

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

**UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE**  
**FACULTE DES SCIENCES EXACTES**  
**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre.....

Série.....

**MEMOIRE PRESENTE POUR OBTENIR LE DIPLOME DE MAGISTERE EN**  
**PHYSIQUE ENERGETIQUE**

**OPTION**

**Photothermique**

**Par**

**KHAB HAYET**

**THEME**

**ETUDE DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE D'ELEMENTS**  
**DE CONSTRUCTION. APPLICATION AUX TOITURES**

**Soutenu le: .... /... / 2007**

**Devant le jury :**

|                     |                  |            |                                    |
|---------------------|------------------|------------|------------------------------------|
| <b>Président :</b>  | <b>L. BAH</b>    | <b>Pr.</b> | <b>Univ. Mentouri- Constantine</b> |
| <b>Rapporteur :</b> | <b>A. CHAKER</b> | <b>Pr.</b> | <b>Univ. Mentouri- Constantine</b> |
| <b>Examineurs :</b> | <b>H. CHABIL</b> | <b>Pr.</b> | <b>Univ. Mentouri- Constantine</b> |
|                     | <b>N. BELLEL</b> | <b>M.C</b> | <b>Univ. Mentouri- Constantine</b> |

## *Dédicaces*

*A mon père,*

*A ma mère,*

*A ma grand-père,*

*A mes frères,*

*A mes sœurs,*

*A toutes mes amies,*

*A tous ceux qui me sont chers,*

*Je dédie ce travail*

*Hayet*



# Remerciements

---

---

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de Physique Energétique de l'université de Constantine.

Je tiens à remercier madame *A. Chaker* Professeur au département de Physique pour avoir brillamment dirigé cette étude et m'avoir fait partager son savoir faire et sa rigueur scientifique, ainsi que ses multiples compétences.

J'adresse mes remerciements à Monsieur *L. Bahi* Professeur à l'université de Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Un grand merci également à monsieur *H. Chabil* Professeur au département de génie civil et à monsieur *N. Bellel* maître de conférence au département de physique, pour avoir accepté de juger ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.

Je remercie également monsieur *D. Mimoune* Professeur au département de génie civil pour l'accueil qu'il m'a réservé au sein de son laboratoire et pour son aide.

Je remercie monsieur *Chaker* et tout le personnel du C.T.C pour leur contribution dans la partie élaboration des échantillons étudiés.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues du laboratoire de Physique Energétique et du département de physique, qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de ce travail. Une mention spéciale à *Sara, Zakaria*, aux deux *Nassima* et à *Hayet*.

J'adresse enfin mes plus chaleureux remerciements à mes parents, pour leur soutien, leurs encouragements et leur présence dans les moments difficiles. Je leur témoigne toute ma reconnaissance et tout mon amour.

---

---

# Nomenclature

| <i>Symboles</i> | <i>Unités</i>                              |                   |
|-----------------|--|-------------------|
| a               | : Diffusivité thermique                    | $m^2/S$           |
| C               | : Coefficient de déperdition de la boîte   | $W/^{\circ}C$     |
| $C_p$           | : Chaleur massique                         | $J/Kg\ ^{\circ}C$ |
| $d_h$           | : Diamètre hydraulique                     | m                 |
| $D_i$           | : Coefficient de diffusion de la phase i   | $m^2/S$           |
| e               | : Epaisseur                                | m                 |
| j               | : Densité de flux de masse                 | $W/m^2$           |
| L               | : Longueur                                 | m                 |
| L               | : Chaleur latente de vaporisation de l'eau | $J/Kg$            |
| $m_i$           | : Masse d'un constituant i                 | Kg                |
| M               | : Masse molaire                            | $Kg/mole$         |
| $P_c$           | : Pression capillaire                      | Pa                |
| $P_i$           | : Pression d'un constituant i              | Pa                |
| q               | : Densité de flux de chaleur               | $W/m^2$           |
| R               | : Constante molaire                        | $J/mole.K$        |
| $R_c$           | : Résistance mécanique à la compression    | MPa               |
| $R_{th}$        | : Résistance thermique                     | $m^2C/W$          |
| r               | : Rayon                                    | m                 |
| $S_{sp}$        | : Surface spécifique                       | 1/m               |
| S               | : Aire d'une surface                       | $m^2$             |
| $S_r$           | : Degré de saturation                      | -                 |
| T               | : Température                              | $^{\circ}C$ ou K  |
| t               | : Temps                                    | S                 |
| V               | : Volume du matériau                       | $m^3$             |
| x               | : Variable d'espace                        | m                 |

**Lettres grecques****Unités**

|               |                                      |                    |
|---------------|--------------------------------------|--------------------|
| $\lambda$     | : Conductivité thermique             | W/m <sup>0</sup> C |
| $\varepsilon$ | : Porosité                           | -                  |
| $\tau$        | : Tortuosité                         | -                  |
| $\theta_i$    | : Teneur volumique en constituant i  | -                  |
| $\theta$      | : Fraction de conduction parallèle   | -                  |
| $\sigma$      | : Tension superficiel                | N/m                |
| $\rho_i$      | : Masse volumique d'un constituant i | Kg/m <sup>3</sup>  |
| $\varphi$     | : Humidité relative                  | -                  |
| $\phi$        | : Flux de chaleur                    | W                  |
| $\delta$      | : Coefficient de thermomigration     | -                  |

**Indices**

|     |             |
|-----|-------------|
| app | : Apparente |
| eff | : Effective |
| f   | : Fluide    |
| g   | : Gaze      |
| l   | : Liquide   |
| p   | : Pores     |
| s   | : Solide    |
| //  | : Série     |
| ⊥   | : Parallèle |

# Sommaire

Nomenclature

|                           |   |
|---------------------------|---|
| <b>INTRODUCTION</b> ..... | 1 |
|---------------------------|---|

---

---

## Chapitre I : LES MATERIAUX DE TOITURES

---

---

|  |    |
|--|----|
| <b><u>I.1- CLASSIFICATION GENERALE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION</u></b> ....        | 4  |
| <b><u>I.2-LE BETON</u></b> .....   | 5  |
| I.2.1- Hétérogénéité de la masse de béton.....                                       | 6  |
| I.2.2- Constituants du béton.....  | 6  |
| I.2.3- Evolution de la porosité et de l'état de l'eau des matériaux cimentaires..... | 8  |
| I.2.4- Composition du béton.....   | 9  |
| I.2.5- Propriétés du béton.....  | 11 |
| I.2.6- Processus de maturation du béton.....   | 12 |

---

---

## Chapitre II : ASPECTS THEORIQUES ET SYNTHESE

### BIBLIOGRAPHIQUE

---

---

|   |    |
|---|----|
| <b><u>II.1- CARACTERISTIQUES DES MILIEUX POREUX</u></b> .....               | 16 |
| II.1.1- Propriétés géométriques des milieux poreux.....                     | 16 |
| II.1.2- Caractéristiques microstructurales.....                             | 18 |
| II.1.3- La porosité et la circulation de fluide.....                        | 19 |
| II.1.4- Changement d'échelle et homogénéisation.....                        | 20 |
| <b><u>II.2- TRANSFERT D'HUMIDITE DANS LES MATERIAUX POREUX</u></b> .....    | 22 |
| II.2.1-Teneur en eau.....   | 22 |
| II.2.2- Fixation de l'humidité dans les matériaux poreux.....               | 23 |
| II.2.3- Transferts d'humidité dans les milieux poreux.....                  | 27 |
| <b><u>II.3-TRANSFERTS THERMIQUES DANS LES MILIEUX POREUX</u></b> .....      | 29 |
| II.3.1- Propriétés thermophysiques.....                                     | 29 |
| II.3.2- Modèles analytiques et empiriques de la conductivité thermique..... | 30 |
| <b><u>II.4- TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE</u></b> .....         | 39 |

---

---

## **Chapitre III : MATERIAUX ETUDIES ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL**

---

---

|   |    |
|---|----|
| <b><u>III.1- COMPORTEMENT THERMIQUE</u></b> .....         | 42 |
| III.1.1- Technique expérimentale utilisée.....            | 42 |
| III.1.2- Matériels et procédure expérimentale.....        | 43 |
| III.1.3- Conductivité thermique.....                      | 44 |
| III.1.4- Diffusivité thermique.....                       | 49 |
| <b><u>III.2- COMPORTEMENT YHDRIQUE</u></b> .....          | 53 |
| III.2.1- Techniques de mesure la teneur en eau .....      | 53 |
| <b><u>III.3- COMPORTEMENT MECANIQUE</u></b> .....         | 53 |
| III.3.1- Résistance à la compression.....                 | 54 |
| <b><u>III.4- ELABORATION DES ECHANTILLONS</u></b> .....   | 54 |
| III.4.1- Caractérisation des différents constituants..... | 54 |
| III.4.2- Formulation des échantillons.....                | 58 |

