

D'après le tableau III.5 :

- Le liège expansé est considérés comme un matériau isolant, pour sa faible conductivité.

III.7. Air et eau :**D'après [19] on a :***Tableau III.6.la conductivité thermique de l'air et l'eau.*

Matériaux	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.°C)
Air sec	1.3	0.02
Eau	1000	1

- On remarque que l'air présente une conductivité thermique intéressante car il est gratuit et facile d'utilisation.

III.8. Brique de terre cuite :

Les matériaux de terre cuite ont été utilisés depuis plusieurs siècles, ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs, dans le domaine traditionnel industriel. Ils sont fabriqués à partir d'argile devenant souvent rouge à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose à jaune et blanc).[58]

D'après[29] on a :*Tableau III.7. Les propriétés thermiques de briques de terre cuite.*

Matériaux	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Effusivité Thermique (j/m ² .s.°C)	Diffusivité Thermique (10 ⁻⁷ m ² /s)
Brique terre cuite pleine	1900	1.15	1370	7
Brique terre cuite creuse	700 à 1000	0.35	470 à 560	5.6 à 3.9
Brique terre cuite monomur (37cm)	700 à 800	0.15	324 à 346	2.1 à 1.9

D'après le tableau III.7 :

- La brique de terre cuite qui est très utilisée de part le monde, présente une conductivité thermique convenable, surtout pour la brique creuse.
- L'utilisation de la brique pleine exige une épaisseur importante pour avoir une résistance thermique adéquate ; ce qui se faisait dans le passé par nos ancêtres dans les villages et montagnes.

-

III.9. Les roches et les sols :**D'après [74] on a :***Tableau III.8. la conductivité thermique des roches*

Matériaux	Masse volumique $\rho(\text{Kg/m}^3)$	Conductivité thermique $\lambda (\text{W/m.K})$
Granite	$2\ 500 \leq \rho \leq 2\ 700$	2.8
Schistes, ardoises	$2\ 000 \leq \rho \leq 2\ 800$	2.2
Basalte	$2\ 700 \leq \rho \leq 3\ 000$	1.6
Trachyte	$2000 \leq \rho \leq 2\ 700$	1.1
Pierre naturelle poreuse	$\rho \leq 1\ 600$	0.55
Marbre	$2\ 600 \leq \rho \leq 2\ 800$	3.5
Pierres froides	$2\ 200 \leq \rho \leq 2\ 590$	2.3
Pierres dures	$2\ 000 \leq \rho \leq 2\ 190$	1.7
Pierres fermes, demi-fermes	$1800 \leq \rho \leq 1\ 990$	1.4

D'après [74] on a :*Tableau III.9. la conductivité thermique des sols*

Matériaux	Conductivité thermique $\lambda(\text{W/m.K})$
Argile ou limon	1.5
Sable ou gravier	2

D'après les tableaux III.8 et III.9 :

- la pierre naturelle poreuse a la plus faible conductivité par rapport aux autres roches.
- D'une façon générale, la conductivité thermique de la pierre est proportionnelle à la masse volumique.
- Les roches homogènes et dures comme le granite et le marbre ont les conductivités thermiques les plus élevées.

III.10.Plâtre :

Le plâtre est un matériau très répandu, utilisé en enduits ou en élément préfabriqués pour réaliser des cloisons légères, et de faible prix de revient.

Le plâtre cependant un matériau très intéressant sur le plan scientifique : c'est un liant hydraulique, mais de structure nettement plus simple que celle du ciment.[57]

D'après [74] on a :

Tableau III.10.conductivité thermique de plâtre

Matériaux	Masse volumique ρ (Kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/(m.K))
Plâtre « gaché serré » ou « très serré » (plâtre de très haute dureté (THD), plâtre projeté et plâtre fin)	$200 < \rho \leq 1\ 500$	0,56
	$900 < \rho \leq 1\ 200$	0,43
	$600 \leq \rho \leq 900$	0,30
	$\rho \leq 600$	0,18
Plâtre courant d'enduit intérieur plâtre fin de construction (PFC) ou plâtre gros de construction (PGC)	$1\ 000 \leq \rho \leq 1\ 300$	0,57
	$\rho \leq 1\ 000$	0,40
Enduit intérieur à base de plâtre et de sable Plaques de plâtres à parement de carton « standard » et « haute dureté » ou éléments préfabriqués en plâtre à parements lisses	$\rho \leq 1\ 600$	0.80
	$750 \leq \rho \leq 900$	0.25

D'après le tableau III.10 :

- Les plâtres d'utilisation très courante, présente une bonne conductivité thermique. Ceci incite son utilisation dans les enduits et comme éléments préfabriqués à la place du ciment.

III.11. Matières plastiques synthétiques compactes, mastics et produits d'étanchéité :**III.11.1. Matières synthétiques compactes d'usage courant dans le bâtiment :****D'après [74] on a :***Tableaux III.11. Les propriétés thermiques de matières synthétiques compactes d'usage courant dans le bâtiment.*

