

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI - CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES EXACTES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre :.....

Série :.....

THESE

POUR OBTENIR LE DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES EN PHYSIQUE

Spécialité

PHYSIQUE ÉNERGETIQUE

THEME

**Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et
Amélioration de L'isolation**

Présentée Par :

Nassima Sotehi

Soutenue le : //2010

Devant le jury:

Président :	N. BELLEL	M. C.	Univ. Mentouri-Constantine
Rapporteur :	A. CHAKER	Prof.	Univ. Mentouri-Constantine
Examineurs :	M. BELHAMEL	Prof.	Centre de Recherche CDER
	B. BENYOUCEF	Prof.	Univ. Tlemcen
	B. DRAOUI	Prof.	Univ. Bechar
	M. DEZZAR	M. C.	Univ. Mentouri-Constantine

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de Laboratoire de Physique Energétique, Université Mentouri de Constantine.

Je voudrais en tout premier lieu remercier chaleureusement Madame **A. Chaker** Professeur au département de physique, qui a suivi et encadré ce travail avec intérêt, disponibilité et compétence.

Je remercie vivement les membres de mon jury d'avoir accepté de juger ce travail et en particulier Monsieur **N. Bellel** Maître de conférence au département de physique, pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury.

Je remercie également Monsieur le Professeur **M. Belhamel** Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), d'avoir accepté d'honorer ma thèse, et ce malgré ses nombreux occupations.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur **B. Benyoucef** Professeur à l'université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a bien voulu accorder à cette étude et de rehausser ce travail par sa présence.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur **B. Draoui** Professeur à l'université de Bechar, pour son intérêt à ce travail et pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury.

J'exprime mes profonds remerciements à Monsieur **M. Djeddar** Maître de conférence au département de physique, pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Je souhaiterai aussi remercier toutes les personnes qui m'ont aidé au cours de ce travail. Ma reconnaissance va à tous mes collègues du Laboratoire de Physique Energétique.

Enfin, je sais combien la présence de mes très chers parents, de mes soeurs et mes frères bien aimés à mes cotés a été importante pour surmonter les moments difficiles. C'est à eux que je dédie particulièrement ce mémoire.

Nomenclatures

Caractères latins

a	: diffusivité thermique	m ² /s
C	: chaleur massique	J/ Kg. K
c	: coefficient global de déperdition thermique à travers la boîte	W/ K
D	: coefficient de diffusion massique	m ² /s
e	: épaisseur de l'échantillon	m
HR	: humidité relative	%
h _c	: coefficient d'échange par convection	W/m ² .K
J	: densité du flux de masse	W/m ²
L _v	: chaleur latente de vaporisation de l'eau	J/ Kg
M	: masse moléculaire de vapeur	Kg/mole
m	: masse	Kg
K	: perméabilité du milieu poreux	m ²
P _a	: pression atmosphérique	Pa
P _l	: pression liquide	Pa
P _v	: pression de vapeur d'eau	Pa
r	: rayon de courbure du ménisque	m
R	: résistance chauffante	Ω
S	: surface d'échange	m ²
T	: température	K
t	: temps	s
V	: tension aux bornes du film chauffant de résistance	volt
x	: variable d'espace	m

Lettres grecques

λ	: conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1} . \text{K}^{-1}$
ρ	: masse volumique	Kg. m^{-3}
δ	: coefficient de thermomigration	
Φ_c	: flux thermique	W
φ	: densité de flux thermique	W.m^{-2}
ε	: porosité totale du matériau	%
ω	: teneur volumique en eau	%
τ	: tortuosité	

Indices

a	: ambiance de la salle
b	: ambiance intérieure de la boîte
c	: face chaude
e	: eau
eff	: effective
f	: face froide
g	: phase gazeuse
l	: phase liquide
s	: solide
v	: vapeur

Table des matières

<u>Introduction générale</u>	17
------------------------------	----

Chapitre 1. Cadre de l'étude

<u>Introduction</u>	21
<u>1. Nécessité de l'isolation thermique</u>	21
1.1 Principe.....	21
1.2 Isolation des parois.....	22
1.2.1 Isolation intérieure.....	23
1.2.2 Isolation extérieure.....	23
1.2.3 Isolation intégrée au matériau porteur.....	23
<u>2. Comportement hydrique</u>	23
2.1 Modes de fixation de l'humidité.....	24
2.1.1 Adsorption physique.....	24
2.1.2 Condensation capillaire.....	26
2.2 Mécanisme du transport de l'humidité.....	28
2.2.1 Transfert en phase liquide.....	29
2.2.2 Transfert en phase vapeur.....	29
2.2.2.1 Transfert par diffusion.....	29
2.2.2.2 Transfert de vapeur d'eau par évapo- condensation.....	30
<u>3. Comportement thermique</u>	31
3.1 Transfert de chaleur par conduction.....	31
3.2 Le transfert de chaleur par convection.....	32
3.3 Transfert de chaleur par rayonnement.....	33
3.4 Conductivité thermique des milieux poreux.....	33
3.4.1 Généralités.....	33
3.4.2 Modélisation de la conductivité thermique des milieux poreux.....	34
3.4.2.1 Modèle série.....	34

3.4.2.2	Modèle parallèle.....	35
3.4.2.3	Juxtaposition des modèles série et parallèle.....	36
3.4.2.4	Milieux triphasiques.....	37
3.5	Résistance thermique.....	39
4. Positionnement de la problématique		39

Chapitre2. Présentation des matériaux étudiés

Introduction		42
1. Le béton		43
1.1	Constituants du béton.....	43
1.1.1	Ciment.....	43
1.1.1.1	Définition.....	43
1.1.1.2	Composition et caractéristiques du ciment.....	43
1.1.1.3	Principaux types de ciments.....	45
1.1.1.4	Hydratation du ciment.....	46
1.1.2	Granulats.....	48
1.1.2.1	Généralités.....	48
2.1.2.2	Caractéristiques des granulats.....	49
2. 1.3	Eau.....	50
1.2	Propriétés des bétons.....	50
1.2.1	Ouvrabilité.....	50
1.2.2	Retrait.....	50
2.2.3	Résistance mécanique.....	51
1.2.4	Fluage.....	51
2. Le liège		52
2.1	Historique.....	52
2.2	Structure alvéolaire du liège.....	53
2. 3	Composition chimique.....	54
2.3.1	La subérine.....	55
2.3.2	La lignine.....	55

2.3.3 La cellulose et les polysaccharides.....	55
2.3.4 Les tannins.....	55
2.3.5 Les céroïdes.....	55
2.4 Préparation du liège.....	55
2.5 Propriétés du liège.....	57
3. Le polystyrène	58
3.1 Composition chimique.....	58
3.2 Fabrication du polystyrène expansé.....	60
3.3 Propriétés du polystyrène.....	61
3.4 Billes de polystyrène.....	61
4. Comportement mécanique des matériaux étudiés	61
4.1 Béton de liège.....	62
4.2 Béton de polystyrène.....	62
Conclusion	65

Chapitre3. Etude expérimentale de la conductivité thermique

Introduction	67
1. Matériaux utilisés	67
1.1Ciment.....	67
1.2 Sable.....	69
1.3 Fibres.....	71
1.3.1 Granulats de liège	71
1.3.2 Billes de polystyrène expansé.....	72
2. Formulation des échantillons	72
2.1 Formulation d'un béton de référence.....	72
2.2 Formulation des bétons allégés.....	73
3. Mesures de la conductivité thermique	75
3.1 Dispositif expérimental utilisé.....	75
3.2 Description de l'installation.....	77

3.3 Evaluation de la conductivité thermique.....	79
3.3.1 Principe de mesure.....	79
3.3.2 Détermination de la conductivité thermique.....	79
3.3.3 Coefficient de déperdition thermique.....	81
3.4 Incertitude de calcul sur la mesure de la conductivité thermique.....	82
3.4.1 Les erreurs systématiques.....	82
3.4.2 Les erreurs accidentelles.....	83
Conclusion	83

Chapitre4. Exploitation des résultats expérimentaux

Introduction	85
1. Masse volumique	85
2. Conductivité thermique	87
2.1 Influence de la teneur en eau.....	88
2.1.1 Béton de liège.....	88
2.1.1 Béton de polystyrène.....	91
2.2 Influence de la masse volumique.....	93
2.3 Influence du dosage de fibre.....	95
3. Résistance thermique	96
3.1 Influence de la teneur en eau.....	97
3.2 Influence de la masse volumique.....	98
3.3 Influence du dosage de fibre.....	101
3.4 Etude thermomécanique.....	102
4. Chaleur massique	104
5. Comparaison du pouvoir thermique d'isolation des matériaux étudiés	106
Conclusion	110

Chapitre 5. Modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse

<u>Introduction</u>	<u>112</u>
<u>1. Modélisation mathématique</u>	<u>113</u>
1.1 Mise en équation.....	113
1.1.1 Equation de transfert de masse.....	114
1.1.2 Equation de transfert de chaleur.....	117
1.3 Conditions aux limites.....	118
<u>2. Résolution numérique des équations</u>	<u>119</u>
2.1 Discrétisation spatiale.....	119
2.2 Discrétisation temporelle.....	122
2.3 Résolution du système d'équations algébriques.....	123
<u>3. Présentation des résultats</u>	<u>124</u>
3.1 Champs d'humidité et de température.....	125
3.2 Influence de la nature du matériau sur les profils de température et d'humidité...	128
3.3 Influence du dosage de fibre sur les profils de température et d'humidité.....	129
<u>Conclusion</u>	<u>132</u>

Conclusion générale et Perspectives 134

Références bibliographiques 138

Annexes

<u>Annexe 1 : Caractéristiques des milieux poreux</u>	<u>147</u>
<u>Annexe 2 : Revue de principaux modèles de la conductivité thermique</u>	<u>151</u>

Liste des figures

Figure 1-1: Répartition des déperditions thermiques dans une habitation.....	22
Figure 1-2 : Allure générale des isothermes de sorption.....	25
Figure 1-3 : Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux [1].....	26
Figure 1-4 : Condensation capillaire dans un pore [3].....	26
Figure 1-5 : Rayon du capillaire en dessous duquel se produit la condensation capillaire pour $T = 20\text{ °C}$ [4].....	28
Figure 1-6 : Evapo -condensation à la constriction d'un pore.....	30
Figure 1-7 : Convection à l'interface solide/fluide.....	33
Figure 1-8 : Représentation du modèle série.....	34
Figure 1-9 : Représentation du modèle parallèle.....	35
Figure 1-10 : Valeurs limites de la conductivité thermique d'un milieu biphasique.....	36
Figure 1-11 : Représentation du modèle de Willy et de Soutwick.....	36
Figure 1-12 : Représentation du modèle de Krischer.....	37
Figure 2-1 : Processus de fabrication du ciment.....	45
Figure 2-2 : Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: consommation des phases du clinker [18].....	46
Figure 2-3 : Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: formation des hydrates [18].....	47
Figure 2-4 : Répartition mondiale des subéraies.....	52
Figure 2-5: Structure et composition du liège.....	53
Figure 2-6 : Structure microscopique du liège.....	53
Figure 2-7: Formation du liège.....	54
Figure 2-8 : Le cycle de production du liège.....	57
Figure 2-9 : Structure chimique du polystyrène.....	59
Figure 2-10: Structure alvéolaire du polystyrène.....	60

Figure 2-11: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la fraction L/B [32].....	62
Figure 2-12: Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [33].....	63
Figure 2-13: Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [33].....	64
Figure 2-14: Evolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage et de la taille des billes de polystyrène [10].....	64
Figure 3-1 : Analyse granulométrique du sable.....	70
Figure 3-2 : Cellule de mesure EI700.....	76
Figure 3-3: Vue générale de la cellule de mesure " la méthode des boîtes".....	77
Figure 3-4 : Boîte de mesure de la conductivité thermique.....	78
Figure 4-1 : Masse volumique des échantillons testés.....	86
Figure 4-2 : Variation de la conductivité thermique des bétons allégés avec le liège en fonction de la teneur en eau.....	88
Figure 4-3 Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BL5 en fonction de la teneur en eau.....	90
Figure 4-4 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BL7 en fonction de la teneur en eau.....	90
Figure 4-5 : Variation de la conductivité thermique des bétons allégés avec les billes de polystyrène en fonction de la teneur en eau.....	91
Figure 4-6 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BP1 en fonction de la teneur en eau.....	92
Figure 4-7 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BP4 en fonction de la teneur en eau.....	92
Figure 4-8 : Variation de la conductivité thermique apparente des bétons de liège en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé.....	93
Figure 4-9 : Variation de la conductivité thermique apparente des bétons de polystyrène en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé.....	94
Figure 4-10 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction du dosage de granulats de liège L/B.....	95
Figure 4-11 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction du dosage des billes de polystyrène P/B.....	96

Figure 4-12 : Variation de la résistance thermique des bétons allégés avec des granulats liège en fonction de la teneur en eau.....	97
Figure 4-13 : Variation de la résistance thermique des bétons allégés avec les billes de polystyrène en fonction de la teneur en eau.....	98
Figure 4-14 : Variation de la résistance thermique des bétons de liège en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé.....	99
Figure 4-15 : Variation de la résistance thermique des bétons de polystyrène en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé.....	100
Figure 4-16 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction du dosage des granulats du liège L/B.....	101
Figure 4-17 : Variation de la résistance thermique en fonction du dosage des billes de polystyrène P/B.....	102
Figure 4-18 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique du Béton de liège.....	103
Figure 4-19 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique du Béton de polystyrène.....	103
Figure 4-20 : Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau de l'échantillon BL7.....	104
Figure 4-21 : Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau de l'échantillon BP4.....	105
Figure 4-22 : Comparaison des conductivités thermiques des BL et BP.....	106
Figure 4-23 : Comparaison des résistances thermiques des BL et BP.....	107
Figure 4-24 : Comparaison des conductivités thermiques des BL1 et BP1.....	108
Figure 4-25 : Comparaison des conductivités thermiques des BL3 et BP3.....	108
Figure 4-26 : Comparaison des résistances thermique des BL2 et BP2.....	109
Figure 4-27 : Comparaison des résistances thermique des BL4 et BP4.....	109
Figure 5-1 : Modèle mathématique.....	118
Figure 5-2: Discrétisation du domaine de calcul.....	120
Figure 5-3 : Evolution de la température moyenne du béton classique au cours du temps.....	125
Figure 5-4 : Evolution de la teneur en eau moyenne du béton classique au cours du temps.....	126
Figure 5-5 : Distribution de la température au sein de la paroi (béton classique).....	127

Figure 5-6 : Distribution de la teneur en eau au sein de la paroi (béton classique).....	127
Figure 5-7 : Influence de la nature du matériau de l'enveloppe sur le profil de la température.....	128
Figure 5-8 : Influence de la nature du matériau de l'enveloppe sur le profil de la teneur en eau.....	129
Figure 5-9 : Influence du dosage de liège sur le profil de la température.	130
Figure 5-10: Influence du dosage de polystyrène sur le profil de la température.....	130
Figure 5-11 : Influence du dosage de liège sur le profil de la teneur en eau.....	131
Figure 5-12: Influence du dosage de polystyrène sur le profil de la teneur en eau.....	131
Figure A-1 : Représentation schématique d'un solide poreux.....	147

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Modèles série, parallèle, et de juxtaposition d'un milieu triphasiques.....	38
Tableau 2-1 : Composants du clinker.....	44
Tableau 2-2 : Dimensions et caractéristiques des familles de granulats.....	48
Tableau 3-1: Composition chimique.....	68
Tableau 3-2 : Essais physiques.....	68
Tableau 3-3 : Résistances mécaniques.....	69
Tableau 3-4 : Composition minéralogique.....	69
Tableau 3-5 : Analyse granulométrique.....	69
Tableau 3-6 : Caractéristiques physiques du sable utilisé.....	70
Tableau 3-7 : Analyse chimique sommaire.....	71
Tableau 3-8 : Caractéristiques des granulats de liège.....	71
Tableau 3-9 : Caractéristiques des billes de polystyrène.....	72
Tableau 3-10 : Composition du béton de référence.....	73
Tableau 3-11 : Compositions des bétons allégés avec des granulats de liège.....	74
Tableau 3-12 : Compositions des bétons allégés avec des billes de polystyrène.....	75
Tableau 4-1 : Masse volumique des échantillons de béton de liège.....	86
Tableau 4-2 : Masse volumique des échantillons de béton de polystyrène.....	86
Tableau 4-3 : Conductivité thermique des échantillons de béton de liège à l'état normal.....	87
Tableau 4-4 : Conductivité thermique des échantillons de béton de polystyrène à l'état normal.....	88
Tableau 4-5 : Conductivité thermique des échantillons de béton de liège étudiés à l'état sec et à l'état saturé.....	93
Tableau 4-6 : Conductivité thermique des échantillons de béton de polystyrène étudiés à l'état sec et à l'état saturé.....	94

Tableau 4-7 : Résistance thermique des échantillons de béton de liège étudiés à l'état sec et à l'état saturé.....	99
Tableau 4-8 : Résistance thermique des échantillons de béton de polystyrène étudiés à l'état sec et à l'état saturé.....	100
Tableau4-9 : Comparaison du pouvoir d'isolation thermique des matériaux étudiés.....	106
Tableau A-1 : Paramètres d'état.....	148

Introduction générale

Un bâtiment est conçu pour protéger les usagers des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie. Le secteur du bâtiment réputé grand consommateur d'énergie (presque la moitié de la consommation globale) est en outre, responsable de 25% des émissions des gaz par l'effet de serre. La réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des bâtisseurs qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable ou encore de la haute qualité environnementale.

L'atteinte de ces objectifs conduit à l'apparition de solutions passives, qui ont été développées en augmentant fortement l'isolation des différentes composantes de l'enveloppe pour empêcher au maximum les déperditions de chaleur vers l'extérieur. Le principe de la construction reposait jusqu'à maintenant sur la juxtaposition de différents matériaux chacun ayant une tâche dévolue. Cependant, cette accumulation de matériaux séduit de moins en moins, car ils deviennent coûteux et finissent par occuper un volume non négligeable. Ceci explique l'évolution des techniques de construction et le développement de nouveaux matériaux servant à l'isolation thermique et qui peuvent réduire le coût de la construction, d'une part et baisser la facture énergétique, d'autre part. Parmi ces matériaux, les bétons allégés, qui sont capables de jouer un rôle en tant qu'isolants tout en conservant des niveaux de performances suffisants.

L'utilisation des granulats de nature végétale dans ces bétons, s'inscrit dans une démarche de développement durable. Elle présente l'avantage d'utiliser une matière première renouvelable, contrairement aux granulats des carrières dont les ressources s'appauvrissent.

Or, les bétons allégés comme la plupart des matériaux de construction sont des matériaux poreux, et donc très sensibles à l'eau, ils sont aptes à fixer et emmagasiner de l'humidité. Cette dernière, outre les problèmes de la durabilité qu'elle est susceptible de créer, peut en

particulier, modifier sensiblement les performances thermiques, en modifiant les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés dans la construction. C'est pourquoi, l'amélioration de l'isolation thermique d'un habitat nécessite une bonne connaissance du comportement hygrothermique des parois.

Ce travail de thèse, porte sur une caractérisation thermique des parois composant l'enveloppe du bâtiment dans le but d'améliorer son isolation thermique. Il fait partie d'une étude intéressante menée dans notre laboratoire, sur les propriétés thermohydriques des bétons allégés, en particulier les bétons renforcés par des fibres naturelles et artificielles.

Les objectifs de ce travail sont multiples. Le premier consiste à caractériser expérimentalement le comportement thermique de matériaux de construction utilisés pour l'isolation de l'enveloppe de bâtiment. Un intérêt particulier est porté aux bétons allégés avec des granulats de liège expansé et avec des billes de polystyrène expansé. Le second concerne une étude numérique des transferts de chaleur et de masse intervenant au sein des parois d'un habitat constituées par ce type de matériaux.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de notre problématique et à une synthèse bibliographique concernant l'isolation thermique des bâtiments. Le lecteur y trouvera également une étude des comportements hydrique et thermique des matériaux poreux.

Le deuxième chapitre s'articule autour de deux thèmes. Le premier à caractère bibliographique, synthétise les principales caractéristiques physiques, la composition chimique, et les procédures de fabrication des matériaux étudiés. Dans le second, quelques résultats concernant le comportement mécanique des matériaux étudiés sont exposés.

La partie expérimentale qui fait l'objet du troisième chapitre, a pour but de déterminer les propriétés thermophysiques des matériaux choisis. Les matériaux utilisés pour l'élaboration des différents échantillons ainsi que, le dispositif expérimental et le principe global de mesure de la conductivité thermique sont présentés.

Le quatrième chapitre s'intéresse à l'analyse et à l'exploitation des résultats expérimentaux obtenus par la mesure de la conductivité thermique au moyen de la méthode des boîtes. Les résultats concernant la résistance thermique et la chaleur massique des différents échantillons testés qui ont été évalués par calcul, sont également exposés et exploités. On termine ce chapitre par une comparaison du pouvoir isolant des différents types de matériaux étudiés.

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse au sein d'une paroi poreuse, il se compose de trois parties. La première consiste à la formulation des équations régissant les phénomènes des transferts hydriques et thermiques qui se produisent au sein des parois composant l'enveloppe de bâtiment. Le lecteur trouvera dans la seconde partie la formulation numérique du problème considéré, et la discrétisation des équations qui est faite en utilisant la méthode des éléments finis. La dernière partie est réservée à la présentation de l'ensemble des résultats obtenus et leurs interprétations.

Une conclusion générale dressant un bilan des résultats obtenus et quelques perspectives compléteront ce manuscrit.

CHAPITRE 1 : Cadre de l'étude

Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présentons tout d'abord, quelques généralités sur l'isolation thermique des bâtiments, puis une synthèse bibliographique sur les comportements hydrique et thermique 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. 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.

1.1 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 figure1-1.

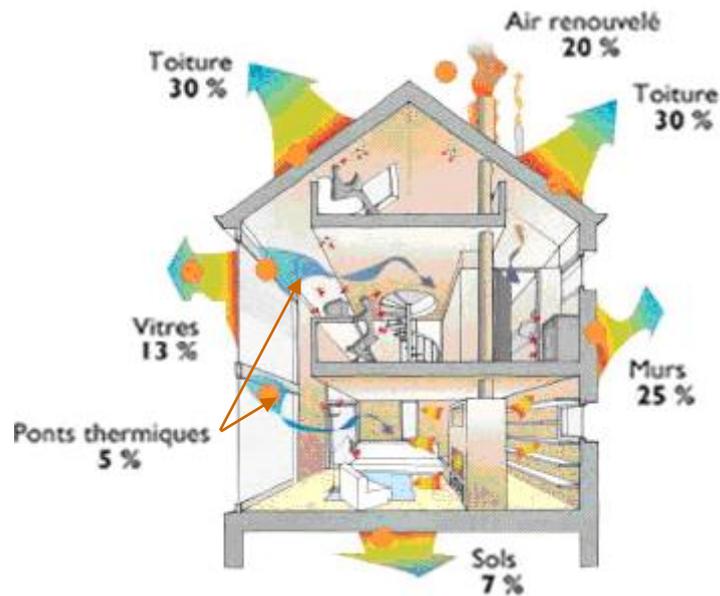


Figure 1-1: Répartition des déperditions thermiques dans une habitation

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

- Toits : 30 %,
- Murs : 25 %,
- Renouvellement d'air : 20 %,
- Portes fenêtres : 13 %,
- Sols : 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%.

1.2 Isolation des parois

Il existe trois types d'isolation des parois :

1.2.1 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.

1.2.2 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.

1.2.3 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 hydrique et thermique des parois.

2. Comportement hydrique

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont des matériaux poreux, ils sont composés d'au moins deux phases ; la phase solide, qui constitue le squelette du matériau,

et les pores de dimensions variables. Ces deniers peuvent être ouverts (connectés à l'extérieur) ou fermés (entièrement entourés de la phase solide). Cette particularité les rend le siège de plusieurs phénomènes tel que la fixation et la migration de l'humidité, l'humidification, le changement de phase, etc.

2.1 Modes de fixation de l'humidité

L'eau est présente dans un matériau poreux sous multiples états, chacun de ces états correspond à un mode de liaison de l'eau. Ainsi, on rencontre :

- L'eau chimiquement liée (hydratation),
- L'eau fixée par des liaisons intermoléculaires de Van Der Waals : c'est l'adsorption physique,
- L'eau fixée par liaisons chimiques : c'est l'adsorption chimique, ce dernier mode de fixation n'intervenant pas dans le cadre de cette étude, nous ne le mentionnerons pas dans ce qui suit,
- L'eau attachée par des liaisons mécaniques (forces capillaires),
- L'eau libre dans le matériau qui n'est plus sous le champ d'influence des forces superficielles, elle se trouve principalement dans les pores capillaires et macropores. Elle représente, en fait un cas particulier de l'eau capillaire et rentre dans la plupart des études dans cette dernière classe.

2.1.1 Adsorption physique

Les matériaux ont la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air ambiant. En effet, sous des variations de conditions de l'air au voisinage, le milieu poreux absorbe de la vapeur qui se condense sous forme d'eau liquide. Ceci se traduit par une augmentation de la masse apparente de ce milieu. Cette augmentation de masse est due à la fixation de molécules d'eau en surface du matériau c'est le phénomène d'adsorption. Inversement une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une diminution de la masse apparente, c'est le phénomène de désorption.

L'origine de ce phénomène, dont l'évolution est schématisée sur la figure 1-2 est attribuée aux forces intermoléculaires (force de Van der Waals) agissant au voisinage de l'interface solide- fluide.

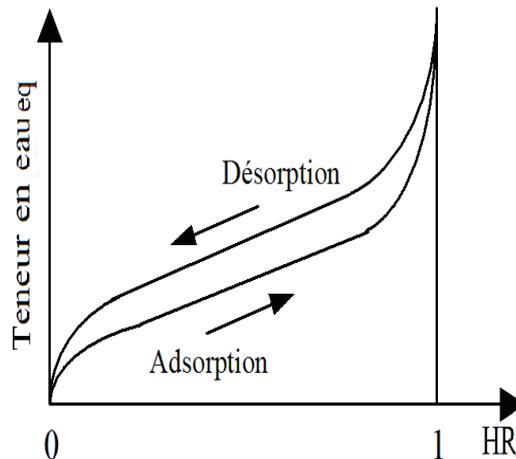


Figure 1-2 : Allure générale des isothermes de sorption

L'adsorption physique peut être décomposée en trois phases (figure 1-3):

- Le domaine hygroscopique (1): l'eau se trouve sous forme adsorbée autour des grains. Les molécules d'eau recouvrent en une couche la surface des pores, c'est l'adsorption monocouche. La phase liquide est discontinue ; la phase gazeuse est continue et les échanges d'eau se font par changement de phase et par diffusion de vapeur.
- Le domaine pendulaire (2) : ce domaine est encore mal défini. Les couches multimoléculaires se rejoignent et forment un pont liquide séparé de la phase gazeuse par un ménisque. L'eau est retenue à la surface par les forces capillaires, ceci entraîne le remplissage des pores fins puis des pores plus importants. Dans ce cas, les transferts se font par filtration liquide et gazeuse et par changement de phase.
- Le domaine funiculaire (3) : la phase liquide est continue et la phase gazeuse se trouve sous forme de bulles occluses. Les transferts d'eau se font par capillarité. Le schéma (4) est un cas particulier de ce domaine, il représente l'état saturé dans lequel la phase gazeuse a entièrement disparue.

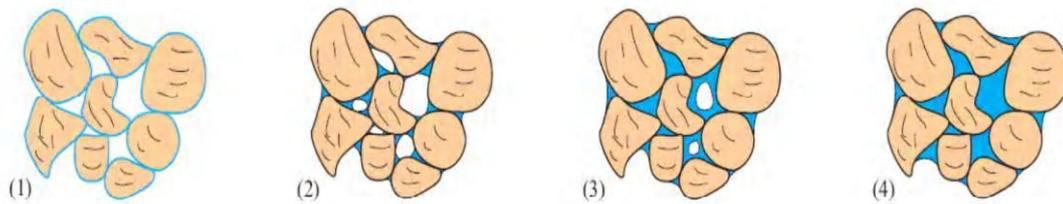


Figure 1-3 : Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux, d'après Salager [1]

2.1.2 Condensation capillaire

La condensation capillaire est un phénomène physique permettant d'expliquer comment un matériau poreux initialement en équilibre hydrique avec le milieu extérieur se remplit peu à peu d'eau liquide lorsque l'on augmente l'humidité relative (HR) de manière isotherme. A l'échelle d'un pore que l'on symbolise ici par deux plaques parallèles (figure 1-4), se trouvent de l'air et de la vapeur d'eau. Si l'espace entre les deux plaques est suffisamment petit, un changement de phase s'opère et de l'eau se condense le long des parois formant des ménisques [2].