---

---

## **Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSION**

---

---

|  |    |
|--|----|
| <b><u>IV.1- LA CONDUCTIVITE THERMIQUE</u></b> .....                    | 61 |
| IV.1.1- Influence de la masse volumique.....                           | 61 |
| IV.1.2- Etude statistique.....   | 62 |
| IV.1.3- Influence de l'humidité .....                                  | 63 |
| IV.1.4- Effet des différents ajouts sur la conductivité thermique..... | 67 |
| <b><u>IV.2- LA RESISTANCE THERMIQUE</u></b> .....                      | 69 |
| IV.2.1- Influence de l'épaisseur.....                                  | 70 |
| IV.2.2- Influence de l'humidité.....                                   | 70 |
| IV.2.3- Influence de la formulation.....                               | 71 |
| <b><u>IV.3- LA DIFFUSIVITE THERMIQUE</u></b> .....                     | 72 |
| <b>CONCLUSION</b> .....  | 73 |
| <b>Annexe A : TRANSFERTS COUPLES</b> .....                             | 76 |
| <b>Annexe B : TECHNIQUES DE MESURE DES PROPRIETES THERMIQUES</b> ..... | 80 |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....                               | 86 |

# INTRODUCTION

L'accroissement des dépenses énergétiques observé durant ces dernières années et la part importante de l'énergie consommée pour le chauffage des bâtiments font qu'un nombre important de chercheurs se penchent sur le problème de l'utilisation rationnelle d'énergie. Il faut noter que ce problème est très vaste et complexe car il dépend de beaucoup paramètres. C'est dans le domaine du génie civil et plus précisément dans la construction, posant le problème de l'isolation thermique optimal des bâtiments, qui portera notre intérêt.

Dans une démarche de développement d'un matériau nouveau ou d'amélioration d'un produit existant, une connaissance approfondie des propriétés thermophysiques est primordiale.

L'objet de cette recherche concerne l'étude des propriétés thermophysiques et mécaniques des matériaux de construction, et fait suite à une étude très intéressante qui a été déjà menée dans notre laboratoire sur le matériau plâtre. Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux), et aux interactions entre les différents types de transferts existants dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels, la conductivité thermique et la diffusivité thermique. Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, et de la microstructure du matériau.

Les campagnes de mesures expérimentales sont menées à l'aide d'un dispositif appelé "boîte thermique". Elles permettent de déterminer la conductivité thermique en régime permanent en réalisant un bilan énergétique du système. De même que la diffusivité thermique en régime dynamique.

Quatre chapitres composent ce mémoire:

- Un premier chapitre est introductif présentant les matériaux étudiés, une description des constituants entrant dans la composition du béton et leurs principales propriétés.
- Le deuxième chapitre débute par une synthèse bibliographique sur les milieux poreux. Divers modèles recensés dans la littérature, permettant d'évaluer la conductivité thermique des matériaux poreux sont présentés. Cette partie du mémoire, un ensemble de notions physiques, qui seront employées tout au long du mémoire, sont également définies.
- Le troisième chapitre est consacré à la description de l'appareillage expérimental utilisé pour la détermination des caractéristiques thermiques et mécaniques. Le protocole expérimental, et l'élaboration des échantillons de matériaux étudiés sont également exposés.

- L'ensemble des résultats obtenus, ainsi que leurs interprétations, fait l'objet du quatrième chapitre.

Ces quatre chapitres sont complétés par deux annexes, contenant respectivement les équations de transferts couplés et les méthodes expérimentales de mesure.

# Chapitre I



La toiture est une composante de l'enveloppe d'un bâtiment, les principales qualités qui lui sont demandées sont notamment la résistance structurelle, la sécurité au feu, l'isolation et l'imperméabilité. Elle se décompose en deux sous ensembles la charpente d'une part, et la couverture d'autre part. En outre une distinction est faite entre deux catégories de toitures: les toitures inclinées (Tuile de terre cuite, tuile de béton,..) et les toitures terrasses qui sont ainsi nommées lorsqu'elles présentent une pente inférieure à 15%

Un ensemble de données sur les matériaux généralement utilisés comme toitures est présenté dans ce chapitre. Une première partie est consacrée à une classification générale des matériaux de construction. La seconde partie portera sur le matériau béton qui est composé de ciment, de granulats et d'eau. En raison de son hétérogénéité, le béton s'avère un matériau particulièrement complexe et évolutif ; en effet il subit de profondes transformations physico-chimiques à partir des premiers instants qui suivent sa préparation (notamment la réaction d'hydratation et le phénomène de prise).

## **I.1- CLASSIFICATION GENERALE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION**

Les matériaux de construction peuvent être classés en deux grandes catégories : les matériaux traditionnels d'origine naturelle et les matériaux modernes composites.

Parmi les matériaux traditionnels, on peut distinguer la pierre, la terre crue et le bois. L'utilisation très ancienne de la pierre, s'explique par sa disponibilité (carrières), sa grande résistance et sa durabilité. Cependant, elle reste difficile à façonner et à mettre en œuvre (poids).

La terre crue, matière première très disponible, est d'une mise en œuvre aisée et peu coûteuse (techniques de construction en pisé ou torchis et briques de terre crue). Néanmoins son utilisation dans le passé étant justifiée, ce matériau économique a été peu à peu remplacé par d'autres matériaux plus performants notamment dans les pays industrialisés. Son utilisation est devenue l'apanage des pays en voie de développement (Brésil, pays Africains)

Quant'au bois qui est facile à travailler et ne nécessitant pas de transformations, il était et reste apprécié dans la construction pour ses propriétés mécaniques (résistance en traction) et son pouvoir isolant. Il sert à fabriquer des structures poreuses, voire des habitations complètes. Toutefois, le bois étant un matériau naturel, il présente des qualités variables selon l'âge, l'essence, l'origine géographique et les conditions de séchage.

Parmi les matériaux récents, le plus employé est évidemment le béton, mélange composé de granulats minéraux rigides, de ciment, de sable et d'eau. Cette formulation de base peut être agrémentée d'adjuvants (produits rajoutés en faible quantité dans le mélange) de façon à obtenir des propriétés particulières (fluidité du mélange, prise plus ou moins rapide), voire par d'autres

constituants (acier pour béton armé ou précontraint, fibre) pour augmenter les performances mécaniques. Ce matériau présente donc 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. Par sa masse synonyme d'une certaine inertie, il bloque la transmission des sons par vibration acoustiques et ralentit le transfert de chaleur. Cet effet tampon compense en partie le fait que le béton soit un matériau conducteur. Globalement, le béton est donc performant du point de vue mécanique et isolation acoustique (limite la transmission) par contre il est moins intéressant du point de vue isolation thermique.

De nouveaux matériaux sont alors apparus, rassemblés sous l'appellation de béton légers. Ces matériaux font références à des bétons de masses volumiques plus faible ( $\rho < 1600 \text{kg.m}^{-3}$ ) que celle des bétons traditionnels, conduisant ainsi à une meilleure isolation thermique. Ces matériaux sont obtenus par substitution des gravillons traditionnels par :

- Des granulats allégés.
- L'incorporation de bulles d'air (béton cellulaire).

Nous présentons dans ce qui suit l'étude du matériau de base utilisé dans le cadre de ce travail.

## **I.2- LE BETON**

Le béton est un des matériaux les plus utilisés dans tous les domaines de la construction. Des critères techniques et économiques justifient cette utilisation.

- ♦ Il est constitué de matériaux naturels primaires largement disponible.
- ♦ Sa mise en œuvre est aisée et ne nécessite que l'utilisation d'une main-d'œuvre rapidement formée.
- ♦ Ses capacités de résistance dépassent celles des meilleures roches naturelles.
- ♦ Il offre une bonne tenue au feu, garantie de sécurité vis-à-vis des incendies.

### **I.2.1- Hétérogénéité de la masse de béton**

Par sa composition, le béton est un matériau présentant une forte hétérogénéité. Constitué de particules, dont la taille varie des plus gros granulats jusqu'aux ultrafines et de vides de la grosseur des bulles d'air entraîné jusqu'aux pores de gel des C-S-H (silicates de calcium hydratés) [1].

## **I.2.2- Constituants du béton**

Le béton est un mélange de trois composants, le ciment, les granulats et l'eau avec des proportions variables. Chacun de ses composants joue un rôle bien défini dans le mélange, celui de liant pour la pâte de ciment, celui de remplissage et source de résistance pour les granulats. Le béton prêt à l'emploi comporte de nombreuses qualités : solidité, durabilité, résistance au feu, isolation acoustique, et plasticité.

### **I.2.2.1- Pâte de ciment**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau.

La taille des grains du ciment Portland ordinaire, varie de quelques microns à 150 microns, ses caractéristiques granulaires sont exprimées à travers sa granulométrie et sa finesse. Cette dernière est souvent caractérisée par sa surface spécifique [2].

L'hydratation du ciment est l'ensemble de réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions vont commencer de la mise en contact de ces deux constituants: lorsque l'on ajoute de l'eau à la poudre de ciment, les produits anhydres vont progressivement se transformer en hydrates [3]. Lors de l'hydratation du ciment, ces différents hydrates se forment et se développent dans les espaces situés entre les grains de ciment anhydres initiaux, ce mode de remplissage des vides originels crée un réseau poreux très complexe.