Matériaux ou application	Masse volumique ρ (Kg/m³)	Conductivité thermique en λ (W/m.K)	Capacité thermique massique C_p J/(Kg.K)
Néoprène (polychloroprène)	1240	0.23	2140
Butyle, plein coulé à chaud	1200	0.24	1400
Caoutchouc mousse	60-80	0.06	1500
Caoutchouc dur, plein	1200	0.17	1400
Éthylène propylène diène monomère (EPDM)	1150	0.25	1000
Polyisobuthylène	930	0.20	1100
Polysulfure	1700	0.40	1000
Butadiène	980	0.25	1000
Acryliques	1050	0.20	1500
Polycarbonates	1200	0.20	1200
Polytétrafluoréthylène (PTFE)	200	0.25	1000
Chlorure de polyvinyle (PVC)	1390	0.17	1900
Polyméthylméthacrylate (PMMA)	1180	0.18	1500
Polyacétate	1410	0.30	1400
Polyamide (nylon)	1150	0.25	1600
Polyamide 6.6 avec 25 % de fibres de verre	1450	0.30	1600
Polyéthylène/polythène, haute densité	980	0.50	1800
Polyéthylène/polythène, basse densité	920	0.33	2200
Polypropylène	910	0.22	1800
Polypropylène avec 25 % de fibres de verre	1200	0.25	1800
Polyuréthane (PU)	1200	0.25	1800

Résine époxy	1200	0.20	1400
Résine phénolique	1300	0.30	1700
Résine polyester	1400	0.19	1200

D'après le tableau III.11 :

- La conductivité thermique de ces produits est assez comparable, sauf pour le caoutchouc mousse qui peut constituer un bon isolant.

- **Mastics pour joints, étanchéité et coupure thermique :**

D'après [74] on a :

Tableau III.12 Les propriétés thermiques des mastics

Matériaux ou application	Masse volumique ρ (Kg\m ³)	Conductivité thermique en λ (W/(m.K))
Silicagel (dessicatif)	720	0.13
Silicone pur	1200	0.35
Silicone mastic	1450	0.50
Mousse de silicone	750	0.12
Uréthane polyuréthane (coupure thermique)	1300	0.21
Chlorure de polyvinyle flexible avec 40 % de plastifiant	1200	0.14
Mousse élastomère flexible	60-80	0.05
Mousse de polyuréthane (PU)	70	0.05
Mousse de polyéthylène	70	0.05

D'après le tableau III.12 :

- Les mousses présentent des performances thermiques très intéressantes qui peuvent être exploitées pour remplir le vide entre les parois et améliorer ainsi la résistance thermique de la paroi.

III.11.2.Produits d'étanchéité :

- **Asphalte :**

Matériau artificiel constitué d'asphalte naturel, de fillers et de bitume, fabriqué et appliqué à chaud par coulée, utilisé comme produit d'étanchéité, revêtement de voirie ou colle de revêtement.[77]

D'après [74] on a :

Tableau III.13.les propriétés thermiques d'asphalte

Matériaux ou application	Masse volumique ρ (Kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/(m.K))
Asphalte pur	$\rho \leq 2\ 100$	0.70
Asphalte sablé		1.15

D'après le tableau III .13 :

- L'asphalte pur a une faible conductivité par rapport l'asphalte sablé.

- **Bitume :**

Les bitumes sont utilisés pour la fabrication des membranes d'étanchéité et pour le collage à chaud des différentes couches qui constituent une toiture plate : pare-vapeur, isolant, membrane d'étanchéité. Ils entrent également dans la composition de l'asphalte.

Le bitume est un mélange visqueux noir ou brun foncé, d'hydrocarbures obtenu par distillation du pétrole.[78]

D'après [74] on a :

Tableau III .14.les propriétés thermiques de bitume

Matériaux ou application	Masse volumique ρ (Kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/m.K)
Pur	$\rho \leq 1\ 050$	0.17
Cartons feutres et chapes souples imprégnées	$1\ 000 \leq \rho \leq 1\ 100$	0.23

D'après le tableau III.14

- le bitume pur est plus isolant que le feutre et chape souple imprégnées.

III.12. Le verre :**D'après [74] on a :***Tableau III .15. conductivité thermique de verre.*

Matériaux ou application	Masse volumique ρ (Kg/m ³)	Conductivité thermique λ (W/(m.K))
Verre sodo-calcaire	2500	1
Pâte de verre	2000	1.2
Quartz	2200	1.4

D'après le tableau III.15

- La conductivité du verre a une relation proportionnelle avec la masse volumique, lorsque la masse volumique augmente la conductivité diminue.

III.13. Matériaux isolants :

Un matériau est considéré comme isolant (RT 2012) lorsque que sa conductivité thermique est inférieure à : 0,065 W.m⁻¹.K⁻¹.

D'après [29] on a :*Tableau III.16. La conductivité thermique des matériaux isolants*

Matériaux	Masse volumique ρ (Kg/m ³)	Conductivité thermique en λ (W/(m.K))
Laine roche		
Classe RA	$18 \leq \rho \leq 80$	0.038 à 0.047
Classe RB	$60 \leq \rho \leq 180$	0.039 à 0.041
Laine de verre		
Classe VA	$7 \leq \rho \leq 65$	0.034 à 0.047
Classe VB	$7 \leq \rho \leq 65$	0.035 à 0.051
Classe VC	$7 \leq \rho \leq 130$	0.036 à 0.056
Classe VD	$9.5 \leq \rho \leq 25$	0.043 à 0.054
Classe VE	$55 \leq \rho \leq 130$	0.037 à 0.039
Polystyrène expansé		
découpé dans blocs moulé	$10 \leq \rho \leq 30$	0.035 à 0.047
en discontinu		
moulé en continue	$10 \leq \rho \leq 35$	0.035 à 0.047