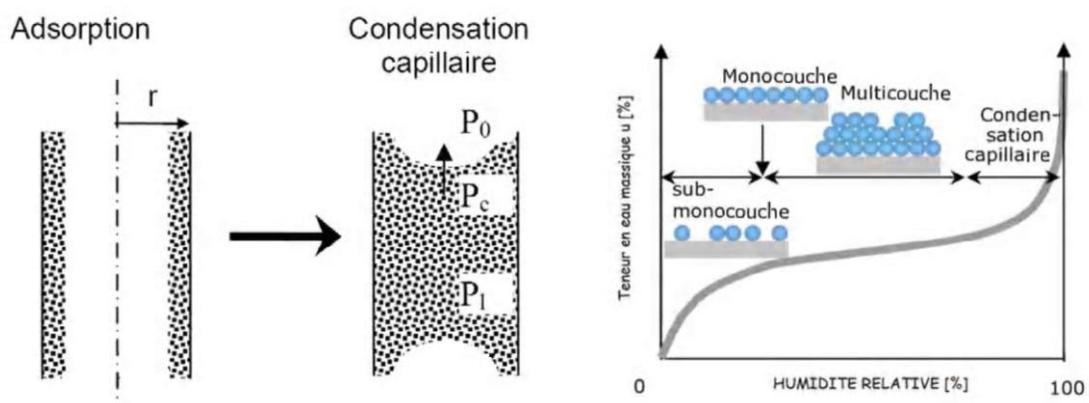


Figure 1-4 : Condensation capillaire dans un pore [3]

Lorsque l'on analyse la condition d'équilibre, on constate l'existence d'une différence de pression positive entre l'air humide et l'eau appelée pression capillaire (P_c) qui est déterminée à partir de la relation de Laplace :

$$P_c = P_a - P_l = \frac{2\sigma(T)\cos\theta}{r} \quad (1.1)$$

avec

P_a : pression atmosphérique,

P_l : pression liquide,

σ : tension superficielle ($0.075 \text{Kg} \cdot \text{s}^{-2}$ dans le cas de l'eau),

θ : angle de mouillage ($< \pi/2$),

r : rayon de courbure du ménisque.

La loi de Kelvin s'écrit :

$$P_c = P_a - P_l = -RT \rho_l \ln HR \quad (1.2)$$

où

ρ_l : masse volumique de l'eau,

R : constante des gaz parfait,

T : température absolue.

La combinaison des deux expressions (1.1) et (1.2) conduit à une relation entre le rayon r du ménisque et l'humidité relative HR :

$$r = \frac{-2\sigma\cos\theta}{\rho_l RT \ln HR} \quad (1.3)$$

L'équation (1.3) exprime que si l'air humide dans le réseau poreux est caractérisé par une humidité relative (HR) à l'équilibre, tous les pores de rayon inférieur à r sont nécessairement remplis d'eau (figure 1-5).

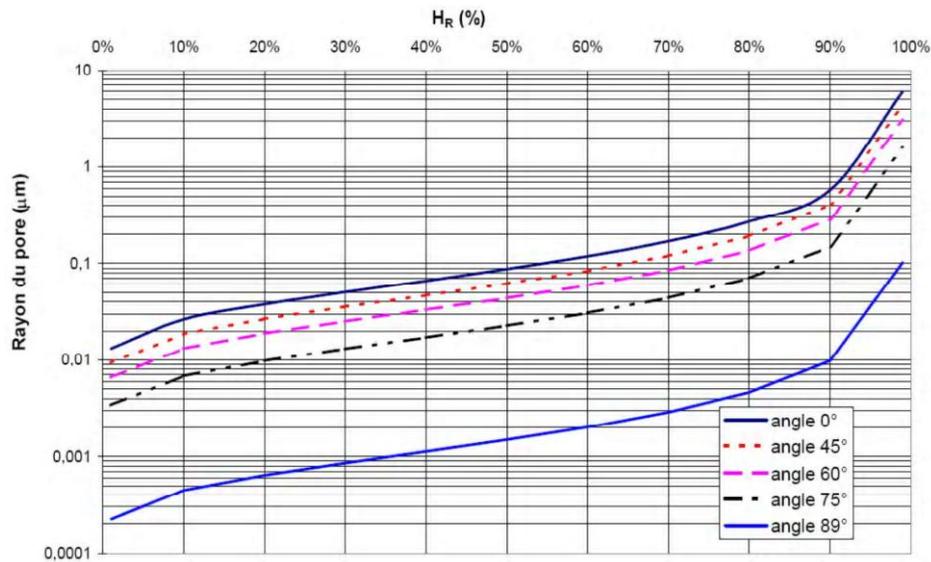


Figure 1-5 : Rayon du capillaire en dessous duquel se produit la condensation capillaire pour $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]

Deux types de milieux poreux sont ainsi mis en évidence [5] :

- Les matériaux à comportement dit hygroscopique, dans lesquels la quantité d'eau fixée par l'adsorption physique, est relativement importante par rapport à la quantité d'eau correspondant à l'état de saturation complète des pores. Ces matériaux ont une grande surface spécifique et un rayon moyen de pores $< 10^{-7}\text{m}$ (figure 1-5),
- Les matériaux non hygroscopiques (capillaro- poreux), pour lesquels la quantité d'humidité fixée par adsorption est négligeable. Dans ce cas l'humidité en masse se trouve fixée au milieu solide, par les forces capillaires.

2.2 Mécanisme du transport de l'humidité

Dans les structures des bâtiments, les transferts d'humidité peuvent se développer en phase gazeuse et/ou liquide. La nature et l'intensité de ces transferts sont liées aux propriétés intrinsèques des matériaux utilisés pouvant induire des phénomènes particuliers:

2. 2.1 Transfert en phase liquide

L'eau présente sous forme liquide dans un milieu poreux est due, soit à l'adsorption des molécules d'eau, soit à la condensation capillaire.

- L'eau adsorbée présente une faible migration qui est induite par le gradient de masse volumique. Les molécules d'eau se déplacent des régions où elles sont moins liées vers des zones où elles sont plus liées,
- L'eau due à la condensation capillaire s'écoule sous l'effet d'un gradient de pression liquide des zones à forte concentration vers des zones à faible concentration en liquide, ce déplacement est régi par la loi de Darcy :

$$\vec{J}_l = -\frac{K_l}{\nu_l} \overrightarrow{\text{grad}} \hat{P}_l \tag{1.4}$$

où

$$\hat{P}_l = P_l - \rho_l g z$$

K_l : perméabilité du milieu à la phase liquide,

ν_l : viscosité cinématique de l'eau,

\hat{P}_l : pression motrice dans le liquide,

2. 2.2 Transfert en phase vapeur

2. 2.2.1 Transfert par diffusion

La diffusion de la vapeur d'eau provient des différences de concentration entre les deux composants du mélange gazeux air sec- vapeur d'eau, il en résulte un transport moléculaire, qui se poursuit jusqu'à l'uniformisation des concentrations.

La densité du flux massique par diffusion moléculaire s'exprime suivant la loi de FICK :

$$\vec{J}_v = -\delta \overrightarrow{\text{grad}} P_v \tag{1.5}$$

P_v étant la pression de vapeur d'eau.

δ représente le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau qui s'exprime sous la forme suivante [6] :

$$\delta = f(\omega) D_v \frac{M_v}{RT} \frac{P}{P - P_v} \quad (1.6)$$

$f(\omega)$ est une fonction de pondération dépendant de la teneur en eau globale et de la tortuosité du milieu poreux.

D_v , M représentent respectivement le coefficient de diffusion moléculaire, et la masse moléculaire de vapeur.

2.2.2.2 Transfert de vapeur d'eau par évapo- condensation

Ce mécanisme de transfert tel que présenté sur la figure 1- 6 se décompose en quatre temps [7] :

- 1- La vapeur arrive à la constriction entre les pores et se condense sur le ménisque amont, du fait de la réduction de la pression de vapeur d'équilibre, en raison de la courbure du ménisque.
- 2- La condensation provoque l'élévation de pression du liquide derrière le ménisque. La différence de pression du liquide entre les ménisques amont et aval induit un transfert convectif du liquide vers l'aval,
- 3- Le liquide arrivant sur le ménisque aval provoque l'augmentation de son rayon de courbure d'où le déplacement de l'équilibre liquide- vapeur vers une pression partielle de vapeur plus élevée, ce qui provoque l'évaporation du liquide,
- 4- La vapeur diffuse sous le gradient de pression partielle.

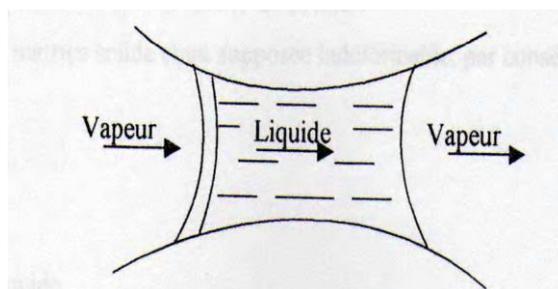


Figure 1-6 : Evapo -condensation à la constriction d'un pore

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 e 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 :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (1.7)$$

avec

ϕ : densité de flux de chaleur,

λ : conductivité thermique du matériau considéré.

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 1-7), le flux thermique échangé entre la surface et le fluide en mouvement est donné par la loi de Newton :

$$\phi_c = hS(T_p - T_f) \quad (1.8)$$

où

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.

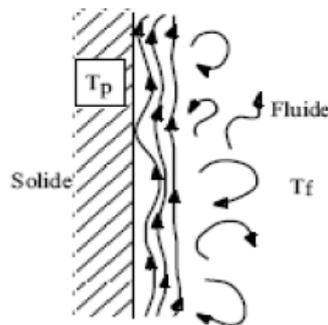


Figure1-7 : Convection à l'interface solide/fluide

3.3 Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par du vide ou par un milieu transparent par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel solide ou fluide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu, la convection et la conduction sont également présentes, il reste négligeable tant que la température du solide se trouve en dessous de 200°C .

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont le siège de transferts thermiques complexes dues au couplage conduction- convection- rayonnement. Dans la structure du bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligées. De même, au voisinage de la température ambiante, les parts de rayonnement et de transfert de masse ne seront pas également prises en compte. Par conséquent le transfert thermique peut être considéré purement conductif.

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, série, et la juxtaposition des deux, les autres modèles seront exposés dans l'annexe 2.

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.

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 1-8).

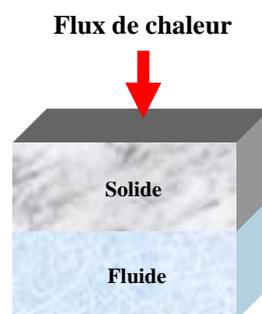


Figure 1-8 : Représentation du modèle série

La conductivité thermique λ_{\perp} correspondante est :

$$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{(1-\varepsilon)}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon}{\lambda_f}} \quad (1.9)$$

où ε est la porosité totale du matériau.

Dans le cas où la conductivité du fluide 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 fait jouer un rôle prépondérant à l'air qui va imposer la conductivité globale du matériau.

3.4.2.2 Modèle parallèle

Le modèle parallèle correspond au cas de figure 1-9, où le flux de chaleur traverse les deux couches de manière parallèle.

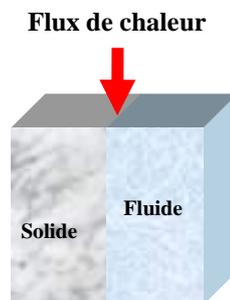


Figure 1-9 : Représentation du modèle parallèle

La conductivité correspondante s'écrit :

$$\lambda_{//} = (1 - \varepsilon)\lambda_s + \varepsilon\lambda_f \quad (1.10)$$

Lorsque la conductivité du flux 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 1-10) :

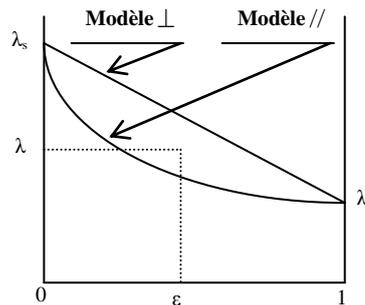


Figure 1-10 : Valeurs limites de la conductivité thermique d'un milieu biphasique

3.4.2.3 Juxtaposition des modèles série et parallèle

Deux approches peuvent être utilisées :

- ✓ Modèle de Willy et Southwick

Le milieu poreux est périodique, et chaque cellule de base est présentée par trois strates en parallèle (figure 1-11).

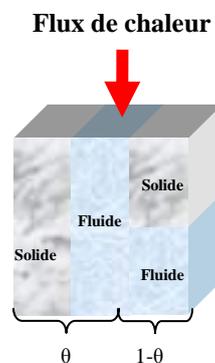


Figure 1-11 : Représentation du modèle de Willy et Soutwick

La conductivité thermique de ce milieu a pour expression :

$$\lambda = \theta \lambda_{//} + (1 - \theta) \lambda_{\perp} \tag{1.11}$$

avec

θ : la part du dispositif en conduction série,

$(1-\theta)$: la part en conduction parallèle.

✓ **Modèle de Krischer**

Dans ce modèle, la cellule de base est constituée de trois strates : phase solide, phase fluide, et une phase constituée de solide et fluide en série (figure 1-12), les trois strates sont en série par rapport à la direction du flux thermique.

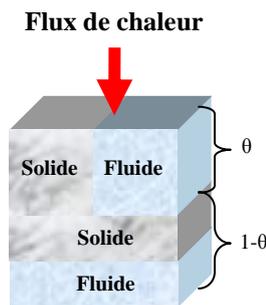


Figure 1-12 : Représentation du modèle de Krischer

La conductivité thermique est donnée par la relation :

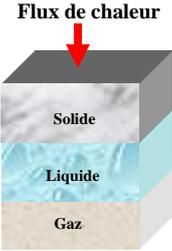
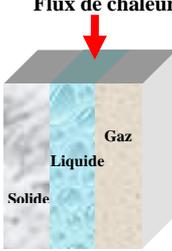
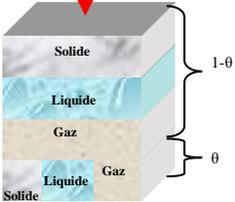
$$\lambda = \frac{1}{\frac{\theta}{\lambda_{//}} + \frac{(1-\theta)}{\lambda_{\perp}}} \tag{1.12}$$

3.4.2.4 Milieux triphasiques

Dans divers domaines courants, on rencontre la cohabitation de l'eau et de l'air dans les pores des milieux. De ce fait, la phase fluide se subdivise en phase liquide (λ_l), et en phase

gazeuse (λ_g). Le tableau 1-1 présente un récapitulatif des modèles développés précédemment dans le cas d'un milieu triphasique.

Tableau 1-1 : Modèles série, parallèle, et de juxtaposition d'un milieu triphasiques

Modèle	Schématisation	Formule
<i>Série</i>	<p>Flux de chaleur</p> 	$\lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{(1-\varepsilon)}{\lambda_s} + \frac{(1-S)\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{\varepsilon S}{\lambda_l}}$
<i>Parallèle</i>	<p>Flux de chaleur</p> 	$\lambda_{//} = (1-\varepsilon)\lambda_s + (1-S)\varepsilon\lambda_s + \varepsilon\lambda_f$
<i>Willy</i>	<p>Flux de chaleur</p> 	$\lambda = \theta\lambda_{//} + (1-\theta)\lambda_{\perp}$
<i>Krischer</i>	<p>Flux de chaleur</p> 	$\lambda = \frac{1}{\frac{\theta}{\lambda_{//}} + \frac{(1-\theta)}{\lambda_{\perp}}}$

2.2.5 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 :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (1.13)$$

La relation (1.13) 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 [9]. 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 thermophysiques, telle que la conductivité, la résistance thermique, et la chaleur massique.

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 liège et des billes de polystyrène. Le choix de ces fibres est justifié par le fait que ces matériaux (le liège et le polystyrène) comptent parmi les matériaux les 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 [10], ils sont destinés à être utilisés pour l'isolation des toitures et d'autres composantes de l'enveloppe [11]. Notre intérêt portera particulièrement sur la détermination de leurs différentes propriétés thermophysiques.

- Le second axe portera sur une modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse qui interviennent au sein des murs des bâtiments. Ces transferts peuvent modifier considérablement les propriétés thermophysiques des matériaux utilisés et par conséquent influencer sur leur pouvoir isolant.

CHAPITRE 2 : Présentation des matériaux étudiés

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 [12]. Ces matériaux peuvent être obtenus grâce à la substitution des granulats traditionnels par des granulats plus légers [13], souvent artificiels tels que l'argile expansée, le schiste, la perlite, la vermiculite, le laitier expansé, etc. Ces bétons, qui sont aujourd'hui bien maîtrisés au niveau de leur formulation et de leur mise en œuvre [14], présentent des densités se situant en général dans la fourchette [1.4, 1.9].

Cependant, on peut atteindre des densités plus faibles encore, en utilisant des granulats extrêmement légers tels que des agglomérés de liège, et des billes de polystyrène expansé 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.

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.

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.

✓ Le clinker

C'est le constituant principal des ciments, il est obtenu d'un mélange de calcaire et d'argile (figure 2-1), ces matières sont broyées, finement moulues et mélangées dans des proportions bien définies, ensuite ils sont placés dans un four et chauffés à environ 1450 °C. Au cours de la calcination les matières premières vont réagir, pour former à la fin de la cuisson, un produit de composition complexe appelé clinker.

Les principaux constituants du clinker sont:

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

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 2-1 regroupe les composants de clinker avec leurs proportions.

Tableau 2-1 : Composants du clinker

Nom du composant	Composition	Abréviation	Pourcentage
silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ S	45 à 65 %
silicate bicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₂ S	15 à 35 %
l'aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A	4 à 14 %
<i>l'alumino-ferrite tétracalcique</i>	<i>$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{F}_2\text{O}_3$</i>	<i>C₄AF</i>	<i>10 à 18 %</i>

- ✓ 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) [15]

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



Figure 2-1 : Processus de fabrication du ciment

1.1.1.3 Principaux types de ciments

Les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion de leurs constituants, définis dans la norme Européenne EN 197- 1[16] :

- Le ciment portland (CEM I),
- Le ciment portland composé (CEM II /A ou B),
- Le ciment de haut fourneau (CEM III),
- Le ciment pouzzolanique (CEM IV),

- Le ciment au laitier et aux cendres (CEM V/A ou B).

1.1.1.4 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 [17], 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.

Les figures 2-2 et 2-3 représentent respectivement le taux d'hydratation des différentes phases de clinker et le taux de formation des différents produits au cours de l'hydratation d'un ciment portland typique.

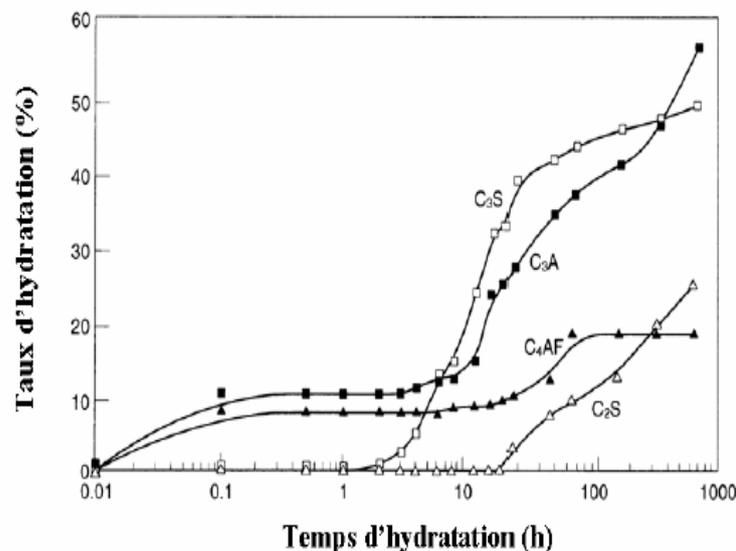


Figure 2-2: Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: consommation des phases du clinker [18]

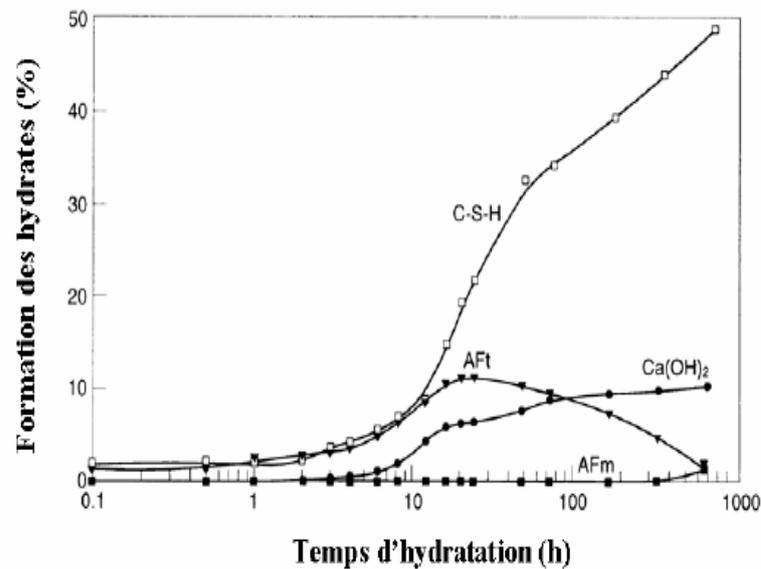


Figure 2-3: Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: formation des hydrates [18]

L'hydratation et sa cinétique sont influencées par de nombreux facteurs, dont les principaux sont [19]:

- La composition des phases du ciment et la présence d'ions étrangers à la maille cristalline des phases du clinker,
- La finesse du ciment, en particulier la distribution de taille des particules qui le compose et sa surface spécifique,
- Le rapport eau/ciment utilisé,
- La température de traitement,
- La présence d'additifs chimiques, c'est-à-dire les substances chimiques ajoutées en petites quantités de façon à modifier la vitesse d'hydratation et les propriétés de la pâte de ciment,
- La présence d'ajouts minéraux, c'est-à-dire les matériaux mélangés au ciment en grandes quantités, tels que les cendres volantes, le laitier ou la fumée de silice.

Pour des informations complémentaires sur l'hydratation des ciments le lecteur pourra se référer aux travaux de Freddy [20]

1.1.2 Granulats

1.1.2.1 Généralités

Le granulats est un ensemble de grains minéraux appelés fillers, sablons, sables, graves, et gravillons suivants leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm. Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origines alluvionnaire terrestres ou marines, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par recyclage de produits tel que les matériaux de démolition. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou de dragués en rivières ou en mer, et concassés obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

Les granulats sont désignés par leur classe granulaire d/D où d et D représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions du produit.

Tableau 2-2 : Dimensions et caractéristiques des familles de granulats

Familles de granulats		
<i>Familles</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Caractéristiques</i>
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm.
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec au moins de 70% de passant à 0.63 mm.
Sables	0/D	$1 \text{ mm} < D \leq 6.3$ mm.
Graves	0/D	$D > 6.3$ mm.
Gravions	d/D	$d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm.
Ballasts	d/D	$D \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

Plus de 70 % en poids du béton est constitué de granulats. Ce sont les composants majeurs de l'ouvrage puisqu'ils conditionnent sa résistance mécanique et son aspect visuel, et peuvent être primordial pour l'esthétisme de l'ouvrage. Les performances mécaniques, esthétiques et de durabilité recherchées sont déterminantes dans le choix des granulats.

2.1.2.2 Caractéristiques des granulats

Les granulats sont caractérisés par un certain nombre de propriétés liées à leur origine (caractéristiques intrinsèques) et à leur mode de fabrication:

- La résistance mécanique : il faut noter que la résistance mécanique du béton est étroitement liée à la résistance mécanique des gravillons,
- Absorption d'eau : le coefficient A_b mesure la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Il est d'autant plus élevé que le matériau est absorbant,
- Sensibilité au gel : le gravillon est considéré comme non gélif si au moins l'une des trois valeurs suivantes est respectée [14]:
 - Coefficient d'absorption d'eau du gravillon $A_b \leq 1\%$,
 - Coefficient de Los Angeles $LA \leq 25$,
 - Sensibilité au gel $G \leq 30$.
- Réactivité aux alcalis : la réaction alcalis- granulats se produit sous certaines conditions d'environnement entre les alcalis (potasse K_2O , et soude Na_2O) présents dans le béton et la silice de certains granulats. Elle peut engendrer des gonflements internes provoquant des désordres par fissuration,
- Granularité : il s'agit de la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle est déterminée par une analyse granulométrique qui fait l'objet d'une représentation graphique, cette courbe représente la distribution en pourcentage des poids des matériaux passant dans le tamis et passoirs de dimensions normalisées,
- Forme des gravillons : elle est mesurée par le coefficient d'aplatissement A . Il est d'autant plus élevé que les gravillons contiennent des grains plats, allongés, ou aiguilles, qui rendent la mise en œuvre et le malaxage difficiles.

2.1.3 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

1.2.1 Ouvrabilité

Elle caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages ou les moules et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité, tel que la nature, le dosage en ciment, la forme, les dimensions des granulats, et le dosage en eau, etc.

1.2.2 Retrait

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.

Ces divers types de retrait peuvent se produire simultanément, c'est ce qui se produit en générale dans la pratique.

2.2.3 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 :

$$R = K \left(\frac{C}{C + E + V} \right)^2$$

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.

1.2.4 Fluage

Le fluage est une déformation lente que subit un matériau soumis à une charge constante et permanente. Au-delà d'une certaine charge (approximativement la moitié de la résistance ultime à la compression), le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente. Le fluage du béton est ce processus continu de déformation d'un élément sur lequel s'exerce une charge constante ou variable. Il est fonction notamment des caractéristiques du béton, de son âge lors du chargement, de l'épaisseur de l'élément, de l'hygrométrie de l'environnement et du temps. Le fluage est un phénomène complexe, mais encore mal compris. Il serait lié à des

effets de migration d'eau dans les pores et les capillaires de la matrice ainsi qu'à un processus de réaménagement de la structure des cristaux hydratés du liant.

2. Le liège

2.1 Historique

Le liège est un matériau vivant et naturel, provenant d'une variété de chêne-liège qui reconstitue son écorce dès quelle est prélevée chaque année. L'arbre produit une épaisseur de liège variant de 1 à 10 mm selon l'âge déjà acquis par l'écorce elle-même. Chaque accroissement annuel est séparé du précédent par une ligne brune bien déterminée. Du point de vue thermique et acoustique le liège est un très mauvais conducteur. Sa première utilisation en tant qu'isotherme remonte très tôt dans l'Antiquité dans la fabrication de ruchers. En ce qui concerne sa place dans la construction, on retrouve quelques traces des premiers emplois comme isolant thermique, parmi les populations primitives d'Afrique du Nord qui l'utilisaient en plaque et mélangé avec de l'argile pour la construction des murs de leurs habitations. L'habitat naturel du chêne-liège est le pourtour du bassin méditerranéen occidental (présent depuis plus de 60 millions d'années). L'aire naturelle de la subéraie mondiale est d'environ 2687000 hectares repartis principalement sur sept pays (figure 2-4). Les principales subéraies algériennes sont situées essentiellement en zone sub-humide au nord, et entre l'Algérois et la frontière Tunisienne, ou elles s'étendent de la mer jusqu'à 1200 m d'altitude.

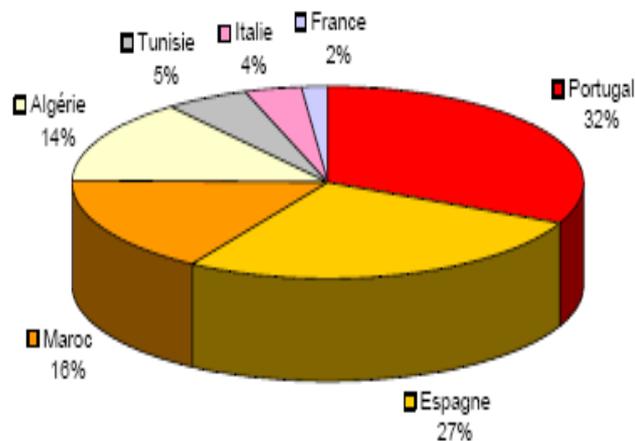


Figure 2-4 : Répartition mondiale des subéraies

2.2 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 [21].