### **I.2.2.2- Les agrégats et interface pâte- granulats**

Pour un béton, la liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la pâte de ciment et les matériaux qu'elle enrobe se traduit par une zone de pâte particulière appelée (auréole de transition) ou interface pâte- granulats [4]. Son épaisseur augmente avec la taille du granulat mais reste toujours inférieure à 50µm. Dans cette zone, la pâte de ciment présente une cohésion plus faible, due à un excès local d'eau, car au moment du gâchage, un film liquide s'adsorbe sur la surface des granulats [5].

Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton (l'agrégat n'ayant aucune interaction avec le ciment et est inaltérable par l'eau et l'air). Les granulats proviennent dans la plus part des cas des roches naturelles [6].

La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais.

Cette appellation "granulats" est souvent complétée par des adjectifs tel que fin, moyen et gros, une classification courante des granulats est proposée dans le tableau I.1.

| Dimension en diamètre de passoire | Appellation des granulats |
|-----------------------------------|---------------------------|
| 0.1 <math>\phi</math>             | Fillers fine farine       |
| 0.1 <math>\phi</math> 0.4mm       | Sable fin                 |
| 0.4 <math>\phi</math> 1.6mm       | Sable moyen               |
| 1.6 <math>\phi</math> 6.3 mm      | Sable gros                |
| 6.3 <math>\phi</math> 10 mm       | Gravier fin               |
| 10 <math>\phi</math> 16 mm        | Gravier moyen             |
| 16 <math>\phi</math> 25 mm        | Gravier gros              |
| 25 <math>\phi</math> 40 mm        | Caillou fin               |
| 40 <math>\phi</math> 63 mm        | Caillou moyen             |
| 63 <math>\phi</math> 100 mm       | Caillou gros              |

Tableau I.1- Classification des granulats

### **I.2.2.3- L'eau**

L'eau constitue le liant pour le ciment, elle est donc une composante essentielle pour la formation de chaque matériau cimentaire. L'eau joue deux fonctions principales, elle lui confère sa maniabilité à l'état frais d'une part et assure l'hydratation du ciment d'autre part. Les particules d'eau exercent les une sur les autres des forces d'attraction de type Van der Waals qui jouent un rôle fondamental sur ses propriétés rhéologique et modifient les forces intergranulaires.

### **I.2.3- Evolution de la porosité et de l'état de l'eau des matériaux cimentaires**

Avec le progrès réalisé sur les techniques d'investigation, essentiellement sur la microscopie à balayage électronique MEB, la microstructure des matériaux cimentaires est actuellement bien connue. Cette structuration détermine le comportement à l'état frais et à l'état durci du mélange. Le béton est un matériau poreux considéré initialement comme saturé et devenant au cours du temps non saturé.

### **I.2.3.1- Microstructure des matériaux cimentaires**

Au cours de l'hydratation, la pâte de ciment incluse dans le béton est composée d'hydrates, des grains de ciment anhydre et des espaces capillaires remplis ou partiellement remplis d'eau. L'hydratation accroît le volume de solide et la quantité d'eau chimiquement liée dans la pâte et augmente en conséquence sa résistance.

#### **a) Les pores**

La porosité est une caractéristique importante des matériaux cimentaires. Elle leur confère plusieurs caractéristiques telle que la perméabilité, la résistance, la durabilité ainsi que le comportement rhéologique. On distingue les pores contenus dans les granulats et qui se trouvent dans la pâte de ciment. La taille et le volume des pores situés à l'intérieur des granulats n'évoluent pas avec le temps et influent sur la résistance du béton à la corrosion. Le volume des pores inclus dans la pâte diminue avec la progression d'hydratation on distingue:

- ♦ Les pores capillaire ( $0.01 \leq \varphi \leq 0.5$ ) qui occupent les espace entre les grains de ciment en suspension dans l'eau. La taille et le volume de ces pores augmentent avec le rapport Eau/ciment du mélange, la perméabilité du matériau est essentiellement dépendante du volume et de la taille de ces pores capillaires.
- ♦ Les pores relatifs aux hydrates ou pores des gels ( $\varphi < 40$ ), le volume de ces pores n'est pas affecté par le rapport Eau/ciment du mélange. Aussi, ce type de pores n'affecte pas la perméabilité du matériau.
- ♦ Les bulles d'air occlus ( $\varphi > 1$ ) qui se trouvent piégées à l'intérieur du béton lors du malaxage du mélange, ces bulles occupant 5 à 20 % du volume du béton frais dans le coffrage.

#### **b) L'état de l'eau dans les matériaux cimentaires**

L'eau présente dans un matériau cimentaire se trouve sous différents états. Il est parfois difficile d'évaluer le degré de liaison de l'eau avec la matrice solide, néanmoins trois degrés peuvent être distingués:

- ♦ L'eau chimiquement liée: qui se trouve être l'eau consommée au cours des réaction d'hydratation, combinée avec d'autre composants dans les hydrates.
- ♦ L'eau adsorbée: qui est l'eau fixée à la surface de la matrice solide sous l'action de forces intermoléculaires, de type force de Van der Waals.

- ♦ L'eau capillaire et l'eau libre: la première étant l'eau en phase condensée remplissant un capillaire, un cas particulier de l'eau capillaire est l'eau libre contenue dans les pores les plus gros et qui ne subit pas d'influence particulière des forces superficielles [7].

L'eau est donc présente dans le béton sous différents états. En général, du point de vue de l'identification des phénomènes mis en jeu pour l'étude de transferts hydriques, il est beaucoup plus simple de distinguer eau évaporable et l'eau non évaporable. Cette dernière comprenant l'eau adsorbée fortement liée et l'eau chimiquement liée. Quant à l'eau évaporable, elle comporte l'eau capillaire et l'eau adsorbée la moins liée.

### **I.2.4- Composition du béton**

La composition d'un béton à l'heure actuelle, consiste dans la détermination des divers quantités de granulats (sable, gravier, caillons), de ciment, d'eau, qu'il est nécessaire de mettre en présence pour obtenir un mètre cube du béton. Le choix de la formulation d'un béton impose un compromis entre trois objectifs; une facilité de mise en œuvre définie par son ouvrabilité, une résistance visé à différents stades de maturation du béton et une durabilité. L'aspect fondamental reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire; une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de la maniabilité en augmente la teneur en eau. Selon l'objectif visé, de nombreuses méthodes de composition sont proposées dans la littérature. Parmi les méthodes les plus utilisées, on retrouve celle de Dreux Gorisse [8], Baron Lesage [9].....

Le mélange de ciment et de l'eau constitue ce qu'on appelle la pâte de ciment, en y rajoutant du sable on obtient un mortier. Le béton résulte d'un mélange de mortier et de granulats (figure I.1).

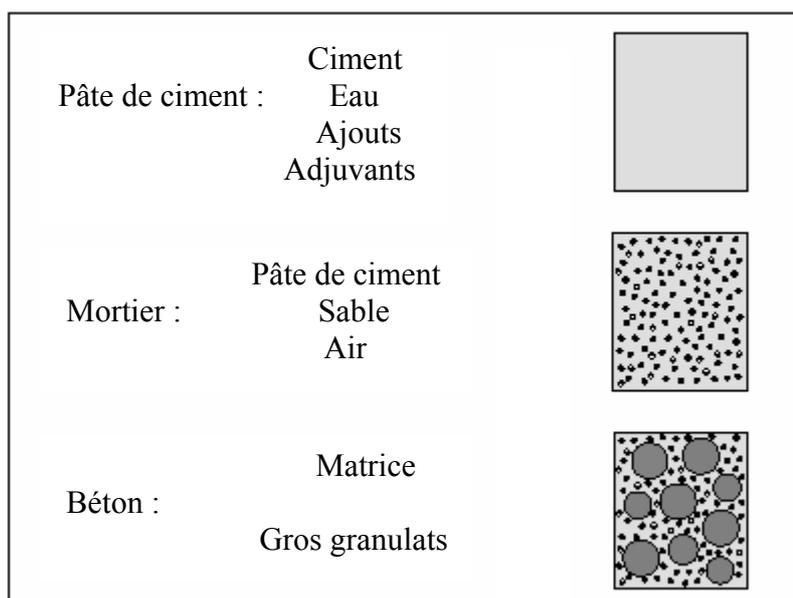


Figure I.1- Composition du béton

Une grande panoplie de béton est actuellement à la disposition des constructeurs (tableau I.2).

| Type de béton               | Composition   |                           |
|-----------------------------|---|---------------------------|
| Ordinaire BO                | Eau+ ciment+ granulats  | $0.5 \leq E/C \leq 0.6$   |
| Haute performance BHP       | Eau+ciment+granulats+adjuvant réducteur d'eau   | $0.35 \leq E/C \leq 0.40$ |
| Très haute performance PTHP | Eau+ciment+granulats+superplastifiant +réducteur d'eau+fumée de silice  | $0.20 \leq E/C \leq 0.35$ |
| Auto plaçant BAP            | Eau+ ciment+ granulats+fines (cendre volante, laitier de haut fourneau, fine calcaire) + superplastifiant+ agent de viscosité | $G/S \approx 1$           |

Tableau I.2- Différents types de béton

### **I.2.5- Propriétés du béton**

On suppose généralement qu'à l'état frais, les matériaux cimentaires sont saturés. Dans la réalité, des bulles d'air restent piégées dans le matériau pendant le malaxage. Ces bulles d'air occupent un volume de 5 à 20% du volume total pour le béton frais et de l'ordre de 5% pour les pâte de ciment [10]. De plus, l'avancement de la réaction d'hydratation provoque une augmentation du volume occupé par cette phase gazeuse qui est constituée d'air et de vapeur d'eau. De ce fait, l'hypothèse de non saturation initiale nous semble tout à fait justifiée, même si par ailleurs certains auteurs jugent que le matériau est plutôt saturé en se référant aux mesures d'humidité relative proches de 100% au départ. Il faut signaler en outre que le degré de saturation diminue avec la progression de l'hydratation des grains de ciment.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant le temps.