Polystyrène extrudé		
Contenant d'air	$28 \leq \rho \leq 40$	0.042
Contenant de HCFC	$25 \leq \rho \leq 40$	0.035
Mousse de polyuréthane		
Découpé dans bloc moulés en discontinu	$30 \leq \rho \leq 100$	0.030 à 0.045
Moulé en continu	$27 \leq \rho \leq 35$	0.030
Plaque à base de perlite expansée	$180 \leq \rho \leq 275$	0.056 à 0.062
Plaque de verre cellulaire	$110 \leq \rho \leq 140$	0.050
Panneaux de chanvre	$35 \leq \rho \leq 40$	0.040 à 0.041
Panneaux de fibre de bois	$100 \leq \rho \leq 240$	0.040 à 0.047
Panneaux de laine de bois	$\rho \leq 50$	0.038
Ouate de cellulose	$30 \leq \rho \leq 70$	0.038 à 0.041
Panneaux de Ouate de cellulose	70	0.039
Laine de mouton	$12 \leq \rho \leq 35$	0.035 à 0.042
Laine de lin	$30 \leq \rho$	0.040
Plumes de canard	$20 \leq \rho \leq 30$	0.033 à 0.035

D'après le tableau III.16 :

Le polyuréthane a la plus faible conductivité thermique, donc c'est le meilleur isolant, mais il n'est pas intéressant pour l'environnement.

III.14. Quelques résultats des études menées à l'université de Biskra :**D'après [56] on a :***Tableau III.17 : les propriétés thermiques des différents bétons.*

	Béton ordinaire	Béton de liège	Béton de polystyrène	Béton de rachi
Conductivité λ (W/m.K)	1.414	1.224	1.058	1.010
Résistance R_{th} (m ² /K.W)	0.028	0.032	0.037	0.039
Chaleur spécifique (KJ/m ³ .K)	1380.6	1378.2	1153.5	1256

D'après le tableau III.17 :

Le béton de rachis présente la plus faible conductivité thermique par rapport aux autres bétons. Ce qui est très intéressant, vu que c'est un béton à base de matériau bio-sourcé disponible et renouvelable.

D'après [5] on a :*Tableau III.18 : propriétés thermiques du mortier ordinaire et de tiges de palmier dattier*

Matériaux	Conductivité λ (W/m.K)	Résistance thermique R (m².K /W)
Mortier ordinaire	1.39	0.020
Mortier de tiges de palmier dattier	1.33	0.022

D'après le tableau III.18 :

Le mortier de tiges de palmier est très intéressant car il a une conductivité plus faible que le mortier ordinaire et a un comportement ductile vis-à-vis de la fissuration. En plus les tiges de palmier sont disponibles en grande quantités.

IV.1.INTRODUCTION :

En utilisant un outil de calcul : Calculis, nous présentons dans ce chapitre des exemples de parois constituées de plusieurs couches dont on détermine les résistances thermiques. Une étude comparative est faite pour évaluer l'influence des différents matériaux sur les propriétés thermiques des parois. Le but de cette étude est de permettre à l'utilisateur de choisir suivant la disponibilité des matériaux, la solution la plus économique pour concevoir et choisir ses parois.

IV.2. Calcul des résistances thermiques et des déperditions :

Dans ce qui suit, on va calculer à l'aide de l'outil Calculis, les résistances thermiques à travers quelques parois. La formule utilisée est $R = e/\lambda$. A partir de là, on peut évaluer la déperdition thermique par la relation : $U = 1/R$

IV.2.1.Parois double :**IV.2.1.1.Parois double en briques :**

La paroi d'une épaisseur de 30 cm, est constituée de trois éléments : une brique creuse de 15 cm + un isolant de 5 cm + une brique creuse de 10 cm.

L'objectif est d'évaluer l'influence de l'isolant sur la résistance thermique de la paroi et l'effet des enduits.

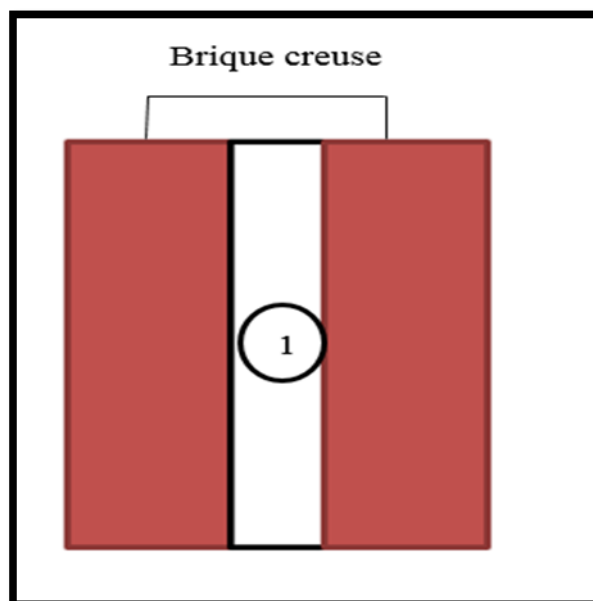


Figure IV.1 : Schéma d'une paroi à trois couches.

Tableau IV.1 : Effet de la nature de l'isolant sur la résistance thermique.

Composition de la paroi	L'épaisseur e (m)	Conductivité λ (w/m.K)	La résistance thermique R ($m^2.K.W^{-1}$)	Les coefficients de déperdition U ($W.m^2.K^{-1}$)
Mur de brique ①Lame d'air Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.5 0.35	0.98	1.020
Mur de brique ①Panneaux de polystyrène expansé Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.039 0.35	2.17	0.461
Mur de brique ①Panneaux de polystyrène extrudé Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.035 0.35	2.31	0.433
Mur de brique ①Panneaux de liège expansé Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.049 0.35	1.90	0.524
Mur de brique ①Panneaux de laine de bois Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.042 0.35	2.07	0.483
Mur de brique ①Panneaux laine de verre Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.038 0.35	2.20	0.455
Mur de brique ①Panneaux de ouate de cellulouse Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.039 0.35	2.17	0.461
Mur de brique ①Panneaux de perlite expansée Mur de brique	0.15 0.05 0.10	0.35 0.05 0.35	2.03	0.493

D'après le tableau IV.1, on remarque que :

- Plus l'isolant a une faible conductivité thermique, plus la résistance thermique de la paroi est grande.
- L'utilisation des isolants performants à la place du vide d'air, donne des résistances thermiques très intéressantes.