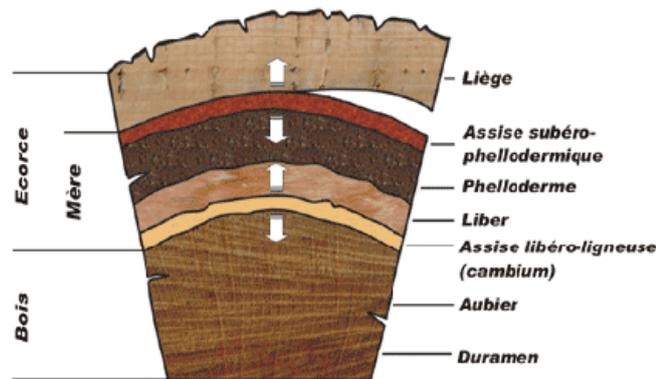


Figure 2-5: Structure et composition du liège

Le liège est un tissu végétal composé de micro cellules, ayant en général une forme polyhydrique. Si on l'examine au microscope, nous avons l'impression de regarder un gâteau de miel (figure 2-6).

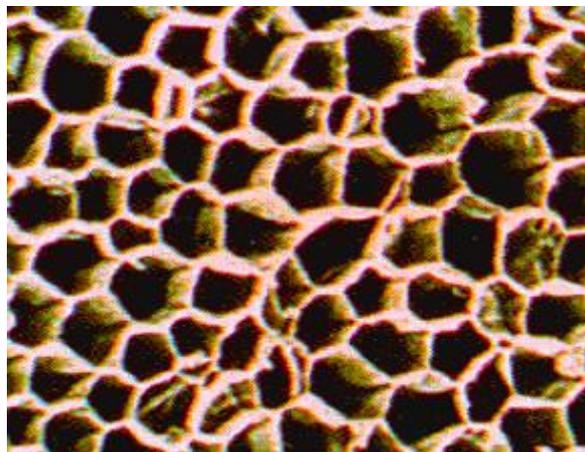


Figure 2-6 : Structure microscopique du liège

On estime que 1 cm³ 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 2-7), légèrement aplaties dont les dimensions sont de l'ordre de 20 à 30 mm, 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 remplis 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.

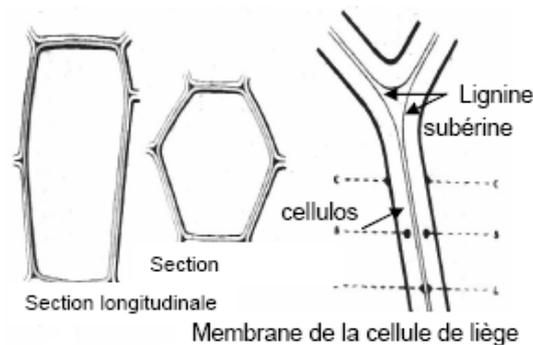


Figure 2-7 : Formation du liège

2. 3 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 [22, 23].

2.3.1 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 [24, 25].

2.3.2 La lignine

La lignine est un produit de masse moléculaire élevée, résultat du couplage de polymères polyphénoliques distribués de façon aléatoire. Les trois unités monomères de la lignine sont l'alcool coniférylique, l'alcool para-hydroxycinnamique et l'alcool sinapylique [26]. C'est elle qui permet la liaison entre les divers composants.

2.3.3 La cellulose et les polysaccharides

La cellulose résulte de la condensation exclusivement linéaire d'unités glucose unies entre elles [26] et les polysaccharides composent les parois des cellules, et contribuent à la définition de sa texture.

2.3.4 Les tannins

Ils déterminent la couleur.

2.3.5 Les céroïdes

Ce sont des Composés hydrophobes assurant l'imperméabilité.

2.4 Préparation du liège

Elle comporte essentiellement les opérations suivantes:

✓ *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.

✓ *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.

✓ *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.

✓ *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.

✓ *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.

✓ *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 2-8 :

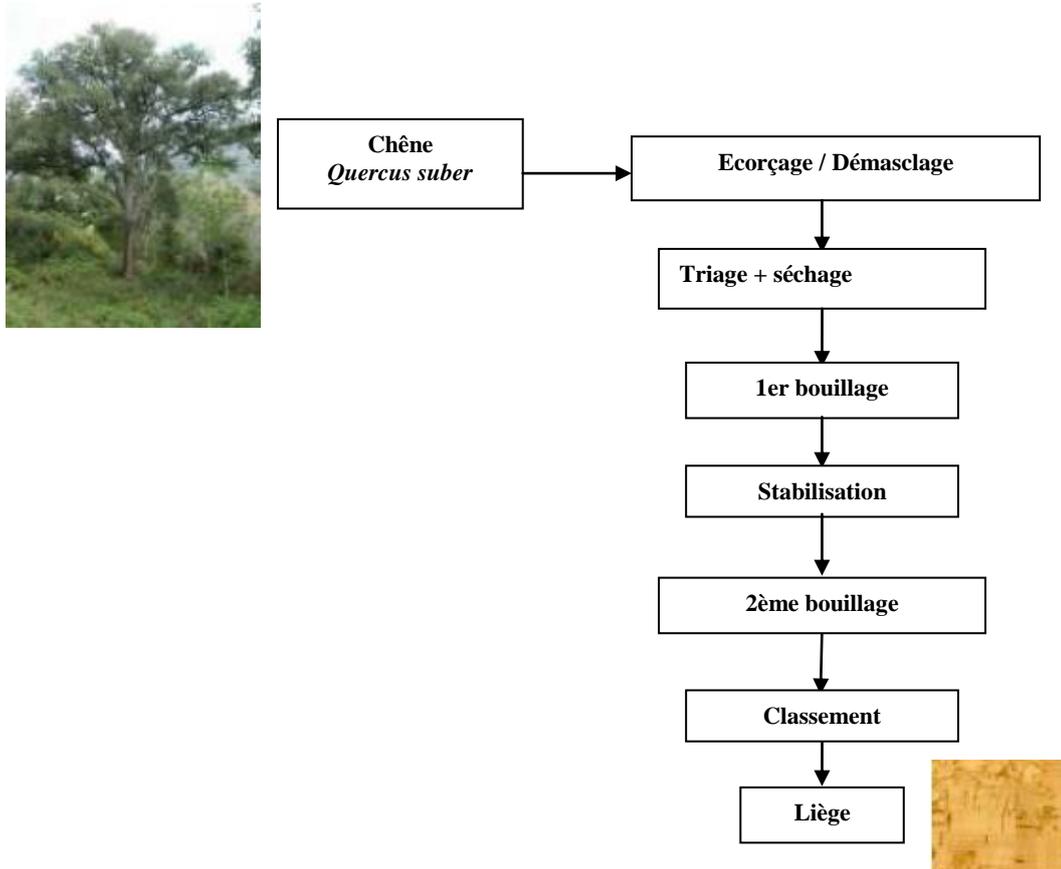


Figure 2-8 : Le cycle de production du liège

2. 5 Propriétés du liège

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

- **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 bâtiment et l'emballage des produits industrielles 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 2-9). Structurellement, c'est une

longue chaîne d'hydrocarbures, avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [27].

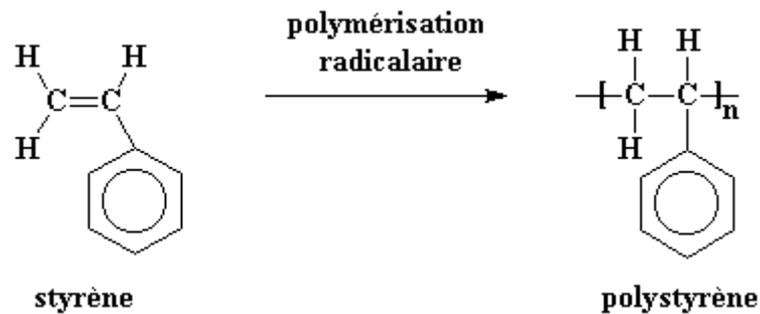


Figure 2-9 : Structure chimique du polystyrène

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 soudures interperles, la taille des cellules se situe habituellement entre 60 et 200 μm (figure 2-10)

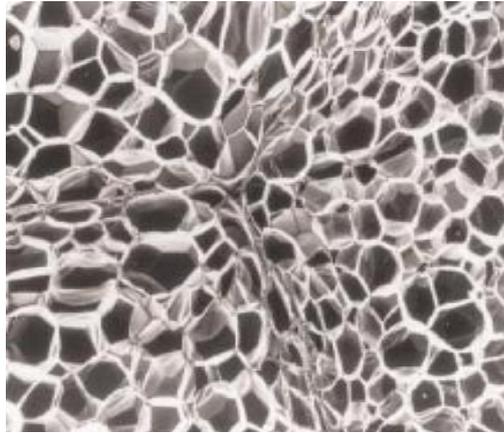


Figure 2-10 : Structure alvéolaire du polystyrène

3.2 Fabrication du polystyrène expansé

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

✓ *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, ...).

3.4 Billes de polystyrène

Les billes de polystyrène sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et Yamauchi [28] ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

4. Comportement mécanique des matériaux étudiés

Dans le cadre d'une caractérisation des matériaux allégés, des études assez complètes ont déjà été menées sur des bétons allégés comme le béton cellulaire [29- 31], et le béton de chanvre [2, 4], par contre très rares sont celles relatives aux matériaux composites tels que

les bétons allégés avec les granulats de liège et avec les billes de polystyrène. Dans la partie suivante, nous exposerons quelques résultats concernant le comportement mécanique de ces matériaux.

4.1 Béton de liège

Concernant la caractérisation mécanique du béton de liège, une étude expérimentale réalisée par Elbakkouri [32] a porté sur l'évolution de la résistance mécanique de ce matériau en fonction de sa masse volumique et de la quantité de liège introduite au matériau initial. Les résultats présentés sur la figure 2-11 montrent que la résistance à la compression de ce matériau est fortement influencée par l'incorporation du liège dans le béton.

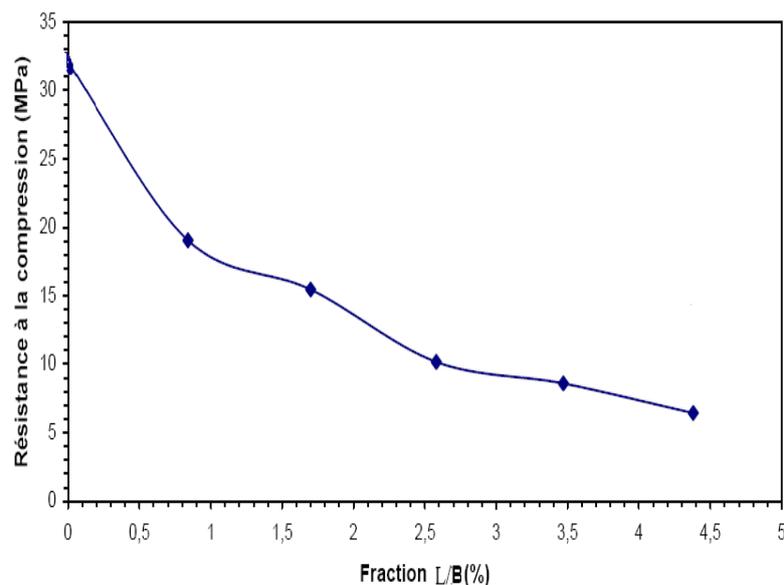


Figure 2-11: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la fraction L/B [32]

4.2 Béton de polystyrène

Bien qu'ils soient technologiquement très prometteurs, les bétons de polystyrène posent encore de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés

mécaniques. Chafi [33] a travaillé sur le béton de fibre de polystyrène expansé de densité comprise entre 1.1 et 2.2. Ses résultats ont montré que la résistance à la compression de ce type de béton diminue sensiblement lorsqu'on augmente le taux de fibre. A titre d'exemple, un béton de densité 0.1 résiste à environ 1/10 du béton de densité 0.2 (figure 2-12).

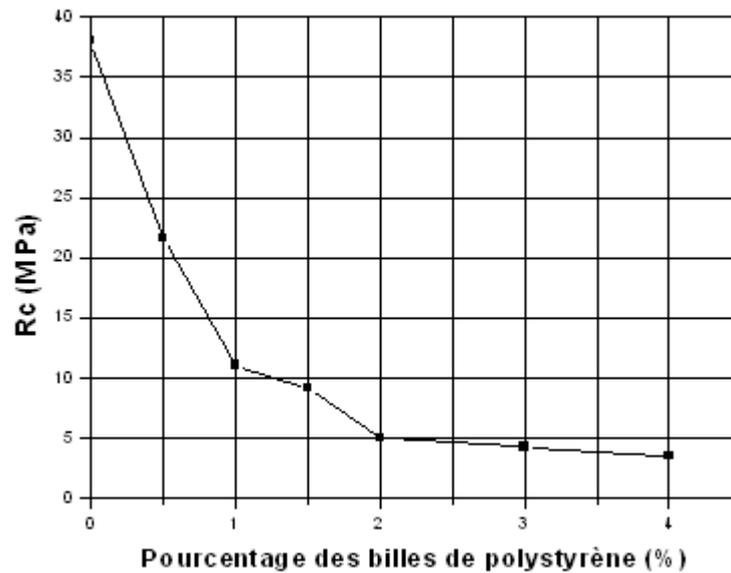


Figure 2-12: Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [33]

Par ailleurs, un comportement aux sollicitations de compression et de flexion très différent est observé. En effet, lorsqu'un béton de densité 1.3 ne possède qu'une résistance à la compression de 1/10 de celle d'un béton de densité 2.2, il a une résistance à la flexion de 4/10 (figure 2-13) c'est-à-dire quatre fois plus. On constate que l'ajout du polystyrène au béton a une influence sur la résistance à la flexion moindre que sur la résistance à la compression.

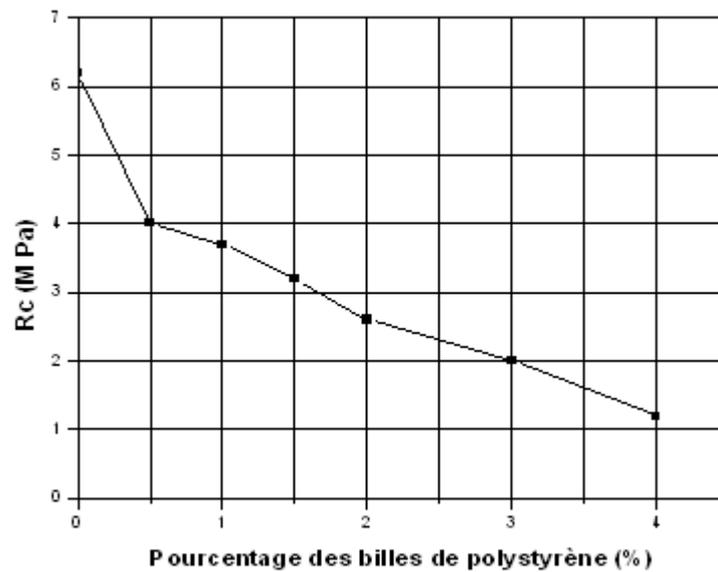


Figure 2-13: Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [33]

L'étude réalisé par Miled [10] montre que la résistance à la compression du béton de polystyrène diminue sensiblement lorsqu'on augmente la taille des billes de polystyrène (figure 2-14).

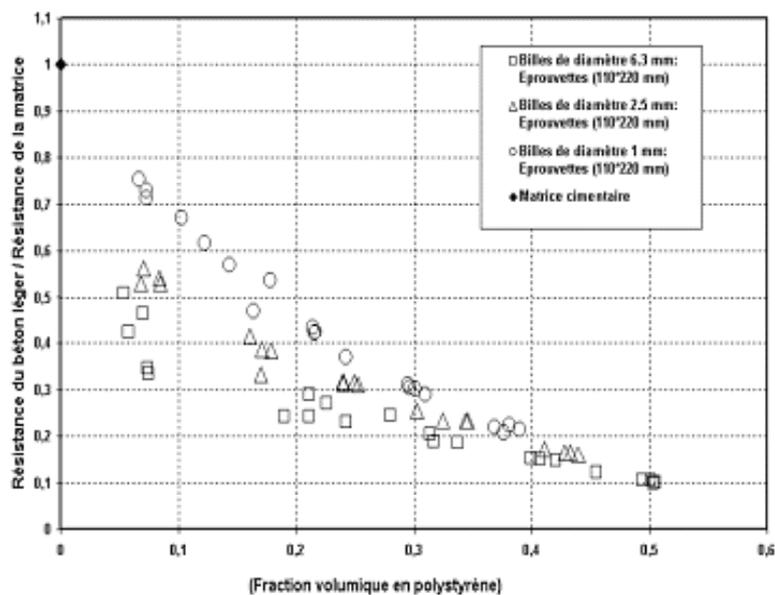


Figure 2-14: Evolution de la résistance de compression en fonction du pourcentage et de la taille des billes de polystyrène [10]

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 paru nécessaire de procéder à une caractérisation thermique approfondie de ces matériaux pour connaître leurs propriétés thermophysiques dans le but de mieux comprendre le processus de transferts thermique à travers une enveloppe d'habitation intégrant ces types isolants (liège et polystyrène).

**CHAPITRE 3 : Etude expérimentale de la
conductivité thermique**

Introduction

Une meilleure connaissance des caractéristiques thermophysiques des matériaux mis en œuvre dans la construction, permettra une approche plus précise des échanges d'énergie qui s'établissent entre une ambiance extérieure naturelle et une ambiance intérieure contrôlée. La conductivité, la résistance thermique, et la chaleur massique sont les propriétés thermophysiques les plus importantes à prendre en compte pour le choix d'un matériau d'isolation thermique. Il est important de rappeler ici que la conductivité thermique intervient en régime permanent, et que dans la plupart des cas, c'est la grandeur que l'on mesure, les deux autres s'obtenant par déduction.

Ce chapitre est consacré dans un premier temps, à l'identification et à la caractérisation des différents matériaux retenus dans le programme expérimental ainsi qu'aux étapes de formulation des divers échantillons à tester. Dans un second temps nous présentons le dispositif expérimental et la méthode des boîtes ayant servi à la détermination de la conductivité thermique des matériaux choisis.

1. Matériaux utilisés

Les caractéristiques que le béton acquiert à sa maturité dépendent de la nature de ses constituants. Tous les matériaux utilisés dans notre recherche sont de provenances locales.

1.1 Ciment

Nous avons utilisé un ciment portland artificiel de type CPJ 45 de norme Algérienne NA442 équivalent au CMII, ENV. 1971 provenant de la cimenterie de Hamma Bouzaiane Constantine (ERCE). La composition chimique, les caractéristiques physiques, les résistances mécaniques, et la composition minéralogique du ciment sont portées sur les tableaux 3-1, 3-2, 3-3 et 3-4.

Tableau 3-1: Composition chimique

ELEMENTS	TENEUR (%)
SiO ₂	23.06
Al ₂ O ₃	5.50
FeO ₃	2.37
CaO	64.69
MgO	0.60
SO ₃	2.45
Na ₂	-
K ₂ O	-
Chlorures	-
CaO libre	0.75
Res. Insol	1.91
P.A.F	1.50

Tableau 3-2 : Essais physiques

TEMPS DE PRISE	DEBUT	2h : 59
	FIN	4h : 14
EXPANSION LE CHATELIER	CHAUD	1.0
	FROID	0.0
SURFACE SPEC.BLAINE	3542	
CONSISTANCE NORMALE	26.00	

Tableau 3- 3 : Résistances mécaniques

RESISTANCE A LA FLEXION (bars)	2 JOURS	48.0
	7 JOURS	68.0
	28 JOURS	94.0
RESISTANCE A LA COMPRESSION (bars)	2 JOURS	216.0
	7 JOURS	406.0
	28 JOURS	594.0

Tableau 3-4 : Composition minéralogique

C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
57.35	20.77	9.94	7.95

1.2 Sable

C'est un sable concassé de fraction 0/4, non lavé (brut) de nature calcaire provenant de la carrière ENG d'El-khroub, qui est caractérisé par une roche à forte teneur en carbonate de calcium ($\approx 98\%$ de CaO_3). Les résultats de l'analyse granulométrique, les caractéristiques physiques ainsi que l'analyse chimique sommaire sont portés respectivement sur les tableaux 3-5, 3-6, 3-7 :

Tableau 3-5 : Analyse granulométrique

Tamis (mm)	6.3	4	2.5	1.25	0.63	0.32	0.16	0.08
Passant aux tamis (%)	100	99	76	55	41	30	22	19

La courbe granulométrique qui traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires composant le sable est représentée sur la figure 3-1 :

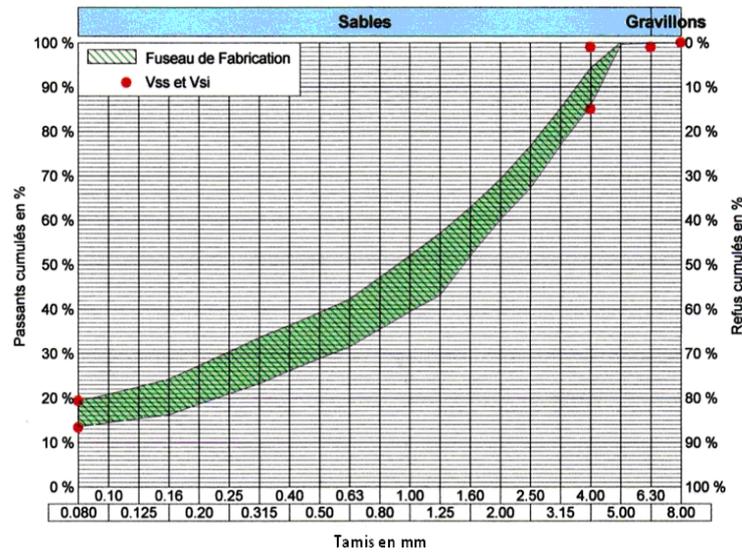


Figure 3-1 : Analyse granulométrique du sable

Le matériau analysé présente les caractéristiques d'un sable peu grossier (module de finesse $M_f = 2.77$), mais il est riche en fines.

Tableau 3-6 : Caractéristiques physiques du sable utilisé

Equivalent de sable (ES)	61
Coefficient d'absorption (AB)	0.74
Masse volumique apparente (t/m^3)	1.42
Masse volumique absolue (t/m^3)	1.45

La valeur de l'équivalent de sable (ES) montre que le sable utilisé est propre.

Tableau 3-7 : Analyse chimique sommaire

Désignation	Insoluble (%)	Sulfate (%)	Carbonate (%)
0/ 4	1.2	Traces	94.60

1.3 Fibres

Au cours de notre recherche, deux types de fibres ont été utilisés pour alléger le béton, les granulats de liège et les billes de polystyrène expansé.

1.3.1 Granulats de liège

Ils proviennent de WPK (EIWIAM de la Petite Kabyle), leurs caractéristiques sont regroupées dans le tableau 3-8 :

Tableau 3-8 : Caractéristiques des granulats du liège

Granulométrie (mm)	0/4 – 4/8
Masse volumique (Kg/ m³)	140 - 180
Coefficient d'absorption acoustique (%)	40
Compressibilité (mm)	0.98
Conductivité thermique (W/m.K)	0.036

1.3.2 Billes de polystyrène expansé

Elles sont obtenues par expansion des billes pleines. Elles sont composées de cellules fermées. Elles sont hydrophobes et adéquates pour être incorporées dans les mortiers et les bétons. Les différentes caractéristiques des billes de polystyrène expansé utilisées dans le cadre de cette recherche sont synthétisées dans le tableau 3-9 :

Tableau 3-9 : Caractéristiques des billes de polystyrène

Granulométrie (mm)	1.4 - 2.5
Masse volumique apparente (Kg/ m³)	21 – 24
Masse volumique absolue (Kg/ m³)	44
Conductivité thermique (W/m. K)	0.045

L'eau du robinet est utilisée pour le gâchage des matériaux

2. Formulation des échantillons

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées s'appelle formulation. La confection des échantillons à tester comporte les étapes suivantes :

2.1 Formulation d'un béton de référence

Etablir la composition d'un béton, consiste à déterminer les diverses proportions de granulats, de ciment, et d'eau qu'il importe de mettre en présence pour obtenir un mètre cube de béton. Pour de nombreux auteurs, le principe de détermination de ces proportions,

lorsqu' il s'agit de confectionner des bétons de granulats légers, est pratiquement le même que celui concernant les bétons traditionnels. Il existe de nombreuses méthodes de choix de la composition du béton classique. Pour la formulation de notre béton de référence, il a été retenu d'utilisation de la méthode de Dreux- Gorisse [34], cette dernière est largement utilisée dans l'industrie du béton en Algérie, une optimisation du squelette granulaire a été réalisée par la méthode Baron Lesage [35].

Nous avons respecté la composition adoptée par [33], formulation selon laquelle, nous avons pour 1 m³ la composition figurant au tableau 3-10 :

Tableau 3-10 : Composition du béton de référence

<i>Ciment (Kg)</i>	<i>Sable (Kg)</i>	<i>Eau (l)</i>	<i>E /C</i>
<i>450</i>	<i>1350</i>	<i>225</i>	<i>0.5</i>

2.2 Formulation des bétons allégés

Nous avons choisi de confectionner des mélanges avec une matrice identique et un pourcentage de granulats différent. Les paramètres qui varient d'un mélange à l'autre, sont le dosage et le type de fibre introduit (granulats de liège et billes de polystyrène). Notre objectif est de réaliser un béton isolant, porteur et de maniabilité fluide, facile à mettre en œuvre. Nous prenons un rapport pondéral sable/ ciment (S/C) et un rapport eau/ ciment (E/C) constants, pour tous les mélanges, par contre la quantité de fibres introduite (**qui est une fraction massique de la masse du ciment**) est différente. L'opération est arrêtée quand le volume occupé par les fibres devenait tellement important qu'il était difficile de mélanger le tout par un malaxeur. Nous avons étudié les pourcentages suivants :

Granulats du liège : 1, 2, 3, 4, 5, 6, et 7 %.

Billes de polystyrène : 1, 2, 3, et 4 %.

Les échantillons testé seront référencés comme suit:

B: Béton de référence (sans fibre).

BL: Béton de liège.

BP: Béton de polystyrène.

Les chiffres associés aux notations BL et BP sont utilisés pour tenir compte des différents pourcentages de granulats de liège et des billes de polystyrène ajoutés au béton.

Tableau 3-11 : Compositions des bétons allégés avec des granulats de liège

Ciment (Kg)	450							
Sable (0 / 4) (Kg)	1350							
Eau (l)	225							
E / C	0.5							
Masse du liège (Kg)	0	4.5	9	13.5	18	22.5	27	31.5
Désignation	B	BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6	BL7

Tableau 3-12 : Compositions des bétons allégés avec des billes de polystyrène

<i>Ciment (Kg)</i>	450				
<i>Sable (0 / 4) (Kg)</i>	1350				
<i>Eau (l)</i>	225				
<i>E / C</i>	0.5				
<i>Masse des billes de polystyrène (Kg)</i>	0	4.5	9	13.5	18
<i>Désignation</i>	B	BP1	BP2	BP3	BP4

3. Mesures de la conductivité thermique

De nombreux dispositifs expérimentaux utilisés pour mesurer la conductivité thermique des matériaux ont été proposés par différents auteurs. Les techniques utilisées dépendent surtout de l'état du milieu à tester (solide, liquide, granulaire, ...). Sans être exhaustif nous citerons, la méthode de la boîte chaude gardée [36], la méthode de la plaque chaude gardée [37, 38], la méthode du flux radial [5], la méthode des boîtes [39, 40], la méthode de flash laser [41]. Toutes ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique de caractéristiques connues et à mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur en un ou plusieurs endroits de l'échantillon.

3.1 Dispositif expérimental utilisé

Les campagnes de mesures expérimentales sont menées dans le cadre de notre travail à l'aide d'un dispositif appelé "boîtes thermiques", il s'agit du dispositif « EI700 » (figure 3-2) qui été mis au point au laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de

l'université Claude Bernard Lyon I [42]. Cette technique permet de déduire la conductivité thermique des matériaux testés en régime permanent en réalisant un bilan énergétique du système. La méthode des boîtes a l'avantage d'une mise en œuvre très simple, et a fait l'objet de plusieurs publications [40]. La précision des mesures est comparable à celle obtenue par les méthodes conventionnelles (MOU, 82). Elle utilise des échantillons de tailles significative, et présente en outre les avantages suivants :

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



Figure 3-2 : Cellule de mesure EI700

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

3.2 Description de l'installation

Le dispositif expérimental présenté sur la figure 3-3, est constitué d'une enceinte isotherme (A) de dimensions $2 \times 1 \times 0.45 \text{ m}$, maintenue à une température assez faible (allant jusqu'à $-10 \text{ }^\circ\text{C}$), grâce un échangeur (R) situé à sa base parcouru par de l'eau glucolée refroidie par un cryostat (K) à bain de circulation, de marque HAAKE type D3-G, c'est la source froide du système. Cette enceinte possède deux ouvertures carrées de 27 cm de côté sur sa face supérieure sur laquelle sont disposées les deux boîtes identiques (B), permettant de faire deux mesures simultanées. Ce sont des boîtes de contre-plaqué isolée de l'intérieur par du styrodur.

