

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences de la matière et mathématique

Département de physique



**Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences de la matière

Filière: physique

Spécialité : physique énergétique

Présenté par : Hamada Nedjoua

Mazouzi Khaoula

Thème

**Efficacité énergétique et nécessité de l'isolation
thermique pour un bâtiment**

Devant le jury :

Bechki Djamel

M.C.A

UKM Ouargla

Président

Tlili Salah

M.A. A

UKM Ouargla

Examineur

Mohcene Hocine

M.C.A

UKM Ouargla

Encadreur

2016/2017

The background of the entire page is a soft-focus image of several pink roses with green leaves. The roses are in various stages of bloom, and the lighting is warm and gentle, creating a romantic and elegant atmosphere. The text is overlaid on this background in a black, cursive font.

Dedicaces

Pour mes parents

A ma sœur et mes frères

*Pour tout mon meilleur ami et mes amis et
collègues*

Chaque famille Mazouzi

*Pour chaque personne que je connais dans ma
vie*

À la fois éclaire le chemin de la science

Et tous les étudiants KasdiMerbah



Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

A celui qui a été toujours Mon support dans cette vie, celui qui me donne le courage éclatant pour continuer à chaque fois que j'ai l'impression de reculer...

papa que DIEU vous protège

A celle qui était et qui restera mon soutien dans cette vie, à celle qui m'a renseigné comment aimer DIEU ; comment fait apparaître le succès et la prospérité du sein du mal et des problèmes... à vous maman, que DIEU vous protège et vous donne la pleine santé et le plein bonheur du monde, de joie et d'attestations.

A Mon très cher frère imad , et Mes très chères sœurs Samira, Siham, ikram, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.

A mes amies, khaoula, houda, mbarqa, fayza, kholtom, wafaa, afaf, imane, lamia, Iman, rajaa, aicha ,rokaia , zouhayra, hyzaia, saida ; zohra ,zahia, natari ,kanza, fariha...

Et tous mes Amis et la famille HAMADA sans exception.

A tout les étudiants d'université d'Ouargla.





Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce mémoire par des remerciements, à Dieu le tout puissant qui donné, le pouvoir et la patience pour le terminer.

*Toutes mes infinies gratitudees à mon promoteur, **Ms MOHCEN HOCIN**, M.C.A à l'université pour son encadrement et ses aides précieuses, leurs conseils, tout au long de ce modeste travail*

*Je tiens à remercier profondément Ms **Bechki Djamel**, M.C.A et Ms **Tili Salah** Maître assistant A à l'université **KASDI MERBAH** d'Ouargla, d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour son soutien morale inoubliable.*

Je remercie aussi les membres de jury qui j'ai fait l'honneur d'accepter le jugement de mon travail.

*Mon sincère reconnaissance à mes enseignants du département: **PHYSIQUE***

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin de ce modeste travail, trouvent ainsi l'expression de mon profondes gratitudees et respects.



Sommaire

Page

LISTE DES TABLEAUX.....	I
LISTE DES FIGURES.....	II
NOMENCLATURES	III
INTRODUCTION GENERALE.....	VII

CHAPITRE1 : CADRE DE L'ETUDE

INTRODUCTION	1
1. EFFICACITE ENERGETIQUE.....	1
2 .NECESSITE DE L'ISOLATION THERMIQUE.....	4
2.1.PRINCIPE.....	4
2.2. ISOLATION DES PAROIS.....	5
2.2.1. ISOLATION INTERIEURE.....	5
2.2.2. ISOLATION EXTERIEUR.....	5
2.2.3 ISOLATION INTEGREE AU MATERIAU PORTEU.....	6
3. COMPORTEMENT THERMIQUE.....	6
3.1 TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION.....	6
3.2 LE TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION.....	7
3.3 TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT.....	9
3.4 CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MILIEUX POREUX.	10
3.4.1GENERALITES.....	10
3.4.2. MODELISATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MILIEUX POREUX	10

3.4.2.1. MODELE SERIE.....	10
3.4.2.2. MODELE PARALLELE.....	11
3.5. RESISTANCE THERMIQUE.....	13
4. POSITIONNEMENT DE LA PROBLEMATIQUE	14

CHAPITRE 2. PRESENTATION DES MATERIAUX ETUDIES

INTRODUCTION	15
1. LE BETON	15
1.1. CONSTITUANTS DU BETON.....	16
1.1.1. CIMENT.....	16
1.1.1.1. DEFINITION.....	16
1.1.1.2. COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DU CIMENT.....	16
1.1.1.3 .HYDRATATION DU CIMENT.....	18
1.1.2. GRANULATS.....	18
1.1.2.1. GENERALITES.....	18
1.1.2.2. CARACTERISTIQUES DES GRANULATS.....	20
2. 1.3. EAU.....	21
1.2. PROPRIETES DES BETONS.....	21
2. LE LIEGE	22
2.1. DESCRIPTION	22
2.2. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES.....	22
2.3. STRUCTURE ALVEOLAIRE DU LIEGE.....	23
2. 4. COMPOSITION CHIMIQUE.....	25
2.4.1. LA SUBERINE.....	25
2.4.2. LA LIGNINE.....	26

2.4.3. LA CELLULOSE ET LES POLYSACCHARIDES.....	26
2.4.4. LES TANNINS.....	26
2.4.5. LES CEROÏDES	26
2.5. PREPARATION DU LIEGE.....	26
2.6 PROPRIETES DU LIEGE.....	28
3. LE POLYSTYRENE	38
3.1. COMPOSITION CHIMIQUE.....	29
3.2. FABRICATION DU POLYSTYRENE EXPANSE.....	30
3.3. PROPRIETES DU POLYSTYRENE.....	31
CONCLUSION.....	32

CHAPITRE 3 : MODELISATION DE TRANSFERT DE CHALEUR

INTRODUCTION.....	33
1. TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION EN REGIME PERMANENT.....	33
1.1. L'EQUATION DE LA CHALEUR.....	33
1.2 TRANSFERT UNIDIRECTIONNEL DANS UN MUR MULTICOUCHES.....	35
2. LES EQUATIONS UTILISEES ET LES CONDITIONS AUX LIMITES	36
3. RESULTATS ET DISCUSSION.....	39
CONCLUSION.....	43
CONCLUSION GENERALE.....	VIII
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	IX

Introduction Générale

Les bâtiments sont conçus pour protéger l'individu contre les changements climatiques (froid et chaud) afin de créer un environnement satisfaisant pour la pratique de différentes activités, avec une consommation moins d'énergie, il est considéré de réduire la quantité d'énergie consommée l'une des préoccupations des concepteurs de bâtiments, ce qui explique les techniques utilisées pour l'améliorer.

Le Sud algérien est connu par un climat estival de température très haute et en saison hivernale très basse, comme exemple les endroits d'Adrar, Ain Salah, Ghardaïa, Ouargla, El oued, Touggourt... Dans cette zone, les citoyens se plaignent des couts de la consommation d'énergie électrique, d'où la nécessité d'une isolation thermique pour réduire le transfert de chaleur

Ce travail met l'accent sur: (l'efficacité énergétique et nécessité de l'isolation thermique pour un bâtiment).

Les objectifs de ce travail : la connaissance du comportement thermique, les caractéristiques des matériaux de construction utilisés le béton allégé, du liège et polystyrène, aussi une étude numérique de transfert de chaleur dans les murs composés de matériau .Cette note a été organisée en trois chapitres :

Chapitre I : pour afficher le problème et l'examen de la documentation relative à l'efficacité énergétique et l'isolation thermique des bâtiments et l'importance de l'isolement que le lecteur trouvera des sujets liés aux types de transfert de chaleur en général.

Le chapitre II: se concentre sur la matière principale, la composition chimique et des procédés de fabrication étudiés.

Le chapitre III : la partie numérique où nous basons sur l'étude de la répartition de la température à travers le mur à l'aide de la simulation de MATLAB programme.

Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présentons tout d'abord, quelques généralités sur l'isolation thermique des bâtiments, puis une synthèse bibliographique sur l'efficacité énergétique et les comportements thermiques des matériaux composant les parois de l'enveloppe. Ceci nous conduira à poser la problématique de notre étude pour définir et justifier les axes de cette recherche.

1. Efficacité énergétique

Il existe plusieurs définitions de l'efficacité énergétique, nous retiendrons quelques-unes :

- C'est le rapport entre l'énergie directement utilisée (dite énergie utile) et l'énergie consommée (en général supérieure du fait des pertes)
- L'efficacité énergétique c'est réduire à la source la quantité d'énergie nécessaire pour un même service, mieux utilisé l'énergie à qualité de vie constante.
- L'efficacité énergétique se définit comme une consommation en énergie moindre pour le même service rendu.

La notion d'efficacité énergétique est à distinguer de celle de l'intensité énergétique, qui représente la quantité d'énergie consommée pour produire une quantité de produit intérieur brut. Elle ne se confond pas non plus avec celle de sobriété énergétique. Cette dernière est consensuelle si elle vise à éviter les gaspillages

De ces trois définitions se dégage un point commun, l'efficacité énergétique vise à réduire le rapport entre l'énergie utile et la consommation énergétique. On rajoutera le fait que la performance énergétique et aussi à distinguer de la notion d'efficacité énergétique qui est intimement liée à un objectif politique signifié en amont [1].

Bâtiment à Basse Consommation:

Bâtiment à basse consommation est un concept qui a été élaboré et mis en place sous forme de label par une association française, l'utilisation de la notion de Bâtiment à Basse Consommation est restrictive et n'est peut être employé que dans le cas où un bâtiment a obtenu le label français BBC. Il se définit comme suit : C'est un bâtiment qui consomme, pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, les auxiliaires et la climatisation, 50 kW hep/m² /an en énergie primaire (mètre carre de SHON (La surface hors œuvre nette) module selon la zone climatique et l'altitude [2].

Le label BBC peut être obtenu grâce à des combinaisons bâti/équipements qui permettent d'atteindre les seuils de performances indiqués [3]. On ajoutera que ce label a disparu au profit de la réglementation thermique 2012 qui l'inclut, ainsi toute les constructions résidentielles neuves doivent être des bâtiments à basse consommation, par ailleurs les rénovations thermique sont aussi contrainte de ne pas dépasser le seuil de $80 \text{ kW h/m}^2 / \text{an}$.

Bâtiments passives:

Le terme PassivHaus est un Label qui a été développé par l'institut de recherche allemand PassivHaus, - est dont le label BBC s'est inspiré - dont les besoins de chauffage (en énergie utile) sont de l'ordre de $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$ et la consommation en énergie primaire est inférieure à $120 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$ pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité. Ce terme peut être employé pour :

un bâtiment qui est quasiment autonome pour ses besoins en chauffage. Il utilise les apports gratuits (solaires, métaboliques, d'équipements) et présente une bonne isolation, le chauffage devenant un simple appoint. La référence allemande est appelée Passivas [2] .

Bâtiments à Zéro énergie:

C'est une notion qui est apparu suite à la construction d'une maison sans consommation de chauffage, sa consommation peut être assurée par une installation solaire, ce qui ramène sa consommation à zéro [1].

Bâtiments à énergie positive:

La définition d'une construction à énergie positive serait la suivante: Un ouvrage "passif" ou à très bas niveau de consommation d'énergie qui serait doté d'équipements de production d'énergie qui lui confèrent un bilan énergétique positif. En clair, ce type de construction produit plus d'énergie qu'il n'en consomme [4].