- Parmi les matériaux isolants étudiés, le polystyrène extrudé donne la meilleure résistance thermique, suivi par la laine de verre. Ensuite vient le polystyrène expansé et la ouate de cellulose.
- Bien que le liège expansé soit considéré comme un bon isolant, ses performances thermiques sont moindres. Néanmoins, elles sont mieux que celles de la lame d'air.
- **Effet de l'enduit sur la résistance thermique :**

On présente dans ce qui suit, l'effet de la nature de l'enduit intérieur et extérieur sur la résistance thermique de la paroi.

Tableau IV.2 : Effet de la nature de l'enduit sur la résistance thermique

Composition	Epaisseur e(m)	Conductivité λ (W/m.K)	Résistance thermique R ($m^2.K.W^{-1}$)	Coefficient de déperdition U ($W.m^2.K^{-1}$)
Enduit en ciment Mur en brique Lame d'air Mur en brique Enduit en ciment	0.02 0.15 0.05 0.10 0.02	0.8 0.35 0.5 0.35 0.8	1.03	0.971
Enduit en ciment Mur en brique Lame d'air Mur en brique Enduit en plâtre	0.02 0.15 0.05 0.15 0.02	0.8 0.35 0.5 0.35 0.56	1.05	0.952
Enduit en ciment Mur en brique Lame d'air Mur en brique Enduit en chaux	0.02 0.15 0.05 0.15 0.02	0.8 0.35 0.5 0.35 0.7	1.04	0.340

D'après les résultats du tableau IV.2, on remarque que :

- Les résultats sont assez proches pour les trois types d'enduits, il n'y a pas une grande influence sur la résistance thermique. Ceci est dû à la faible épaisseur de l'enduit.
- L'enduit en plâtre pour la paroi intérieur, donne de meilleur résultat par rapport au ciment.

IV.2.1.2. Parois double en deux matériaux :

Le but de ce tableau est définir l'effet de la nature des matériaux de paroi sur la résistance thermique.

Tableau IV.3 : Effet de la nature de la paroi sur la résistance thermique.

Composition	Epaisseur e (m)	Conductivité λ (W/m.K)	Résistance R ($m^2.K.W^{-1}$)	Coefficients de déperdition U ($W.m^2.K^{-1}$)
Mur en brique creuse	0.15	0.35	2.17	0.461
Panneaux de polystyrène expansé	0.05	0.039		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		
Mur en bloc béton	0.15	0.952	1.9	0.526
Panneaux de polystyrène expansé	0.05	0.039		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		
Mur en béton armé	0.15	1.650	1.83	0.546
Panneaux de polystyrène expansé	0.05	0.039		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		
Mur en pierre	0.15	1.40	1.84	0.543
Panneaux de polystyrène expansé	0.05	0.039		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		
Mur en brique pleine	0.15	1	1.89	0.529
Panneaux de polystyrène expansé	0.05	0.039		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		

D'après les résultats du tableau IV.3, on remarque que :

- La brique creuse est le matériau qui a la bonne résistance par rapport les blocs de béton et les pierres.
- La brique pleine faible isolant par rapport la brique creuse, les creux jouent un bon rôle dans la résistance thermique de paroi.

IV.2.2. Parois simples avec enduits :

Pour définir l'effet de la nature de matériau, on va utiliser un mur simple paroi avec la variation de la nature de matériaux de construction.

Tableau IV.4 : *Effet de la nature du matériau sur la résistance thermique d'une paroi simple.*

Composition	Epaisseur e (m)	Conductivité λ (W/m.K)	Résistance R(m ² .K.W ⁻¹)	Coefficients de déperdition U (W.m ⁻² .K ⁻¹)
Enduit en ciment Mur en brique creuse Enduit en ciment	0.02 0.15 0.02	0.8 0.35 0.8	0.69	1.440
Enduit en ciment Mur en bloc béton (parpaing) Enduit en ciment	0.02 0.15 0.02	0.8 0.95 0.8	0.42	2.381
Enduit en ciment Mur en béton armé Enduit en ciment	0.02 0.15 0.02	0.8 1.65 0.8	0.35	2.857
Enduit en ciment Mur en pierre Enduit en ciment	0.02 0.15 0.02	0.8 1.40 0.8	0.36	2.778

Par D'après le tableau IV.3, on peut dire que :

- Par rapport au béton et à la pierre, les briques de terre cuite donnent les meilleurs performances thermiques, suivis par les blocs de parpaing de ciment.
- La résistance thermique diminue énormément lorsqu'on utilise une simple paroi de 15 cm : $R=0.69\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ au lieu de $1.03\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$ pour une paroi double de 30 cm.
- **Effet de l'épaisseur sur la résistance thermique d'une paroi simple :**

On présente dans ce qui suit, l'effet de l'épaisseur de matériau sur la résistance thermique de la paroi. On va utiliser une paroi simple avec l'augmentation de l'épaisseur des matériaux qui se trouve dans le tableau IV.3.