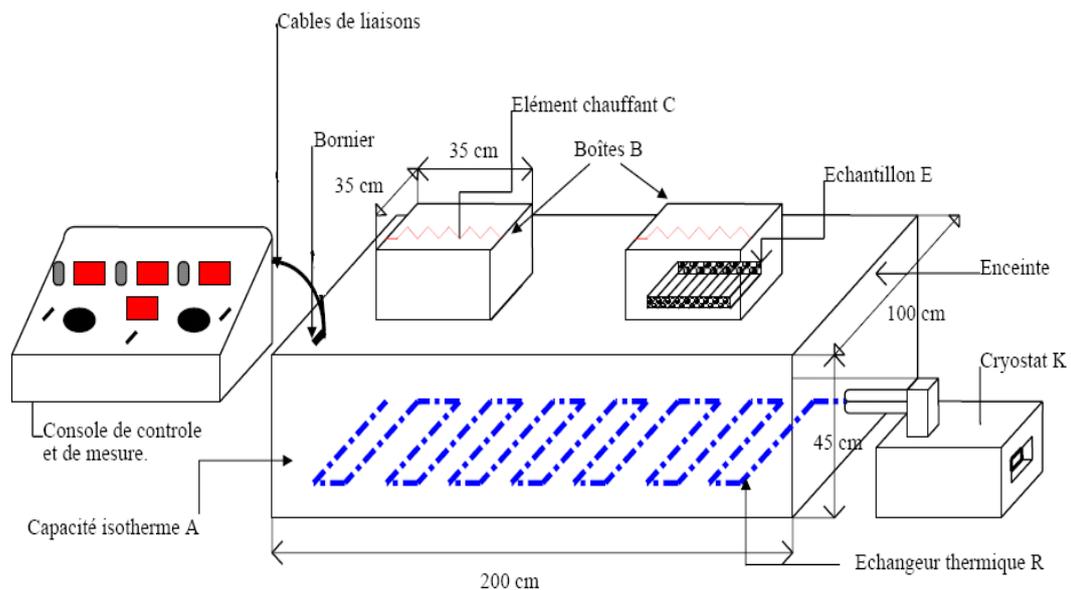


Figure 3-3: Vue générale de la cellule de mesure " la méthode des boîtes "

Chaque boîte munie d'un émetteur de chaleur de faible puissance collé contre sa base, et joue le rôle de source chaude ; il s'agit en fait d'une résistance chauffante électrique (film de FLEXEL S20). On impose ainsi une température uniforme dans la boîte en modifiant la tension électrique V appliquée aux bornes de la résistance chauffante.

Les capteurs de température (D) sont des thermosondes en platine (norme DIN43700, 1000Ω à $0 \text{ }^\circ\text{C}$) de surface et d'ambiance, réparties en divers endroits de l'appareil, ils

permettent de mesurer la température ambiante dans la boîte (T_b), la température extérieure dans la salle (T_a), les températures sur les faces supérieure (T_c) et inférieure (T_f) de l'échantillon.

Une console de mesure, disposant d'un grand nombre de Voies et pouvant donner des informations instantanées (centrale de mesures DORIC 100 voies, type DIGITREND 220), reçoit tous les fils de liaison aux sondes, elle indique également la valeur de la tension électrique V.

Un ohmmètre électrique permet de mesurer les résistances R de chaque boîte.

Les échantillons à tester doivent être parallélépipédique à base carré de 27 cm de côté et d'épaisseur comprise entre 2 et 7 cm. Ils se placent entre la boîte B et la capacité isotherme A de telle sorte que les flux latéraux soient négligeables.

L'échantillon présente ainsi une face chaude du côté de la boîte et une face froide du côté de la capacité isotherme.

Les dispositions de l'émetteur de chaleur, de l'échantillon à tester, et des différentes sondes, sont illustrées par la figure 3-4.

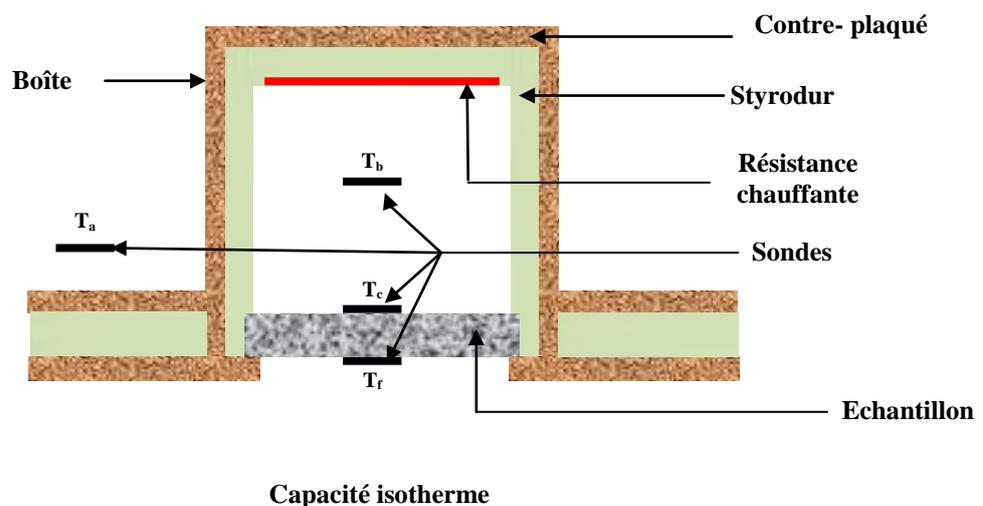


Figure 3-4 : Boîte de mesure de la conductivité thermique

3.3 Evaluation de la conductivité thermique

3.3.1 Principe de mesure

Le principe de mesure de la conductivité thermique des matériaux à tester est basé sur la réalisation de façon permanente d'un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers la boîte, en créant un gradient de température entre la capacité isotherme (source froide), et l'émetteur de chaleur à flux constant (source chaude). On impose ainsi une température uniforme dans la boîte, en modifiant la tension électrique V appliquée aux bornes du film chauffant, l'émission de la chaleur est faite de telle sorte que la température à l'intérieur de la boîte (T_b) soit légèrement supérieure à la température extérieure (T_a) qui est la température de l'ambiance ; $(T_b - T_a) < 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

La mesure est réalisée quand le régime permanent est établi, c'est-à-dire quand les valeurs des températures restent constantes pendant plus d'une demi- heure environ.

3.3.2 Détermination de la conductivité thermique

La conductivité thermique des matériaux varie généralement avec la température (qui influence en particulier le libre parcours moyen des particules). Sur un intervalle de températures T_f à T_c , la valeur moyenne de la conductivité est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_m = \frac{1}{T_c - T_f} \int_{T_f}^{T_c} \lambda(T) dT \quad (3.1)$$

Si T_f et T_c désignent respectivement les températures du côté froid et du côté chaud d'un échantillon, λ_m correspond à une température moyenne $T_m = \frac{T_c + T_f}{2}$ (pour un écart de température $\Delta T = T_c - T_f$).

Dans l'intervalle de température de nos expériences ($T_c - T_f$ généralement inférieur à $10 \text{ }^\circ\text{C}$), nous pouvons considérer que la conductivité thermique varie de façon linéaire avec

la température [43]. Il en résulte que $\lambda_m \approx \lambda_v$, où λ_v désigne la conductivité thermique exacte à la température T_m .

Les résultats de nos essais donneront par conséquent la conductivité thermique à la température $T_m = \frac{T_c + T_f}{2}$.

En régime permanent, le système reçoit l'énergie (\dot{q}) fournie par dissipation thermique dans la résistance par effet de Joule, cette énergie est dissipée en partie à travers les parois de la boîte (\dot{q}_1), et à travers l'échantillon (\dot{q}_2). On obtient donc :

$$\dot{q} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \quad (3.2)$$

Ces puissances sont déterminées à partir des relations suivantes :

$$\dot{q} = \frac{V^2}{R} \quad (3.3)$$

$$\dot{q}_1 = c(T_b - T_a) \quad (3.4)$$

$$\dot{q}_2 = \frac{\lambda}{e} S (T_c - T_f) \quad (3.5)$$

avec :

V : tension aux bornes du film chauffant,

R : valeur de la résistance chauffante,

c : coefficient global de déperdition thermique à travers la boîte,

T_b : température ambiante à l'intérieur de la boîte B,

T_a : température ambiante de la salle de mesure,

λ : conductivité thermique du matériau à tester,

e : épaisseur de l'échantillon,

S : aire des faces de l'échantillon, normales aux lignes de flux,

T_c : température de la surface chaude,

T_f : température de la surface froide.

Finalement la valeur de la conductivité thermique de l'échantillon à tester est obtenue à partir de l'expression :

$$\lambda = \frac{e}{S \Delta T} \left[\frac{V^2}{R} - c(T_b - T_a) \right] \quad (3.6)$$

3.3.3 Coefficient de déperdition thermique

Le dispositif contenant les échantillons est isolé de l'extérieur par du styrodur. Ce matériau permet de limiter les pertes de chaleur à travers les parois des boîtes thermiques, générées par l'existence d'un gradient de température entre l'intérieur de la boîte et le milieu extérieur. On définit un coefficient de déperdition thermique c pour chaque boîte, qui dépend de la géométrie et des propriétés thermiques des matériaux constitutifs. La valeur de ce coefficient peut être obtenue par une méthode théorique en utilisant la formule Carslaw et Jaeger [44], qui permet de déterminer les écoulements thermiques à travers un dièdre en régime permanent, et celle de Langmuir [45] donnant la valeur du coefficient de forme pour un coin. Pour les boîtes avec le styrodur comme matériau isolant et le contre plaqué comme externe, l'application numérique de ces formules [46], donne : $c=0.16W/K$.

Par ailleurs, ce coefficient peut être déterminé expérimentalement en effectuant deux mesures de la conductivité thermique sur le même échantillon avec deux valeurs de flux différentes, on obtient alors deux équations à deux inconnus λ et c . Hormis ces deux valeurs, toutes les autres sont connues. Les valeurs du coefficient global de déperdition thermique déduites expérimentalement sont légèrement plus élevées que les valeurs théoriques.

La valeur du coefficient c retenue pour toutes les mesures de la conductivité thermique est : $c=0.20 W/K$

3.4 Incertitude de calcul sur la mesure de la conductivité thermique

Les erreurs relatives à nos essais pour atteindre la conductivité thermique sont de deux types :

3.4.1 Les erreurs systématiques

Le vieillissement des sondes ainsi que les fils de connexion reliés à ces dernières provoque des erreurs systématiques sur la mesure de la conductivité thermique. Ces erreurs ont pu être minimisées grâce à un étalonnage effectué périodiquement en début de chaque mois. Les sondes de surface sont toutes collées sur un échantillon de polystyrène, et l'on note pour chacune d'elle l'écart entre son indication et celle de l'une d'entre elles prise pour référence. Généralement, la référence est prise égale à la plus faible indication de température. Pour les sondes d'ambiances, les deux sondes des boîtes sont mises avec la sonde d'ambiance de la salle, dans l'une des boîtes. On note l'écart de chacune par rapport à l'indication la plus faible. Dans les calculs on soustrait l'écart noté lors de l'étalonnage, de la valeur indiquée pendant la mesure effectuée.

En outre, le courant électrique qui traverse les sondes provoque leur échauffement et modifie le champ de température, ce qui introduit certainement des erreurs sur la mesure effectuée.

Le ruban adhésif et le silicone employés pour fixer les sondes de température engendre également des erreurs, dont l'évaluation demeure très difficile [40, 46], en réalité, il a été montré que cette influence est très faible [8].

Du fait de la position intégrée de l'échantillon dans la boîte, la surface utile qu'on peut aussi appeler zone de mesure, est légèrement inférieure à $27 \times 27 \text{ cm}^2$. Dans notre calcul, on fait intervenir la surface dite corrigée :

$$S = \left(\frac{l+l'}{2} \right)^2$$

3.4.2 Les erreurs accidentelles

Elles concernent en particulier les erreurs dues aux fluctuations aléatoires telles que la tension électrique (instabilité des appareils), la précision visuelle, et le temps de réponse des appareils de mesure.

Usuellement, ces erreurs sont quantifiées par l'utilisation des différentielles logarithmiques. En se basant sur l'expression de la conductivité donnée par la relation (3-6), on aboutit à une erreur relative de la forme :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T} + \frac{\Delta q + c(\Delta T') + \Delta c \Delta T'}{q + c \Delta T'} \quad (3-7)$$

avec

$$\Delta T = T_c - T_f$$

$$\Delta T' = T_b - T_a$$

Conclusion

Ce chapitre a dressé une présentation des différentes caractéristiques des matériaux utilisés pour l'élaboration des échantillons testés au cours de notre étude. De plus, nous avons donné une description des campagnes de mesures expérimentales utilisées pour la détermination de la conductivité thermique.

Le choix porté sur la méthode des boîtes ne se justifie pas uniquement par les avantages qu'elle a par rapport aux autres méthodes, mais surtout au fait de l'existence de ce dispositif au sein de notre laboratoire.

Comme nous l'avons déjà mentionné au début de ce chapitre, la conductivité thermique est la seule grandeur que l'on mesure. La résistance thermique et la chaleur massique sont déterminées par déduction. Les résultats obtenus lors des différentes campagnes de mesures seront présentés et exploités dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4 : Exploitation des résultats expérimentaux

Introduction

Dans le cadre de ce travail de thèse, les matériaux qui ont fait l'objet de notre étude sont :

- Béton dit classique (un échantillon de référence),
- Bétons à base de granulats de liège (sept échantillons),
- Bétons de polystyrène (quatre échantillons).

Dans ce chapitre qui constitue en fait une des parties essentielles du mémoire nous présentons l'ensemble des résultats obtenus par des mesures effectuées sur les divers échantillons élaborés (masse volumique et conductivité thermique) ainsi que les valeurs de la résistance thermique obtenue par calcul. Concernant la chaleur massique, elle sera déterminée à partir de nos résultats et des mesures de la diffusivité thermique existant dans la littérature.

Notre intérêt s'est porté particulièrement sur l'influence de la teneur en eau, de la masse volumique apparente du matériau, et de la fraction massique des fibres introduite dans le béton sur les paramètres cités antérieurement. Les interprétations vont principalement être axées sur la conductivité et la résistance thermique et complétées par une étude thermomécanique notamment la résistance à la compression. Enfin, nous terminerons par une comparaison des pouvoirs d'isolation thermique des différents types des matériaux étudiés.

4.1 Masse volumique

L'influence de l'incorporation des granulats de liège et de billes de polystyrène sur la masse volumique du béton a été étudiée. Les résultats obtenus sont regroupés respectivement dans les tableaux 4-1 et 4-2, et représentés par les courbes de la figure 4-1 :

Tableau 4-1 : Masse volumique des échantillons de béton de liège

Désignation	<i>B</i>	<i>BL1</i>	<i>BL2</i>	<i>BL3</i>	<i>BL4</i>	<i>BL5</i>	<i>BL6</i>	<i>BL7</i>
ρ (Kg/ m ³)	2168	2092	1990	1939	1862	1811	1760	1684
ρ / ρ_B (%)	100	96.49	91.80	89.44	85.88	83.53	81.18	77.67

Tableau 4-2 : Masse volumique des échantillons de béton de polystyrène

Désignation	<i>B</i>	<i>BP1</i>	<i>BP2</i>	<i>BP3</i>	<i>BP4</i>
ρ (Kg/ m ³)	2168	1837	1607	1250	1097
ρ / ρ_B (%)	100	84.73	74.12	57.66	50.60

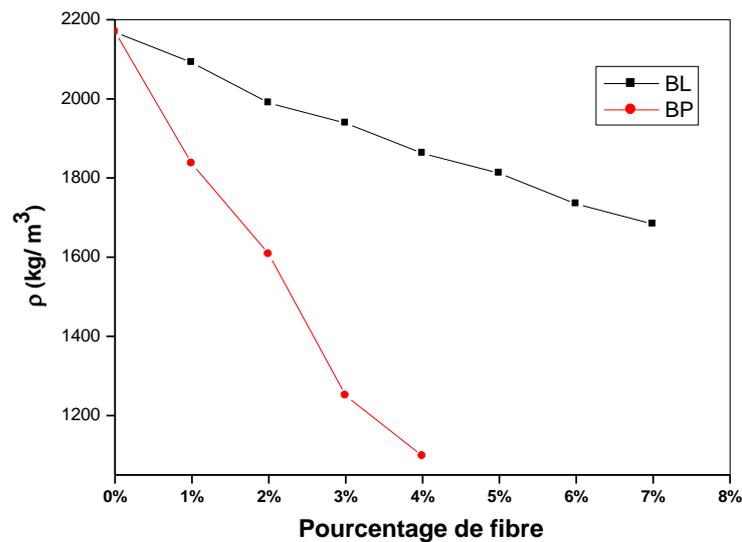


Figure 4-1 : Masse volumique des échantillons testés

Il apparaît clairement sur la figure 4-1, que la masse volumique du béton allégé décroît avec l'augmentation du pourcentage de fibres, ce résultat est remarqué pour les deux types de bétons étudiés. A titre d'exemple la masse volumique de béton de référence (B) est de 2168 Kg/ m³, alors que celle d'un béton renforcé de 7 % de liège (BL7) n'est que de 1684Kg/ m³, ce qui correspond à une diminution de 22 %. La masse volumique d'un béton

renforcé de 4 % de polystyrène (BP4) est de 1097 Kg/ m³, ce qui correspond à une diminution de 49 %. On remarque sans ambiguïté que cette diminution est très grande dans le cas du béton de polystyrène par rapport à celle dans le cas du béton de liège, ce qui peut être aisément expliqué par le fait que la masse volumique de polystyrène (24 Kg/ m³) est très inférieure à celle du liège (180 Kg/ m³). De plus, nous pouvons constater que dans le cas du béton de polystyrène il existe des paliers pour lesquels la masse volumique diminue remarquablement. Ainsi, on peut noter une diminution très rapide (15 %) de la masse volumique entre B et BP1, suivie d'une décroissance supplémentaire de 10 % entre BP1 et BP2, puis une autre diminution très rapide (16 %) entre BP2 et BP3, et un dernier palier (7%) entre BP3 et BP4.

4.2 Conductivité thermique

La conductivité thermique est la grandeur caractéristique en terme d'isolation thermique. Il est connu que plus un matériau est conducteur de chaleur, et plus sa conductivité est grande. Nous présentons dans ce qui suit les résultats de la campagne de mesures menée dans notre laboratoire.

Dans un premier temps, les échantillons sont étudiés à l'état normal où ils sont en permanence à l'air libre, dans les conditions naturelles de température, de pression et d'humidité de la salle de mesure. Dans cet état, leur teneur en eau n'est pas nulle. En effet, la présence de cette teneur en eau résiduelle se vérifie lorsque nous mettons les échantillons à l'étuve. L'échantillon conservé à l'air libre a donc pu absorber de l'eau se trouvant dans l'air sous forme de vapeur d'eau. Les valeurs de conductivités mesurées sont regroupées dans le tableau 4-3, pour le béton de liège, et dans le tableau 4-4, pour le béton de polystyrène.

Tableau 4-3 : conductivité thermique des échantillons de béton de liège à l'état normal

Désignation	<i>B</i>	<i>BL1</i>	<i>BL2</i>	<i>BL3</i>	<i>BL4</i>	<i>BL5</i>	<i>BL6</i>	<i>BL7</i>
λ (W/ m. K)	0.770	0.656	0.650	0.568	0.524	0.481	0.458	0.382

Tableau 4-4 : conductivité thermique des échantillons de béton de polystyrène à l'état normal

Désignation	<i>B</i>	<i>BP1</i>	<i>BP2</i>	<i>BP3</i>	<i>BP4</i>
λ (W/ m. K)	0.770	0.441	0.359	0.186	0.109

4.2.1 Influence de la teneur en eau

Les mesures de la conductivité thermique apparente des matériaux étudiés sont effectuées à l'état sec, à l'état saturé, et à différents degrés d'humidité. Les teneurs en eau successives ont été obtenues en saturant d'abord les échantillons testés, puis en les désaturants progressivement par un séchage dans une étuve ventilée, cette technique permet d'obtenir une répartition aussi uniforme que possible de l'eau à l'intérieur des échantillons [47].

4.2.1.1 Béton de liège

Les résultats de mesure de la conductivité thermique apparente des différents bétons de liège étudiés en fonction de la teneur en eau volumique, sont représentés dans la figure 4-2.

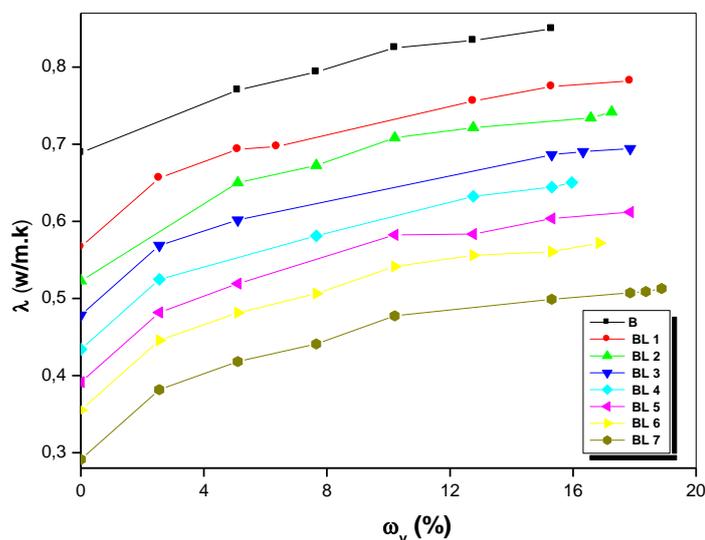


Figure 4-2 : Variation de la conductivité thermique des bétons allégés avec le liège en fonction de la teneur en eau

Nous pouvons remarquer que toutes les courbes de la figure 4-2 présentent une allure similaire. Pour analyser l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau, nous avons choisi deux échantillons BL5 et BL7.

La figure 4-3 donne l'allure de la courbe expérimentale illustrant la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour l'échantillon BL5. Elle montre une augmentation accentuée de celle-ci pour des valeurs d'humidité inférieures à 10 %, puis un accroissement moins important dans l'intervalle [10, 15 %] et de nouveau une augmentation plus rapide pour des teneurs proches de l'état de saturation.

Dans le cas de l'échantillon BL7 (figure 4-4), on observe une augmentation très importante pour faibles teneurs en eau [0, 7 %], cet accroissement devient très lent dans l'intervalle [7, 13 %]. Puis, pour les teneurs en eau très élevées la conductivité thermique augmente de nouveau très rapidement.

Le comportement thermique des matériaux étudiés est fonction de la distribution de l'eau au sein de ces matériaux, laquelle se fait suivant trois étapes [48] :

- A l'état sec ou pour des teneurs en eau faible, le transfert de chaleur s'effectue essentiellement par conduction pure au niveau des points de contact entre les grains formant le matériau ; les parts de transfert convectif et par rayonnement étant négligés (pores de faible dimension, transfert de chaleur au voisinage de la température ambiante). En ajoutant de l'eau non seulement une phase supplémentaire que l'on introduit dans le milieu mais c'est aussi le transfert d'énergie induit par le mouvement de l'eau en phases liquide et gazeuse qui vient s'ajouter au transfert de chaleur par conduction à travers les différentes phases du milieu ; si de plus la proportion d'eau est faible, il s'ensuit la formation autour des points de contact, du ménisque liquide donc création d'un pont thermiques, les transferts s'effectue aux interface solide- liquide et il en résulte une forte augmentation de la conductivité thermique.
- En augmentant un peu plus la quantité d'eau (teneurs en eau moyennes), la surface mouillée s'élargit autour des points de contact favorisant moins le transfert par conduction, d'où une augmentation moins rapide de la conductivité thermique.
- Pour les grandes valeurs d'humidité voisines de l'état de saturation il y a une formation des chemins liquides continus et la conductivité thermique augmente de nouveau plus rapidement.

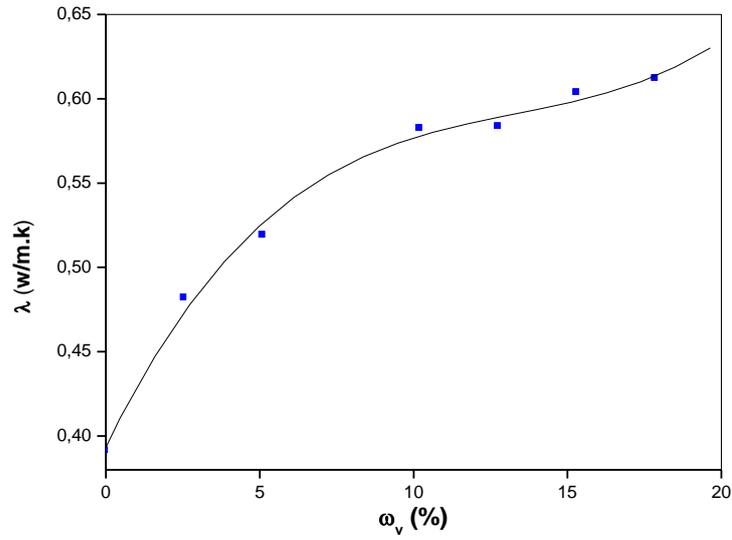


Figure 4-3 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BL5 en fonction de la teneur en eau

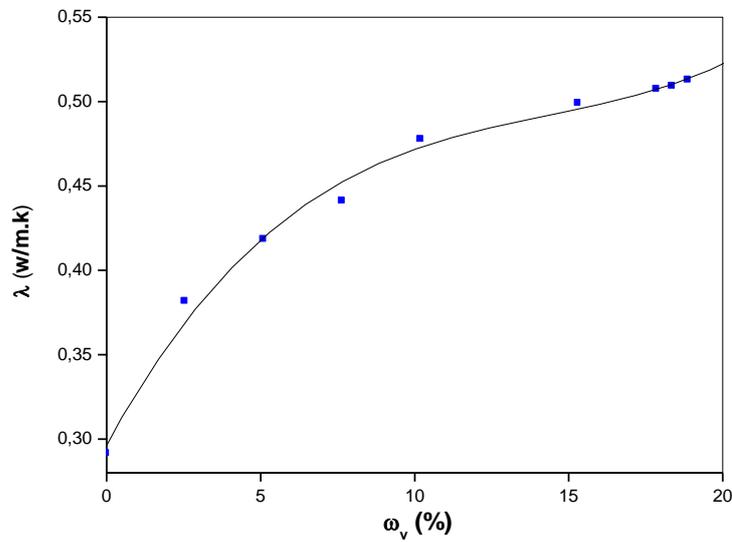


Figure 4-4 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BL7 en fonction de la teneur en eau

4.2.1.1 Béton de polystyrène

Les courbes de la figure 4-5, montrent clairement que la conductivité thermique des échantillons de béton de polystyrène augmente au fur et à mesure que la teneur d'humidité croît. Il faut néanmoins souligner qu'elle est d'autant moins importante que le pourcentage des billes de polystyrène est plus élevé. L'allure de ces courbes est proche de celles de béton de liège (figure 4-2).

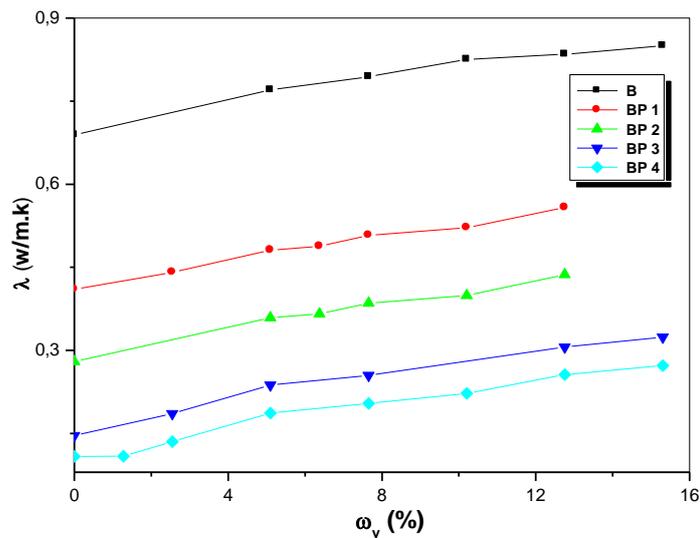


Figure 4-5 : Variation de la conductivité thermique des bétons allégés avec les billes de polystyrène en fonction de la teneur en eau

Pour discuter la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau et comme l'allure de toutes les courbes est similaire, nous prendrons le cas des échantillons BP1 et BP4.