### **I.2.5.1- Béton frais**

L'ouvrabilité du béton est sa propriété à se mettre plus ou moins facilement en œuvre. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : nature et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie et dosage en eau.

- Un dosage en eau trop faible entraîne une ouvrabilité insuffisante du béton et provoque des chutes de résistance en raison d'une mauvaise mise en place à laquelle peut s'ajouter une hydratation incomplète.
- Un excès d'eau se traduit par une diminution de la compacité c'est-à-dire une augmentation de la porosité entraînant une durabilité moins bonne. Il est donc impératif, pour obtenir un béton de qualité, de limiter le dosage en eau.
- Le dosage en ciment joue également un rôle important. Il intervient principalement par sa composition, et sa finesse qui semble être le facteur le plus important. La plasticité augmente avec la surface spécifique du ciment [11].
- Les proportions relatives de gravillons et de sable dans la composition sont représentées par le rapport G/S. D'une façon générale la valeur de ce rapport ne dépasse pas 2. Des valeurs de 2.2 à 2.3 donnent des bétons résistants, mais très difficiles à mettre en œuvre, nécessitent une vibration très puissante et présentant des risques de ségrégation.

### **I.2.5.2- Béton durcis**

La résistance mécanique est le pouvoir d'un matériau de résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à une charge. Les résistances mécaniques évoluent en fonction du dosage des granulats [12], [13] et du taux de gâchage. Ces deux paramètres sont liés:

- Les résistances mécaniques du béton réalisé avec des granulats données baissent avec la croissance du taux de gâchage E/C. ce rapport ne peut toutefois être considéré comme un critère suffisant pour prévoir les performances mécaniques du béton.
- Plus les grains sont fins, meilleure est la maniabilité, par contre les résistances finales chutes.
- Plus les grains sont gros, meilleure est la résistance mais il peut y avoir ségrégation.

## **I.2.6- Processus de maturation du béton**

### **I.2.6.1- Prise de ciment**

Lorsqu'on observe une pâte de ciment gâchée à l'eau, on remarque qu'elle reste inaltérable pendant un certain temps (quelques minutes voire plusieurs heures suivant la nature de ciment), puis

on observe une augmentation brusque de la viscosité, c'est le début de la prise, avec un léger dégagement de chaleur. On notera que le début de la prise des ciments couramment utilisés se situe entre deux à trois heures après le gâchage. La fin de prise correspond à l'instant d'être où la pâte cesse d'être déformable. L'aiguille de Vicat permet d'enregistrer le début et la fin de prise, "c'est le temps de prise". La maîtrise de ce dernier revêt une grande importance pratique pour la mise en œuvre. Les notions de temps et de fin de prise sont couramment employées pour indiquer l'intervalle de temps pendant lequel on observe une accélération des réactions d'hydratations et par conséquent un affermissement significatif du mélange.

### **I.2.6.2- Hydratation de ciment**

L'hydratation d'un matériau cimentaire fait référence à l'ensemble des réactions entre les différentes phases du ciment et l'eau de gâchage. Ces réactions exothermiques sont responsables de la prise et du durcissement des matériaux. La vitesse de dégagement de chaleur augmente au début (période de prise) puis diminue.

La phase solide de la pâte de ciment est formée de grains de ciment plus ou moins bien hydratés. Les produits de l'hydratation sont notamment [7]:

- ♦ Les silicates de calcium hydratés ou (C-S-H), qui sont sous forme de gel solide poreux ayant une structure en feuille et formé de cristaux très petits. Les forces de Van der Waals sont en partie responsables de la cohésion de ce gel.

Les autres hydrates qui se présentent sous forme de cristaux ont une évolution. Nous pouvons citer principalement:

- ♦ La portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ , qui cristallise en plaquettes hexagonales essentiellement et joue un rôle primordial sur la durabilité du béton mais participe peu au développement de sa résistance mécanique.
- ♦ Les aluminates de calcium hydratés dont la forme la plus stable  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , cristallise sous forme cubique.
- ♦ La géhlénite hydratée  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ , qui cristallise en cristaux lamellaires.
- ♦ Les sulfo-aluminates de calcium hydratés, parmi lesquels l'ettringite ( $\text{C}_3\text{A}$ ,  $3\text{CS}$ ,  $\text{H}_{32}$ ) qui cristallise sous forme d'aiguille.

### **I.2.6.3- Phénomène de retrait**

La pâte de ciment manifeste des variations dimensionnelles, en l'absence de chargement; ces variations sont surtout en relation avec sa dessiccation (évaporation de l'eau interne) et sa structuration progressive (par l'hydratation du ciment) [14]. Le retrait est un phénomène de diminution de volume accompagnant la prise d'eau et le durcissement du béton. Ce phénomène est influencé par la quantité de l'eau de gâchage ; il est autant plus important que cette dernière est plus élevée. En fait, il existe plusieurs sortes de retraits, nous distinguons, une composante exogène, due à des gradients hydriques ou thermiques régnant entre le matériau et le milieu environnant, et une composante endogène générée par le matériaux lui même sans échange de chaleur avec l'extérieur.



**Chapitre II**



**Aspects théoriques et synthèse  
bibliographique**

La caractérisation des propriétés thermophysiques d'une paroi joue un rôle important pour pouvoir modéliser et comprendre le comportement thermique des bâtiments. Les matériaux utilisés dans le génie civil sont généralement de structure poreuse, aussi nous présentons dans ce chapitre un rappel des notions nécessaires pour l'étude d'un milieu poreux. La première partie de ce chapitre s'attachera à définir les caractéristiques propres des milieux poreux, et la seconde concernera essentiellement les différents mécanismes de fixation et de déplacement d'humidité dans les matériaux utilisés dans la construction. Un rappel des principaux modèles de conductivité thermique sera également présenté.

## **II.1- CARACTERISTIQUES DES MILIEUX POREUX**

Les milieux poreux sont considérés comme étant la superposition d'une matrice solide et de vides, appelés pores. Le pourcentage de vide définit la porosité totale. Ce vide peut être occupé par de l'eau, de l'air ou un mélange, air vapeur (figure II.1).

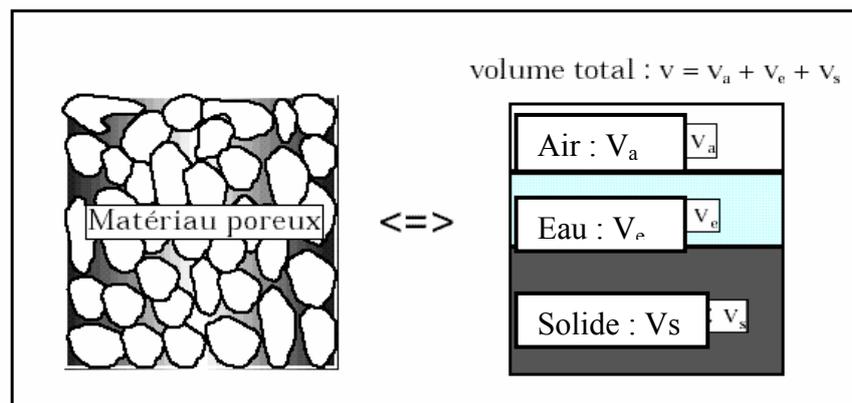


Figure II.1- Schéma d'un milieu poreux

### **II.1.1- Propriétés géométriques des milieux poreux**

Dans le cas des milieux poreux consolidés (béton ou roche), considérés comme indéformables, un certain nombre de paramètres est couramment employés pour les caractériser. Nous pouvons notamment citer:

### II.1.1.1- La porosité

La porosité d'un matériau  $\varepsilon$  caractérise l'importance des vides (pores) qu'il contient. Elle représente donc la fraction volumique de vide c'est-à-dire le rapport entre le volume de l'espace poreux  $V_p$ , et le volume total du milieu poreux ou volume apparent du matériau  $V_0$ . Le volume total est par ailleurs composé du volume solide  $V_s$ , et du volume des pores  $V_p$ .