Tableau IV.5 : Effet de l'épaisseur sur la résistance thermique d'une paroi simple

Composition	Epaisseur e (m)	Conductivité λ (W/m.K)	Résistance R ($m^2.K.W^{-1}$)	Coefficients de déperdition U ($W.m^2.K^{-1}$)
Enduit en ciment Mur en terre cuite Enduit en ciment	0.02 0.20 0.02	0.8 0.35 0.8	0.79	1.266
Enduit en ciment Mur en bloc béton(parpaing) Enduit en ciment	0.02 0.20 0.02	0.8 0.952 0.8	0.43	2.326
Enduit en ciment Mur en béton armé Enduit en ciment	0.02 0.20 0.02	0.8 1.650 0.8		
Enduit en ciment Mur en pierre Enduit en ciment	0.02 0.20 0.02	0.8 1.40 0.8	0.36	2.778

D'après le tableau IV.5, on remarque :

- Les performances thermiques des parois augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi. Néanmoins, cette augmentation ne remplace pas l'utilisation de la double paroi qui s'avère la conception la plus efficace

➤ **IV.1.3. Parois triples :**

Dans ce cas on va étudier l'effet du dédoublement de la couche de matériaux isolants..

Tableau IV.6: Effet du dédoublement de l'isolant sur la résistance thermique d'une paroi en brique.

Composition de la paroi	L'épaisseur e (m)	Conductivité λ (w/m.K)	La résistance thermique R (m ² .K.W ⁻¹)	Les coefficients de déperdition U (W.m ² .K ⁻¹)
Mur de brique	0.10	0.35	0.98	1.020
Lame d'air	0.02	0.5		
Mur de brique	0.05	0.35		
Lame d'air	0.03	0.5		
Mur de brique	0.10	0.35		
Mur de brique	0.10	0.35	2.17	0.461
Panneaux de polystyrène expansé	0.02	0.039		
Mur de brique	0.05	0.35		
Panneaux de polystyrène expansé	0.03	0.039		
Mur de brique	0.10	0.35		
Mur de brique	0.10	0.35	2.31	0.433
Panneaux de polystyrène extrudé	0.02	0.035		
Mur de brique	0.05	0.35		
Panneaux de polystyrène extrudé	0.03	0.035		
Mur de brique	0.10	0.35		

D'après le tableau IV.6, on remarque que :

- ✓ Le déboulement du matériau isolant n'a aucun effet sur la résistance thermique de la paroi, ça nous donne le même résultat pour un isolant (tableau IV.1). Ceci est dû à l'épaisseur de la paroi qui reste fixée.

- L'effet d'utilisation de deux couches d'isolation différente :

Dans ce cas on va étudier l'effet de deux couches d'isolation, et on fixe la lame d'air comme première couche.

Tableau IV.7.l'effet d'utilisation de deux isolants différents.

Composition	Epaisseur (m)	Conductivité λ (W/m.K)	Résistance thermique R ($m^2.K.W^{-1}$)	Coefficient de déperdition U ($W.m^2.K^{-1}$)
Mur en brique creuse	0.10	0.35	1.78	0.5618
Lame d'air	0.02	0.50		
Mur en brique creuse	0.05	0.35		
Panneaux de polystyrène extrudé	0.03	0.035		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		
Mur en brique creuse	0.10	0.35	1.69	0.591
Lame d'air	0.02	0.50		
Mur en brique creuse	0.05	0.35		
Panneaux de polystyrène expansé	0.03	0.039		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		
Mur en brique creuse	0.10	0.35	1.64	0.610
Lame d'air	0.02	0.50		
Mur en brique creuse	0.05	0.35		
Panneaux laine de bois	0.03	0.042		
Mur en brique creuse	0.10	0.35		
Mur en terre cuite	0.10	0.35	1.71	0.585
Lame d'air	0.02	0.50		
Mur en terre cuite	0.05	0.35		
Panneaux laine de verre	0.03	0.038		
Mur terre cuite	0.10	0.35		
Mur en terre cuite	0.10	0.35	1.69	0.591
Lame d'air	0.02	0.50		
Mur en terre cuite	0.05	0.35		
Panneaux de ouate de celluleuse	0.03	0.039		
Mur terre cuite	0.10	0.35		
Mur en terre cuite	0.10	0.35	1.54	0.640
Lame d'air	0.02	0.50		
Mur en terre cuite	0.05	0.35		
Panneaux de liège expansé	0.03	0.049		
Mur terre cuite	0.10	0.35		

D'après le tableau IV.7, on remarque que :

- ✓ La résistance thermique d'une paroi contenant deux couches d'isolation est plus forte que celle d'une paroi qui contient une couche d'isolation.
- ✓ Le polystyrène extrudé avec la lame d'air représente une bonne solution technico-économique.
- ✓ L'utilisation de deux isolants ayant de faibles conductivités, donnent des résistances thermiques excellentes.

IV.3. Analyse des résultats :

D'après les résultats obtenus dans les tableaux précédents :

- Le polystyrène extrudé est un très bon isolant par rapport aux autres matériaux isolants.
- L'épaisseur de la paroi joue un rôle important dans la résistance thermique ; lorsqu'on augmente l'épaisseur, la résistance augmente automatiquement.
- Les enduits n'ont pas une influence significative sur la résistance thermique des parois.
- La multiplication des couches d'isolants améliore la résistance thermique. Néanmoins, il faut tenir compte du facteur économique dans le choix des isolants.

Conclusion générale

Le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe représente un enjeu considérable pour la réduction des consommations énergétiques dans le secteur du bâtiment.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, c'est la caractérisation thermique des matériaux utilisés pour la construction des parois composant l'enveloppe du bâtiment dans le but d'améliorer son isolation thermique.