L'analyse des courbes des figures 4-6 et 4-7, permet d'observer un accroissement de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en eau. Ceci s'explique par le fait que les matériaux que nous avons étudiés sont poreux. A l'état sec, la conductivité thermique n'est fonction que de celles de la matrice solide et de l'air (environ 0.26W/ m. K à 20 °C), cette dernière est très inférieure à la conductivité thermique de l'eau (environ 0.60W/ m. K à 20 °C), qui va remplacer progressivement l'air contenu dans les pores, au cours de l'humidification, il s'ensuit une augmentation de la conductivité thermique

apparente du matériau. Cette dernière sera d'autant plus importante que la teneur en eau est élevée. Ce résultat à été observé sur d'autres matériaux tel que la brique creuse de terre stabilisée au ciment [49], le mortier à base de ciment [50], le béton cellulaire [31, 51] et le béton classique [52].

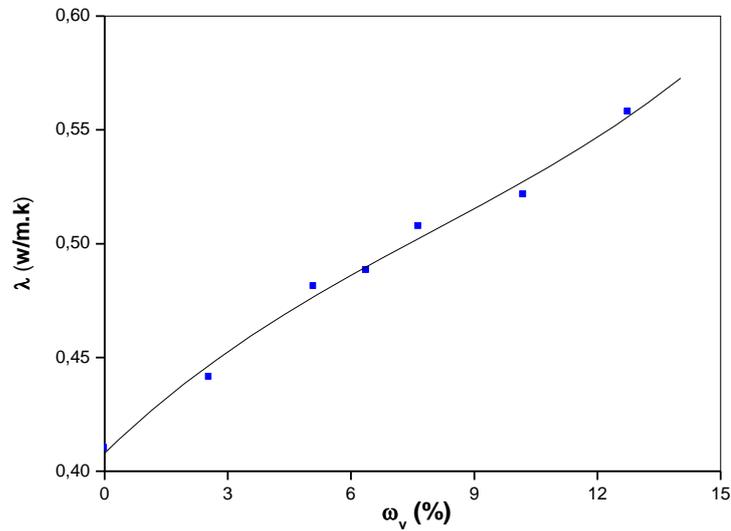


Figure 4-6 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BP1 en fonction de la teneur en eau

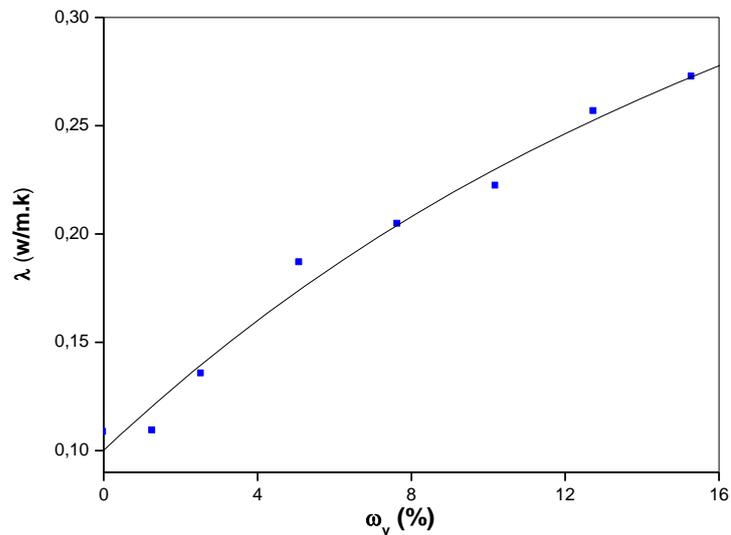


Figure 4-7 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon BP4 en fonction de la teneur en eau

4.2.2 Influence de la masse volumique

L'ensemble des résultats de mesure relatifs à l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente des bétons de liège et des béton de polystyrène sont regroupés dans les tableaux 4-5 et 4-6, et illustrés respectivement par les figures 4-8 et 4-9.

Tableau 4-5 : Conductivité thermique des échantillons de béton de liège étudiés à l'état sec et à l'état saturé

Désignation		<i>B</i>	<i>BL1</i>	<i>BL2</i>	<i>BL3</i>	<i>BL4</i>	<i>BL5</i>	<i>BL6</i>	<i>BL7</i>
$\rho(\text{Kg/m}^3)$		2168	2092	1990	1939	1862	1811	1760	1684
λ (W/m. K)	<i>Etat sec</i>	0.689	0.567	0.523	0.479	0.434	0.391	0.355	0.291
	<i>Etat saturé</i>	0.850	0.782	0.741	0.694	0.650	0.612	0.572	0.513

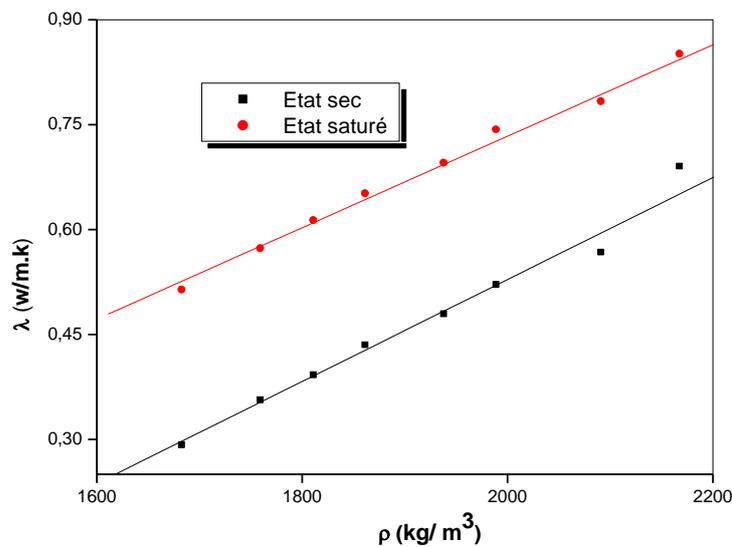


Figure 4-8 : Variation de la conductivité thermique apparente des bétons de liège en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé

Tableau 4-6 : Conductivité thermique des échantillons de béton de liège étudiés à l'état sec et à l'état saturé

Désignation	B	BP1	BP2	BP3	BP4	
$\rho(\text{Kg/m}^3)$	2168	1837	1607	1250	1097	
λ (W/m. K)	<i>Etat sec</i>	0.689	0.410	0.280	0.146	0.108
	<i>Etat saturé</i>	0.850	0.558	0.437	0.324	0.272

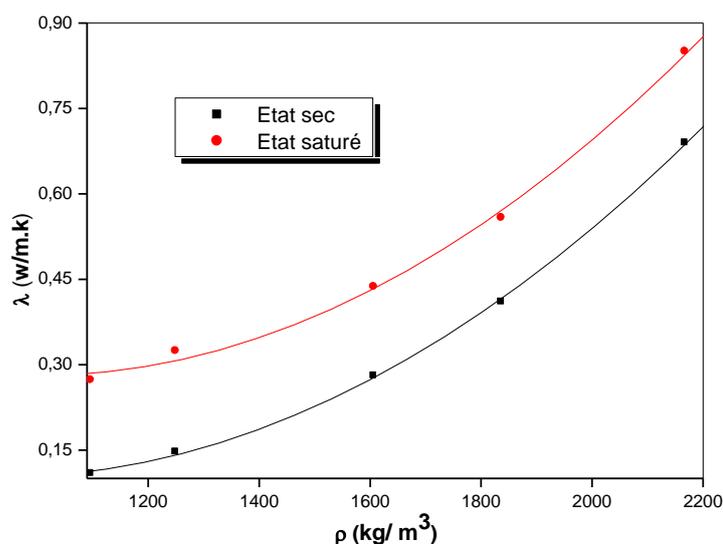


Figure 4-9 : Variation de la conductivité thermique apparente des bétons de polystyrène en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé

Nous pouvons aisément remarquer que quelque soit l'état des bétons étudiés secs ou saturés, leur conductivité thermique apparente, s'accroît proportionnellement avec la masse volumique apparente. En effet, d'une part la densification croissante des matériaux bouche les pores et élimine l'air qui s'y trouve, ce dernier possède une conductivité thermique

inférieure aux conductivités thermiques des matrices solides, et d'autre part, plus le matériau est compact (dense) plus il comporte des particules élémentaires susceptibles de transporter de l'énergie thermique. Or, la conductivité thermique représente la somme algébrique de la contribution de chacune de ces particules, à la conduction au sein du matériau.

4.2.3 Influence du dosage de fibre

L'évolution de la conductivité thermique des bétons allégés en fonction du dosage des granulats de liège est représentée sur la figure 4-10. Celle en fonction des billes de polystyrène est donnée par la figure 4-11.

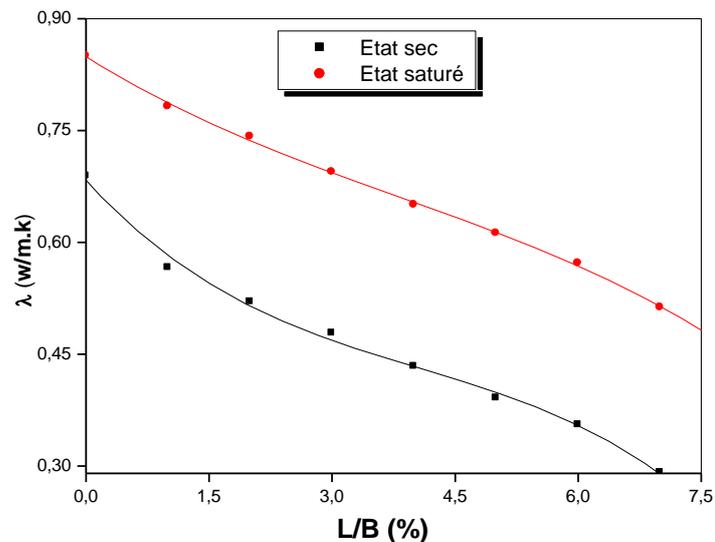


Figure 4-10 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction du dosage de granulats de liège L/B

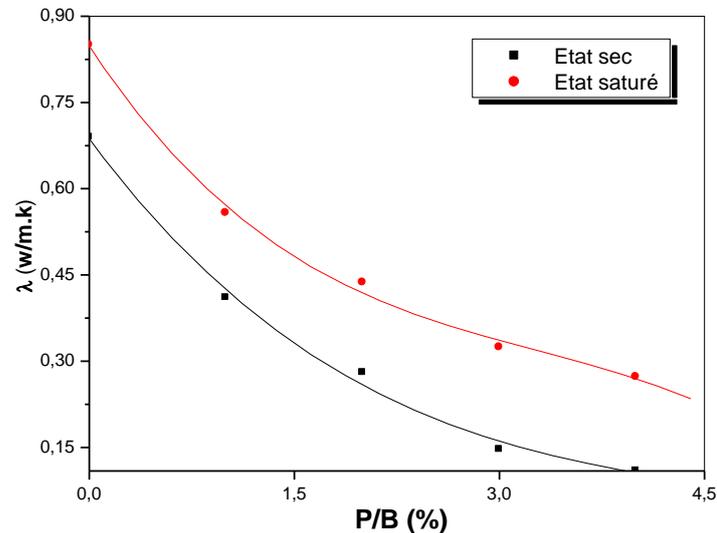


Figure 4-11 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction du dosage des billes de polystyrène P/B

Nous remarquons que la conductivité évolue en sens inverse du dosage des fibres, ceci se justifie par le fait que la conductivité thermique des granulats de liège, ainsi que celle des billes de polystyrène sont très faibles comparativement à celle du ciment. Le liège et le polystyrène sont des matériaux isolants. Ainsi pour un volume donné, en augmentant le pourcentage volumique de ces matériaux dans le béton, on rend par conséquent ce dernier plus isolant thermiquement.

4.3 Résistance thermique

Nous présentons dans cette partie, les résultats concernant la résistance thermique des matériaux étudiés. Dans cette présentation nous suivons le même plan adopté dans le cas de la conductivité thermique.

4.3.1 Influence de la teneur en eau

Les graphes représentant la variation de la résistance thermique des échantillons testés (béton de liège et de polystyrène) en fonction de la teneur en eau sont fournis par les figures 4-12 et 4-13.

On remarque que l’humidification croissante des matériaux étudiés entraîne une diminution de la résistance thermique, ce qui influe négativement sur le pouvoir isolant de ces matériaux. Ceci s’explique très facilement, par le fait que l’eau est un excellent conducteur induit une diminution de la résistance thermique du béton en se substituant à l’air qui est un excellent isolant.

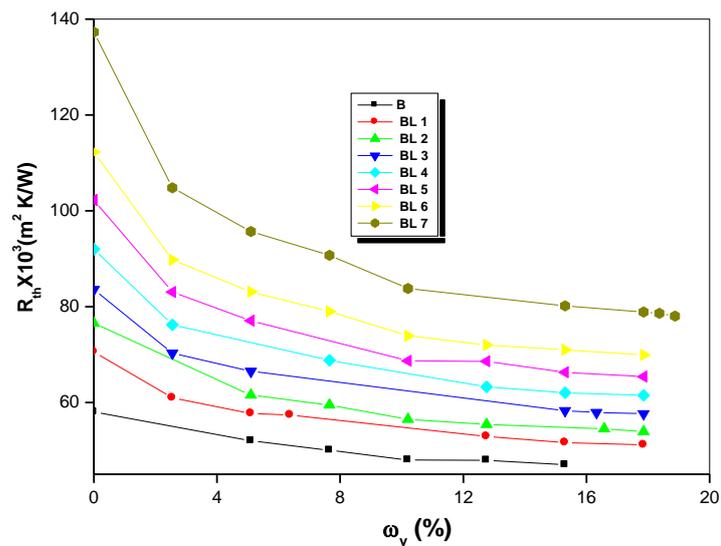


Figure 4-12 : Variation de la résistance thermique des bétons allégés avec des granulats de liège en fonction de la teneur en eau

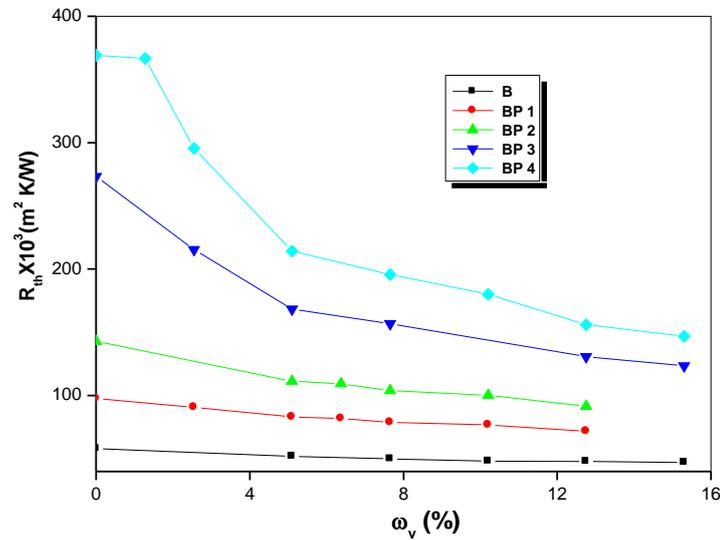


Figure 4-13 : Variation de la résistance thermique des bétons allégés avec les billes de polystyrène en fonction de la teneur en eau

4.3.2 Influence de la masse volumique

L'analyse des résultats de variation de la résistance thermique des bétons de liège et des bétons de polystyrène en fonction de la masse volumique, regroupés respectivement dans les tableaux 4-7 et 4-8, et illustrés par les figures 4-14 et 4-15, permet de constater une influence notable de cette grandeur (la masse volumique) sur la résistance thermique des matériaux, et donc sur leur pouvoir d'isolation thermique. Plus le matériau est dense et plus sa résistance thermique diminue. Il est clair que le facteur déterminant dans cette décroissance est la porosité du matériau.

Tableau 4-7 : Résistance thermique des échantillons de béton de liège étudiés à l'état sec et à l'état saturé

Désignation	B	BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6	BL7	
e (cm)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
ρ (Kg/m ³)	2168	2092	1989	1939	1862	1811	1760	1684	
$R_{th} \times 10^3$ (m ² .K/W)	<i>Etat sec</i>	58	71	76	84	92	102	113	137
	<i>Etat saturé</i>	47	51	54	58	62	65	70	78

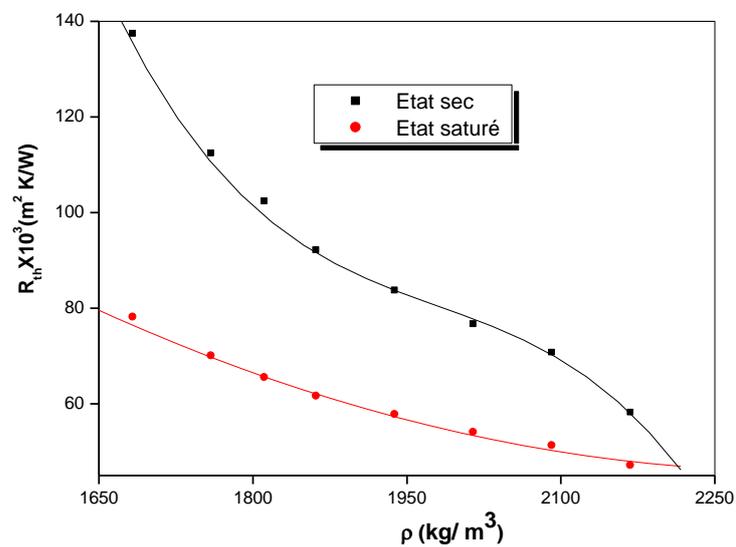


Figure 4-14 : Variation de la résistance thermique des bétons de liège en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé

Tableau 4-8 : Résistance thermique des échantillons de béton de polystyrène étudiés à l'état sec et à l'état saturé

Désignation		<i>B</i>	<i>BP1</i>	<i>BP2</i>	<i>BP3</i>	<i>BP4</i>
e (cm)		4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
ρ (Kg/m ³)		2168	1837	1607	1250	1097
$R_{th} \times 10^3$ (m ² .K/W)	<i>Etat sec</i>	58	98	143	273	369
	<i>Etat saturé</i>	47	72	92	124	147

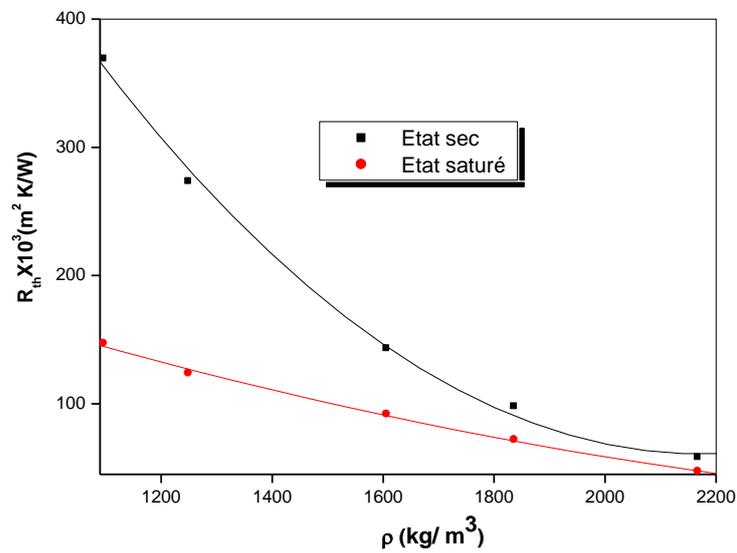


Figure 4-15 : Variation de la résistance thermique des bétons de polystyrène en fonction de la masse volumique à l'état sec et à l'état saturé

4.3.3 Influence du dosage de fibre

L'effet du dosage des fibres introduites dans les bétons étudiés, sur leur résistance thermique est mis en évidence sur les figures 4-16 et 4-17.

Il apparaît nettement une proportionnalité entre la quantité des fibres (granulats de liège ou billes de polystyrène) introduite dans le béton et sa résistance thermique. A titre d'exemple, un béton à 3 % de granulats de liège (BL3) a une résistance thermique de l'ordre de $84 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$. En doublant le taux du dosage de liège (BL6), il s'ensuit une augmentation de sa résistance thermique jusqu'à $113 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$, ce qui démontre l'influence considérable de la proportion des fibres sur la résistance thermique du béton. Par ailleurs, la résistance thermique d'un mur de béton de polystyrène (BP1) de 4 cm d'épaisseur passe de $72 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ à l'état saturé, jusqu'à $98 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ K/W}$, à l'état sec. Un mur est ainsi d'autant plus résistant thermiquement qu'il est plus sec.

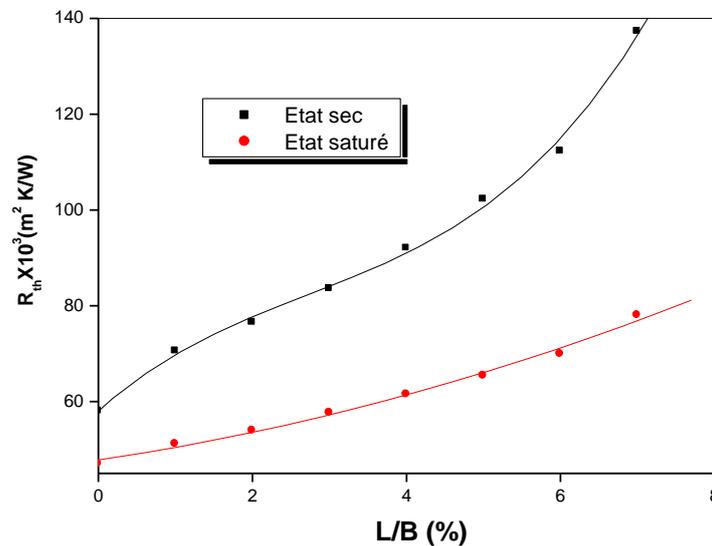


Figure 4-16 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction du dosage des granulats du liège L/B

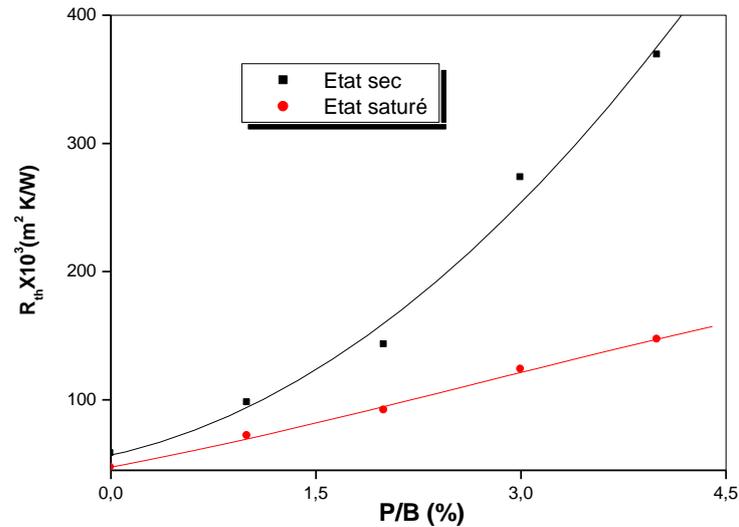


Figure 4-17 : Variation de la résistance thermique en fonction du dosage des billes de polystyrène P/B

4.3.4 Etude thermomécanique

L'une des caractéristiques les plus importantes dans le choix d'un matériau de construction est évidemment la résistance mécanique. En terme de matériau isolant et porteur, la qualité recherchée pour un matériau de construction est une résistance thermique maximale, à laquelle s'ajoute une résistance mécanique élevée. Notre but est principalement l'amélioration des qualités thermiques du béton en lui intégrant des matériaux isolants lors de son gâchage, tout en conservant des performances mécaniques suffisantes. Il nous a paru par conséquent nécessaire de mener une étude thermomécanique. En se basant sur un ajustement statistique des résultats expérimentaux concernant la résistance mécanique obtenus par Elbakkouri [32] pour le béton de liège et ceux obtenus par Chafi [33] pour le béton de polystyrène, et l'ensemble de nos résultats présenté précédemment concernant la résistance thermique, nous donnons la variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique dans l'objectif de caractériser un domaine où les valeurs de ces deux caractéristiques sont acceptables.

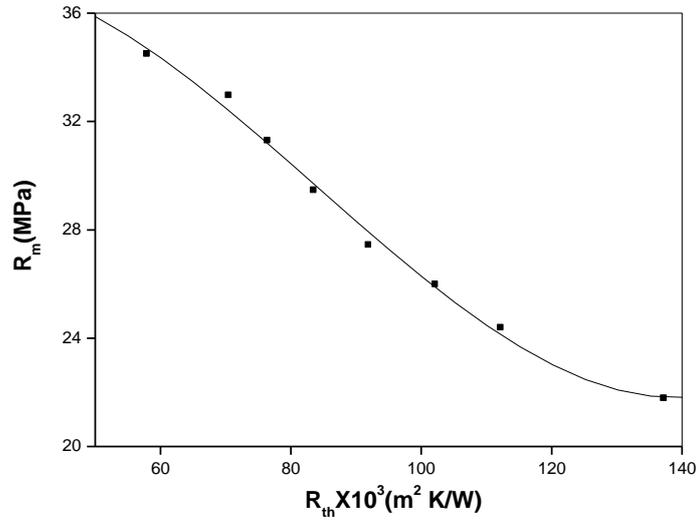


Figure 4-18 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique du Béton de liège

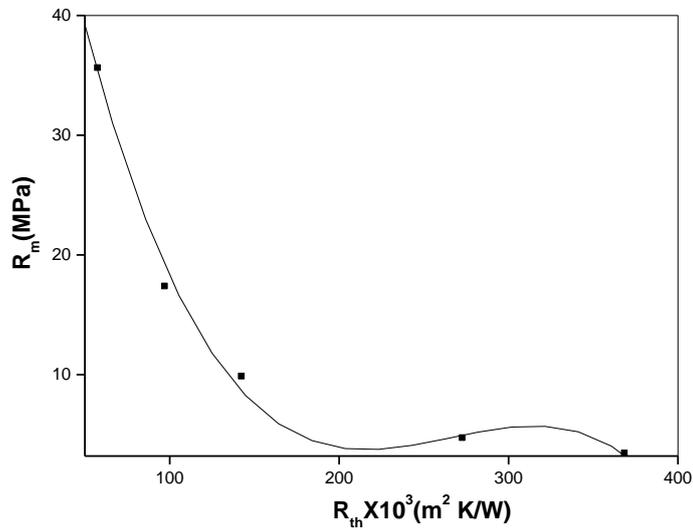


Figure 4-19 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique du Béton de polystyrène

Les figures 4-18 et 4-19 peuvent être considérées comme des références pour choisir les masses volumiques des bétons testés qui pourraient être utilisés comme des matériaux isolants porteurs. Il suffit donc de fixer les limites thermiques ou mécaniques pour déterminer le domaine de la masse volumique correspondant.

4.4 Chaleur massique

Un autre élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique. Cette grandeur caractérise la capacité du matériau à emmagasiner la chaleur. Nous avons déduit la chaleur massique à partir de la relation (4-1) :

$$C = \frac{\lambda}{\rho a} \quad (4-1)$$

a étant la diffusivité thermique du matériau.

A défaut d'avoir pu mesurer la diffusivité thermique des matériaux étudiés, nous avons utilisé des résultats de la littérature. Ceux trouvés par Elbakkouri [32] pour l'échantillon BL7 et ceux obtenus par Belhamri et al [53] pour l'échantillon BP4.

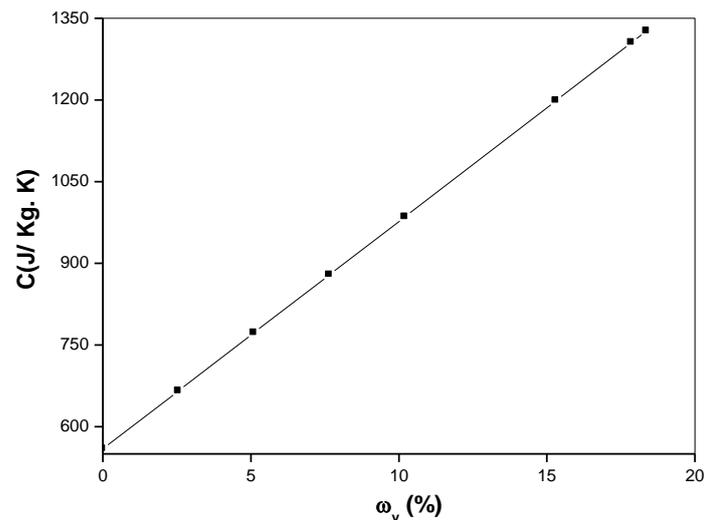


Figure 4-20 : Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau de l'échantillon BL7

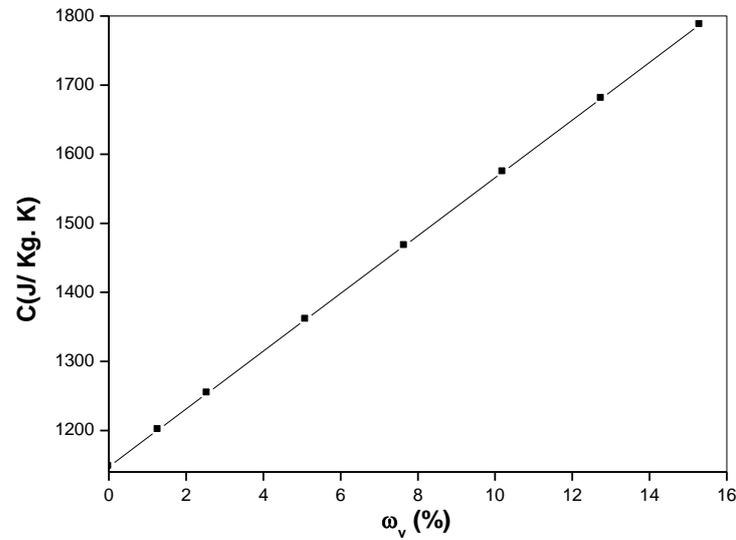


Figure 4-21 : Variation de la chaleur massique en fonction de la teneur en eau de l'échantillon BP4

L'observation des courbes des figures 4-20 et 4-21 représentant les variations de la chaleur massique (C) respectivement des échantillons BL7 et BP4 en fonction de la teneur en eau, permet de remarquer que cette grandeur croît de manière linéaire avec la teneur en eau. Ce résultat approche assez bien les prévisions théoriques, si nous considérons que la chaleur massique d'un milieu composite est donnée par la relation [54]:

$$C = \sum_i \omega_i C_i \quad (4-2)$$

avec

ω_i : teneur en eau volumique du constituant i ,

C_i : chaleur massique du constituant i .