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_0} = \frac{V_p}{V_p + V_s} \quad (\text{II.1})$$

Les pores forment des réseaux de vides plus ou moins complexes ayant une influence directe sur les phénomènes hydriques, mécaniques et thermiques. On distingue deux catégories de pores (figure II.2); les pores ouverts qui sont connectés à la partie extérieure du matériau, parmi lesquels les pores pénétrants qui ont la particularité de relier au moins deux faces du matériau poreux, reliés entre eux par des canaux qui permettent le transfert de fluide et les pores fermés qui sont isolés à l'intérieur du matériau et ne sont connectés à aucun autre pore.

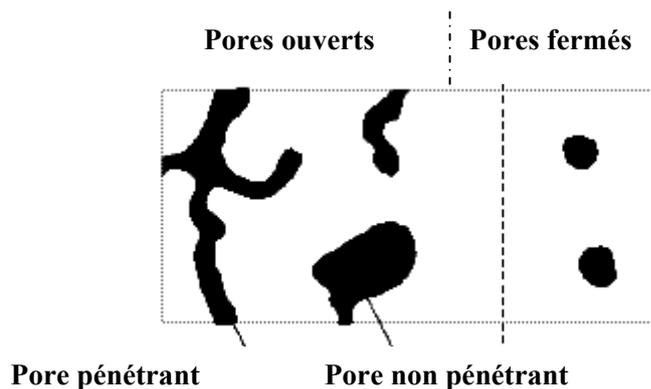


Figure II.2- Différents types des pores

### II.1.1.2- Surface spécifique

Elle est définie comme étant le rapport entre la surface totale des vides et le volume total du milieu poreux.

$$S_{sp} = \frac{S_p}{V_0} \quad (\text{II.2})$$

Propriété géométrique importante du milieu poreux, cette grandeur joue un rôle capital dans les problèmes d'adsorption. Il convient parfois de distinguer la surface spécifique accessible et la surface spécifique totale comprenant l'air des parois des cavités occluses.

## **II.1.2- Caractéristiques microstructurales**

Outre la porosité précédemment définie, la circulation d'un fluide à l'intérieur d'un matériau poreux dépend aussi de la taille et de la morphologie des pores constitutifs du réseau.

### **II.1.2.1- Distribution de taille des pores**

Si les pores sont considérés comme des entités distinctes du réseau, la distribution de taille reflète la répartition des volumes formés par les pores de rayon  $r_p$ . Elle est généralement représentée par une courbe de la forme  $\Delta V_p = f(r_p) \Delta r_p$ , où  $V_p$  est le volume des pores de rayon  $r_p$ .

Pour déterminer la distribution de tailles de pores, plusieurs méthodes expérimentales existent parmi lesquelles, la thermoporométrie et le porosimètre à mercure [7].

### **II.1.2.2- Diamètre hydraulique moyen**

Dans la majorité des structures poreuses, la taille des pores est distribuée selon un large spectre de diamètre, le diamètre hydraulique moyen  $d_h$  est défini par la relation suivante:

$$d_h = 4 \left( \frac{V_p}{S_p} \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec:

$V_p$  : Le volume des pores.

$S_p$  : La surface.

### **II.1.2.3- Tortuosité et connectivité**

La tortuosité  $\tau$  est définie comme étant le carré du rapport de la longueur effective de passage  $L_e$  sur la longueur  $L$  [15] du chemin le plus court mesurée dans la direction du flux macroscopique.

$$\tau = \left( \frac{L_e}{L} \right)^2 \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$L_e$ : Longueur effective du déplacement du fluide, c'est-à-dire longueur moyenne des lignes de courant du fluide traversant l'échantillon.

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

La connectivité est un paramètre microscopique qui caractérise le degré avec lequel une structure est connectée. Dans un milieu poreux homogène à une échelle macroscopique, la valeur de la connectivité est proportionnelle à la taille de l'échantillon. Elle définie par la relation:

$$c = b - n + 1 \quad (\text{II.5})$$

Avec:

b : Nombre de branche (pores, bras, cavités).

n : Nombre de nœuds connectés aux différentes branches.

### **II.1.3- La porosité et la circulation de fluide**

#### **II.1.3.1- Porosité cinématique**

Le volume poreux dans lequel l'eau peut circuler est inférieur au volume vide total. La porosité cinématique est la fraction de la porosité totale contenant l'eau qui peut circuler.

Sont donc exclus de la porosité cinématique:

- ♦ les espaces poreux occupés par l'eau liée. L'eau attachée à la surface des grains par le jeu des forces d'attraction moléculaire, et peut donc être considérée comme faisant partie du solide.
- ♦ les pores non connectés. L'importance de la porosité cinématique est en effet liée à la notion d'interconnections.
- ♦ les pores en culs-de-sac dans lesquels l'eau est quasi immobile.

L'ordre de grandeur de la valeur de la porosité cinématique des roches est indiqué dans le tableau II.1 [16].

| Roche           | Porosité totale | Porosité cinématique |
|-----------------|-----------------|----------------------|
| Gravier, galets | 25-40%          | 20-40%               |
| Sable           | ≈ 40%           | 5- 15%               |
| Argile          | 40-45%          |                      |
| Craie           | 30-45%          | 5%                   |
| Grés            | 5- 30%          | $\varepsilon$ -10%   |

Tableau II.1- Ordre de grandeur des principaux paramètres hydrodynamiques de quelques matériaux

### **II.1.3.2- La perméabilité**

C'est la capacité d'un corps poreux de se laisser traverser par un fluide. Cette caractéristique est liée à la forme des grains et à la porosité cinématique (communication entre les pores), du milieu et par conséquent indépendante des caractéristiques des fluides. Elle ne dépend que de la structure et de la connectivité des pores.

### **II.1.4- Changement d'échelle et homogénéisation**

A l'échelle microscopique le matériau est bien entendu trop complexe. Les écoulements et les transferts qui prennent place dans de tels milieux sont d'une approche difficile. En effet, la modélisation des transferts en milieu poreux à l'échelle des pores (microscopique) est pratiquement irréalisable, elle nécessite la connaissance exacte de la distribution des phases et des conditions aux limites. Pour cette raison, plusieurs théories sont utilisées telles que les méthodes de réseau basées sur la notion de percolation de gaz sur réseau, et les méthodes d'homogénéisation.

Le concept d'homogénéisation consiste à trouver un moyen de décrire et de prédire le comportement global à grande échelle de systèmes hétérogènes en terme de propriétés effectives. La détermination de propriétés effectives est donc un problème de changement d'échelle [17].

L'approche que nous utilisons est l'approche dite macroscopique, qui est basée sur l'existence d'un volume élémentaire représentatif (V.E.R) permettant la définition de la quantité macroscopique comme la moyenne sur ce V.E.R de la même quantité prise à l'échelle microscopique (ou échelle des pores). La taille de ce volume doit être suffisamment grande pour que les hétérogénéités présentes à l'échelle microscopique ne soient plus apparentes à l'échelle macroscopique (figure II.3).

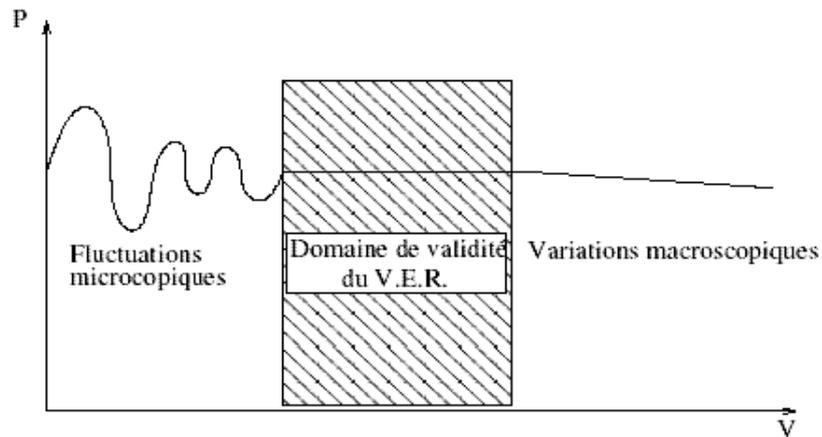


Figure II.3- Définition du V.E.R.

Le passage à l'échelle macroscopique permet de construire à partir d'un milieu réel discontinu un milieu continu fictif (figure II.4), dans lequel les équations de la mécanique classique sont applicables [18], [19].