C'est la maison dont le bilan énergétique est positif, elle produise plus d'énergie qu'elle n'en consomme (via des capteurs photovoltaïques, chauffage à énergie renouvelable...). Ce type d'habitation demande un investissement initial très important [5]

Bâtiments bioclimatiques:

La conception bioclimatique d'un bâtiment vise à optimiser l'utilisation des apports solaires et de la circulation naturelle de l'air, limitant ainsi le recours au chauffage et à la climatisation. Elle valorise les avantages du terrain (orientation du bâtiment), l'orientation des pièces, les surfaces vitrées, L'inertie du bâtiment..[2]. Les maisons bioclimatiques ne retiennent que l'influence du climat, se protègent passivement de ses inconvénients, valorisent toujours passivement ses atouts [5]. Les maisons bioclimatiques reposent sur l'idée que l'édifice peut, par le choix de son orientation et sa conception, tirer le maximum d'énergie des éléments naturels et en particulier du climat et de la topographie locale [5].

Maison écologique:

Les bâtiments écologiques diffèrent des bâtiments conventionnels en raison de l'intégration d'objectifs sociaux et économiques. Les considérations environnementales correspondent en gros aux impacts écologiques directs et indirects, comme des émissions réduites de gaz à effet de serre ou une consommation d'eau réduite. Les considérations sociales peuvent être directement liées au bâtiment en soi (comme de l'air sain et confortable ou une lumière naturelle) ou déborder le cadre du bâtiment (promotion de l'utilisation des transports en commun ou densification urbaine).

La construction de bâtiments écologiques respecte un processus unique de réalisation de projet [6].

. Maisons solaires: Précurseurs des maisons bioclimatiques, elles n'utilisent que le soleil direct comme solution d'économie d'énergie [5].

2. Nécessité de l'isolation thermique

Les deux critères nécessaires de la conception thermique des bâtiments sont la protection des occupants d'une manière automatique et passive, des facteurs climatiques pluies, vent, rayonnement, chaud ou froid de diverses parois, et l'optimisation de la consommation énergétique. Le concepteur doit faire en sorte que cette consommation (production de chaud ou de froid) reste dans les limites fixées par la réglementation et les possibilités financières des occupants, tout en assurant un niveau de confort défini par le maître d'ouvrage. L'isolation thermique introduite par les différents éléments de l'enveloppe de bâtiment constitue un important critère de performance énergétique. Elle permet de réduire les déperditions de chaleur, de réaliser des économies de chauffage, de limiter les émissions de gaz à effet de serre, et de bénéficier d'un meilleur confort de vie [7].

2.1. Principe

Dés 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. Le but de l'isolation est de freiner cet échange de 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

La répartition des déperditions dans une habitation non isolée est illustrée par la figure1.

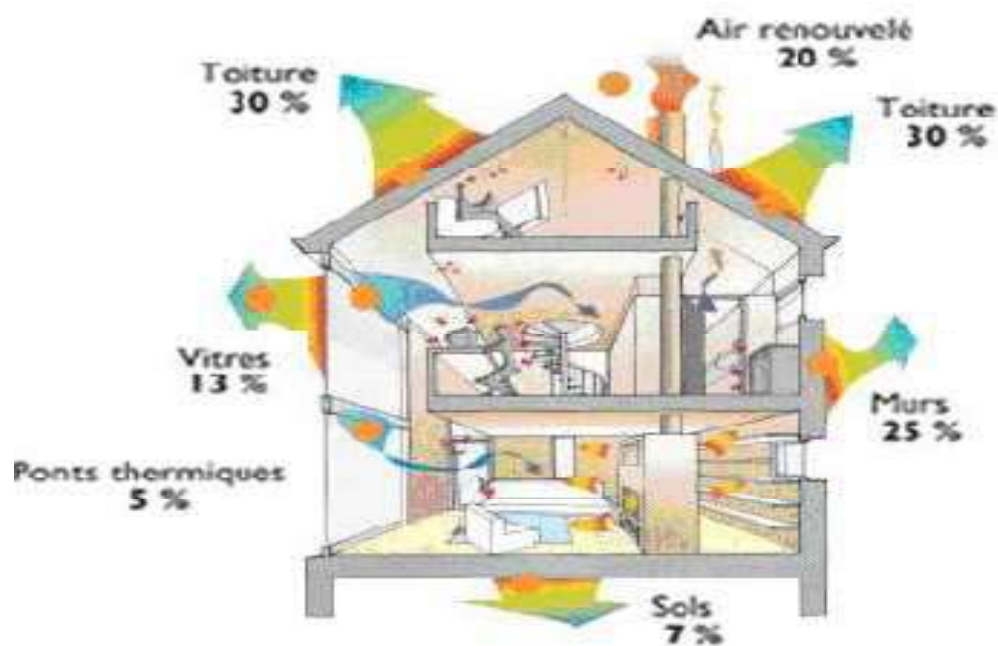


Figure 1: Répartition des déperditions thermiques dans une habitation [7].

On compte approximativement des valeurs de déperditions thermiques l'ordre de :

- Toits : 30 %,
- Murs : 25 %
- Renouvellement d'air : 20 %
- Portes fenêtres : 13 %
- plancher bas : 7 %
- Ponts thermiques : 5 %

Une grande partie de déperdition de chaleur se faisant par les toits et les murs, par conséquent une bonne isolation thermique des parois permet de réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments de plus de 60% [7].

2.2. Isolation des parois

Il existe trois types d'isolation des parois :

2.2.1. Isolation intérieure

Ce type d'isolation est le plus répandu, il est facile à mettre en œuvre, et nécessite des travaux directement dans l'espace intérieur du logement en mettant l'isolant sur la face intérieure du mur. L'isolation intérieure laisse le mur à l'extérieur de la zone isolée et permet une montée en chauffe rapide adaptée à un usage temporaire, par contre elle conduit à une réduction de l'espace intérieur et à la présence des ponts thermiques qui restent à traiter [7].

2.2.2. Isolation extérieure

Cette technique nécessite généralement une épaisseur de l'isolant plus faible. Elle consiste à mettre un isolant sur le mur de l'habitation, côté extérieur. Elle a l'avantage de mieux isoler en éliminant les ponts thermiques, de protéger globalement la structure du bâtiment, de ne pas diminuer la surface intérieure de l'habitation, de conserver la masse thermique du mur à l'intérieur de l'enveloppe isolée. Néanmoins elle est difficile à mettre en œuvre sur certains édifices anciens. En outre elle nécessite une protection contre les intempéries, par conséquent elle est plus coûteuse, et moins intéressante du point de vue énergétique [7].

2.2.3. 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 thermique des parois [7].

3. Comportement thermique

Les échanges thermiques au sein des matériaux poreux sont des phénomènes de transfert d'énergie sous forme de chaleur. Ils sont régis par plusieurs phénomènes [8]:

- Conduction dans la matrice solide, dans la phase liquide (généralement l'eau), dans la phase gazeuse contenue dans les pores.
- Convection dans les pores.
- Rayonnement entre les parois des pores.
- Evaporation- condensation qui implique un transfert de chaleur par la chaleur latente sous l'effet d'un gradient de concentration de température.
- Diffusion de la vapeur d'eau sous l'effet d'un gradient de pression partielle.

Nous rappelons succinctement les modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement), dans ce qui suit séparément. Il faut noter que ces modes sont en général interdépendants et qu'ils se présentent simultanément dans les problèmes pratiques.

3.1 Transfert de chaleur par conduction

Le phénomène de la conduction de la chaleur existe dans tous les corps, solides ou fluides, c'est un transfert par contact sans mouvement de matière.

Il correspond à un accroissement de l'énergie de vibration du réseau cristallin pour les solides, et à une transmission d'énergie cinétique opérée par les chocs entre les molécules pour les fluides. Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier énonçant

que « le flux surfacique est proportionnel au gradient de température », ce qui se traduit pour un matériau isotrope homogène par la relation :

$$\vec{\varphi} = \lambda \text{grad}\vec{T}$$

Avec

θ : densité de flux de chaleur.

λ : conductivité thermique du matériau considéré.

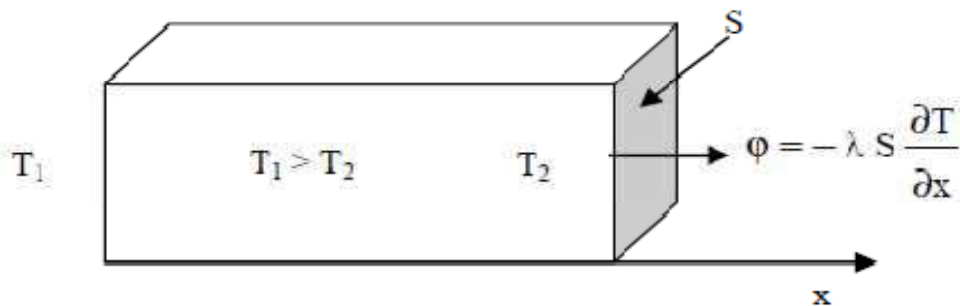


Figure 2: Schéma du transfert de chaleur conductif [9].

3.2. Transfert de chaleur par convection

La convection est un transfert de chaleur se produisant dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert a lieu au sein des fluides ou entre un solide et un fluide. Dans le domaine du bâtiment en particulier, on distingue deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée.

-La convection naturelle recouvre les écoulements des fluides interstitiels, induit par les variations de masse volumique dues aux différences de température.

- La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure d'origine mécanique (pompe, mise en pression, ventilateur, etc. ...).

- La convection mixte mêle de manière équivalente les deux modes de convection précédemment cités.

- La convection est un phénomène très complexe où la thermique et la mécanique des fluides sont couplées. Dans le cas d'un transfert entre un solide et un fluide (figure 3), le flux thermique échangé entre la surface et le fluide en mouvement est donné par la loi de Newton [7] :

$$\phi_c = (T_f - T_p) h S$$

Φ_c : flux thermique traversant la paroi.

T_p : température de la paroi du solide.

T_f : température du fluide loin de la paroi.

S : surface d'échange

h : coefficient d'échange par convection.

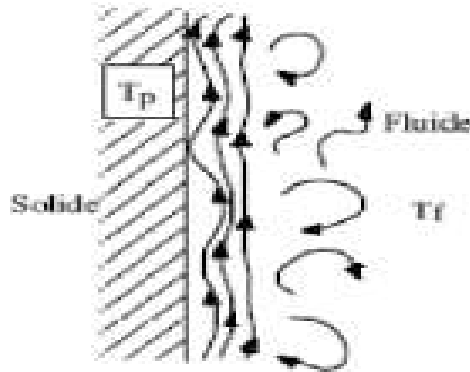


Figure 3: Convection à l'interface solide/fluide [7].

3.3. Transfert par rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant (figure 4) et dans ce cas nous avons la relation [9] :

$$\Phi = \varepsilon_p \sigma s (T_p^4 - T_\infty^4)$$

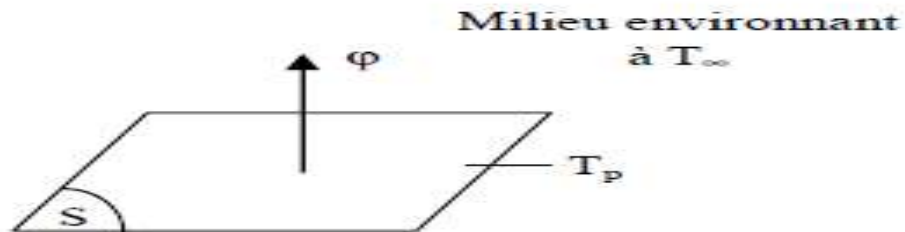


Figure 4 : Schéma du transfert de chaleur radiatif [9]

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement

σ : Constante de Stefan Boltzmann

ε_p : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface

T_∞ : Température du milieu environnant la surface

S : Aire de la surface

3.4 .Conductivité thermique des milieux poreux

3.4.1. Généralités

La conductivité thermique est le flux de chaleur par unité de surface, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de un degré entre ses deux faces.

Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. Cette propriété est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

La conductivité thermique des milieux poreux doit prendre en compte certains paramètres tels que les conductivités thermiques des phases solide et fluides, leurs fractions volumiques, la structure de la phase solide, et les zones de contacts entre particules. Dans ce qui suit, nous présentons les modèles les plus simples sur le plan théorique : modèle parallèle et série [7].

3.4.2. Modélisation de la conductivité thermique des milieux poreux

Le milieu poreux est considéré comme une juxtaposition de couches alternées solide et fluide, caractérisées respectivement par leurs conductivités thermiques λ_s et λ_f . Le calcul de la conductivité thermique apparente du milieu peut se faire soit par résolution de l'équation de la chaleur appliquée à la géométrie du milieu considéré, soit par l'analogie électrique, en assimilant le milieu à un ensemble de résistances en série et en parallèle [7].

3.4.2.1. Modèle série

Le milieu série est considéré comme une succession de couches solide, fluide alternées qui sont disposées perpendiculairement à la direction du flux de chaleur (figure 5).

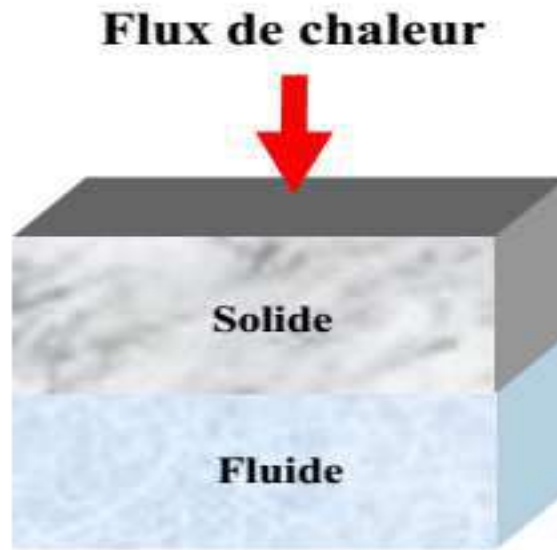


Figure 5 : Représentation du modèle série [7].

La conductivité thermique correspondante est :

$$\lambda_{\perp} = 1 / (((1-\varepsilon) / \lambda_s) + (\varepsilon / \lambda_f))$$

Où

ε : est la porosité totale du matériau.

Dans le cas où la conductivité du fluide λ_f tend vers 0, la conductivité totale tend aussi vers 0. La couche de fluide isole le matériau global et crée une rupture dans le chemin de propagation de la chaleur. Ce schéma jouer un rôle prépondérant à l'air qui va imposer la conductivité globale du matériau [7].

3.4.2.2. Modèle parallèle

Le modèle parallèle correspond au cas de figure 6, où le flux de chaleur traverse les deux couches de manière parallèle [7]



Figure 6 : Représentation du modèle parallèle [7]

La conductivité correspondante s'écrit :

$$\lambda_{\parallel} = (1-\varepsilon)\lambda_S + \varepsilon\lambda_F \quad (6)$$

Lorsque la conductivité du fluide devient négligeable devant celle du solide ($\lambda_f \ll \lambda_s$), la phase solide impose la conductivité totale, et λ tend vers $(1-\varepsilon)\lambda_s$. Il en est de même lorsque la phase fluide a une conductivité très faible comme c'est le cas pour l'air. Plusieurs travaux de recherches ont montré que la conductivité thermique du milieu poreux est toujours comprise entre deux valeurs limites correspondant respectivement aux milieux série (borne inférieure) et parallèle (borne supérieure). Ce sont les bornes de Voigt et Reuss (figure 7).

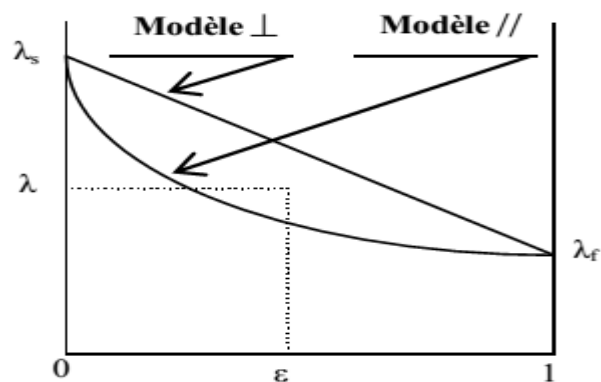


Figure 7 : Valeurs limites de la conductivité thermique d'un milieu biphase [7]

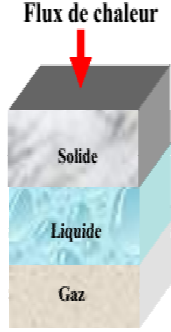
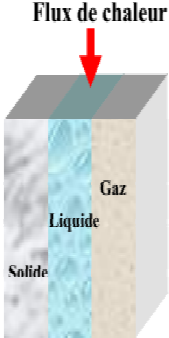
Modèle	Schématisation	Formule
<i>Série</i>		$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{(1-\varepsilon)}{\lambda_s} + \frac{(1-S)\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{\varepsilon S}{\lambda_l}}$
<i>Parallèle</i>		$\lambda_{\parallel} = (1-\varepsilon)\lambda_s + (1-S)\varepsilon\lambda_s + \varepsilon\lambda_f$

Tableau (1): Modèles série et parallèle [7]

3.5. Résistance thermique

Sur le plan thermique, une paroi est caractérisée par sa résistance thermique (R_{th}), qui quantifie la capacité de la paroi à s'opposer aux échanges thermiques. En effet, la résistance thermique est d'autant plus élevée que l'isolation est plus efficace. A la différence du coefficient de conductivité (λ), qui caractérise intrinsèquement un matériau, la résistance thermique est significative pour les parois, car elle tient compte de leurs géométries. Elle est définie par la relation suivante [7] :

$$R_{TH} = e/\lambda$$

Ou :

e : L épaisseur de la paroi.

λ : coefficient de conductivité thermique.

La relation (6) montre très clairement que pour une paroi donnée la connaissance de λ permet de trouver facilement R_{th} , pour une paroi donnée.

4 . Positionnement de la problématique

Comme nous venons de le voir à travers cette étude bibliographique, la lutte contre le gaspillage d'énergie dans le secteur de bâtiment passe par la mise en œuvre d'une isolation thermique des parois qui composent l'enveloppe. Ces parois sont généralement des matériaux poreux, dont les pores peuvent contenir une proportion d'eau libre très variable [10]. Cette eau provient, soit des effets de la pluie et de l'humidité d'air, soit de l'eau utilisée initialement lors de la fabrication et/ou de la mise en œuvre des matériaux employés. Cette humidité est considérée parmi les agents les plus nuisibles sur les matériaux de construction, sa présence dans la structure du bâtiment peut causer plusieurs problèmes tels que l'effritement des parois, l'augmentation des échanges thermiques à travers les murs ce qui provoque une surconsommation énergétique. En outre et comme nous le montrerons à travers cette étude, elle contribue à une influence néfaste sur différentes propriétés thermo physiques, telle que la conductivité, la résistance thermique, et la chaleur massique [7].

Dans le cadre de ce travail, nous nous proposons d'étudier l'isolation thermique des bâtiments. Notre recherche est axée sur deux points :

- le premier axe consistera en l'amélioration de l'isolation au moyen de matériaux adéquats utilisés pour l'enveloppe des bâtiments. Notre choix s'est porté sur les bétons allégés avec les granulats de lièges et des billes de polystyrène. Le choix de ces fibres est justifié par le fait que ce matériau (le liège et le polystyrène) compte parmi les matériaux le plus abondants en l'Algérie. En outre, ils présentent des caractéristiques intéressantes, notamment une faible conductivité thermique, qui conduit à un grand pouvoir isolant. Ainsi, grâce à leur légèreté et à leur résistance à l'humidité, ils peuvent présenter une solution technique dans le domaine du bâtiment [11], ils sont destinés à être utilisés pour l'isolation des toitures et d'autres composantes de l'enveloppe [12]. Notre intérêt portera particulièrement sur la détermination de leurs différentes propriétés thermo-physiques.

- Le second axe portera sur une modélisation numérique de transfert de chaleur qui intervient au sein des murs des bâtiments. Ce transfert peut modifier considérablement les propriétés thermo- physiques des matériaux utilisés et par conséquent influencer sur leur pouvoir isolant [7].

Introduction

La limitation de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment est basée en premier lieu sur le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe. Parmi les matériaux de construction les plus utilisés le béton. Il est facile à fabriquer et présente des propriétés structurelles intéressantes et une bonne durabilité. Cependant, il a une masse volumique élevée d'où la mise en place de fondations importantes pour supporter le poids de construction. Globalement, ce matériau est performant du point de vue mécanique, mais il est moins intéressant de point de vue thermique.

De nouveaux matériaux sont alors apparus, connus sous l'appellation de bétons légers. Ils ont une masse volumique plus faible que celle des bétons ordinaires et visent principalement une meilleure isolation thermique [13]. Ces matériaux peuvent être obtenus grâce à la substitution des granulats traditionnels par des granulats plus légers [14], souvent artificiels tels que l'argile expansée, le schiste, la perlite, la vermiculite, le laitier expansé, etc.

Cependant, on peut atteindre des densités plus faibles encore, en utilisant des granulats extrêmement légers tels que des agglomérés de liège qui font l'objet de notre étude.

Ce chapitre à caractère bibliographique, débute par une description approfondie du béton et des matériaux utilisés pour l'allègement (liège et polystyrène). Les compositions chimiques, les propriétés physiques, et les différentes procédures de fabrication de ces matériaux sont présentées. Les résultats concernant le comportement mécanique des bétons étudiés seront également exposés.

1. Le béton

Les matériaux de construction peuvent être classés en deux catégories, les matériaux traditionnels d'origine naturelle tel que la pierre, la terre crue, le bois, et les matériaux modernes composites dont le plus utilisé est le béton. 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 [7].

1.1. Constituants du béton

Il est composé de ciment, de granulat, et d'eau.

1.1.1. Ciment

1.1.1.1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, il représente 25 à 40 % du volume total du béton [7].

1.1.1.2. Composition et caractéristiques du ciment

Le ciment est caractérisé par sa composition chimique et par ses caractéristiques physiques (la forme et la finesse des grains). Les grains de ciment sont hétérogènes et polyphasés. Au contact de l'eau ils donnent naissance à des produits dont la composition chimique est variable. Il est principalement composé de clinker, de sulfate de calcium, et d'ajouts éventuels [7].

- Le clinker

Le clinker est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire (qui apporte le calcium) et de 20 % de matériaux aluminosilicates (notamment les argiles qui apportent le silicium, l'aluminium et le fer). La « farine » ou le « cru » est formée du mélange de poudre de calcaire et d'argile. Cette cuisson, la clinkerisation, se fait à une température d'environ 1 450 °C qui explique la forte consommation énergétique de ce processus [7].

Les principaux constituants du clinker sont:

- Le silicate tricalcique ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
- Le silicate bi-calcique ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
- L'aluminate tricalcique ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)
- L'alumino-ferrite tétra calcique ($4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{F}_2\text{O}_3$).

Il est usuel d'abrégé les formules des oxydes communs à une simple lettre, tel que C pour CaO ou S pour SiO₂. Le silicate tricalcique devient alors C3S.

Le tableau 5 regroupe les composants de clinker avec leurs proportions

Nom du composant	Composition	Abréviation	Pourcentage
silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45 à 65 %
silicate bicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 à 35 %
l'aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	4 à 14 %
<i>l'alumino-ferrite tétracalcique</i>	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{F}_2\text{O}_3$	C_4AF	10 à 18 %

Tableau 2 : Composants du clinker [7]

- Le sulfate de calcium

Il est ajouté au ciment pour réguler la prise

- Les ajouts éventuels (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers et les fumées de silice) [19]

On les ajoute au ciment pour des raisons économiques et/ou pour leurs propriétés hydrauliques.