Les phases fluides en présence sont généralement l'air humide et l'eau.

5. Comparaison du pouvoir thermique d’isolation des matériaux étudiés

Pour les mêmes proportions d’allègement (L/B=P/B = 1, 2, 3 et 4 %), une comparaison des pouvoirs isolants des bétons étudiés (BL et BP) a été menée. Les résultats des mesures des conductivités et des calculs des résistances thermiques, à l’état sec des matériaux étudiés sont regroupés dans le tableau 4-9 et illustrés par les figures 4-22 et 4-23.

Tableau 4-9 : Comparaison du pouvoir d’isolation thermique des matériaux étudiés

Désignation	BL1	BL2	BL3	BL4	BP1	BP2	BP3	BP4
λ (W/m.K)	0.567	0.523	0.479	0.434	0.410	0.280	0.146	0.108
$R_{th} \times 10^3$ (m ² .K/W)	71	76	84	92	98	143	273	369

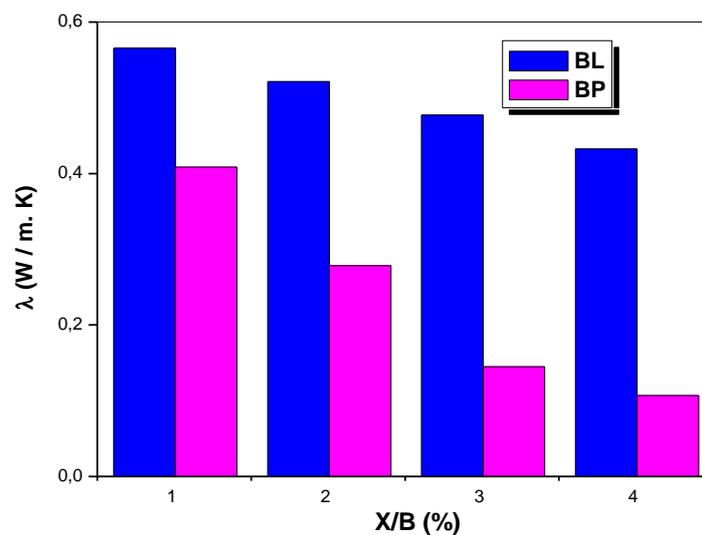


Figure 4-22 : Comparaison des conductivités thermiques des BL et BP

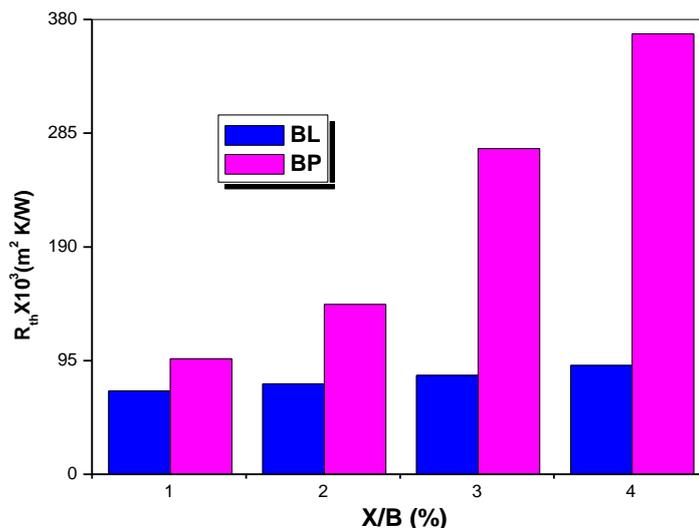


Figure 4-23 : Comparaison des résistances thermiques des BL et BP

L'analyse des résultats du tableau 4-9 et des histogrammes des figures 4-22 et 4-23, permet de remarquer que quelque soit la fraction massique (X/B) de fibre utilisée et bien que la conductivité thermique du polystyrène ($\lambda = 0.045 \text{ W/ m. K}$) soit supérieure à celle du liège ($\lambda = 0.036 \text{ W/ m. K}$), les meilleures performances thermiques sont obtenus avec le béton de polystyrène, sa conductivité thermique est nettement inférieure à celle du béton de liège et par conséquent sa résistance thermique est toujours supérieure à la résistance thermique du béton de liège. Ceci peut s'expliquer par le fait que le polystyrène a une faible masse volumique (très petite devant celle du liège), il en résulte que pour le même dosage de fibre (granulats de liège et billes de polystyrène), la quantité de polystyrène introduite dans le béton est très grande par rapport à celle du liège et par conséquent le volume occupé par le polystyrène dans le béton est très grand par rapport à celui occupé par le liège. On constate également aussi que l'écart entre les conductivités et les résistances thermiques augmente au fur et à mesure que la fraction d'allègement du béton croît quelque soit l'état hygroscopique des matériaux (figures 4-24, 4-25, 4-26 et 4-27).

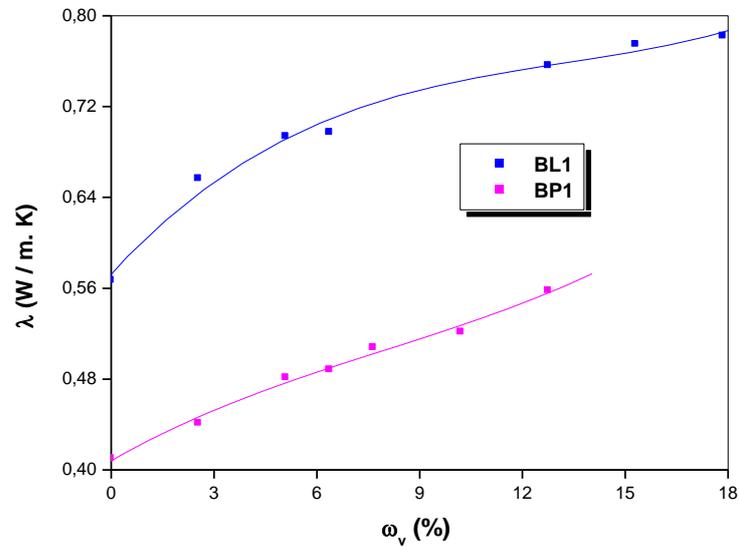


Figure 4-24 : Comparaison des conductivités thermiques des BL1 et BP1

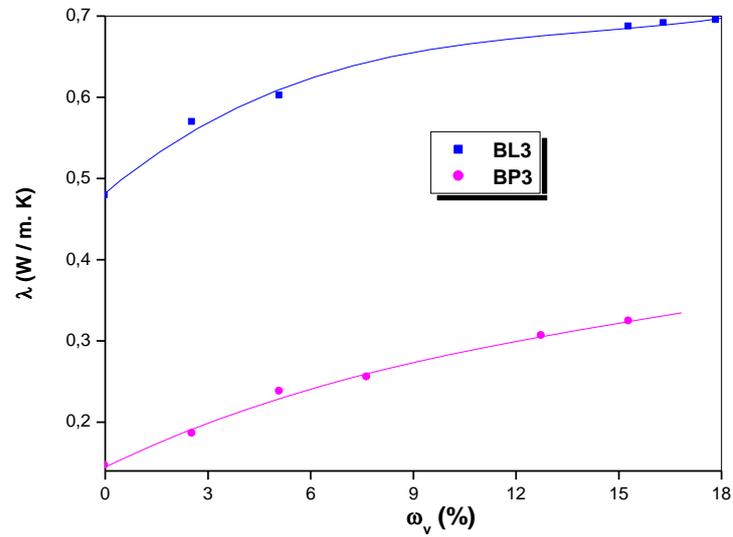


Figure 4-25 : Comparaison des conductivités thermiques des BL3 et BP3

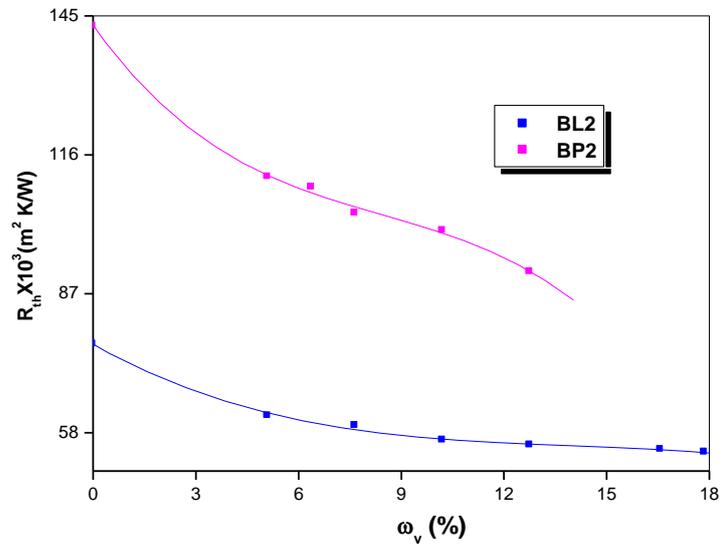


Figure 4-26 : Comparaison des résistances thermique des BL2 et BP2

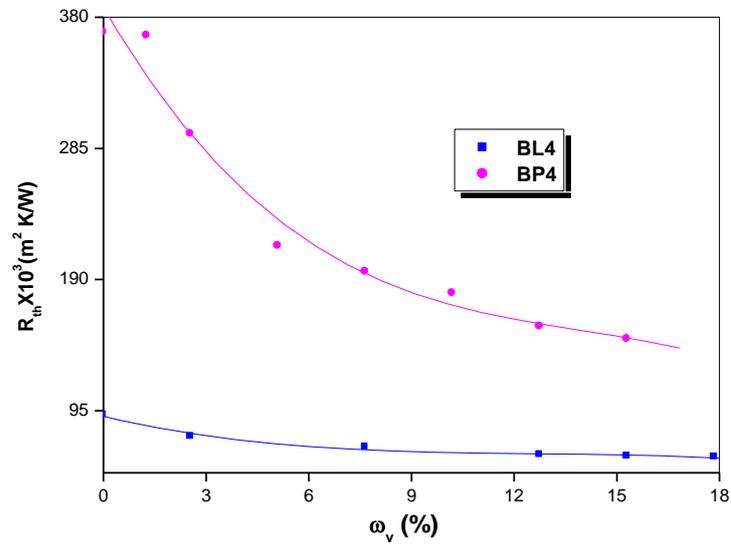


Figure 4-27 : Comparaison des résistances thermique des BL4 et BP4

Conclusion

L'exploitation des résultats expérimentaux obtenus, nous a permis de quantifier la plupart des grandeurs thermophysiques caractéristiques des échantillons que nous avons élaboré.

L'analyse de ces résultats a montré clairement que la présence de l'eau dans les matériaux de construction, même en faible quantité modifie considérablement leurs propriétés thermophysiques. Par ailleurs, il apparaît sans ambiguïté que l'introduction de liège et de polystyrène dans le béton lors de sa préparation a une influence favorable sur ses performances thermiques (conductivité et résistance thermique). La masse volumique reste l'un des paramètres essentiels pour suivre l'évolution des paramètres thermophysiques des matériaux car elle permet d'apprécier globalement leurs qualités isolantes.

Cette partie expérimentale de notre travail portant sur les propriétés thermophysiques donne des indications pour le choix d'un matériau en vue de l'isolation thermique des bâtiments, cependant il faut tenir compte d'autres critères pour le choix définitif tel que le comportement de ces matériaux en contact de l'eau.

L'humidité contenue dans les matériaux de construction résulte de la migration de l'eau sous forme vapeur où sous forme liquide, celle-ci s'accompagne souvent de transfert de chaleur. L'étude des transferts couplés de chaleur et de masse qui interviennent au sein des matériaux étudiés qui sera présentée dans ce qui suit permettra de mieux nous situer dans ce choix.

**CHAPITRE 5 : Modélisation des transferts
couplés de chaleur et de masse**

Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'humidité qui a lieu au sein des matériaux étudiés a une influence notable sur leurs propriétés thermophysiques. Son apparition dans l'enveloppe est généralement attribuée aux phénomènes de diffusion et de condensation de l'air humide intérieur. L'infiltration qui se produit pendant la saison des pluies est probablement le problème d'humidité le plus courant dans les maisons elle peut se manifester par des taches et des fuites au plafond ou l'écaillage de la peinture, dans les graves cas, elle peut causer un pourrissement pouvant même affecter la structure.

Du fait des conditions hygrothermiques ambiantes variables, il se produit un transfert de cette humidité au sein des matériaux. Ce transfert hydrique est souvent lié à un transfert thermique. Le couplage de ces deux types de transfert affecte la durabilité de l'enveloppe et peut contribuer de façon significative aux déperditions énergétiques. L'amplitude de cette contribution dépend de plusieurs facteurs, en particulier l'épaisseur des parois et les conditions environnementales. Pour prévoir et suivre les mouvements de l'humidité dans l'enveloppe d'un bâtiment, plusieurs études ont été réalisées et de nombreuses simulations ont été développées et validées au cours de ces dernières années [55- 57].

En vue d'une meilleure compréhension de ces phénomènes, nous allons aborder dans ce chapitre une modélisation du transfert couplé unidimensionnel de chaleur et de masse au sein d'une paroi poreuse monocouche.

En premier lieu, nous présentons la description mathématique des transferts hydrique et thermique qui interviennent au sein d'un milieu poreux. Puis, nous exposons la discrétisation de ces équations. Ensuite, nous effectuerons une application numérique sur trois types de parois (B, BL et BP). Les évolutions temporelles de la teneur en eau et de la température et leurs distributions spatiales au sein de chaque matériau seront étudiées, ainsi que l'étude de l'influence de la nature des matériaux et des dosages de fibres introduites au sein de l'enveloppe sur ces transferts.

1. Modélisation mathématique

Les premiers travaux scientifiques de chaleur et de masse en milieux poreux ont débuté dès les années 20, notamment par Sherwood [58] qui est le premier à proposer une équation de diffusion de l'eau avec un coefficient de diffusion constant, appliqué au bois. Vingt ans plus tard, les scientifiques observeront que le mouvement de l'eau par diffusion est réservé au domaine hygroscopique et que le coefficient de diffusion est essentiellement variable. Puis une avancée importante est réalisée par Luikov [59] et par Philip et De Vries [60] avec le développement d'une formulation des transferts couplés de chaleur et de masse en milieu poreux non saturé. Après l'établissement de ces deux modèles, plusieurs travaux ont été consacrés à leur évaluation. Parmi ces différentes études de vérification, nous citons en particulier celles effectuées par Crausse [5] et Perrin [61] qui sont certainement les plus complètes. Par ailleurs, à partir de la bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux, ils ont constaté que la modélisation proposée par Luikov- De Vries, constitue une description satisfaisante des mécanismes physiques mis en jeu. Par contre, ces deux modèles posent problème pour les parois multicouches. En effet, le potentiel de transfert hydrique utilisé dans ces modèles et qui correspond à la teneur en eau pondérale n'est pas continu aux interfaces de deux milieux différents. Pour éliminer les problèmes de discontinuités, les modélisateurs, travaillant dans le domaine du bâtiment, utilisent dans leur système d'équations un potentiel hydrique continu tel que l'humidité relative [62] ou bien la pression capillaire [55].

Les théories qui ont suivi vont permettre de mieux comprendre les phénomènes internes. Elles sont basées sur la thermodynamique des processus irréversibles [63] ou sur la conversion à l'échelle macroscopique des équations de transport, sur un milieu continu à l'échelle du pore [64].

1.1 Mise en équations

Le béton allégé utilisé dans cette étude comme enveloppe de bâtiment est un matériau poreux. Il contient de l'eau en phase liquide ou gazeuse. Les faces intérieure et extérieure des enveloppes sont à des températures différentes. Il en résulte par conséquent un transfert de chaleur par conduction à travers le matériau et un transfert de chaleur accompagnant chaque changement de phase. La modélisation mathématique du phénomène de thermomigration qui intervient au sein du matériau s'effectue à partir d'une approche

macroscopique qui consiste à introduire les lois physiques expérimentales des processus élémentaires dans les relations de conservation de masse et de chaleur. Cette approche est fondée sur l'identification du milieu poreux à un milieu continu fictif dont les dimensions sont grandes par rapport aux dimensions des pores, et pour lequel les variables et les paramètres physiques sont identifiées à des valeurs moyennes sur un certain volume du milieu poreux. Les hypothèses de cette modélisation sont les suivantes [57,60]:

- La phase solide constituant le milieu poreux est indéformable, homogène, isotrope, et n'est le siège d'aucune réaction chimique,
- La pression de la phase gazeuse est uniforme et constante dans le milieu poreux,
- Les différentes phases sont en équilibre thermique en tout point du milieu poreux,
- La phase gazeuse obéit à la loi des gaz parfaits,
- La température est comprise entre 0 °C et 100 °C, et les gradients thermiques dans le milieu sont faibles,
- La teneur en masse de l'humidité en phase vapeur, est supposée très faible par rapport à celle de la phase liquide,
- Les chaleurs massiques des différentes phases sont constantes, pour la gamme de température considérée.

1.1.1 Equation de transfert de masse

Comme nous l'avons signalé au 1^{er} chapitre, le transfert de masse dans un milieu poreux humide est une combinaison de différents mécanismes de transport de vapeur et d'eau liquide. Ces transferts se font par diffusion moléculaire sous l'effet d'un gradient de pression partielle de la vapeur d'eau en phase vapeur, et sous l'action des forces capillaires en phase liquide. En appliquant les lois de conservation aux différentes phases et en considérant les hypothèses simplificatrices citées précédemment (§ 1.1), nous pouvons écrire pour chaque constituant de la phase fluide [65]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 \omega_i) + \text{div} \vec{J}_i = I_i \quad (5-1)$$

D'après la deuxième hypothèse, la pression étant uniforme dans le milieu, la densité du flux de masse transporté par convection est donc nulle :

J_i : densité du flux de masse transporté par diffusion,

I_i : source

➤ Transfert de masse en phase vapeur

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 \omega_v) + \text{div} \vec{J}_v = I_v \quad (5-2)$$

La densité de flux de masse de vapeur par diffusion moléculaire \vec{J}_v a pour expression :

$$\vec{J}_v = -\rho_0 D_v [\nabla \omega_v + \delta_v \nabla T] \quad (5-3)$$

avec

D_v : diffusivité massique de l'humidité en phase vapeur.

$$D_v = f(\omega) D_v \left(\frac{M_v}{RT} \right)^2 \frac{P_{vs}}{\rho_0} \frac{P}{P - P_v} g \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right)_T HR$$

δ_v est appelé le coefficient de thermomigration de la vapeur

$$\delta_v = \frac{dP_{vs}/dT}{P_{vs} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right)_T \frac{M_v}{RT}} + \frac{\left(\frac{\partial \Psi}{\partial T} \right)_\omega}{\left(\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right)_T} - \frac{\Psi/T}{\left(\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right)_T}$$

Par approximation [66] on trouve :

$$\delta_v = \frac{L_v}{Tg \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right)_T}$$

➤ Transfert de masse en phase liquide

L'équation de conservation du constituant liquide s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 \omega_l) + \text{div} \vec{J}_l = I_l \tag{5-4}$$

Sachant que le déplacement du liquide est régi par la loi de Darcy, en faisant apparaître les gradients de température ∇T et d'humidité $\nabla \omega$ la densité de flux de masse en phase liquide \vec{J}_l prend la forme :

$$\vec{J}_l = -\rho_0 D_l [\nabla \omega + \delta_l \nabla T] \tag{5-5}$$

D_l étant la diffusivité massique de l'humidité en phase liquide

$$D_l = \frac{\rho_l K_l g}{\rho_0 v_l} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} \right)_T$$

δ représente le coefficient de thermomigration en phase liquide exprimé par :

$$\delta_l = \frac{(\partial \Psi / \partial T)_\omega}{(\partial \Psi / \partial \omega)_T}$$

En général, la masse de vapeur est négligeable devant celle du liquide, et par conséquent la concentration de l'humidité dans le milieu poreux est égale à la teneur d'humidité en phase liquide :

$$\omega = \omega_v + \omega_l \approx \omega_l$$

et

$$I_v = -I_l = \dot{m}$$

L'équation de transfert de masse de l'ensemble des phases s'écrit alors :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla(D \nabla \omega + D \delta \nabla T) \quad (5-6)$$

avec :

$$D = D_v + D_l$$

$$\delta = \frac{\delta_v D_v + \delta_l D_l}{D}$$

1.1.2 Equation de transfert de chaleur

L'expression de la conservation de l'enthalpie dans les phase solide, liquide et vapeur permet d'obtenir l'équation de transfert de chaleur [65]:

$$\rho_0 C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \varepsilon' L_v \rho_0 \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (5-7)$$

avec:

ε' : taux du changement de phase,

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau,

C_p : chaleur massique à pression constante.

Le flux de chaleur est composé du transfert thermique par conduction et d'un terme source résultant des processus d'évaporation-condensation de l'humidité. Ce dernier terme traduit les effets du changement de phase (chaleur latente) dont le moteur est la densité de flux de vapeur.

1.2 Conditions aux limites

L'enveloppe d'un bâtiment en fonctionnement normal est sollicitée par des conditions atmosphériques variables. Sur la face extérieure soumise aux intempéries, de nombreux paramètres influencent la température et l'humidité relative (vent, pluie, etc.). Sur la face intérieure, la régulation climatique est effectuée en fonction du bien être des occupants. Cette régulation tend à stabiliser la température et l'humidité. On considère que les flux thermique et hydrique sont nuls au sol et au plafond, par conséquent leur variation a lieu uniquement dans la direction x :

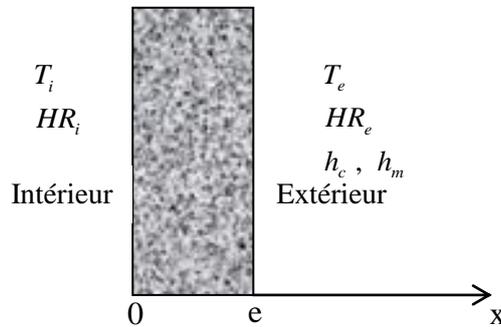


Figure 5-1: Modèle mathématique

- A $x = 0$ (face intérieure) :

$$HR = HR_i \tag{5-8}$$

$$T = T_i \tag{5-9}$$

- A l'interface milieu poreux- milieu fluide ($x = e$, face extérieure), on suppose que :

$$\rho_0 \left(D \frac{\partial \omega}{\partial x} + D \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) = h_m \left(\frac{P_{vs}}{T} HR - \frac{P_{va}}{T_a} HR_a \right) \tag{5-10}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + (\varepsilon' - 1) L_v \rho_0 \left(D \frac{\partial \omega}{\partial x} + D \delta \frac{\partial T}{\partial x} \right) = h_c (T - T_a) \tag{5-11}$$

h_c , h_m sont respectivement les coefficients de transferts convectif thermique et massique. On démontre [67] que le rapport entre ces deux coefficients varie très peu avec des températures, comprises entre 0 °C et 50 °C ; dans cet intervalle de température et à pression atmosphérique ce rapport est de l'ordre de 10^{-3} [68].

Les équations (5-6) et (5-7) avec les conditions aux limites (5-8), (5-9), (5-10) et (5-11) forment un système d'équations différentielles partielles non linéaires et couplées qui ne peut pas être résolu de façon analytique. Il est donc nécessaire de faire appel à des méthodes numériques pour résoudre ce système. Depuis plusieurs années, la méthode des éléments finis s'est imposée comme outil pratique pour la résolution de ce type de problème [61, 69- 72].

2. Résolution numérique des équations

L'objectif de cette partie est de présenter la mise en oeuvre numérique du système d'équations formulé dans la partie précédente. Les inconnues du modèle sont les champs d'humidité (ω) et de température (T). Le problème consiste à trouver l'évolution de ces variables pour un milieu poreux dont on connaît la géométrie, l'état initial et l'environnement thermodynamique.

La méthode numérique comprend :

- Une discrétisation de l'espace par la méthode des éléments finis,
- Une discrétisation par rapport au temps par la méthode des différences finies,
- Une résolution du système obtenu d'équations algébriques.

2.1 Discrétisation spatiale

La méthode des éléments finis consiste à discrétiser le problème étudié en décomposant le domaine de calcul en plusieurs sous domaines (R_e) appelés *éléments* de forme linéaires de longueurs Δx , interconnectés en des points appelés *nœuds*. Les distributions du taux d'humidité et de la température, dans chaque élément sont obtenues par interpolation nodale:

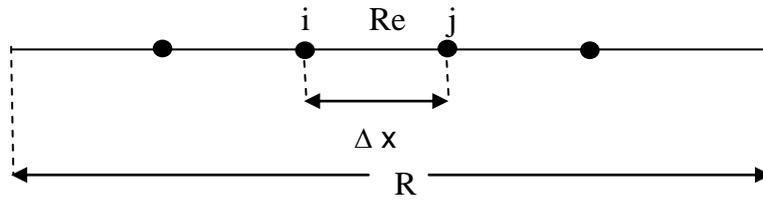


Figure 5-2: Discrétisation du domaine de calcul

$$\omega^{(e)}(x,t) = N_i(x)\omega_i^{(e)}(t) + N_j(x)\omega_j^{(e)}(t) \tag{5-12}$$

$$T^{(e)}(x,t) = N_i(x)T_i^{(e)}(t) + N_j(x)T_j^{(e)}(t) \tag{5-13}$$

L'exposant (e) désigne la valeur élémentaire.

$\omega_i, \omega_j, T_i, et T_j$ sont respectivement les valeurs inconnues du taux d'humidité et de la température, aux nœuds i et j

$N_i(x)$ et $N_j(x)$ sont les fonctions d'interpolation, elle sont données par [73]:

$$N_i(x) = \frac{x_j - x}{x_j - x_i}$$

$$N_j(x) = \frac{x - x_i}{x_j - x_i}$$

et satisfont les relations :

$$N_i(x) = 1 \qquad N_j(x) = 0$$

$$N_i(x) = 0 \qquad N_j(x) = 1$$

En substituant les expressions (5-12) et (5-13) respectivement dans les équations (5-6) et (5-7), et en procédant suivant le principe de Galerkin [74], nous trouvons:

$$\int_{R_e} \left[\frac{\partial \omega^{(e)}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \omega^{(e)}}{\partial x} + D \delta \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \right) \right] N_i dx = 0 \quad (5-14)$$

$$\int_{R_e} \left[\rho_c C^{(e)} \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} - (\varepsilon' \rho_0 L_v)^{(e)} \frac{\partial \omega^{(e)}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^{(e)} \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \right) \right] N_i dx = 0 \quad (5-15)$$

L'intégration par partie des équations (5-14) et (5-15), et l'introduction des conditions aux limites nous donne les systèmes matriciels suivants:

$$[A]^{(e)} \left\{ \frac{d\omega}{dt} \right\}^{(e)} + [B]^{(e)} \{\omega\}^{(e)} + [C]^{(e)} \{T\}^{(e)} = 0 \quad (5-16)$$

$$[A']^{(e)} \left\{ \frac{dT}{dt} \right\}^{(e)} + [B']^{(e)} \left\{ \frac{d\omega}{dt} \right\}^{(e)} + [C']^{(e)} \{T\}^{(e)} = 0 \quad (5-17)$$

avec

$$A_{ij}^{(e)} = \int_{R_e} N_i N_j dx$$

$$B_{ij}^{(e)} = \int_{R_e} D^{(e)} \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx$$

$$C_{ij}^{(e)} = \int_{R_e} (D \delta)^{(e)} \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx$$

$$A'_{ij}{}^{(e)} = \int_{R_e} \chi^{(e)} N_i N_j dx$$

$$B_{ij}^{(e)} = \int_{R_e} \rho_0 C^{(e)} N_i N_j dx$$

$$C_{ij}^{(e)} = \int_{R_e} \lambda^{(e)} \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} dx$$

$$\chi = \varepsilon' \rho_0 L_v$$

Une fois que la discrétisation est faite pour tous les éléments, nous devons assembler les différents systèmes élémentaires pour obtenir le système global, mais auparavant nous avons besoin de les élargir à la taille $(n \times n)$ du système global, nous trouvons alors :

$$[A] \left\{ \frac{d\omega}{dt} \right\} + [B] \{\omega\} + [C] \{T\} = 0 \tag{5-18}$$

$$[A'] \left\{ \frac{d\omega}{dt} \right\} + [B'] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + [C'] \{T\} = 0 \tag{5-19}$$

Les coefficients $D^{(e)}$, $D\delta^{(e)}$, $\lambda^{(e)}$, $\chi^{(e)}$ sont obtenus par interpolation linéaire dans chaque élément comme les fonctions ω et T .