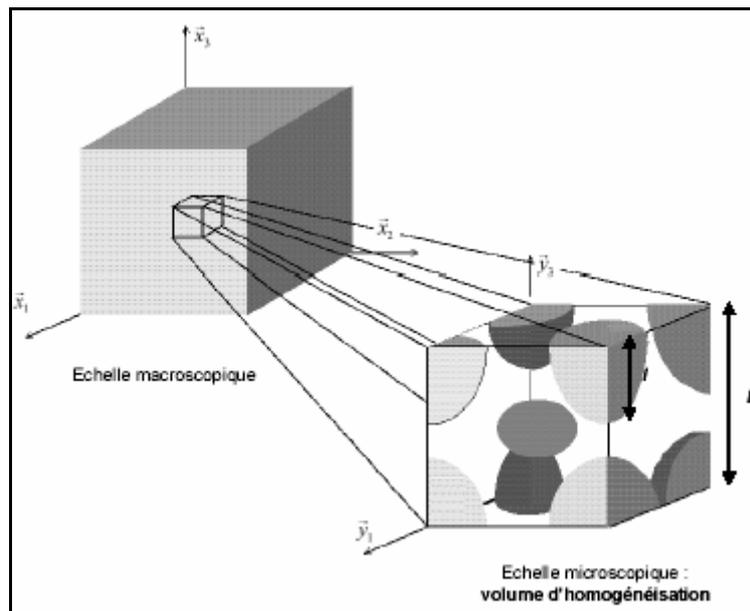


Figure II.4- Echelles caractéristiques d'un milieu poreux

## II.2- TRANSFERT D'HUMIDITE DANS LES MATERIAUX POREUX

### II.2.1-Teneur en eau

Les cavités d'un milieu poreux humide non saturé contiennent généralement une phase liquide (eau) et une phase gazeuse (air et/ou vapeur). Il est évident que l'utilisation seule des

volumes des différentes phases n'est pas suffisante pour donner la valeur de la quantité d'eau stockée dans les pores, pour cela nous définissons les grandeurs suivantes:

- ♦ Teneur en eau volumique en phase liquide:

$$\omega_l = \frac{V_l}{V_0}$$

- ♦ Teneur en eau massique en phase liquide:

$$\theta_l = \frac{m_l}{m_0}$$

- ♦ Le degré de saturation:

$$S_r[\%] = \frac{V_l}{V_p} \times 100$$

Avec:

$V_l$  : Volume d'eau occupant les pores.

$m_l$  : Masse d'eau dans les pores.

### **II.2.2- Fixation de l'humidité dans les matériaux poreux**

Le problème de liaison de l'eau à la matière est très complexe puisqu'il existe différentes formes de liaison d'humidité pouvant varier d'un matériau à un autre, et s'effectuer sous deux formes, liquide ou gazeuse. D'une manière générale, la liaison de l'humidité dans les milieux poreux, s'effectue principalement selon trois mécanismes:

- ♦ adsorption
- ♦ condensation
- ♦ capillarité

Chacun de ces mécanismes dépend de divers paramètres, notamment des propriétés structurales du milieu (porosité, surface spécifique), de la nature de la phase aqueuse avec lequel le matériau est mis en contact (vapeur ou liquide) et des conditions thermodynamiques (pression température) auxquelles il se trouve soumis [20].

### II.2.2.1- Adsorption

L'adsorption se manifeste par la formation de couches d'eau sur la surface des pores du matériau, elle répond à un processus de fixation de l'humidité. Ce phénomène est lié aux forces de van der Waals agissant entre les molécules d'eau en phase gazeuse et la surface du matériau.

#### a) Isotherme de sorption et de désorption

Si un échantillon de matériau poreux est soumis à une température constante, et à des ambiances d'humidité relatives variables, sa masse varie (figure II.5). La variation de masse est décrite par l'isotherme de sorption pour une humidité relative croissante, et désorption pour une humidité relative décroissante. Ces courbes sont caractéristiques du milieu poreux considéré et traduisent sa capacité d'adsorption.

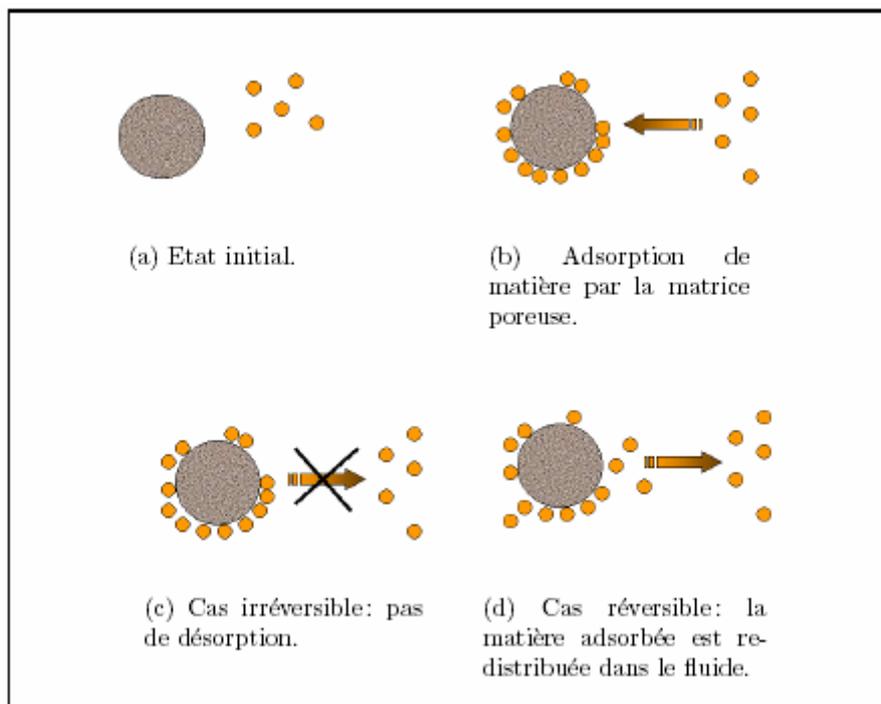


Figure II.5- Adsorption- désorption

#### b) Forme générale des isothermes

Les isothermes d'adsorption- désorption présentent en général trois zones, chaque zone correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau, sur le milieu (figure II.6).

- ❖ **Zone 1:** Pour une humidité relative faible  $\varphi < 20\%$ , l'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe des pores du milieu poreux. L'eau est dans un état rigide, en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand

toute la surface est saturée [21]. Le modèle de Langmuir (1918) rend compte correctement de ce phénomène.

- ❖ **Zone 2:** Pour une humidité relative comprise entre 20% et 50%, une adsorption des molécules sur la monocouche initiale, il se produit donc une adsorption pluri moléculaire. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.
- ❖ **Zone 3:** Pour une humidité relative comprise entre 50% et 100%, il y a condensation capillaire. Les films d'eau s'épaississent jusqu'à ce que l'espace poreux se remplisse, il y a alors saturation et écoulement dans la phase condensée.

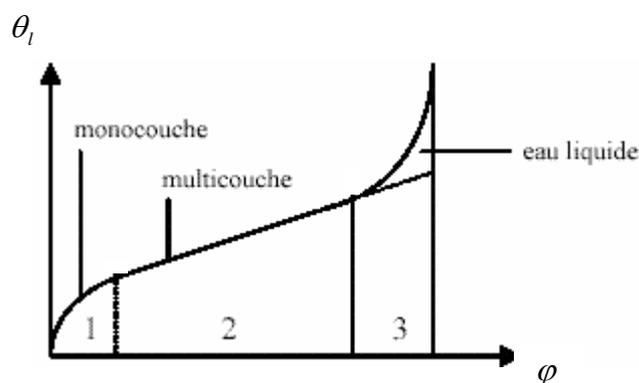


Figure II.6- Isothermes de sorption

La teneur maximale d'adsorption  $\theta_c$  est inférieure à la teneur en eau de saturation des pores  $\theta_{ls}$ . Elle varie cependant suivant la nature du matériau [22].

### II.2.2.2- La condensation

La masse liquide formée dans le milieu poreux provient, d'une part, d'effet de pluie diffusés à l'intérieur du milieu par capillarité, et d'autre part de phénomène de condensation lié au changement de phase de l'eau, passant de l'état vapeur à l'état liquide sous l'influence de variation de température.

### II.2.2.3- La capillarité

L'existence d'eau en masse à la surface d'une structure poreuse, surtout dans le domaine du bâtiment peut résulter soit d'un phénomène de condensation superficielle (température de surface inférieure à la température de saturation de vapeur), soit d'un phénomène de mouillage (pluie).

Lorsque deux phases non miscibles de mouillabilité différentes coexistent, elles sont séparées par une interface courbe [23]. La pression est discontinue à la traversée de cette interface

et la différence des pressions entre la phase mouillante (eau) et la phase non mouillante (air) s'appelle la Pression capillaire (figure II.7).

$$P_c = P_g - P_l = \frac{2\sigma(T)}{r} \cos \alpha_m \quad (\text{II.6})$$

Avec:

$P_c$  : Pression capillaire.

$P_g$  : Pression de la phase gazeuse.

$P_l$  : Pression de la phase liquide.

$r$  : Rayon du capillaire.

$\alpha_m$  : Angle de raccordement entre le ménisque et le solide ou angle de mouillage.

$\sigma$  : Tension superficielle de l'interface liquide/ gaz.