En calculant la résistance thermique et le coefficient de déperdition nous pouvons contrôler la construction avec suivi des toutes les normes modernes telles que le confort thermique et l'utilisation des isolants.

- D'une façon générale, on remarque que la conductivité des bétons diminue avec la diminution de la masse volumique. La diminution de la masse volumique est obtenue soit en utilisant des granulats légers ou par incorporation de vides à l'intérieur de la masse de béton (béton caverneux, bétons cellulaire)
- Contrairement aux bétons et aux mortiers, la conductivité thermique des métaux n'est pas proportionnelle à la masse volumique. En effet, on remarque que le plomb qui a la plus grande masse volumique (11340 kg/m^3) présente la conductivité thermique la plus faible ($35 \text{ w/m.}^\circ\text{C}$)
- Le bois est un matériau très intéressant point de vue conductivité thermique car c'est une ressource renouvelable et non polluante.
- La brique de terre cuite qui est très utilisée de part le monde, présente une conductivité thermique convenable, surtout pour la brique creuse.
- L'utilisation de la brique pleine exige une épaisseur importante pour avoir une résistance thermique adéquate ; ce qui se faisait dans le passé par nos ancêtres dans les villages et montagnes.
- la pierre naturelle poreuse a la plus faible conductivité par rapport aux autres roches.
- Les plâtres d'utilisation très courante, présente une bonne conductivité thermique. Ceci incite son utilisation dans les enduits et comme éléments préfabriqués à la place du ciment.

- Les mousses présentent des performances thermiques très intéressantes qui peuvent être exploitées pour remplir le vide entre les parois et améliorer ainsi la résistance thermique de la paroi.
- Le béton de rachis présente la plus faible conductivité thermique par rapport aux autres bétons. Ce qui est très intéressant, vu que c'est un béton à base de matériau bio-sourcé disponible et renouvelable.
- Le mortier de tiges de palmier est très intéressant car il a une conductivité plus faible que le mortier ordinaire et a un comportement ductile vis-à-vis de la fissuration. En plus les tiges de palmier sont disponibles en grande quantités.
- Parmi les matériaux isolants étudiés, le polystyrène extrudé donne la meilleure résistance thermique, suivi par la laine de verre. Ensuite vient le polystyrène expansé et la ouate de cellulose.
- Bien que le liège expansé soit considéré comme un bon isolant, ses performances thermiques sont moindres. Néanmoins, elles sont mieux que celles de la lame d'air.
- Par rapport au béton et à la pierre, les briques de terre cuite donnent les meilleurs performances thermiques, suivis par les blocs de parpaing de ciment.
- Les performances thermiques des parois augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi. Néanmoins, cette augmentation ne remplace pas l'utilisation de la double paroi qui s'avère la conception la plus efficace.
- Le déboulement du matériau isolant n'a aucun effet sur la résistance thermique de la paroi, ça nous donne le même résultat pour un isolant (tableau IV.1). Ceci est dû à l'épaisseur de la paroi qui reste fixée.

Pour l'isolation thermique des parois verticales, la solution la plus économique c'est d'utiliser un double mur avec une lame d'air au milieu. Elle est moins coûteuse et en même temps, c'est une isolation thermique et phonique.

Références bibliographiques

- [1] **AÏSSANI, Amina.** *Optimisation fiabiliste des performances énergétiques des bâtiments.* Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. 2016.
- [2] **ANH, Dung Tran le.** *Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment (sous-titre : simulation numérique et approche expérimentale).* Thèse de doctorat . Université de Reims-Champagne Ardenne. 2010.
- [3] **AURENT.M, VUILLERMOZ,P.** Conductivité thermique des solides. *Techniques de l'ingénieur, traité Constantes physico-chimiques K*, 1993, 420
- [4] **DRAOULA., MENEZO. CH .YEZOU, BBABBAH. Somia.** Evaluation Energétique des Bâtiments au Nord du Maroc. *Journées Internationales de Thermique*, 2005
- [5] **BELHADJ, Saida.** *Etude de l'influence du mode de cure sur les caractéristiques mécanique des mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier .*Mémoire de master. Université Khider Mohammed Biskra . 2017.
- [6] **BEKKOUCHE.S,BENOUAZ.T,CHEKNANE.A.** Etude par simulation de l'effet d'isolation thermique d'une pièce d'un habitat dans la région de Ghardaïa. *Revue des Energies Renouvelables*,2007.
- [7] **BENSEGHIRA, Elmouatez Billah.** *Etude de l'isolation thermique d'un local situé dans la région d'Ouargla (sud-est de l'Algérie).* Mémoire de master. Université Kasdi Merbah Ourgla. 2014.
- [8] **BENMANSOUR, Nadia.** *Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat.* Thèse de doctorat. Université El Hadj Lakhdar de Batna 1. 2015
- [9] **BERREHAIL, Tahar.** *La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable.* thèse de doctorat .Université Mentouri Constantine .2009 .