Figure 8 : processus de fabrication du ciment [7].

1.1.1.3. Hydratation du ciment

Lorsque le ciment est mis en contact avec de l'eau, il s'hydrate selon une série de réactions chimiques individuelles s'effectuant à la fois en parallèle et successivement. Ce processus est associé à une libération de chaleur. Le ciment doit être mélangé avec suffisamment d'eau pour pouvoir s'hydrater complètement. D'après Perche [18], on peut diviser l'hydratation d'un ciment portland en quatre périodes :

- Période de prés- induction (les premières minutes),
- Période d'induction ou période dormante (les premières heures),
- Période d'accélération (3- 12 h après mélange),
- Période de post accélération [7]

1.1.2. Granulats

1.1.2.1. Définition

Le granulats est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes :

- fillers
- sablons
- sables
- graves
- gravillons
- ballast
- enrochements.



Figure 9 : les granulats [19].

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille d'un granulats répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulats est désigné par le couple d/D avec :

d : dimension inférieure du granulats.

D : dimension supérieure du granulats [19].

<i>Les granulats les plus utilisés</i>		
<i>Familles</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Caractéristiques</i>
<i>Fillers</i>	O/D	D < 2 mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
<i>Sables</i>	O/D	d = 0 et D ≤ 4 mm
<i>Graves</i>	O/D	D ≥ 6,3 mm
<i>Gravillons</i>	d/D	d ≥ 2 mm et D ≤ 63 mm
<i>Ballasts</i>	d/D	d = 31,5 mm et D = 50 ou 63 mm

Tableau 3 : Dimensions et caractéristiques des familles des granulats [19]

Les intervalles d/D et O/D sont appelés classes granulaires.

Les granulats utilisés pour la confection des bétons sont :

- les **fillers** ;
- les **sables** ;
- les **gravillons** ;
- les **graves**.

Les granulats sont considérés comme courants lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m³ et léger si elle est inférieure à 2 t/m³. Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration.

1.1.2.2. Caractéristiques des granulats

...Les granulats sont spécifiés par deux types de caractéristiques

a). *Des caractéristiques intrinsèques*, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, telles que, par exemple [19] :

- la masse volumique réelle
- l'absorption d'eau et la porosité
- la sensibilité au gel
- la résistance à la fragmentation et au polissage
- la gélivité.

b). *Des caractéristiques de fabrication*, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

- la granularité ;
- la forme (aplatissement) ;

– la propreté des sables [19].

1.1.3. Eau

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints.

1.2. Propriétés des bétons

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité [20].
- Une bonne résistance mécanique : La résistance mécanique du béton est caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier du type et du dosage en ciment, de la porosité du béton et du rapport E/C (rapport du dosage en eau au dosage en ciment). Parmi les formules qui permettent de prévoir les résistances, celle de Féret est la plus connue [7] :

$$R=K (C / (C+E+V)) ^2.$$

R: résistance.

K: coefficient dépendant de la classe de ciment, du type de granulats et du mode de mise en œuvre.

C: dosage en ciment.

E: dosage en eau.

V: volume d'air subsistant.

- Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance. Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs [7].
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton :

Au cours de son évolution, le béton subit diverses déformations volumiques appelées retrait (ou gonflements) qui croient avec le temps pour tendre, après quelques années, vers une limite qui dépend notamment de la composition du béton, des dosages en ciment et en eau, de l'épaisseur des pièces et de l'humidité relative de l'atmosphère environnante. Les causes de ces déformations sont multiples et peuvent être classées en quatre catégories :

- Retrait thermique lié à une variation de température (causé dans le béton par l'hydratation du ciment qui est une réaction exothermique),

-Retrait chimique lié aux réactions chimiques entre le ciment et l'eau ou à la carbonations,

- Retrait capillaire lié à la formation de ménisque d'eau entre les particules par évaporation superficielle de l'eau de gâchage,
 - Retrait de dessiccation lié à une variation de l'humidité relative et donc de la quantité d'eau dans les pores du matériau [7].
- Ces divers types de retrait peuvent se produire simultanément, c'est ce qui se produit en générale dans la pratique [20].
 - Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées [20].

2. Le Liège

2.1. Description

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, les récoltes ayant lieu environ tous les 10 ans. En France, les zones de production se situent en Corse, dans le Var et les Pyrénées-Orientales.

La première couche de l'écorce appelée « mâle » a une texture dure et irrégulière et est réservée à l'isolation. Les couches suivantes, appelées « femelles » sont utilisées pour la fabrication de bouchons ou de revêtement de sols.

Le liège peut être utilisé brut (liège blanc) ou expansé (liège noir) : après l'avoir réduit en granules, il est passé à la vapeur en four autoclave (à 300°C). Grâce à sa propre résine, la subérine, les granules s'agglomèrent sans aucun additif. On obtient ainsi du liège expansé, souvent de couleur foncée en raison de la température. La matière obtenue forme un bloc compact dont l'expansion a dilaté la porosité et remplit les vides entre les granules, ce qui lui confère ses qualités d'isolant thermique et phonique.

Le liège expansé est ensuite façonné sous forme de panneaux, et les chutes sont reconstruites sous forme de granules en vrac [21].

2.2. Caractéristiques Techniques

Nous nous consacrons ici plus particulièrement au liège expansé qui est le plus utilisé en Éco construction.

Dimensions : Les dimensions des panneaux sont généralement de 1 m par 0,5 m pour des Épaisseurs de 20 à 120 mm [21].

Valeurs moyennes	Vrac expansé	Panneaux expansés
Masse volumique	$r = 70 \text{ kg/m}^3$	$r = 120 \text{ kg/m}^3$
	Propriétés thermiques	
Chaleur spécifique	$c = 1700 \text{ J/kg}$	
Conductivité thermique	$\lambda = 0,038 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	$\lambda = 0,040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
Epaisseur	$e = 0,20 \text{ m}$	$e = 0,20 \text{ m}$
Résistance thermique	$R = 5,26 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	$R = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
Capacité thermique surfacique	$24 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$	$41 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$
Effusivité thermique	$1,12 \text{ W} \cdot \text{h}^{1/2} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$	$1,51 \text{ W} \cdot \text{h}^{1/2} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$
Diffusivité thermique	$3,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Déphasage thermique	8,1 h	10,4 h

Tableau 4: les caractéristiques techniques de liège [21].

2.3. Structure alvéolaire du liège

L'assise génératrice cambiale du chêne liège donne naissance vers l'intérieur à un bois très dur, riche en larges rayons ligneux, pauvre en zone poreuse et en vaisseaux, et vers l'extérieur, à un liber mince et riche en tanin. Entre liber et liège fonctionne une seconde assise génératrice externe, subéro phellodermique, donnant vers l'extérieur, un tissu élastique mort, assurant le rôle de protection : le liège [22].

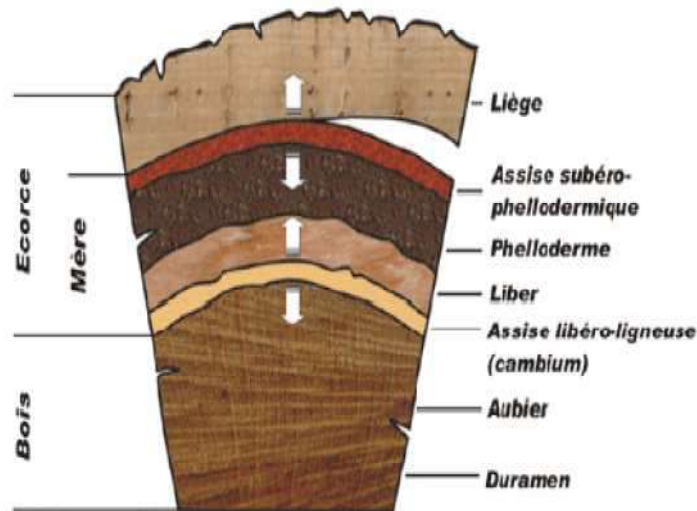


Figure 10: Structure et composition du liège [7].

Le liège est un tissu végétal composé de micro cellules, ayant en général une forme poly hydrique. Si on l'examine au microscope, nous avons l'impression de regarder un gâteau de miel (figure 11).

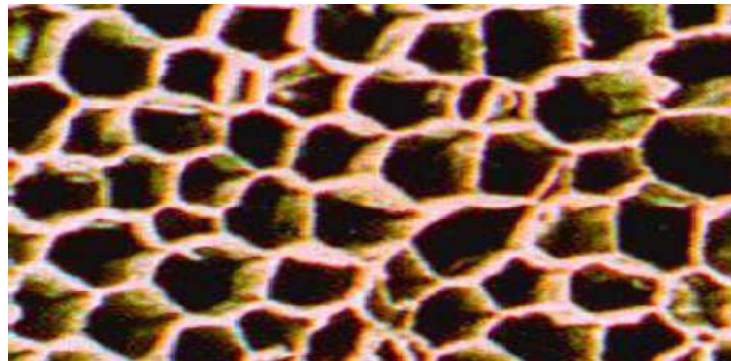


Figure 11 : Structure microscopique du liège [7].

On estime que 1 cm^3 de liège comporte entre 15 et 40 millions de cellules qui sont disposées en rangées régulières. En coupe transversale elles présentent un contour polygonal. Les parois séparant les cellules sont minces (figure 11), légèrement aplatis dont les dimensions sont de l'ordre de 20 à 30 μm , elles semblent composées de cinq feuillets, deux internes de nature cellulosique, une intermédiaire lignifiée, et deux externes subérifiés. Le tissu subéreux est traversé radialement par des lenticelles qui sont des pores remplis de cellules riches en tannins et à forte lignification. Les lenticelles sont perméables aux gaz et aux liquides et elles sont

souvent envahies de micro-organismes saprophytes. Ces parois ayant une épaisseur de 1 à 2 millièmes de mm, sont remplies de gaz d'une composition proche de l'air mais plus faible en CO₂. Ce gaz comprimé hermétiquement par des parois souples explique les qualités mécaniques et physiques du liège.

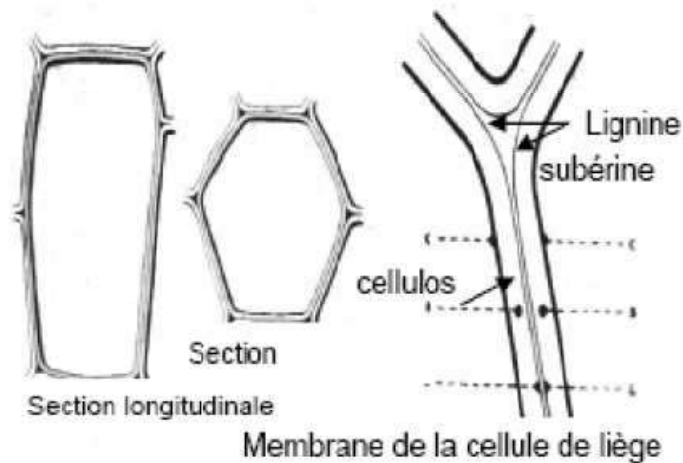


Figure 12: Formation du liège [7]

2. 4. Composition chimique

Le liège du chêne *Quercus suber* est une substance très complexe. L'étude de sa composition chimique a été menée au cours de nombreux travaux qui ont conduit à des résultats parfois contradictoires. La plupart des constituants du liège ne sont accessibles qu'après dépolymérisation et les résultats sont fortement liés aux procédés utilisés. Les constituants du liège sont présents à des proportions qui varient selon l'âge et l'habitat du chêne liège. Il est cependant admis que le liège est généralement constitué d'environ 40 % de subérine, 22 % de lignine, 20 % de polysaccharides et de 18 % de composés divers parmi lesquels les cires, la matière minérale et l'eau [23, 24,7].