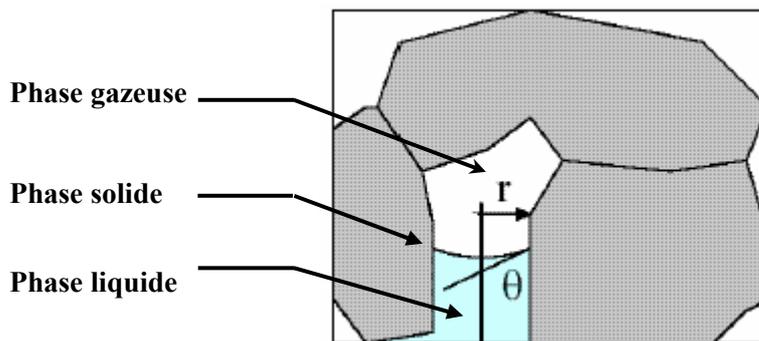


Figure II.7- Schéma d'un ménisque capillaire non saturé

Une relation entre cette différence de pression entre l'eau et l'air, et l'humidité ambiante est donnée par la loi de Kelvin. La succion dans un milieu poreux dépend donc de la température et de l'humidité.

$$P_g - P_l = \frac{RT\rho_l}{M} \ln \varphi \quad (\text{II.7})$$

Où:

$R$  : La constante molaire des gaz.

$T$  : La température.

$\rho_l$  : La masse volumique de l'eau.

$\varphi$  : Humidité relative.

Tenant compte des relations de Kelvin et de Laplace, il est possible d'établir une relation entre la pression capillaire, le rayon des pores capillaires et l'humidité relative.

$$\sigma_{cap} = P_g - P_l = \frac{2\sigma \cos \alpha_m}{r} = -\frac{RT\rho_l}{M} \ln \varphi \quad (\text{II.8})$$

Il faut noter que:

-Lorsque la capillarité est le mécanisme dominant de fixation du fluide, le matériau est dit capillaro poreux.

-Lorsque le mécanisme dominant est l'adsorption, le matériau est dit hygroscopique.

En termes d'échelles caractéristiques, cette distinction intervient pour un diamètre moyen des pores de l'ordre ou inférieure à [24].

$d \leq 0,1\mu\text{m}$ , le milieu poreux hygroscopique.

$d > 0,1\mu\text{m}$ , le milieu poreux capillaro poreux.

### **II.2.3- Transferts d'humidité dans les milieux poreux**

Dans la structure de bâtiment, les transferts internes d'humidité peuvent se développer en phase gazeuse et/ou liquide. La nature et l'intensité de ces transferts à l'échelle macroscopique dépendent des propriétés intrinsèques des matériaux utilisés qui peuvent induire des phénomènes particuliers.

Il existe plusieurs modes de transport de l'humidité à travers une paroi poreuse, parmi lesquels la migration par diffusion, par capillarité, par convection ou par gravité [25]. Notons que la migration par diffusion moléculaire en phase vapeur sous l'effet d'un gradient de pression partielle de la vapeur d'eau, et par capillarité (phénomène de suction) en phase liquide sont les modes de migration les plus importants.

Les lois qui régissent ces transferts de masse s'inspirent directement des méthodes classiques de la mécanique des milieux continus, en admettant les hypothèses suivantes:

- ❖ transfert de chaleur par rayonnement négligeable.
- ❖ milieu poreux indéformable, homogène, isotrope, ayant des propriétés thermodynamiques indépendantes de la température.
- ❖ équilibre thermique entre phases au sein du milieu poreux [13].

### II.2.3.1- Loi de darcy

Un écoulement est dit "darcéen" s'il est produit par un gradient de pression. Il s'ensuit donc un flux de transfert de masse  $j_l$  allant de la pression la plus élevée vers la pression la plus basse, remplissant progressivement les pores par l'eau.

Le cas d'un matériau poreux nous avons généralement une phase liquide  $p_l$  et une phase gazeuse  $p$ . Nous pouvons donc écrire selon la loi de Darcy :

$$\vec{j}_l = -\frac{k_l}{\nu_l} \overrightarrow{\text{grad}} \hat{p}_l \quad (\text{II.9})$$

Avec:

$k_l$  : Perméabilité du milieu à la phase liquide.

$\nu_l$  : Viscosité cinématique.

$\hat{p}_l$  : Pression motrice dans le liquide. ( $\hat{p}_l = p_l - \rho_l gz$ )

### II.2.3.2- Loi de Fick

La diffusion de la vapeur d'eau est due au fait que dans un mélange de gaz présentant des différences de concentration, un transport moléculaire se produit jusqu'à la disparition de ces différences. Cet écoulement est dit "Fickien" [3]. Ce phénomène de diffusion de la vapeur d'eau peut s'effectuer sans ou avec condensation, dans ce dernier cas, le vapeur qui se condense va d'une part libérer sa chaleur latente de vaporisation qui contribuera au transfert de chaleur, et d'autre part, changer les caractéristiques thermo physiques locales de la paroi. (§ II.4)

La densité de flux de masse de vapeur par diffusion moléculaire s'exprime suivant la loi de Fick [24].

$$\vec{j}_{vd} = -\delta \overrightarrow{\text{grad}} p_v \quad (\text{II.10})$$

Avec:

$p_v$  : Pression partielle de vapeur d'eau.

$\delta$  : Coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau, qui est fonction de la matrice solide du matériau, de la teneur en eau et de la température.

## **II.3- TRANSFERTS THERMIQUES DANS LES MILIEUX POREUX**

Les transferts de chaleur dans les milieux poreux sont complexes du fait de l'apparition simultanée de la conduction dans la phase solide, du rayonnement et de la convection dans la phase gazeuse et/ou liquide [26], en plus, des transferts par changement de phase.

Dans le bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligée. Les parts du rayonnement du transfert de masse en phase liquide et vapeur pour un matériau poreux non saturé ne seront pas également prises en compte au voisinage de température ambiante lorsque la masse volumique n'est pas trop faible. Par conséquent le transfert thermique peut être considéré purement conductif.

### **II.3.1- Propriétés thermophysiques**

Le processus de conduction de la chaleur dans un corps traduit le transport d'énergie résultant des interactions moléculaires sous une distribution non homogène de la température. La relation fondamentale qui décrit ce phénomène de conduction est basée sur des observations expérimentales.

Selon la loi de Fourier [27], pour un corps isotrope, la densité de flux est proportionnelle au gradient de température, soit:

$$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II.11})$$

$\lambda$  : Étant la conductivité thermique

C'est une propriété intrinsèque du matériau qui caractérise la diffusion de la chaleur dans les milieux sans mouvement macroscopique de matière [28].

Dans le cas du régime transitoire et pour un milieu isotrope à conductivité thermique constante, l'équation du transfert thermique prend la forme:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \Delta T \quad (\text{II.12})$$

Où le rapport  $\frac{\lambda}{\rho c_p}$ , est appelé diffusivité thermique

## **II.3.2- Modèles analytiques et empiriques de la conductivité thermique**

La littérature est très riche en modèles de prédiction du comportement effectif d'un matériau multiphasé à partir de celui de ces constituants, permettant de prévoir les caractéristiques thermiques de très nombreux matériaux. Basés sur des approches parfois très différentes, ils peuvent être séparés en deux classes, d'une part les modèles analytiques, et issus d'approches purement mathématiques, et d'autre part, les modèles empiriques.

L'objectif de cette partie n'est pas de fournir une liste exhaustive de l'ensemble des modèles existants, ni de rentrer dans les détails des démonstrations propres à chacun d'eux, mais de répertorier les plus utilisés et les plus simples à mettre en œuvre pour l'expérimentateur.

### **II.3.2.1- Outils de prédiction basés sur une approche mathématique**

La conductivité thermique effective d'un matériau poreux dépend de nombreux paramètres, les conductivités thermiques du solide et du gaz, le taux de porosité, la taille, la forme et la distribution des pores. Prédire la valeur de la conductivité thermique effective pour un échantillon donné nécessite d'une part d'avoir un maximum d'informations sur la microstructure et d'autre part de disposer d'outils analytiques qui prennent en compte ces informations. Des simplifications géométriques sont le point de départ de tout modèles. La précision de l'estimation dépend de la pertinence du modèle par rapport à la microstructure réelle [29].

D'un point de vue analytique, les approches classiquement utilisées pour prédire le comportement de systèmes multiphasés sont les méthodes variationnelles ou autocohérentes.

Les hypothèses communes à chaque modèle ne sont pas toujours très explicites, particulièrement sur la morphologie et la répartition spatiale, on peut toutefois retenir quelques postulats communs:

- ❖ Le matériau est considéré comme parfaitement isotrope.
- ❖ Les interactions physico-chimiques entre les différentes phases sont négligées.
- ❖ L'adhésion entre les phases est supposée parfaite, assurant la continuité du flux thermique et du gradient de température aux interfaces [30].

Le problème de conduction thermique est analogue au problème de conduction électrique.

Nous développerons dans ce qui suit, tout d'abord des modèles simples (modèles série et parallèle) qui font l'hypothèse d'un flux de chaleur unidimensionnel ; puis le cas de matériaux biphasés présentant des géométries plus complexes, avec un arrangement d'une seconde phase dans une matrice continue. On peut distinguer, pour les matériaux poreux deux catégories de modèles analytiques suivant l'hypothèse faite sur la nature du mélange des deux phases. Dans la catégorie des modèles faisant l'hypothèse d'inclusions isolées dans une matrice continue, nous présenterons

brièvement les modèles de Rayleigh, Maxwell, Hashin- Shtrikman. La seconde catégorie considère des phases éventuellement interconnectées en fonction du taux de porosité. Nous présenterons sommairement la théorie de la percolation du milieu effectif, les équations de Landauer. Enfin le modèle de Hasselman sera détaillé, il permet de prendre en compte la résistance interfaciale à travers les pores.