- [10] **BENSSENOUCI, Mohammed Zakaria.** *Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat.* Thèse de doctorat Université Abou bekr Belkaid .Telemcen . 2010.
- [11] **BOUKHATTEM, Lahcen.** *Caractérisation thermo physique des matériaux et modélisation des transferts couplés de chaleur a travers un bâtiment.* Thèse de doctorat.Université Ibn Zohr Aghadir . 2008.
- [12] **BENSAADA ,S. M.BOUZIANE .**Cours Transfer de chaleur .
- [13] **CHAHWANE, Loyal.** *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments.* 2011. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- [14] **CHABANE, Koceila .CHAOUCHÉ, Lyliia.** *Amélioration du confort thermique par la résolution des ponts thermiques dans l'habitat individuel. Cas d'une maison à Bouira.* 2017.Mémoire de Master. Université Abderrahmane Mira.
- [15] **CHEHEB, Zied.** *Mesure des propriétés thermiques des mélanges à base de caoutchouc dans les conditions de mise en oeuvre.* Thèse de doctorat. Nantes .2012.
- [16] **CHEBAANI, Souad.** *Modélisation Thermique d'Un Transformateur Utilisant Un Matériau Composite Fer-Résine.* Mémoire de master . Université de Batna 2. 2012.
- [17] **CHELGHOUIM, Z. BELHAMRI, A.** Analyse des propriétés thermiques des matériaux de constructions utilisent dans la ville de Tamanrasset. *Sciences & Technologie D*, 2011, 33: 47-56.Universite Mentouri Constantine, Algérie .
- [18] **CHERIER, Mohamed Kamel.** *Etude Théorique et Expérimentale de l'Isolation Thermique Intérieure d'une Pièce d'un Habitat dans la région de Ghardaïa.*Mémoire de master. Université Abou Bekr Belkaid. 2012.
- [19] **COUASNE, Yves. BLACHÈRE, Gérard.** *Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction.* Edition du Moniteur, 2005.
- [20] **DAHMANI, Saci .GHENDIR OUN, Bachir.** *Etude des caractéristiques thermiques des matériaux de construction 'cas de brique' .*Université Kasdi Merbah. 2011.
- [21] **DEHMOUS, M'hnd.** *Confort thermique dans les construction en béton préfabriqué cas faculté des sciences médicales de l'université Tizi-ouzou,* Université Mammeri Mouloud Tizi-ouzou. 2016.

- [22] **DIDA, Mustapha** . *Contribution à l'étude de l'effet d'isolation thermique sur la consommation énergétique des bâtiments*. Mémoire de master. Université Kasdi Merbah Ouargla . 2016.
- [23] **DUTA, A. NOEL, J. ROUX, J.** CODYBA-V6. 0 : new version of software for building dynamical behaviour simulation. In: *PLEA*. 2000.
- [24] **Eugene, dimitriu-valcea** .*Isolation thermique des constructions en Algérie*, Achever d'imprimer sur les presses de l'Entreprise Nationale des Arts Graphiques Unité Ahmed zabana –Alger, 1986
- [25] **FERRADJI, Kenza**. *Evaluation des performances énergétiques et du confort thermique dans l'habitat : Cas des logements HPE de l'OPGI de Blida*. Mémoire de master. Université Mohamed Khider-Biskra. 2017.
- [26] **FILALI, Mohamed**. *Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures*. Thèse de doctorat .École doctorale : TYFEP. 2006.
- [27] **FOURA, Samir**. *Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie*. Thèse de doctorat .Université MENTOURI Constantine. 2008.
- [28] **Fragos, M.** et Trouillez «Le guide de l'isolation ; Mieux comprendre pour bien choisir», Edition Comprendre choisir.com, Paris. 2012. Téléchargeable du site www.comprendrechoisir.com consulté le 13. 05. 2014
- [29] **GALLAUZIAUX, Thierry.FEDULLO, David**. *Le grand livre de l'isolation*. Eyrolles, 2010.
- [30] **GALLAUZIAUX, Thierry. FEDULLO, David**. *L'isolation thermique*. Eyrolles. 2010.
- [31] **GACEM, Mohamed**. *Comparaison entre l'isolation thermique Extérieure et Intérieure d'une pièce d'un Habitat situé dans le Site de Ghardaïa*. Université Abou baker Blkaid .2010
- [32] Guide technique «Guide des matériaux isolants», energivie.info
- [33] **GHEDAMSI, Rébh**. *Elaboration d'un matériau de construction en vue de l'isolation thermique des bâtiments*. Mémoire de master . Université Kasdi Merbah de Ouargla. 2013.
- [34] Guide maghrébin des matériaux d'isolation thermique de bâtiment. REME, Edition 2010
- [35] Guide des matériaux isolants, Edition Espace Info-Energie .Téléchargeable du site : www.eie43.fr

- [36] Matériaux d'isolation thermique : choisir des matériaux sains : Avec un Ecobilan Favorable Juillet 2010. Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments , recommandation pratique MAT05
- [37] Guide de choix isolation Le centre expert pour l'émergence des éco technologie , ou service de développements des éco entreprise . September 2008
- [38] Guide pratique pour les architectes L'isolation thermique des façades verticales
- [39] **HAFSI, Fouad.** *Contribution à l'étude de l'isolation thermique des bâtiments dans les zones désertiques.* 2010 .Mémoire de Master .Université Gasdi Merbah Ourgula .2010 .
- [40] **HAKKOUM, Soumia.** *Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de Ouargla.* Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah Ouargla .2015.
- [41] **HAMIDA, Mohamed Lamine.** *Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction.* Mémoire de Master . Université Mentouri Constantine.2010.
- [42] **HANDJAR, Mahdia .** *Etude d'une technique d'isolation thermique des bâtiments dans la région de sud Algérien.* Mémoire de Master. Université KASDI Merbah Ouargla 2013.
- [43] **HAZEM, Ahmed.** *Méthodologie d'Optimisation Énergétique d'un Bâtiment Equipé d'une Double Façade Ventilée (DFV).* 2018. Mémoire de Master. Université de Batna 2.
- [44] **HOLGER, Hendrichs.** Guide pratique .Coefficient de transmission thermique.
- [45] **JANNOT, Yves. MOYNE, Christian.** *Transferts thermiques.* Cours et 55 exercices corrigés. 2016.
- [46] **KAEMMERLEN, Aurélie.** *Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment.* Thèse de doctorat . Nancy 1. 2009.
- [47] **KHAB, Hayet.** Etude du comportement hygrothermique d'éléments de construction. Application aux toitures. Mémoire de Master. Université Mentouri de constantine . 2007.
- [48] **Kellati, N. El Bouardi, A. Ajzoul, T. et Ezbakhe, H.** Etude de propriétés thermophysiques et acoustiques du liège compact et granulaire." *Revue des Energies Renouvelables CER 7 (2007): 241-4.* Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan, Maroc
- [49] **KUZNIK, F.; VIRGONE, J.** Compréhension des effets de l'inertie thermique: cas des parois contenant des matériaux à changement de phase. In: *Congrès de l'AUGC.* 2006.