2.2 Discrétisation temporelle

La discrétisation des équations (5-18) et (5-19) par rapport au temps se fait à l'aide d'un schéma semi implicite (schéma de *Cranck Nicholson*), en utilisant les approximations suivantes :

$$\left\{ \frac{d\omega}{dt} \right\} = \frac{1}{\Delta t} (\{\omega\}^{t+\Delta t} - \{\omega\}^t)$$

$$\{\omega\} = \frac{1}{2} (\{\omega\}^{t+\Delta t} + \{\omega\}^t)$$

et

$$\left\{ \frac{dT}{dt} \right\} = \frac{1}{\nabla t} (\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t)$$

$$\{T\} = \frac{1}{2} (\{T\}^{t+\Delta t} + \{T\}^t)$$

La linéarisation du système est obtenue par évaluation des coefficients au temps $(t + \frac{1}{2}\Delta t)$.

En tenant compte de ces expressions, les équations (5-18) et (5-19) prennent les formes suivantes :

$$[A_1]\{\omega\}^{t+\Delta t} + [B_1]\{T\}^{t+\Delta t} = [C_1]\{\omega\}^t + [D_1]\{T\}^t \quad (5-20)$$

$$[A_2]\{\omega\}^{t+\Delta t} + [B_2]\{T\}^{t+\Delta t} = [C_2]\{\omega\}^t + [D_2]\{T\}^t \quad (5-21)$$

2.3 Résolution du système d'équations algébriques

La discrétisation des équations de transfert de chaleur et de masse se ramène aux deux systèmes matriciels (5-20) et (5-21), ces deux systèmes de n équation linéaires sont transformés en un système linéaire (5-22) de 2n équations dans lequel le vecteur des inconnues admet pour composantes $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, T_1, T_2, \dots, T_n$:

$$\begin{bmatrix} [A_1] & [B_1] \\ [C_1] & [D_1] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} [A_2] & [B_2] \\ [C_2] & [D_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \\ T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}^t \quad (5-22)$$

La résolution de ce système a été effectuée par la méthode de décomposition LU avec substitution, la solution étant obtenue lorsque la différence entre deux estimations successives des inconnues devient inférieure à une valeur donnée.

Afin d’assurer le bon déroulement du programme numérique qui est développé pour la résolution du système (5-22), il semble intéressant de valider sa fiabilité avant de pouvoir se pencher sur les matériaux de notre étude. En première approche, nous l’avons appliqué pour étudier les transferts couplés de chaleur et de masse qui se produisent au sein d’une plaque plane de terre cuite non saturée, les résultats obtenus concernant le champ de température et le champ d’humidité sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement [75, 76].

3. Présentation des résultats

L’ensemble des résultats présentés dans cette partie de notre travail se rapporte à l’étude des transferts couplés de chaleur et de masse qui se produisent au sein de trois types de paroi (B, BL, BP) d’épaisseur e égale à 4 cm. Initialement, les parois ont une température constante T_0 égale à 20 °C, inférieure à la température ambiante ($T_a = 45\text{ °C}$). La teneur en eau initial ω_0 est de l’ordre de 0.2 kg/kg. Les propriétés thermophysiques pour chacun des matériaux étudiés, telle que la conductivité thermique, la masse volumique, et la chaleur massique sont obtenues expérimentalement (chapitre 4). Les valeurs des diffusivités massiques sont déduites de la littérature [77].

3.1 Champs d'humidité et de température

Les figures 5-3 et 5-4 représentent respectivement l'évolution temporelle de la température et de la teneur en eau moyennes de la paroi B. L'allure de ces courbes correspond à celle prévu par [78]. La figure 5-3 montre que dans l'intervalle de temps ($0 < t < 60$ min) il se produit une rapide montée de la température moyenne de la paroi, ce qui provoque une évaporation, qui se fait uniquement en surface et qui se traduit par une décroissance linéaire de la teneur en eau moyenne (figure 5-4). Dans cette phase le transfert de masse peut être globalement assimilable à l'évaporation à la surface libre d'un liquide, elle se poursuit jusqu'à que les forces capillaires qui ramènent l'humidité sous forme liquide de l'intérieur de la paroi vers la surface extérieure, deviennent assez faibles et que la phase liquide soit discontinue et ne s'écoule plus, par conséquent le transfert d'humidité en phase liquide vers la surface s'arrête. Cependant, on note l'apparition d'un front d'évaporation qui se propage vers l'intérieur de la paroi. Au-delà de 60 min, on remarque que le taux moyen d'humidité chute considérablement, il devient très faible et la température de la paroi devient quasi constante.

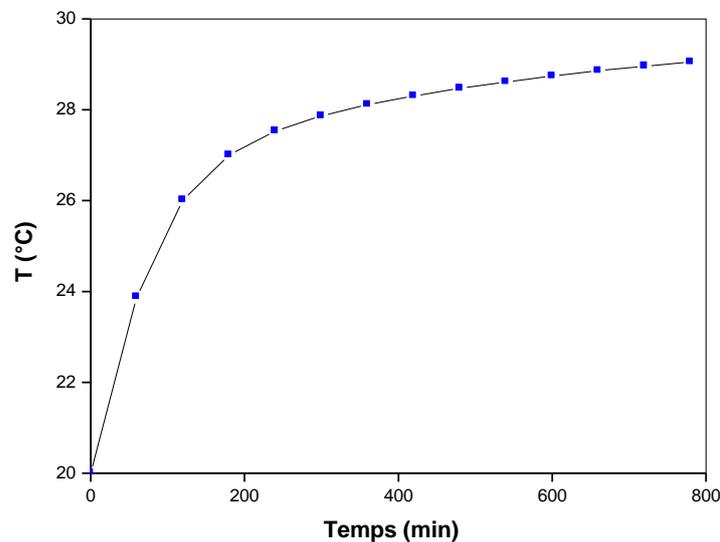


Figure 5-3 : Evolution de la température moyenne du béton classique au cours du temps

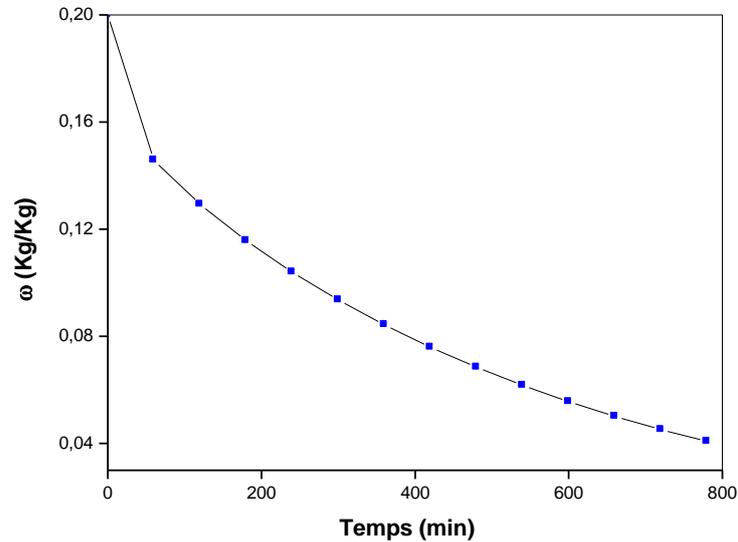


Figure 5-4 : Evolution de la teneur en eau moyenne du béton classique au cours du temps

Les distributions spatio- temporelle de la température et de la teneur en eau dans la paroi de béton classique sont représentées respectivement par les courbes des figures 5-5 et 5-6. On remarque qu'à partir d'un certain moment dans l'interface milieu poreux- milieu fluide, la teneur en eau devient assez faible pour que la phase fluide soit discontinue et ne s'écoule pas, résultant du gradient de température qui devient faible. Les transferts d'humidité en phase liquide vers cette partie de l'interface s'arrêtent alors, et la teneur en liquide chute considérablement dans cette région, les forces de rétention de l'eau deviennent importantes et font que la pression d'équilibre de la vapeur est inférieure à la pression de vapeur saturante. On dit, alors que cette région est entrée dans le domaine hygroscopique. La décroissance de la pression partielle de la vapeur avec la teneur en eau donne naissance à une diffusion de la vapeur vers l'interface et donc à une évaporation à l'intérieur du milieu poreux.

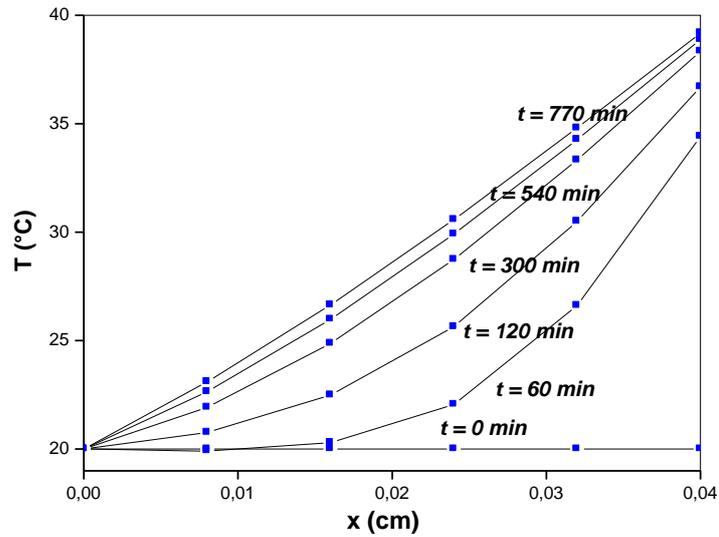


Figure 5-5 : Distribution de la température au sein de la paroi (béton classique)

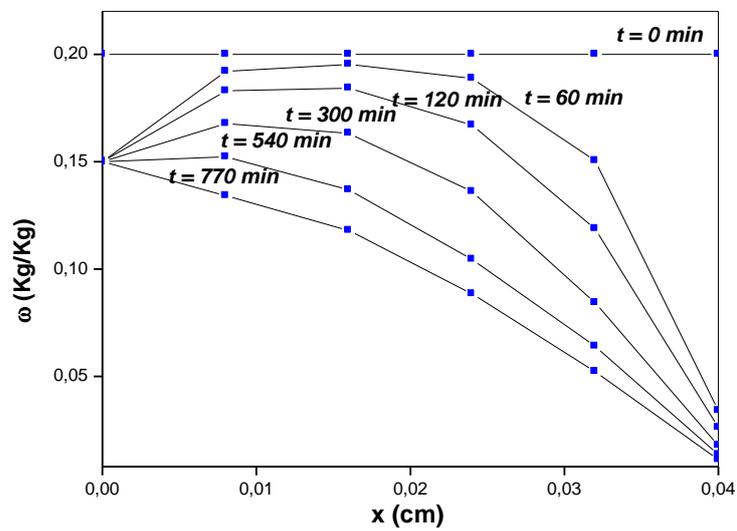


Figure 5-6 : Distribution de la teneur en eau au sein de la paroi (béton classique)

3.2 Influence de la nature du matériau sur les profils de température et d'humidité

Les courbes de la figure 5-7 illustrent l'évolution temporelle des températures moyennes des trois types de parois en B, BL3 et BP3. On remarque que les températures des matériaux qui initialement sont égales à la température de l'air intérieur, augmentent progressivement jusqu'à ce qu'elles atteignent une valeur proche de la température de l'air extérieur. On constate que la pente des profils de ces températures est plus faible pour BP3 et BL3 qui sont plus isolants que le matériau B.

Comme pour la température, nous avons également tracé les profils de la teneur en eau pour les trois matériaux étudiés (figure 5-8). On peut constater que la teneur en eau évolue de façon similaire à travers les trois parois, mais avec des pentes différentes. Ceci s'explique par le fait que l'ajout de liège et de polystyrène au sein du béton, favorise l'existence des pores au sein du matériau et le rend plus hygroscopique.

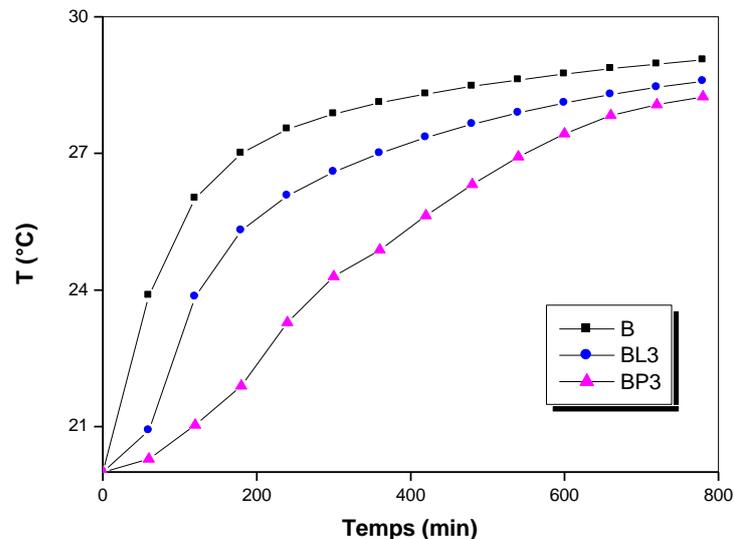


Figure 5-7 : Influence de la nature du matériau de l'enveloppe sur le profil de la température

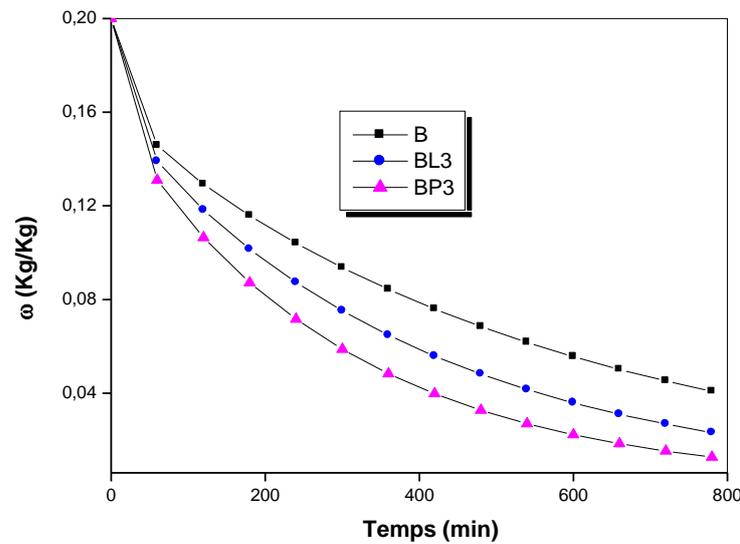


Figure 5-8 : Influence de la nature du matériau de l'enveloppe sur le profil de la teneur en eau

3.3 Influence du dosage de fibre sur les profils de température et d'humidité

Notre intérêt a porté en outre sur l'influence des dosages de granulats de liège et de billes de polystyrène sur les évolutions temporelles de la température et de l'humidité. Les résultats concernant l'effet sur la température sont représentés respectivement sur les figures 5-9 et 5-10. On observe que l'allure de tous les profils est la même et que pour un instant donné, la température diminue au fur et à mesure que le dosage de fibre augmente (liège ou polystyrène).

Par ailleurs l'augmentation de la quantité des fibres introduite dans le béton modifie le profil de la teneur en eau comme le montre les figures 5-11 et 5-12. Cette modification de la pente peut s'expliquer par le fait que vu leur légèreté, les granulats de liège et les billes de polystyrène se dispersent mieux au sein du béton de même qu'ils apparaissent à la surface. Ce phénomène de dispersion du liège et de polystyrène au sein du béton augmente de manière significative l'ouverture des pores ce qui favorise mieux l'élimination de l'eau du matériau allégé.

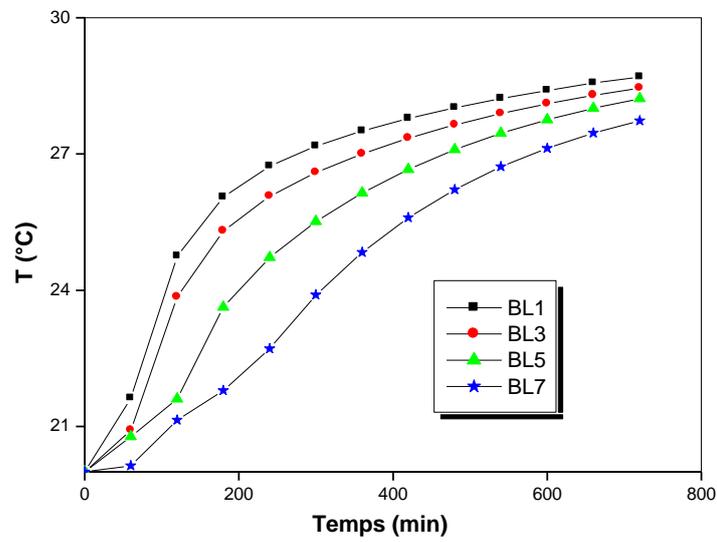


Figure 5-9 : Influence du dosage de liège sur le profil de la température

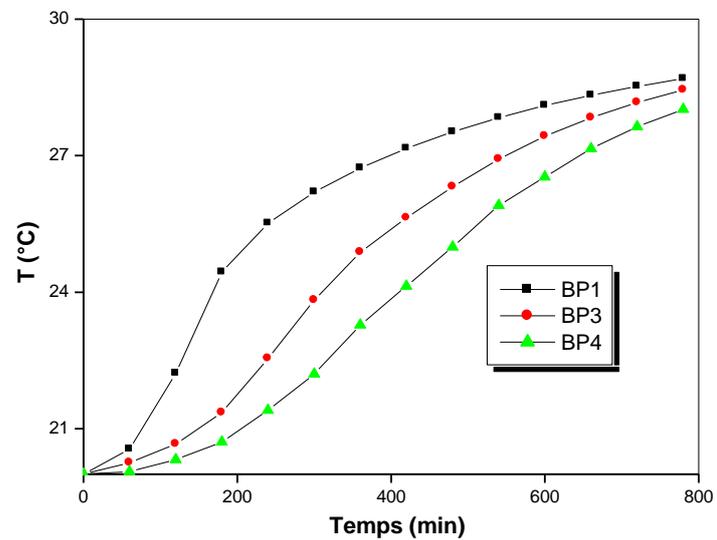


Figure 5-10: Influence du dosage de polystyrène sur le profil de la température

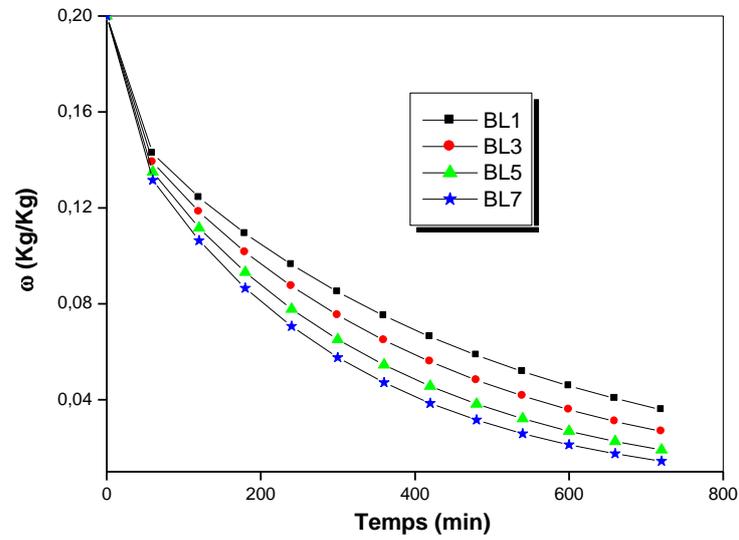


Figure 5-11 : Influence du dosage de liège sur le profil de la teneur en eau

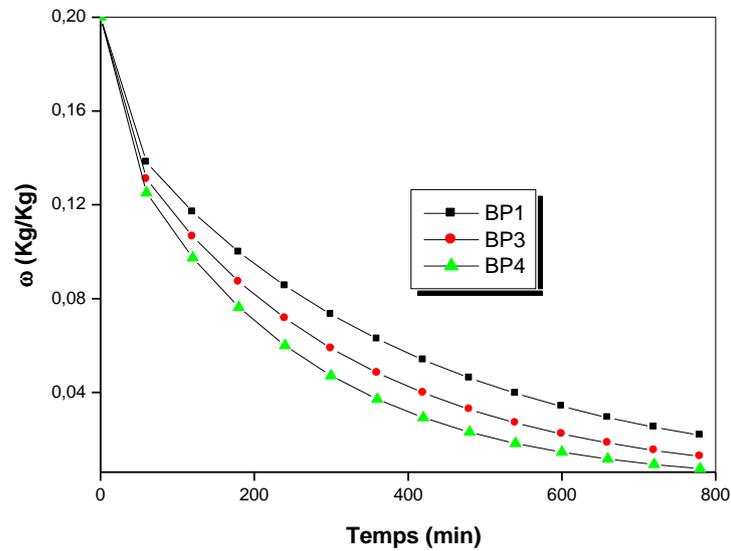


Figure 5-12: Influence du dosage de polystyrène sur le profil de la teneur en eau

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué des simulations numériques pour étudier les transferts couplés de chaleur et de masse à travers une paroi de l'enveloppe de bâtiment soumise à deux conditions climatiques différentes à savoir l'intérieur et l'extérieur de bâtiment. Les enveloppes étudiées sont constituées soit de béton classique, soit de béton de liège ou de béton de polystyrène.

La formulation mathématique des équations régissant les transferts thermiques et hydriques qui se produisent au sein des différentes parois étudiées a été faite en utilisant le modèle de Luikov. Les équations obtenues, sont discrétisées en utilisant la méthode des éléments finis. L'ensemble des résultats obtenus permet de mettre en évidence les évolutions des températures et des teneurs en eau moyennes ainsi que les distributions spatio-temporelles au sein de chaque matériau étudié. Il apparaît sans ambiguïté que l'ajout de liège et de polystyrène au béton lors de son gâchage rend lui plus hygroscopique et plus isolant thermique.

Conclusion générale et Perspectives

Le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe représente un enjeu considérable pour la réduction des consommations énergétiques dans le secteur de bâtiment. Généralement, les matériaux utilisés dans le domaine de la construction et du génie civil sont des milieux poreux, ils ont ainsi tendance à capter l'humidité de diverses provenances. Ces sollicitations hydriques peuvent provoquer une baisse des performances thermiques de l'enveloppe et modifier considérablement ses propriétés thermophysiques. De plus, elles sont souvent combinées aux sollicitations thermiques, qui contribuent à provoquer d'autres désordres tels que le risque de condensation dû à la baisse de la température, et conditionnent par conséquent ses propriétés d'usage et sa durabilité.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, dont l'objectif principal est une caractérisation thermique des matériaux utilisés pour la construction des parois composant l'enveloppe de bâtiment dans le but d'améliorer son isolation thermique. Trois matériaux ont été sélectionnés, le béton classique utilisé comme matériau de référence auquel nous avons associé sept échantillons de béton de liège et quatre échantillons de béton de polystyrène.

Nous avons consacré la première partie de cette thèse à une étude bibliographique des comportements hydrique et thermique des milieux poreux, puis à une présentation approfondie des compositions chimiques et des caractéristiques physiques des matériaux testés.

Par la suite, notre travail visait deux objectifs majeurs :

Dans un premier temps, un programme expérimental important, dont le but est la mesure des conductivités thermiques des matériaux choisis. Pour cela avons utilisé la méthode dite

" méthode des boîtes " développée au Laboratoire d' Etudes Thermiques et Solaires de l'Université Claude Bernard, qui a l'avantage d'être rapide et d'une bonne précision. La résistance thermique et la chaleur massique des matériaux étudiés sont estimées par calcul.

Les travaux que nous avons effectués sur les propriétés thermophysiques des bétons de liège et des bétons de polystyrène ont permis de mettre en évidence l'influence de la teneur en eau, de la masse volumique, et de la fraction massique de fibre sur ces propriétés. Les observations essentielles que nous pouvons retenir sont :

- L'effet défavorable de la présence d'eau sur le pouvoir d'isolation thermique des matériaux. En effet la conductivité thermique du matériau est d'autant plus importante que sa teneur en eau est plus élevée,
- La conductivité thermique des matériaux étudiés est fortement influencée par la masse volumique, et augmente au fur et à mesure que le matériau est dense. Cette densification croissante provoque une diminution de sa résistance thermique,
- L'ajout des granulats de liège et des billes de polystyrène au matériau initial améliore ses performances thermiques,
- L'augmentation linéaire de la chaleur massique avec la teneur en eau semble confirmer la validité de ces résultats,

Si on prend comme seul critère de choix les performances thermique du matériau, les bétons de polystyrènes présentent les meilleurs avantages. Ils ont une faible masse volumique, des conductivités faibles et de grandes résistances thermiques. Cependant il faut tenir compte d'autres critères de choix comme la durabilité du matériau. L'étude thermomécanique, a permis de présenter la courbe de variation de la résistance à la compression en fonction de la résistance thermique, qui doit être considérée comme un critère de choix de ces matériaux pour qu'ils soient utilisés comme des isolants porteurs.

Dans un second temps, une modélisation numérique du transfert couplé de chaleur et de masse au sein d'une paroi poreuse a été présentée. La formulation mathématique des équations régissant ces phénomènes de transfert a été faite en utilisant le modèle de Luikov. Le problème a été abordé par une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis qui consiste à transformer les équations différentielles en un système d'équations

algébriques dont la résolution est faite au moyen de la méthode de décomposition LU avec substitution.

Les résultats obtenus ont permis de tracer les évolutions temporelles de la teneur en eau et de la température moyennes et leurs distributions spatiotemporelles au sein des parois testées. Ils ont montré également que l'incorporation de liège et de polystyrène dans le béton ralentit le transfert de chaleur à travers la paroi et favorise mieux la libération de l'eau contenue dans le béton.

Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives telles que:

- L'influence de la température sur les différentes propriétés thermophysiques étudiées pour des utilisations industrielles (fours, ...) des matériaux testés.
- L'influence de la distribution des pores ouverts et fermés dans la matrice solide des différents matériaux étudiés.
- L'effet du vieillissement des matériaux.
- La détermination des courbes de sorption et d'adsorption des matériaux étudiés.
- L'étude des propriétés acoustiques de ces matériaux.
- L'évaluation de la perméabilité à l'humidité des différents éléments qui composent l'enveloppe ainsi que de leur assemblage.
- L'étude des transferts couplés de chaleur et de masse au sein des parois multicouches.

Références bibliographiques

- [1] **Salager, S.** Influence de la température sur le comportement hydrique de milieux poreux partiellement saturés ; XXIV^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, La Grande Motte, France 2006.
- [2] **Samri, D.** Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique ; thèse de Doctorat, Lyon (2008).
- [3] **Collet, F.** Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux ; thèse de doctorat, INSA Rennes (2004).
- [4] **Cerezo, V.** Propriétés mécanique, thermique et acoustique d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique ; thèse de doctorat, Lyon (2005).
- [5] **Crausse, P.** Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieux poreux non saturé ; thèse de Doctorat, Toulouse (1983).
- [6] **Krischer, O., Kroll, K.** Technique du séchage ; centre technique des industries Aéronautique et Thermique – Traduction du Springer- Verlag, Berlin (1963).
- [7] **Pfczlski, R., Laurnt, M.** Transfert dans les aliments solides modèles physiques et mathématiques ; Techniques de l'Ingénieur, traité Agroalimentaire F 2000.
- [8] **Ngohe-Ekam, P.S., Meukam, P., Menguy, G., Girard, P.** Thermophysical characterisation of tropical wood used as building materials: With respect to the basal density ; Construction and Building Materials, Vol. 20, (2006).
- [9] **Crausse, P., Laurent, J.P., Perrin, B.** Influence des phénomènes d'hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux : Comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrique de parois de bâtiment ; Rev. Cén. Therm. Vol. 35, pp. 95- 106, (1996).