2.4.1. La subérine

La subérine est le constituant principal des parois des cellules du liège, elle lui permet son élasticité. C'est une substance originale très complexe, sorte de polymère lipidique. La structure macromoléculaire de la subérine n'est pas encore établie de façon définitive puisque son extraction ne peut se faire qu'après dépolymérisation, par des méthodes d'hydrolyses alcalines [25, 26 ,7].

2.4.2. La lignine

La lignine est un produit de masse moléculaire élevée, résultat du couplage de polymères poly-phénoliques distribués de façon aléatoire. Les trois unités monomères de la lignine sont l'alcool coniférylique, l'alcool para-hydroxycinnamique et l'alcool sinapylique [27]. C'est elle qui permet la liaison entre les divers composants [7].

2.4.3. La cellulose et les polysaccharides

La cellulose résulte de la condensation exclusivement linéaire d'unités glucose unies entre elles [27] et les polysaccharides composent les parois des cellules, et contribuent à la définition de sa texture [7].

2.4.4. Les tannins

Ils déterminent la couleur [7].

2.4.5. Les céroïdes

Ce sont des Composés hydrophobes assurant l'imperméabilité [7].

2.5 Préparation du liège

Elle comporte essentiellement les opérations suivantes:

1- *Ecorçage ou démasclage* : Le cycle d'exploitation du chêne liège commence tout d'abord par l'écorçage. Une première étape de sélection du produit initial est effectuée dans les subéraies. La levée du liège s'exécute manuellement selon une pratique traditionnelle à l'aide d'une hachette spéciale très tranchante. D'abord deux profondes entailles horizontales sont pratiquées, l'une à la base du tronc et l'autre en haut, puis deux entailles verticales. Les plaques de liège sont enlevées avec le manche de la hachette. Les entailles pratiquées au cours de cette étape doivent être précises, car des lésions dues à une mauvaise manipulation peuvent compromettre la qualité du produit et causer à long terme la mort de l'arbre [7].

2- *Triage et séchage* : Les planches de liège sont empilées à l'air libre pendant 6 à 12 mois afin de permettre au liège de s'affiner par oxydation [7].

3- *Bouillage* : Cette étape s'effectue pendant 45 à 90 minutes dans de l'eau. Ce nettoyage permet d'éliminer une partie des substances hydrosolubles du liège (en particulier les composés phénoliques du liège), d'augmenter son épaisseur, de réduire sa densité et d'améliorer sa souplesse [7].

4- *Stabilisation* : Les plaques sont ensuite stabilisées pendant 2 à 4 semaines dans un lieu où l'aération et l'humidité sont réglables. Cette opération permet aux planches de s'aplanir, le liège sèche pour atteindre la consistance permettant la découpe [7].

5- *Deuxième bouillage* : Le liège subit un tri. Les planches qui ne correspondent pas au calibre et à la qualité souhaitée sont éliminées, les autres planches sont bouillies une seconde fois, pendant environ 30 minutes, pour les rendre malléables [7].

6- *Classement* : C'est la répartition des planches de liège selon leur épaisseur et leur choix.

- ✓ Les étapes de préparation du liège citées précédemment sont représentées sur la figure 13 :

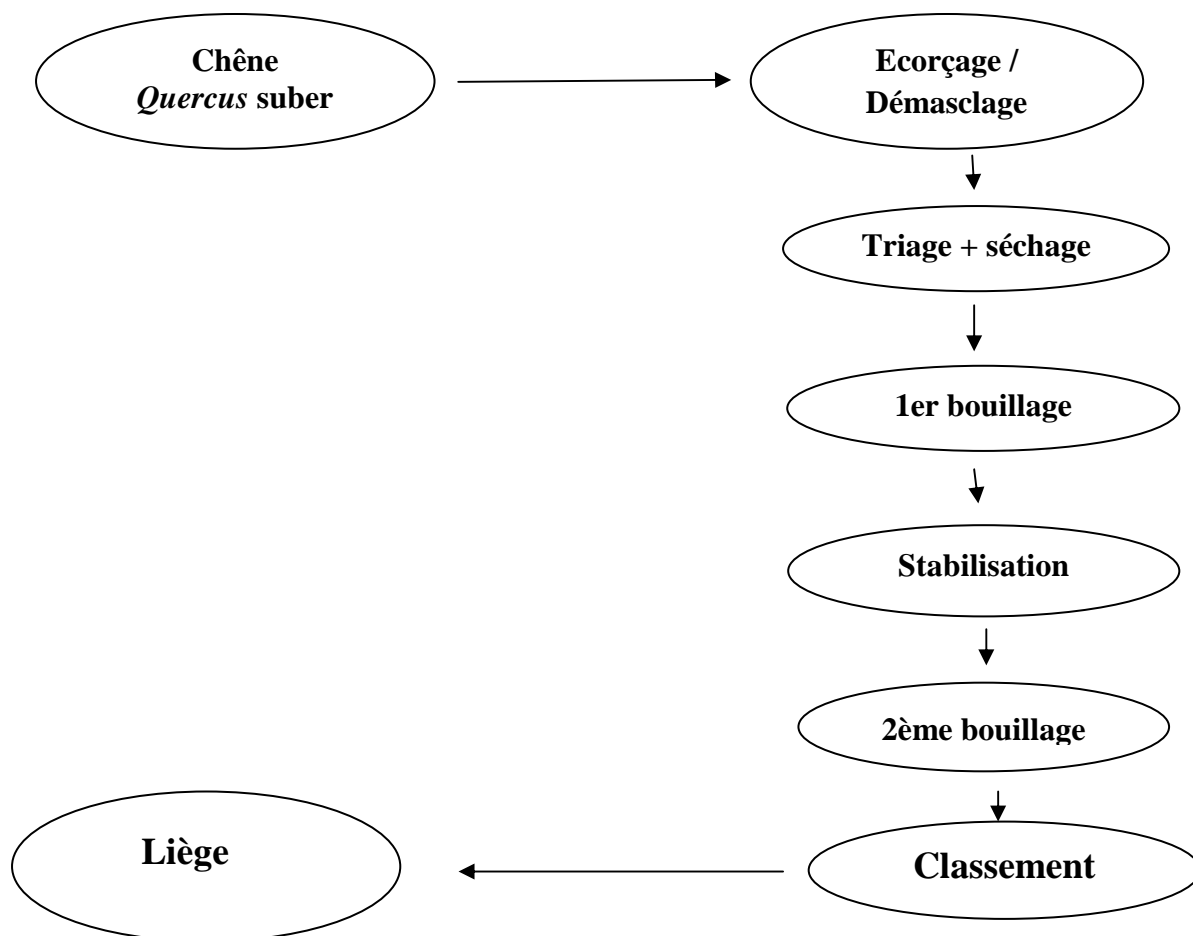


Figure 13 : Le cycle de production du liège

2.6. Propriétés du liège

La composition et la structure du liège lui confèrent de nombreuses propriétés[7]:

- ✓ **Elasticité- Compressibilité– Souplesse.** Il est comprimé rapidement dans sa limite élastique, et prend presque instantanément 85 % de son volume initial.
- ✓ **Légèreté,** sa faible densité est variable avec la qualité du liège. Elle est due à l'air contenu dans ses cellules.
- ✓ **Adhérence,** elle est permise par la force d'expansion d'une matière élastique et par la présence de micro ventouses (cellules coupées lors du cycle de fabrication) au contact des parois.
- ✓ **Imperméabilité** qui est due non seulement à la contre- pression exercée par le gaz des cellules, mais aussi à la présence dans les membranes du liège d'une forte proportion de substances grasses (subérine, cérine, ...). Le liège absorbe moins de 18 à 20 % d'eau si son volume augmente (au bouillage), résultant essentiellement de la dilatation des gaz contenus dans ces cellules.
- ✓ **Durabilité.** Du fait de sa faible perméabilité il résiste aux agents extérieurs.
- ✓ **Faible conductivité phonique et thermique,** du au fait que l'air reste enfermer dans ses cellules (minuscules compartiment étanches) est isolé par une matière non hygroscopique et de faible poids spécifique. La conductibilité thermique interne du liège en planche est de 0.2963 W/m. K, c'est la raison pour laquelle le tissu subéreux du chêne liège est parmi les substances douées de la plus haute capacité isolante. De plus, en réduisant par compression sa taille de moitié, la pression de l'air emprisonné à l'intérieur des cellules ferme les capillarités.
- ✓ **Mauvaise combustibilité** car il lui faut beaucoup d'oxygène pour brûler. De plus il carbonise en surface et cette couche empêche la propagation du feu .

3. Le polystyrène

Le polystyrène 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.

3.1 Composition chimique

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif homopolymère de styrène (figure 14). Structurellement, c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés, avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [16].

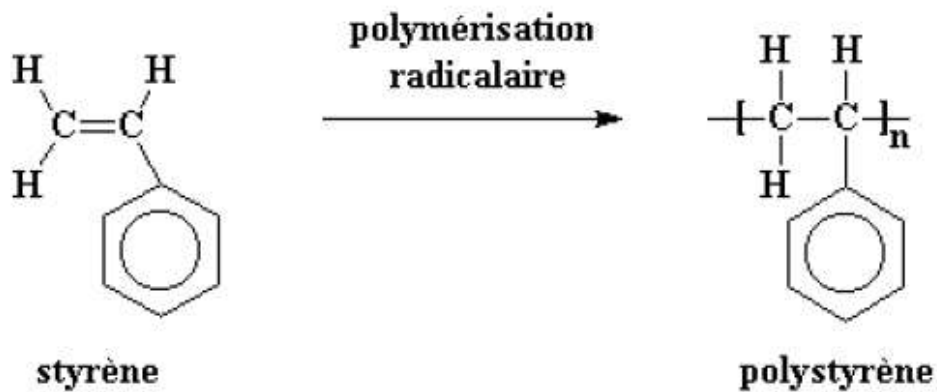


Figure 14 : Structure chimique du polystyrène [7]

Le produit de base servant à la fabrication du polystyrène expansé est obtenu sous forme de petites perles blanches, chimiquement très stable, et doué de propriétés thermoplastiques.

Suivant les applications, on distingue trois types différents par leur granulométrie et leurs propriétés :

- Ceux destinés aux fabrications courantes, les perles sphériques reformant un

« porogène » (ou agent gonflant) : le pentane,

- Ceux destinés à la fabrication de produit « difficilement inflammable » ou auto- extinguibles », cette propriété n'étant acquise qu'après un certain temps de stockage en raison de la teneur en pentane,
- Ceux destinés à la fabrication de produits expansés résistant aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques.

La structure du polystyrène expansé (PES) comporte des cellules interconnectées, la taille des cellules se situe habituellement entre 60 et 200 μm (figure 15)

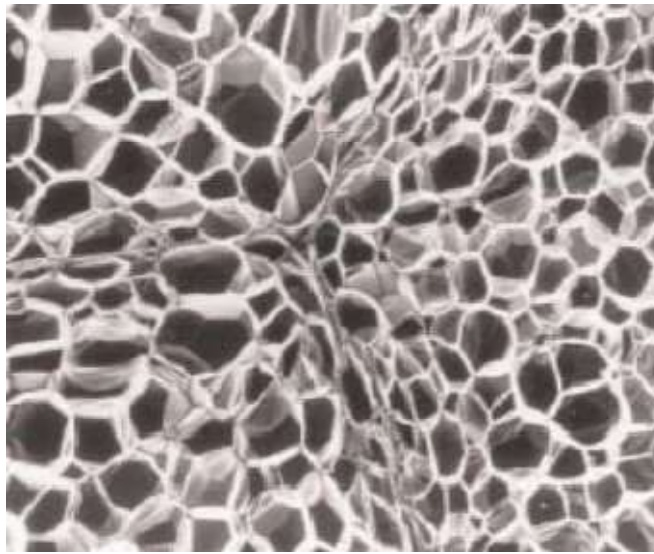


Figure 15 : Structure alvéolaire du polystyrène

3.2 Fabrication du polystyrène expansé

La transformation du polystyrène en élément isolant (polystyrène expansé) comprend les étapes suivantes [7] :

✓ *Pré- expansion*

Le produit de base subit une phase de pré- expansion. Celle- ci s'effectue dans un prémousseur muni d'une arrivée de vapeur, d'une arrivée d'air et d'un système d'introduction des perles brutes. L'opération est faite en continu à une vitesse de 250 Kg/ heure et à une température de 97 °C. Le produit obtenu a une densité comprise entre 17 et 18 Kg/ m³.