- [50] **LANGLAIS, Catherine; KLARSFELD, Sorin.** Isolation thermique à température ambiante. Propriétés. *Techniques de l'ingénieur. Matériaux fonctionnels*, 2004, 1.BE9860.
- [51] **LEFEBVRE, Gilles.** Comportement thermique dynamique des bâtiments: simulation et analyse. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, B*, 1994, 2: 041-1.
- [52] **LEMTENNECHE, Abdallah. BOUGUENNOUR, Tarek.** *Etude expérimentale des transferts thermiques dans un local muni d'un isolant à base végétale.* Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah Ouargla.2017.
- [53] Matériaux d'isolation. Edition Espace Info-Energie. 30 Octobre 2012. Téléchargeable sur le site : www.eie-lorraine.fr
- [54] **MATI-BAOUCHE, Narimane.** *Conception d'isolants thermiques à base de broyats de tiges de tournesol et de liants polysaccharidiques.* Thèse de doctorat . Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. 2015.
- [55] **MATI-BAOUCHE, Narimane. BAYNAST, Hélène. MICHAUD ,Philippe.** *Conception d'isolants thermiques à base de broyats de tiges de tournesol et de liants polysaccharidiques.* Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. 2015.
- [56] **MGHEZZI HABELLAH, Akram.** *Etude des performances mécaniques et thermiques des bétons légers.* Mémoire de Master. Université Khider Mohammed biskra . 2017
- [57] **MEILLE, Sylvain.** *Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure.* Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2001.
- [58] **MEKHERMECHE, Abdessalam.** *Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes.* Mémoire de Master .Université KASDI Merbah Ourgla . 2012.
- [59] **MEUKAM, Pierre.** *Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments.* Université de Yaoundé I, 2004.
- [60] **MOUMENI, Abdelhamid.** *Analyse thermique des ailettes Détermination des profils de températures et des rendements de quelques formes géométriques simple.* Mémoire de Master. Université Gasdi Merbah Ouargla. 2013 .
- [61] **NGUYEN, Le Hung, et al.** *Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées: approche expérimentale et modélisation numérique.* Thèse de doctorat. Cergy-Pontoise. 2013.

- [62] NGUYEN, V. *Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température: application à des éprouvettes de grandes dimensions*. 2013. Thèse de doctorat . Université de Cergy Pontoise. 2013.
- [63] NOËL, Jean *Comparison with EMPA Cell Test Results*. 2005
- [64] NOËL, Jean. ROUX, Jean-Jacques. *CoDyBA Manuel Utilisateur*. 2007 .
- [65] Notice d'utilisation, *Outil de calcul automatique de résistance et de déphasage thermiques*, Le centre expert pour l'émergence des éco technologie , ou service de développements des éco entreprise .mai 2012
- [66] OUEDRAOGO, Emmanuel. COULIBALY, Ousmane. *Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment*. Journal of Materials and engineering structures. 2015. 68–76
- [67] PETIT, Amélie .NIMAGA, Fatoumata.*Analyse de confort thermique dans CODYBA* . IUP M1 GSI Maîtrise de l'énergie .université de Rouen.2008
- [68] RAIS, Ismahane. *Etude du confort thermique d'une construction pédagogique cas des amphis de l'ex centre universitaire de tébessa*. Thèse de doctorat . Université Larbi Tébessi – Tébessa.2017.
- [69] Rémy Delécluse. *Guide d'utilisation du bois*. Edition CNDB
- [70] SEDIRI, Fatima.RABAHI, Wafaa. *Mise au point et analyse thermique d'un nouveau matériau composite à base végétale destiné à réduire les déperditions thermiques des locaux*. 2016.Université Djilali Bounnaama Khmis-Miliana
- [71] SEWAN, das patle. *Analysis and measurement of thermophysical properties by temperature oscillation* . Thèse de doctorat . 2006.
- [72] SOTEHI, Nassima. *Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation*. Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine . 2010.
- [73] TANOI, Séverin Tchini .*Mesure des propriété thermiques thermophysiques des matériaux réfractaires par voie solaire*. Thèse de doctorat. Agence universitaire de la francophonie .2011.
- [74] Th-Bat, Règles. "Règles de calcul du coefficient GV des bâtiments d'habitation et du coefficient G1 des bâtiments autres que d'habitation." *Cahiers du CSTB 2256* (1988). Date de publication : 26/02/2015

[75] **TRAORÉ, Issiaka**. *Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois*. Thèse de doctorat. Nancy 1. 2011.

[76] **YVES, Jannot** .Cours de transferts thermiques, 2012.

[77] www.editions-eyrolles.com

[78] www.energieplus-lesite.be