- [10] **Miled, K., Sab, K., Le Roy, R.** Effet d'échelle dans le béton léger de polystyrène expansé ; Colloque Microstructure et Propriétés des matériaux, pp. 189- 194. , ENPC (2005).
- [11] **Khabbazi, A., Lahahar, N., Terhmina, O.** Etude expérimentale hygrothermique d'un nouveau matériau isolant à base de granulats de liège ; Phys. Chem. News. Vol. 14, pp. 22- 25, (2003).
- [12] **Yasar, E., Erdogan, Y.E.** Strength and thermal conductivity in lightweight building Materials, Bull. Eng. Geol. Environ., Vol. 67, pp. 513- 519, (2008).
- [13] **Shink, M.** Compatibilité, élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers ; thèse de doctorat (Ph.D.), Université Laval Québec (2003).
- [14] **Arnould, M., Virlogeux, M.** Granulats et bétons légers ; Bilan de 10 ans de recherche ; Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris (1986).
- [15] Normalisation Française des ciments NF EN 197-1.
- [16] Comité Européen de Normalisation. Norme Européenne EN 197-1, Ciment - Partie 1: Composition, Spécifications et Critères de Conformité des Ciments Courants ; CEN, Bruxelles (2000).
- [17] **Perche, F., Houst, Y.F., Bowen, P., Hofmann, H.** Adsorption of Lignosulfonates and Polycarboxylates - Depletion and Electroacoustic Methods; Supplementary Papers, 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, pp. 1- 15, U.S.A. (2003).
- [18] **Older, I.** Hydration, Setting and hardening of Portland cement; Lea's Chemistry of Cement and Concrete; (Hewlett P.C., Ed.), Fourth Edition, Ed: Arnold, London, Great Britain (1998).
- [19] **Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N.** Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete; Ed. CANMET, Ottawa, Canada (1998).

- [20] Freddy Houst, Y. Diffusion de gaz, carbonation et retrait de la pâte de ciment durcie ; thèse de doctorat Es Sciences, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (1992).
- [21] **Cantat, R., Piazzettar, R.** La levée du liège ; Guide technique et de vulgarisation, Institut Méditerranéen du Liège (2005).
- [22] **Lopes, M.H., Barros, A.S, PASCoal Neto, C., Rutledge, D., Delgadillo, I. et Gil, A.M.** Variability of cork from portugese Quercus suber studied by solid-state; ¹³ C-NMR and FTIR spectroscopies. Biopolymers (biospectroscopy), Vol. 62, pp. 268- 277, (2001).
- [23] **Boudaoud, N.** Potentialités d'utilisation du nez électronique à spectromètre de masse pour la caractérisation de la fraction volatile du liège œnologique ; thèse de doctorat, l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon (2006).
- [24] **Cordeiro, N., Belgacem, M.N. Silvestre, A.J.D., Pascoal Neto, C. et Gandini, A.** Cork suberin as a new source of chemicals: 1. Isolation and chemical characterization of its composition; International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 22(2), pp. 71- 801 (1998).
- [25] **Rocha, S., Goodfellow, B.J, Neto, C.P., Gill, A.** Enzymatic isolation and structural characterization of polymeric suberin of cork from Quercus suber; International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 28, pp. 107- 119, (2001).
- [26] **Riboulet, J.M., Alegoet, C.** Aspects pratiques du bouchage des vins ; Collection avenir œnologie, (1986).
- [27] **Erner, A., Henry, J.F., Billon, N.** Mechanical dissipation during plug assisted thermoforming of polystyrene as mesured by infrared thermography; ESAFORM'2004 Conf. Proc., Trondheim, Norway (2004).
- [28] **Yamura, K., Yamauchi, M.** Use of polystyrene pieces for aggregate of concrete; Proc. Annual conf. of Chugoku-Shikoku Branch of JSCE, Japan pp. 295- 29, (1982).
- [29] **Laurent, J.P.** la conductivité thermique à sec des bétons cellulaire autoclavés ; Materials and Structures, vol. 24, pp. 221- 226, (1991).

- [30] **Laurent, J.P., Guerre-Chaley, C.** Influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé ; *Materials and Structures*, vol. 28, pp. 464- 472, (1995).
- [31] **Chereches M., Chereches N.C., Popa C.V.** Etude Expérimentale sur la Conductivité Thermique des Matériaux Humides ; XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy (2008).
- [32] **Elbakkouri, A.** Caractérisation hygroscopique, thermophysique et mécanique des matériaux allégés : cas du béton allégés avec du liège ou avec des grignons d'olive ; thèse de doctorat, Tetouan (2004).
- [33] **Chafi, N.** Matrice cimentaire renforcée de fibres ; thèse de magistère, Constantine (2005).
- [34] **Dreux, G., Gorisse, F.** Composition des bétons : méthode Dreux-Gorisse ; *Annales de L'ITBTP*, n° 414, (1983).
- [35] **Baron, J., Lesage, R.** La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier ; *Rapport de recherche LCP*, n° 64, (1976).
- [36] **Fournol, A.** La chambre thermique de la station expérimentale de Champs-sur-Marne ; *Cahiers du CSTB* n° 216, (1955).
- [37] **Tye, R.P.** Thermal conductivity; Academic Press London and New-York, Vol. 1, (1969).
- [38] **Marechal, J.C., Devisme, J.M.** Matériaux de construction ; Vol. 7, (1974).
- [39] **Loukou, K.** Etude experimental des caractéristiques acoustiques et thermophysiques de bétons de terre stabilisé au ciment ; thèse de doctorat, Lyon (1994).
- [40] **Zegadi, S.** Etude théorique et expérimentale des transferts thermiques dans des milieux granulaires, Alger (1997).
- [41] **Min, S., Blumm, J., Lindemann, A.** A new laser flash system for measurement of the thermophysical properties; *Thermochimica Acta*, vol. 46, (2007).

- [42] **Menguy, G. Laurent, M.** Société WEBER BROUTIN, Moutarda, A. Leveau, J. Cellule de mesure des caractéristiques thermophysiques des matériaux E1700 ; Bulletin technique : Deltalab, (1986).
- [43] **El bouardi, A.** Etude en régime stationnaire et dynamique des propriétés thermophysiques de matériaux poreux humide non saturés utilisés en génie civil ; thèse de doctorat es-sciences, Rabat (1991).
- [44] **Carslaw, H.S., Jaeger J.C.** Conduction of heat solids; Second Edition, p. 45 Oxford University Press, London (1973).
- [45] **Langmur I., Adams, E.G., Meikle, F.S.** Flow of heat through furnace walls; Trans. Ame. Electrochem. Soc., (1913).
- [46] **Mourtada, A.** Comportement thermique des mortiers d'isolation extérieur du bâtiment ; thèse de doctorat, Lyon (1982).
- [47] **Horton, R., Wierenga, P.J., Nielsen, D.R.** A rapid technique for obtaining uniform water content distributions in unsaturated soil columns; Soil science. Vol. 133 (6), pp. 397-399, (1982).
- [48] **Chaker, A, Hamida, M.L.** Etude de l'effet des ajouts pailles et sciure de bois sur les caractéristiques thermophysiques du matériau plâtre ; Seventh international conference on material sciences, Lebanon (2010).
- [49] **Meukam, P., Noumowe, A., Jannot, Y., Duval, R.** Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment ; Materials and Structures. Vol. 36, pp 453-460. August-September (2003).
- [50] **Boukhattem, L., Mir, R., Kourchi, M., Bendou, A.** Caractérisation thermophysique du mortier a base du ciment et de sable ; Revue internationale d'héliotechnique énergie-environnement, Vol. 36, pp. 03-12, (2007).
- [51] **Boutin, C.** Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé: modélisation par méthode autocohérente ; Matériaux et Constructions, vol.29, pp.609- 61, (1996).

- [52] **Khab, H., Chaker, A.** Influence des ciments locaux sur les propriétés hygrothermiques des bétons ; Revue algérienne de physique, Vol. 3, pp. 46- 49, (2009).
- [53] **Belhamri, A., Rebahi, K., Chikhi, A., Bennamoun, L.** Etude et caractérisation des transferts thermiques dans les matériaux de construction locaux; 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique, Albi, France (2007).
- [54] **Quenard, D., Cope, R., Derrien, F., Sallee, H.** Influence de la teneur en eau sur la diffusivité thermique du plâtre ; Materials and Structures. Vol. 17 (4), pp 306-309, July (1984).
- [55] **Meukam, P., Noumowe, A.** Modeling of heat and mass transfer in lateritic building envelopes; J. Heat Mass Transfer, Vol. 42, pp. 158- 167, (2005)
- [56] **Woloszyn, M., May, M., Kwiatkowski, J.** Influence des conditions aux limites sur les mesures de l'inertie hygrique des matériaux de construction, 24^{ème} Rencontres Universitaire de Génie Civil, La Grande Motte, France (2006).
- [57] **Samri, D., Arnaud, L.** Assessment of heat and mass transfers in building porous materials; Proceedings of the 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings, Lyon (2006).
- [58] **Sherwood T.K.** Drying of solids 1, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 21 (1), pp. 976-980, (1929).
- [59] **Luikov, A.V.** System of differential equations of heat and mass transfer in capillary porous ; Int. J Heat Transfer, vol. 18, pp. 1-14, (1954).
- [60] **Philip, J.R., De Vries, D.A.** Moisture movement in porous material under temperature gradients; Transaction of The American Geophysical Union, Vol. 38 (2), pp. 222- 232, (1957).
- [61] **Perrin, B., Javelas, R.** Transferts couples de chaleur et de masse dans des matériaux consolidés utilisés en génie civil ; J. Heat and Mass Transfer. Vol.30 (2), pp. 297- 309, (1987).

- [62] **Holm, A. R. and Kunzel, R. M.** Practical application of an uncertainty approach for hygrothermal building simulations - drying of an AAC flat roof ; Building and Environment, Vol. 37, pp. 883- 889, (2002).
- [63] **Luikov, A.V.** Heat and mass transfer in capillary porous bodies ; Oxford : Pergamon Press, (1966).
- [64] **Whitaker, S.** Heat and mass transfer in granular porous media; Advances in drying I, Hemisphere publication, pp. 23- 61, (1980).
- [65] **Bories, S., Prat, M.** Transfert de chaleur et de masse dans les milieux poreux ; Technique de l'ingénieur, Traité génie énergétique B 8 250.
- [66] **Zeghmati, B.** Etude du couplage entre les équations de Luikov et celle de la couche limite laminaire en convection naturelle au- dessus d'une plaque plane inclinée ; thèse de doctorat, Université de Perpignan (1988).
- [67] **Kalboussi, A.** Transfert de chaleur en régime stationnaire et dynamique à travers les milieux poreux humides non saturés ; thèse de doctorat, Lyon (1990).
- [68] **Sacadura, J.F.** Initiation aux transferts thermiques ; Techniques et documentation, (1980).
- [69] **Crausse, P., Bacon, G., Bories, S.** Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur- masse en milieux poreux ; Int. J. Heat and Mass Transfer., Vol. 24 (6), pp. 991 – 1004, (1981).
- [70] **Ferguson, W.J., Lewis, R.W.** A fully nonlinear analysis of temperature, moisture, and pressure in a capillary porous body; Numerical Heat Transfer, Part B, vol. 23, pp. 91- 110, (1993).
- [71] **Lewis, R.W., Morgan, K., Thomas, H.R.** The finite element method in heat transfer analysis, New York (1996).

- [72] **Chassagne, P.** Contribution à la prédiction des conséquences mécaniques des phénomènes thermo- hydriques couplés: Application au bois; thèse de doctorat, Lyon (2006).
- [73] **Buden, R.L., Faris, J.D.** Numerical analyses; Priendel, Weber and Schmidt, Boston (1985).
- [74] **Hebner, K.H., Thornton, E.A.** Finite element method for engineers; A Wiley-Interscience Publication, (1982).
- [75] **Sotehi, N., Chaker, A.** Modeling of heat and mass transfers during drying of a building material; phys. Chem. News, vol. 31 pp. 1- 5, September (2006).
- [76] **Sotehi, N., Chaker, A.** Study of the heat and mass transfer in wet porous media: application to drying; The second Jordanian International Conference of Materials Science and Engineering, Jordan, (2007).
- [77] International energy agency. Catalogue of Material Properties; Annex XIV: Condensation and energy, Vol. 3, (1991).
- [78] **Remache, L., Belhamri, A.** Modélisation du séchage par convection ; Revue des Energies Renouvelables, CISM'08, pp. 289- 297, (2008).
- [79] **Athinson, A., Nickerson, A.K.** The diffusion of ions through water- saturated cement; J. Mater. Sci., Vol.19, pp.3068-3078, (1984).
- [80] **Carman, P.C.** Flow of gases through porous media ; Academic press, New York (1956).
- [81] **Quenard, D., Sallée, H.** Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment ; Cahiers de CSTB n° 2525, (1991).

ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques des milieux poreux

A.1 Définition

Pour sa représentation thermodynamique, on conceptualise le milieu poreux en trois phases : Solide, liquide et gazeuse. Dans le cas du béton durci, la matrice représente la phase solide. Les pores remplis d'air ou d'eau représentent respectivement les phases gazeuses ou liquides. Ces pores peuvent être connectés entre eux ou non (figure A-1).

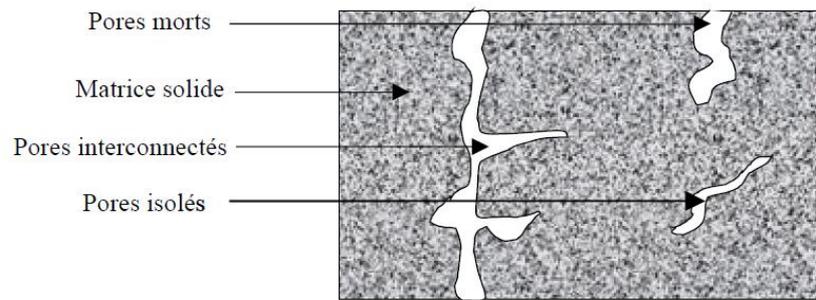


Figure A-1 : Représentation schématique d'un solide poreux.

A noter que dans cette représentation on ne fait pas intervenir d'effets d'échelle sur la porosité, alors que la structure poreuse des matériaux cimentaires se décline sur un vaste intervalle de tailles de pores. Cette lacune de la représentation macroscopique standard pourra être à l'origine de différences entre modèles et expériences [79].

A. 2 Paramètres d'état

Le tableau (A-1) décrit les différents paramètres d'état pour caractériser un milieu poreux.

Tableau A-1 : Paramètres d'état.

	<i>Notations</i>	<i>Formulation</i>
<i>Paramètres extensifs</i>		
<i>Volume de la phase i</i>	V_i	V_s, V_b, V_g
<i>Masse de la phase i</i>	m_i	m_s, m_b, m_g
<i>Masse totale ou apparente</i>	m_t	$m_t = m_s + m_l + m_g$
<i>Paramètres intensifs</i>		
<i>Masse volumique de la phase i, à la température T</i>	ρ_i	$\rho_i = m_i / V_i$
<i>Masse volumique sèche apparente du solide</i>	ρ_o	$\rho_o = m_s / V_t$
<i>Masse volumique apparente à saturation</i>	ρ_{sat}	$\rho_{sat} = (m_s + m_l) / V_t$ avec : $m_g = 0, V_g = 0$

A.3 Porosité

La porosité (ε) est définie par le rapport entre le volume de pores (V_p) et le volume total (V_t) de matériau.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (A-1)$$

D'après la figure A-1, on constate trois groupes de pores :

- Les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.
- Les pores aveugles ou bras morts qui sont connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.
- Les pores isolés qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

On définit aussi l'indice des vides par le rapport du volume des vides (V_{vides}) sur le volume de solide (v_s).

$$e = \frac{V_{vides}}{V_s} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \quad (\text{A-2})$$

A.4 Teneur en eau

Teneur en eau volumique :

$$\omega_v = \frac{V_l}{V_t} \quad (\text{A-3})$$

Teneur en eau ou en vapeur d'eau massique ou pondérale (%) :

$$\omega = \frac{m}{m_s} \cdot 100 \quad (\text{A-4})$$

Les paramètres précédemment définis sont des caractéristiques macroscopiques du milieu poreux, mais ces paramètres sont limités pour expliquer les phénomènes physiques et certains résultats expérimentaux. C'est la raison pour laquelle on définit des caractéristiques microscopiques du milieu poreux comme la tortuosité et la connectivité, qui viennent en supplément de la formulation macroscopique.

A.5 Tortuosité

La tortuosité τ , est définie par le rapport entre la distance parcourue par le fluide L_e et la distance effective du déplacement L . Selon d'autres auteurs, elle est définie par le carré de ce rapport. Cette dernière définition est celle proposée par Carman [80, 81].

$$\tau = \left(\frac{L_e}{L} \right)^2 \quad (\text{A-5})$$

avec :

L_e : longueur effective du déplacement du fluide, c'est à dire la longueur moyenne des lignes de courant du fluide,

L : distance parcourue par le fluide, c'est à dire la longueur de l'échantillon poreux dans la direction de l'écoulement.

Annexe 2 : Revue des principaux modèles de la conductivité thermique

<i>Modèle</i>	<i>Formules</i>	<i>Observations</i>
<i>Parallèle</i>	$\lambda_{app} = \sum_i \varepsilon_i \lambda_i$	Milieu constitué en plusieurs strates parallèles entre elles
<i>Série</i>	$\lambda_{app} = \left(\sum_i \varepsilon_i / \lambda_i \right)^{-1}$	Milieu constitué en plusieurs strates en série entre elles
<i>Hashin-Shtrikman</i>	$\frac{\lambda_{min}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \frac{\varepsilon}{\frac{1}{1 - \lambda_s / \lambda_f} + \frac{\alpha}{3\lambda_s / \lambda_f}}$ $\frac{\lambda_{max}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\alpha}{\frac{1}{\lambda_s / \lambda_f - 1} + \frac{\varepsilon}{3}}$	Le milieu est isotrope
<i>Lichtencker</i>	$\lambda^n = \varepsilon \lambda_f^n + \alpha \lambda_s^n$ $\lambda_{app} = \lambda_f^\varepsilon \lambda_s^\alpha$	Modèle empirique n : paramètre à déterminer expérimentalement
<i>Maxwell</i>	$\lambda_{app} = \frac{\varepsilon \lambda_f (2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha \lambda_s \lambda_f}{\varepsilon(2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha \lambda_f}$	Particules sont sphériques, et aucune interaction mutuelle entre les particules
<i>Hamilton</i>	$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s + (n-1)\lambda - (n-1)\varepsilon(\lambda_f - \lambda_s)}{\lambda_s + (n-1)\lambda_f + \rho(\lambda_f - \lambda_s)}$	Une extension du modèle Maxwell à diverses formes géométriques
<i>De Vries</i>	$\lambda_{app} = \frac{\varepsilon \lambda_f + \alpha G \lambda_s}{\varepsilon + \alpha G}$	Extension du modèle de Maxwell à des particules ellipsoïdales

Wiley Southwick	$\lambda_{app} = \frac{n_w \lambda_s}{\varepsilon \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \alpha} + (1 - n_w)(\alpha \lambda_s + \varepsilon \lambda_f)$	Combinaison du modèle série et parallèle
Russel	$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = \frac{\alpha^{2/3} + \frac{\lambda_f}{\lambda_s}(1 - \alpha^{2/3})}{\alpha^{2/3} - \varepsilon_d + \frac{\lambda_f}{\lambda_s}(1 - \alpha^{1/3} + \alpha)}$	La phase discontinue est sous forme de cubes régulièrement espacés. -Hypothèse d'isothermes parallèles
Frey	$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = \frac{(1 - \alpha^{1/3} + \alpha) + \frac{\lambda_f}{\lambda_s}(\alpha^{1/3} - \alpha)}{(1 - \alpha^{1/3}) + \frac{\lambda_f}{\lambda_s} \alpha^{1/3}}$	La phase discontinue est sous forme de cubes régulièrement espacés. Hypothèse de flux uniforme
Krisher	$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{b \lambda_{série} + (1 - b) \lambda_{parallèle}}$	Combinaison du modèle série et parallèle
P.L.Chaurasia , D.R.Chaudhar y et R.C.Bhandari a	$\lambda_{app} = (D \lambda_f + B \lambda_s)^n \left(\frac{\lambda_f \lambda_s}{A \lambda_s + C \lambda_f} \right) (1 - n)$	A+B+C+D=1 C+D=ε B+D=n D = ε ^{1.3} et B = $\frac{1}{\psi} \left(\frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right)$
Crane et Vachon	$\lambda_{app_{inf}} = \int_0^1 \frac{\lambda_s \lambda_f}{\lambda_s + (1 - \varepsilon)(\lambda_f - \lambda_s)} dx$ $\lambda_{app_{sup}} = \int_0^1 \frac{\lambda_s \lambda_f}{\lambda_f + (1 - \varepsilon)(\lambda_f - \lambda_s)} dx$	$\lambda_2 \leq \lambda_{app} \leq \lambda_1$ pour tous les mélanges stochastiques normalement distribués
Zarichniak et Novikov	$\lambda_{app} = \sum_{P=0}^n C_n^P \varepsilon^P (1 - \varepsilon)^{n-P} \frac{n}{\frac{P}{\lambda_g} + \frac{n-P}{\lambda_s}}$	Arrangement aléatoire de cubes solides et fluides

<p>Jinn Huie</p>	$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = \alpha_{jin} \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \beta$ $\alpha_{jin} = \rho_{app} \text{Exp}\left(-\frac{n}{\rho_{app}}\right)$	<p>n :paramètre empirique n=0 pour un solide, et n=1 pour un milieu poreux non consolidé n> 1 pour un milieu poreux non consolidé</p>
<p>Yagi et Kunii</p>	$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = \varepsilon_1 + \frac{(1 - \varepsilon_1)\lambda_s}{(1 - \alpha_1)\lambda_f + \alpha_1\lambda_s}$	<p>Le transfert s'effectue à travers les surfaces de contacts</p>
<p>Kunii-Smith</p>	$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = \varepsilon + \frac{\alpha\beta}{\frac{\lambda_f}{\lambda_s} \gamma + \phi}$	<p>$\gamma = 2/3$ $\beta = 1$</p>
<p>Bauer Schlünder</p>	$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon}) \left(\frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1) + \frac{\lambda_f}{\lambda_f^*}} + \varepsilon \frac{\lambda_R}{\lambda_f} \right) + \sqrt{1 - \varepsilon} \left(\varphi \frac{\lambda_s^*}{\lambda_f} + (1 - \varphi) \frac{\lambda_{so}^*}{\lambda_f} \right)$	<p>Le transfert s'effectue à travers les surfaces de contact</p>
<p>Hayashi et al</p>	$\lambda_{app} = \frac{1}{2}(3\varepsilon - 1)(\lambda_f + \beta_1 D_p \cos\psi) + \frac{3\beta_1(1 - \varepsilon)(1 - \delta)\cos\psi}{2 \left(1 / \left(\frac{\lambda_f^*}{\varphi^*} + h_{rs} D \right) + \frac{\cos\psi - \varphi^*}{\lambda_s} \right)}$	<p>Le transfert s'effectue à travers les surfaces de contact</p>

Thermal characteristics of building walls and Improved Insulation

Abstract

Optimizing energy consumption is one of the building designers concerns. This explains the technology assessment and development of new building materials. Among these materials lightweight concrete, which can be play a role as an insulator, while maintaining adequate levels of performance.

The knowledge of the materials thermal properties used for building shielding such as thermal conductivity, thermal resistance and heat mass are the most important features for the choice of a thermal insulation material

This work is a contribution to the study of cork lightweight and polystyrene lightweight concretes thermal behaviour. These materials are intended to be used for roof insulation and other building components and there lightness makes them an interesting technical solution for the building tower.

Regarding the experimental measurements, in steady regime for the thermal conductivity, we have used the "Boxes method". Thermal resistance and mass heat are obtained by calculation.

The experimental results made it possible to specify the effect of the water content, the materials density and the fibres dosage on the materials thermophysical properties.

The mathematical modelling of coupled heat and mass transfer occurring within building walls is obtained with using Luikov's model. The differential equations obtained are discredited by the finite element method.

The obtained results illustrate the temporal evolutions of the temperature and the moisture content, and the distributions of the temperature and moisture content inside the wall for several periods of time. They allow us to specify the effect of the nature and fibre dosage on the heat and mass transfer.

KEYWORDS: *thermal insulation, lightweight concrete, thermal properties, cork, polystyrene, thermophysical properties, boxes method, heat and mass transfer.*

الخصائص الحرارية لجدران المباني وتحسين العزل

ملخص

يعتبر التقليل من كمية الطاقة المستلكة أحد أهم اهتمامات مصممي البناء. و هذا ما يفسر تحسين التقنيات المستعملة، وتطوير مواد بناء جديدة من بين هذه المواد الخرسانة المخففة، والتي يمكن استعمالها كعازل حراري مع المحافظة على مستويات كافية من الأداء.

إن المعرفة الدقيقة للخصائص الحرارية للعناصر المكونة للغلاف الخارجي للبناء على غرار الناقلية والمقاومة الحرارية والحرارة الكتلية، تعتبر ذو أهمية بالغة لدراسة السلوك الحراري لهذا الغلاف ومعيارا هاما من أجل تحديد إمكانية استعمالها كمادة عازلة.

يهدف العمل المقدم في هذا البحث إلى المساهمة في دراسة السلوك الحراري لهوعين من المواد المستعملة في البناء: الخرسانة المدعمة بلبغليين والخرسانة المدعمة بالبولىسترين. حيث تتميز هذه المواد بدرجة كبيرة من الخفة تجعلها ذات أهمية بالغة في مجال البناء والهندسة المدنية.

من أجل قياس الناقلية الحرارية استعملنا طريقة العلب في حين أن كل من المقاومة الحرارية و الحرارة الكتلية فقد تم استخراجهما باستعمال الحسابات و اعتمادا على نتائج القياس. وقد أوضحت النتائج التجريبية بدقة تأثير الرطوبة، الكتلة الحجمية وكذلك تأثير كمية كل من الفلين والبولىسترين المستعملة لدعم الخرسانة على الخصائص الحرارية لهذه الأخيرة

و من جهة أخرى فقد قمنا بدراسة ظاهرة الانتقال المتزامن للرطوبة و الحرارة داخل جدار متكون من هذه المواد حيث اعتمدنا في التمثيل الرياضي لهذه الظاهرة على نموذج لويكوف والذي يتمثل في استخراج جملة من المعادلات التفاضلية ذات المشتقات الجزئية ثم حلها باستعمال الطريقة العددية المعروفة بطريقة العناصر المنتهية.

و من خلال النتائج المتحصل عليها تمكننا من دراسة تغير حرارة الجدار ورطوبته مع الزمن وكذلك تمكننا من تمثيل توزيعهما داخل الجدار خلال أزمنة مختلفة ، و دراسة تأثير كل من نوع و كمية الألياف المستعملة على تغير حرارة الجدار ورطوبته.

الكلمات الدالة :

العزل الحراري ، خرسانة مخففة ، فلين ، البولىستران ، خصائص ترموفيزيائية ، طريقة العلب، انتقال الرطوبة و الحرارة.

Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation

Résumé

L'optimisation de la consommation énergétique est l'une des préoccupations des concepteurs du bâtiment. Ceci explique l'évolution des techniques et le développement de nouveaux matériaux de construction, parmi lesquels les bétons allégés, qui sont capables de jouer le rôle d'un isolant tout en conservant des niveaux de performances suffisants.

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 et du génie civil.

La conductivité thermique des matériaux étudiés est mesurée en régime permanent par la méthode des boîtes, la résistance thermique et la chaleur massique sont calculées.

Les résultats expérimentaux obtenus mettent en évidence l'influence de la teneur en eau, de la masse volumique apparente du matériau, ainsi que l'effet de la fraction massique des fibres introduite dans le béton sur ses propriétés thermophysiques.

La formulation mathématique des équations régissant les phénomènes des transferts thermique et massique qui se produisent au sein d'une paroi composant l'enveloppe du bâtiment a été faite en utilisant le modèle de Luikov, les équations différentielles obtenues sont discrétisées par la méthode des éléments finis.

Les résultats obtenus ont permis de tracer les évolutions temporelles des teneurs en eau et des températures moyennes, leurs distributions spatiotemporelles au sein de trois types de parois choisis, et d'étudier l'influence de la nature et du dosage de fibres utilisés sur les transferts thermique et hydriques.

MOTS- CLES : *isolation thermique, béton allégé, liège, polystyrène, propriétés thermophysiques, méthode des boîtes, transfert de chaleur et de masse.*