✓ *Stockage intermédiaire*

Les perles ainsi pré- expansées sont ensuite stockées dans des silos pour y subir un « mûrissement » permettant la mise en équilibre des pressions entre les cellules dans lesquelles le porogène a en grande partie disparu sous l'action de la température et le milieu extérieur.

✓ *Seconde expansion*

Elle est faite selon la même méthode que précédemment mais dans des appareils de volume plus important. C'est au cours de cette opération que les perles sont façonnées suivant le produit que l'on désire obtenir.

3.3 Propriétés du polystyrène

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, ...).

Conclusion :

Cette étude a dressé une synthèse de connaissances des caractéristiques physico- chimiques de différents constituants de bétons allégés avec des granulats de liège et avec des billes de polystyrène expansé, ainsi que de leurs comportements mécaniques.

Ces matériaux ont été étudiés sur le plan mécanique, mais on note que peu d'études ont été réalisées en thermique. Il nous a donc par nécessaire de procéder à une caractérisation thermique approfondie de ces matériaux pour connaître leurs propriétés thermo-physiques dans le but de mieux comprendre le processus de transferts thermique à travers une enveloppe d'habitation intégrant ces types isolants (liège et polystyrène).

Introduction

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

Dans cette étude, nous avons utilisé le deuxième cas et négligé le transfert de chaleur par rayonnement.

Ensuite, nous avons étudié comment la chaleur se transmet le long d'une paroi constituée de cinq couches différentes de conductivité et d'épaisseurs et considérons le transfert de chaleur par conduction et convection.

1. Transfert de chaleur par conduction en régime permanent

1.1 L'équation de la chaleur

Dans sa forme monodimensionnelle, elle décrit le transfert de chaleur unidirectionnel au travers d'un mur plan :

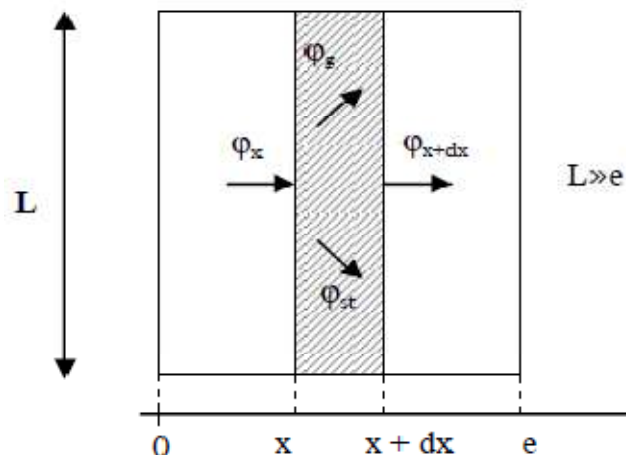


Figure 16 : Bilan thermique sur un système élémentaire

Considérons un système d'épaisseur dx dans la direction x et de section d'aire S normalement à la direction Ox .

Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\Phi_x + \Phi_g = \Phi_{x+dx} + \Phi_{st}$$

avec :

$$\Phi_x = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \quad \text{et} \quad \Phi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx}$$

$$\Phi_{st} = \rho s c \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\Phi_g = q s dx$$

En reportant dans le bilan d'énergie et en divisant par dx , nous obtenons

$$\left[\left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} - \left(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x \right] / dx + \dot{q} s = \rho s c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Soit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} s = \rho s c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Et dans le cas tridimensionnel, nous obtenons l'équation de la chaleur dans le cas le plus général :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

- Cette équation peut se simplifier dans un certain nombre de cas :

- a) Si le milieu est isotrope : $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$
- b) S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $\dot{q} = 0$
- c) Si le milieu est homogène, λ n'est fonction que de T .

Les hypothèses a) + b) + c) permettent d'écrire :

$$\lambda \left(\frac{\partial T^2}{\partial X^2} + \frac{\partial T^2}{\partial Y^2} + \frac{\partial T^2}{\partial Z^2} \right) + \frac{d\lambda}{dT} \left(\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

d) Si de plus λ est constant (écart modéré de température), nous obtenons l'équation de Poisson :

$$a \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Le rapport $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ est appelé la diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$) qui caractérise la vitesse de propagation d'un flux de chaleur à travers un matériau.

e) En régime permanent, nous obtenons l'équation de Laplace

$$\nabla^2 T = 0$$

1.2 Transfert unidirectionnel dans un Mur multicouches

C'est le cas des murs réels (schématisé sur la figure 17) constitués de plusieurs couches de matériaux différents et où on ne connaît que les températures T_{f1} et T_{f2} des fluides en contact avec les deux faces du mur de surface latérale S .

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

$$\varphi = h_1 S (T_{F1} - T_{f2}) = \frac{\lambda_A S (T_1 - T_2)}{e_A} = \frac{\lambda_B S (T_2 - T_3)}{e_B} = \frac{\lambda_C S (T_3 - T_f)}{e_C} = h_2 S (T_4 - T_{f2})$$

D'où :

$$\varphi = \frac{(T_{F1} - T_{f2})}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}}$$

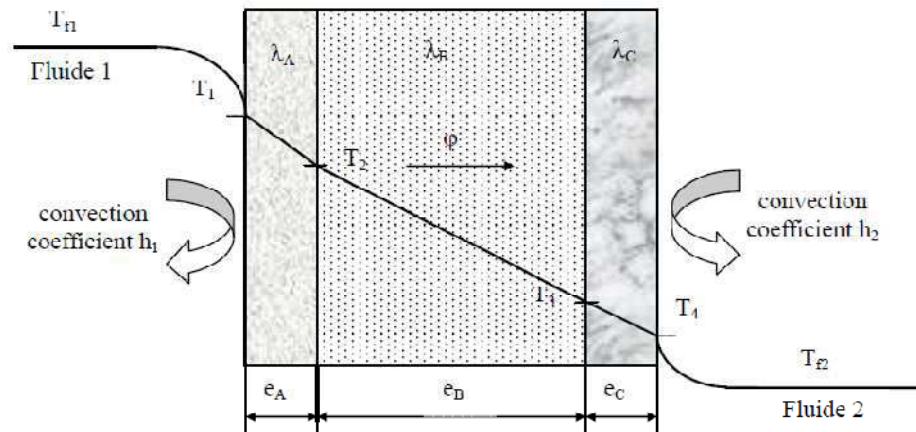


Figure 17 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouche

On a considéré que les contacts entre les couches de différentes natures étaient parfaits et qu'il n'existait pas de discontinuité de température aux interfaces. En réalité, compte-tenu de la rugosité des surfaces, une microcouche d'air existe entre les creux des surfaces en regard qui contribue à la création d'une résistance thermique (l'air est un isolant) appelée résistance thermique de contact. La formule précédente s'écrit alors :

$$\varphi = \frac{(T_{F1} - T_{f2})}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + R_{AB} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + R_{BC} + \frac{1}{h_2 S}}$$

2. les équations utilisées et les conditions aux limites

$i=1$

$$\varphi(i) = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{e_5}{k_5} + \frac{1}{h_2}}$$

Ou :

$$R(i) = \frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{e_4}{k_4} + \frac{e_5}{k_5} + \frac{1}{h_2}$$

T_1 : température extérieur

T_2 : température intérieur

e_1 : l'épaisseur de béton

e_2 : l'épaisseur de brique pleine

e_3 : l'épaisseur de liège/ l'épaisseur de polystyrène.

Et :

$$e_5 = e_1, e_4 = e_2, k_5 = k_1, k_4 = k_2$$

$$T_2 = 300.15 \text{ K}, T_1 = 315.15 \text{ K}$$

$j=1$:

$$x(j) < e_1$$

$$T(i, j) = T_1 - \left(\frac{x(j)}{k_1} \right) * \varphi(i)$$

$x(j) \geq e_1$ et $x(j) < e_1 + e_2$

$$T(i, j) = T_1 - \left(\left(\frac{e_1}{k_1} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{x(j) - e_1}{k_2} \right) * \varphi(i) \right)$$

$x(j) \geq e_1 + e_2$ et $x(j) < e_1 + e_2 + e_3(i)$

$$T(i, j) = T_1 - \left(\left(\frac{e_1}{k_1} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{e_2}{k_2} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{x(j) - e_1 - e_2}{k_3} \right) * \varphi(i) \right)$$

$x(j) \geq e_1 + e_2 + e_3(i)$ et $x(j) < e_1 + e_2 + e_3(i) + e_4$

$$T(i, j) = T_1 - \left(\left(\frac{e_1}{k_1} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{e_2}{k_2} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{e_3}{k_3} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{(x(j) - e_1 - e_2 - e_{3(i)})}{k_4} \right) * \varphi(i) \right)$$

$$x(j) \geq e_1 + e_2 + e_{3(i)} + e_4 \text{ et } x(j) < e_1 + e_2 + e_{3(i)} + e_4 + e_5$$

$$T(i, j) = T_1 - \left(\left(\frac{e_1}{k_1} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{e_2}{k_2} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{e_3}{k_3} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{e_4}{k_4} \right) * \varphi(i) \right) + \left(\left(\frac{(x(j) - e_1 - e_2 - e_{3(i)} - e_5)}{k_5} \right) * \varphi(i) \right)$$

$$x(j) \geq e_1 + e_2 + e_{3(i)} + e_4 + e_5$$

$$T(i, j) = T_2$$

3. Résultats et discussion

3.1 . 1^{er} cas

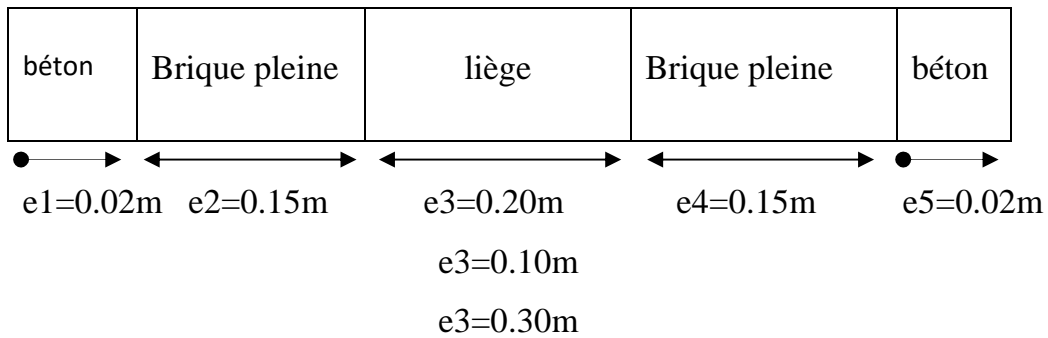


Figure 18 : Schématisation des l'épaisseurs des couche.

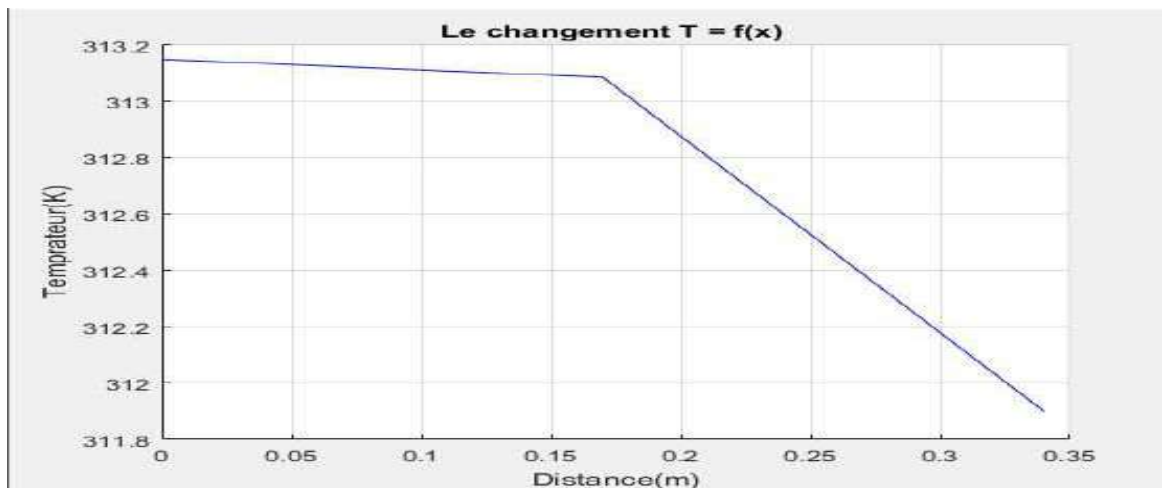


Figure 19 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l'isolant $e_3=0.10m$

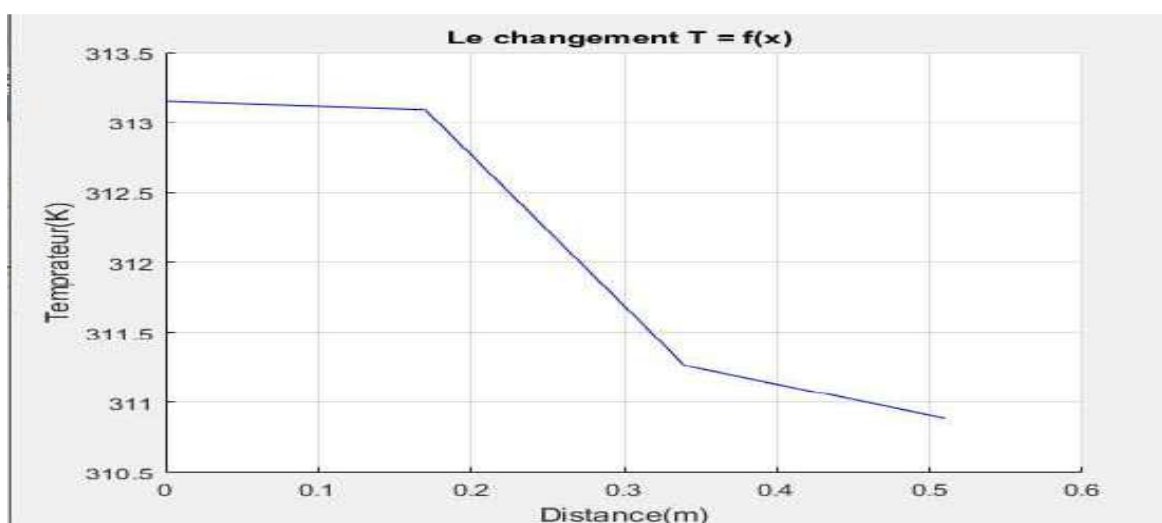


Figure 20 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l'isolant $e_3=0.20m$

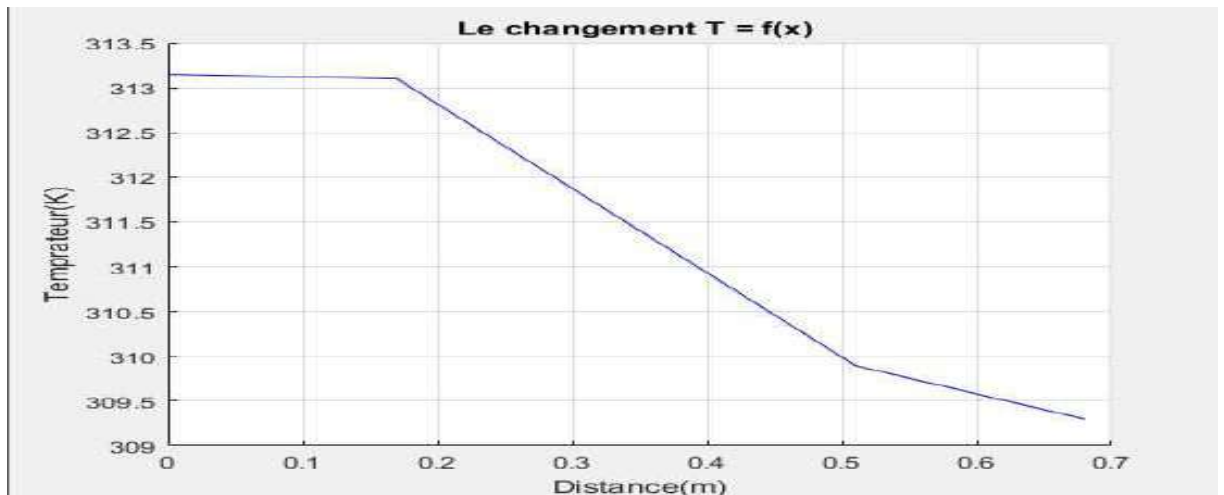


Figure 21 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l'isolant $e_3=0,30m$

Analyse de la courbe 1 (figure19) :

Dans le domaine $[0m, 0,17m]$: La diminution de la température faible de 313,17K à 313,15K.

$[0,17m, 0,35m]$: Une diminution de la croissance de la température 313,15K à 311K. Ceci est dû à la présence d'une épaisseur d'isolant de 0,10 m..

Analyse de la courbe 2 (figure20) :

La température diminue progressivement jusqu'à atteindre l'épaisseur de 0,17m et une température de 313,1K.

Dans le domaine $[0,17 m, 0,35m]$: Une diminution croissante de la température [313K, 311,2K] après les couches totales (béton+brique pleine) en raison de la présence d'un isolant de l'épaisseur du liège 0,20m.

Dans le domaine $[0,35m, 0,54m]$: La poursuite de la diminution de la température 311,2K jusqu'à 310,6K, (rythme faible).

Analyse de la courbe 3 (figure21) :

La température diminue progressivement jusqu'à atteindre l'épaisseur de 0,17m et une température de 313,1K.

Dans le domaine $[0,17 m, 0,54m]$: Une diminution croissante de la température [313K, 309,7K] après les couches totales (béton+brique pleine) en raison de la présence d'un isolant de l'épaisseur du liège 0,30 m.

Dans le domaine $[0,54m, 0,70m]$: La poursuite de la diminution de la température 309,7K jusqu'à 309 K, (rythme faible).

3.2. 2^{eme} cas :

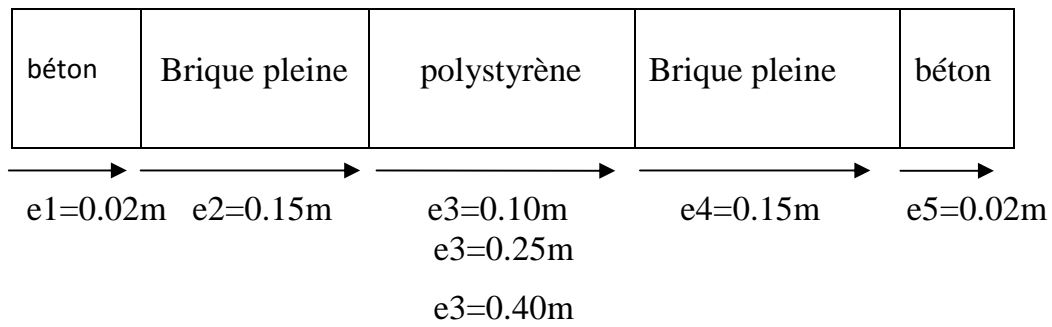


figure22 : Schématisation des l'épaisseurs des couche.

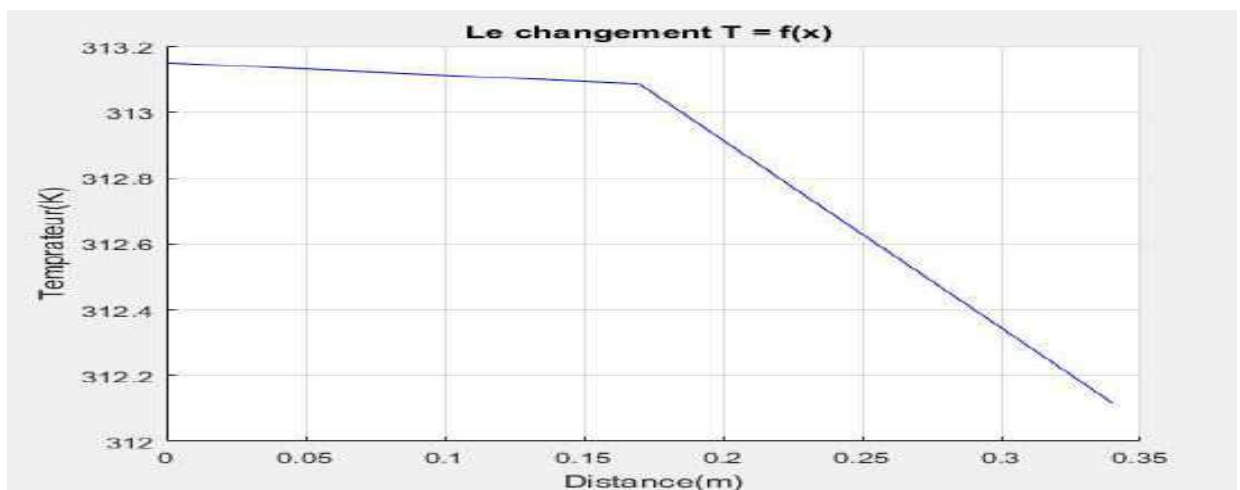


Figure 23 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l'isolant $e_3=0.10m$.

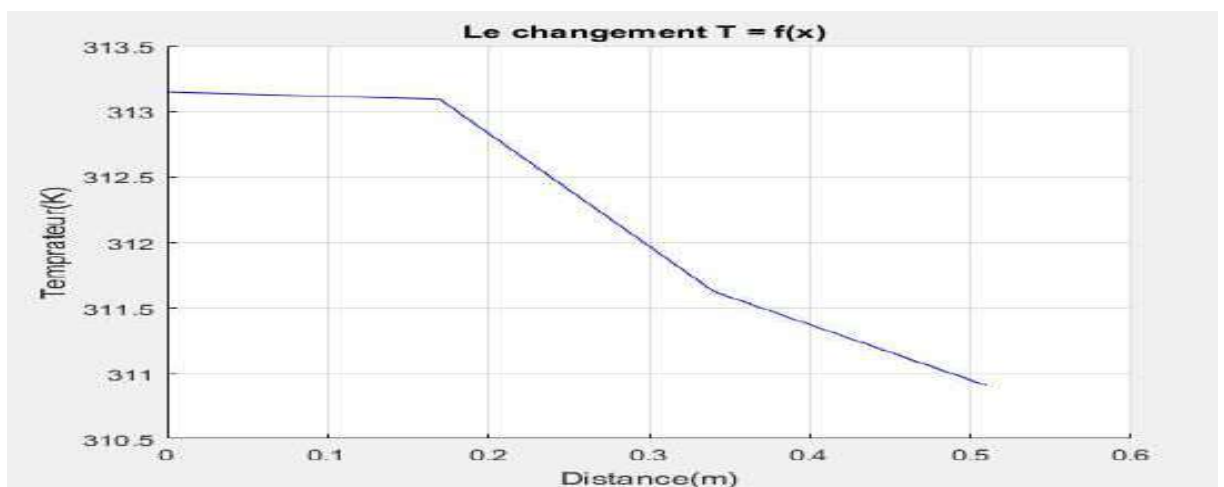


Figure 24: changement de Température en fonction de l'épaisseur de l'isolant $e_3=0.25m$

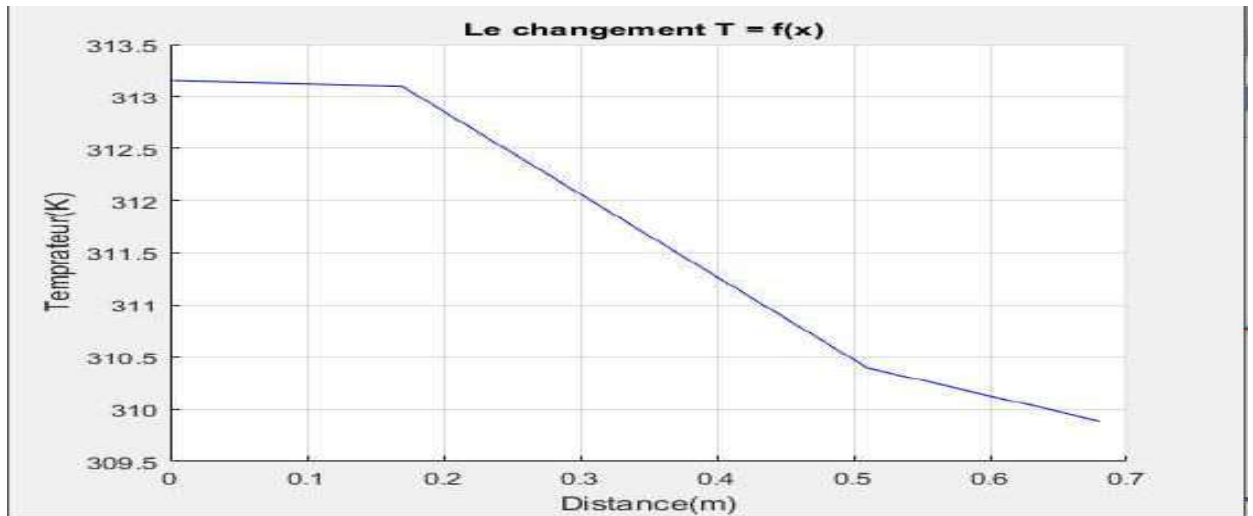


Figure 25 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l'isolant $e_3=0,40\text{m}$

Analyse de la courbe 1 (figure23):

Dans le domaine $[0\text{ m}, 0,17\text{m}]$ on distingue que la courbe indique que la température est presque stable ou constante sur l'épaisseur du degré de 313,15 K à 313,10K

Dans le champ $[0,17\text{m}, 0,44\text{ m}]$ on constate la courbe de la température baisse de 313,10 K à 312,10 K. Cela est dû à la variation d'épaisseur de l'isolant, ce qui a conduit à un transfert de chaleur de façon spectaculaire.

Analyse de la courbe 3 (figure 24) :

Nous notons dans le domaine $[0\text{ m}, 0,17\text{ m}]$ une haute température presque constante à 313 K

Dans le domaine $[0,17\text{ m}, 0,42\text{m}]$ on constate une diminution de température de 313,15 K à 311,15 K

Dans le domaine $[0,42\text{ m}, 0,59\text{ m}]$ on observe que la température varie faiblement, Cela est dû au changement de l'épaisseur de l'isolant.

Analyse de la courbe 3 (figure25) :

dans le domaine $[0\text{m}, 0,17\text{m}]$ une haute température presque constante à 313 K

Dans le domaine $(0,17\text{m}, 0,57\text{m})$ on constate une diminution de température 313,15 K à 310,10 K .

Dans le domaine [0.57m , 0.74m] on observe que la température varie faiblement Ceci explique que le transfert de chaleur à travers le mur diminue au fur et au mesure que l'épaisseur de l'isolant augmente. .

Résumé :

Il existe une relation inversement proportionnelle entre l'épaisseur de l'isolant et le transfert de chaleur,

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons effectué de simulation numérique pour étudier le transfert de chaleur à travers une paroi de l'enveloppe du bâtiment soumise à deux conditions climatiques différentes à savoir l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Les enveloppes étudiées sont constituées soit le brique pleine + le béton + le liège, soit le brique pleine + le béton + le polystyrène.

Conclusion générale :

Le choix des matériaux utilisés dans la construction d'une question importante pour réduire la consommation d'énergie dans le secteur de la construction, et dans ce contexte, prévu pour notre travail, qui est la caractérisation thermique des matériaux utilisés pour construire le composant enveloppe du bâtiment des murs afin d'améliorer l'isolation thermique d'un objectif principal.

Nous avons discuté dans la première partie de cette mémoire pour étudier la littérature du comportement thermique et le milieu poreux dans lequel pénètrent facilement et afficher des compositions chimiques et les propriétés physiques des matériaux qui ont été sélectionnés et l'examen de la littérature sur l'efficacité énergétique et le principe de l'isolement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons traité les matériaux de construction sont ces nouveaux matériaux, connus sous le nom de béton dilué ou léger, ont moins de densité béton normal est la base de l'isolation thermique mieux.

Nous avons également constaté que l'on peut obtenir une densité plus faible et rappelle à l'aide de poids agrégat léger de léger, que nous devons étudier et connaître ses caractéristiques et ses composants et ses avantages, aussi connu composition chimique et physique du béton et l'affichage dilué, avec du polystyrène matériau mâle et certaines de leurs caractéristiques et des composants pour les comparer avec l'isolation en liège matériau.

Dans la troisième partie de la mémoire, nous avons étudié le transfert de chaleur par l'épaisseur du mur est constituée de cinq couches différentes de la conductivité et de l'épaisseur par conduction thermique et la transmission de la convection, et le respect des équations mathématiques et méthodes de résolution numériques et programme de simulation de MATLAB.

Et nous sommes arrivés aux courbes du gradient de température sur l'épaisseur du mur.

Liste des figures	Page
Figure 1: Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.....	4
Figure 2 : Schéma du transfert de chaleur conductif.....	7
Figure 3 : Figure 3: Convection à l'interface solide/fluide	8
Figure 4 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	9
Figure 5 : Représentation du modèle série.....	11
Figure 6 : Représentation du modèle parallèle	12
Figure 7: Valeurs limites de la conductivité thermique d'un milieu biphasique.....	12
Figure 8 : Processus de fabrication du ciment.....	17
Figure 9 : les granulats.....	19
Figure 10: Structure et composition du liège.....	24
Figure 11 : Structure microscopique du liège	24
Figure 12: Formation du liège.....	25
Figure 13: Le cycle de production du liège.....	27
Figure 14 : Structure chimique du polystyrène.....	29
Figure 15 : Structure alvéolaire du polystyrène.....	30
Figure 16 : Bilan thermique sur un système élémentaire.....	32
Figure 17 : Schématisation des flux et des températures dans un mur multicouches.....	43
Figure 18 : Schématisation des l'épaisseurs des couche.....	36
Figure 19 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l isolant $e_3=0.10m$	39
Figure 20 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l isolant $e_3=0.20m$	39
Figure 21 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l isolant $e_3=0.30m$	39
Figure22 : Schématisation des l'épaisseurs des couche.....	40
Figure 23 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l isolant $e_3=0.10m$	41
Figure 24: changement de Température en fonction de l'épaisseur de l isolant $e_3=0.25m$	41
Figure 25 : changement de Température en fonction de l'épaisseur de l isolant $e_3=0.40m$	42

Liste des tableaux	Page
Tableau1: Modèles série et parallèle	13
Tableau 2 : Composants du clinker	17
Tableau 3 : Dimensions et caractéristiques des familles des granulats.....	20
Tableau 4: les caractéristiques techniques de liège.....	23

Nomenclatures

Caractères latins

e : épaisseur	m
x : variable d'espace	m
t : temps	s
T : température	K
S: surface d'échange	m ²
H:coefficient d'échange par convection	W/m ² .k

Lettres grecques

λ : conductivité thermique	W.m ⁻¹ . K ⁻¹
ρ : masse volumique	Kg. m ⁻³
θ : densité de flux thermique	W.m ⁻²
Φ_c : flux thermique	W
θ : densité de flux thermique	W.m ⁻²
σ : Constante de Stefan Boltzmann	[W m ⁻² K ⁻⁴]
ϵ_p : Facteur d'émission de la surface	
ϵ : porosité totale du matériau	%

المخلص:

إن المعرفة الدقيقة للخصائص الحرارية للعناصر المكونة لغلاف الخارجي للبناء على غرار الناقلية و المقاومة الحرارية ذو أهمية بالغة لدراسة السلوك الحراري للغلاف و معيارا هام من اجل تحديد إمكانية استعمالها كمواد عازلة . يهدف العمل المقدم لمعرفة فاعلية الطاقة وأهمية العزل الحراري في البناء من أجل دراسة السلوك الحراري للمواد المستعملة للبناء: الخرسانة المدعمة بالفلين والخرسانة المدعمة بالبوليستر. بحيث تتميز هذه المواد بدرجة كبيرة من الخفة تجعلها مهمة في مجال البناء. يتمثل عملنا هذا في دراسة ظاهرة انتقال الحرارة داخل جدار مكون من عدة طبقات تختلف من حيث المادة و السمك, من خلال معادلة الطاقة وحلها بطرق العددية, تحصلنا على النتائج المطلوبة لتوزيع درجة الحرارة عبر الجدار.

الكلمات المفتاحية : العزل الحراري , السلوك الحراري , الخرسانة , الفلين , البولبيستر ين , توزيع درجة الحرارة , انتقال الحرارة

Résumé:

La connaissance des propriétés thermiques tel que la conductivité, la résistance thermique et la chaleur massique des différents éléments de l'enveloppe d'un bâtiment présente une importance capitale pour l'étude des transferts thermiques et constitue un important critère pour le choix d'un matériau d'isolation. Le présent travail est une contribution à l'étude du comportement thermique des bétons allégés avec des granulats de liège et avec des billes de polystyrène. Ces types de matériaux présentent grâce à leur légèreté, une solution technique intéressante pour les domaines de construction de bâtiment . Ce travail est d'étudier le phénomène de transfert de chaleur dans le mur d'un composant de plusieurs couches différentes en termes de matériaux et l'épaisseur, par l'équation de l'énergie et de résoudre des moyens numériques, nous avons acquis les résultats requis pour la distribution de température à travers le mur.

Les Mots clé : l'isolation thermique, le comportement thermique, béton allégé, le liège, polystyrène, transfert de chaleur.

Summary:

La connaissance des propriétés thermiques tel que la conductivité, la résistance thermique et la chaleur massique des différents éléments de l'enveloppe d'un bâtiment présente une importance capitale pour l'étude des transferts thermiques et constitue un important critère pour le choix d'un matériau d'isolation. Le présent travail est une contribution à l'étude du comportement thermique des bétons allégés avec des granulats de liège et avec des billes de polystyrène. Ces types de matériaux présentent grâce à leur légèreté, une solution technique intéressante pour les domaines de construction de bâtiment. This work is to study the phenomenon of heat transfer in the wall of a component of several different layers in terms of materials and thickness, by the equation of energy and solve numerical means; we acquired the results required for temperature distribution across the wall.

Keywords: thermal insulation, thermal behavior, lightweight concrete, cork, polystyrene. heat transfer