**a) Modèles avec hypothèse d'un flux de chaleur unidimensionnel**

Dans cette partie, nous nous intéressons au cas d'un milieu poreux de porosité totale  $\varepsilon$  formé d'une matrice solide de conductivité thermique  $\lambda_s$  et d'une phase fluide de conductivité  $\lambda_f$ , nous pouvons distinguer selon la disposition des couches par rapport au flux de chaleur les modèles suivants:

◆ **Modèles issus d'arrangement série parallèle**

Les modèles les plus simples considèrent une association en parallèle ou en série de différents constituants. Leurs expressions respectives pour un assemblage de 2 phases sont reportées dans le tableau II.2.

Le flux de chaleur traverse chacune des phases soit parallèlement, soit perpendiculairement à leur arrangement.

La borne inférieure correspond à un milieu où le vecteur densité de flux de chaleur est perpendiculaire aux strates, La borne supérieure correspond à une disposition des strates parallèles à la direction de la densité de flux de chaleur.

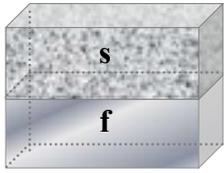
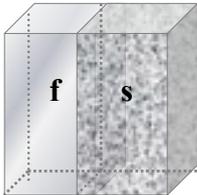
| <b>Assemblage en série<br/>(Borne inférieure)</b>   | <b>Assemblage en parallèle<br/>(Borne supérieure)</b>                                   |
|---|---|
|                              |     |
| $\lambda_{eff} = \lambda_{\perp} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{(1-\varepsilon)}{\lambda_s}}$ | $\lambda_{eff} = \lambda_{\parallel} = \varepsilon\lambda_f + (1-\varepsilon)\lambda_s$ |

Tableau II.2- Conductivité thermique de milieux poreux série et parallèle

Il est important de souligner le caractère universel de ces deux modèles puisqu'ils correspondent à l'encadrement le plus large qu'il est possible d'obtenir pour les propriétés réelles d'un matériau. Autrement dit, le domaine délimité par les assemblages en parallèle et en série des phases englobe nécessairement les propriétés de tout matériau réel non endommagé, quelles que soient la morphologie et la répartition de ses phases. Ces modèles n'intègrent pas la totalité des contributions microstructurales et ne permettent donc pas d'obtenir une description très précise du comportement d'un matériau.

◆ **Juxtaposition des modèles série et parallèle**

Deux approches peuvent être utilisées:

- Krischer combine les deux modèles série et parallèle. Pour essayer de faire le calcul théorique de la conductivité thermique de matériaux à plusieurs phases. La conductivité de l'ensemble est donnée par le tableau II.3.

- Willy et Southwich assimilent le milieu poreux à un ensemble formé d'un modèle série et parallèle en parallèle. La conductivité thermique effective est donnée par le tableau II.3.

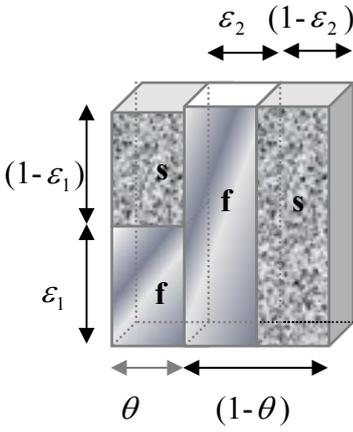
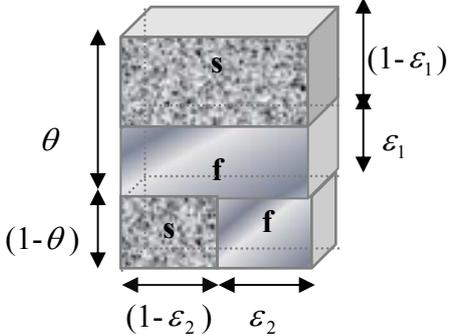
| Modèle de Willy   | Modèle de Krischer  |
|---|---|
|  |                 |
| $\lambda_{eff} = \theta \lambda_{\perp} + (1 - \theta) \lambda_{\parallel}$         | $\lambda_{eff} = \frac{1}{\frac{\theta}{\lambda_{\perp}} + \frac{(1-\theta)}{\lambda_{\parallel}}}$ |

Tableau II.3- Modèles de juxtaposition

Avec :

$\theta$  : La part de dispositif en conduction série.

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

En pratique, on considère que le milieu poreux présente une porosité uniforme  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ , sachant que la porosité  $\varepsilon$  s'écrit :  $\varepsilon = \theta\varepsilon_2 + (1-\theta)\varepsilon_2$

Dans divers domaines courants, on rencontre la cohabitation de l'eau et de l'air, dans les milieux poreux. La connaissance approfondie de certains milieux, conduit à déterminer leur conductivité thermique globale, en considérant que ces derniers sont constitués par trois éléments, l'air, l'eau et le milieu solide, de caractéristiques connues. Différents modèles permettent d'approcher le phénomène.

◆ **Modèles série et parallèle**

Leurs expressions respectives pour un assemblage de trois phases solide, liquide (eau) et gazeux (air) de conductivités thermiques respectives  $\lambda_s$ ,  $\lambda_l$  et  $\lambda_g$  figurent dans le tableau II.4.

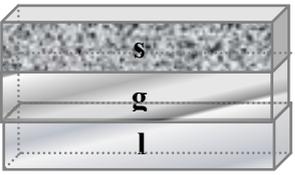
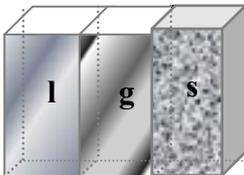
| Modèle série  | Modèle parallèle  |
|---|---|
|    |           |
| $\lambda_{\perp} = \left[ \frac{(1-\varepsilon)}{\lambda_s} + \frac{(1-S)\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{S\varepsilon}{\lambda_l} \right]^{-1}$ | $\lambda_{//} = (1-\varepsilon)\lambda_s + (1-S)\varepsilon\lambda_g + S\varepsilon\lambda_l$ |

Tableau II.4- Modèle série et parallèle

Avec:

S : Le taux de saturation

◆ **Modèle de Krischer**

Ce modèle est fondé sur la combinaison des deux modèles précédents. Le système triphasique est schématisé par des plaques composées de solide, d'eau et d'air, les plaques sont

disposées de façon à ce qu'une partie du milieu soit perpendiculaire au vecteur densité de flux de chaleur et l'autre lui soit parallèle (Figure II.8).

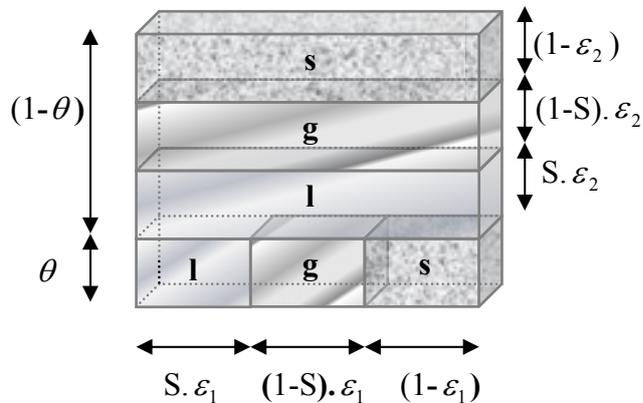


Figure II.8- Modèle de Krischer

La conductivité thermique effective est alors donnée par l'expression:

$$\lambda_{eff} = \left( \frac{1-\theta}{\lambda_{\perp}} + \frac{\theta}{\lambda_{\parallel}} \right)^{-1} \quad (II.13)$$

#### ◆ **Modèle de type Jakson et Black**

Les auteurs [31] proposent d'autres modèles pour calculer la conductivité thermique d'un milieu poreux granulaire. Ils introduisent un autre paramètre qui décrit le contact entre les différents composants, la contiguïté  $c_{ij}$  de la phase  $i$  avec la phase  $j$  définie comme la fraction de la surface de la phase  $i$  en contact avec la phase  $j$ . Jakson et Black utilisent une cellule élémentaire et font un calcul approché de résistances thermiques en série et en parallèle.

#### **b) Modèles inclusionnaires**

##### ◆ **Modèle de Hashin et Shtrikman**

Hashin et Shtrikman proposent un encadrement plus performant des propriétés thermiques d'un matériau multiphasé, la méthode variationnelle utilisée est basée sur la résolution d'un problème d'inclusions noyées dans une matrice homogène. L'assemblage de sphères composites conçu par Hashin [32] considère des sphères semblables constituées d'un noyau sphérique de matériau 1 (solide) entouré d'une coquille de matériau 2 (fluide) avec  $\lambda_s > \lambda_f$ . De telles sphères peuvent remplir tout l'espace. Leur distribution spatiale est parfaitement aléatoire et leur diamètre peut atteindre des valeurs infinitésimales (figure II.9) [30].

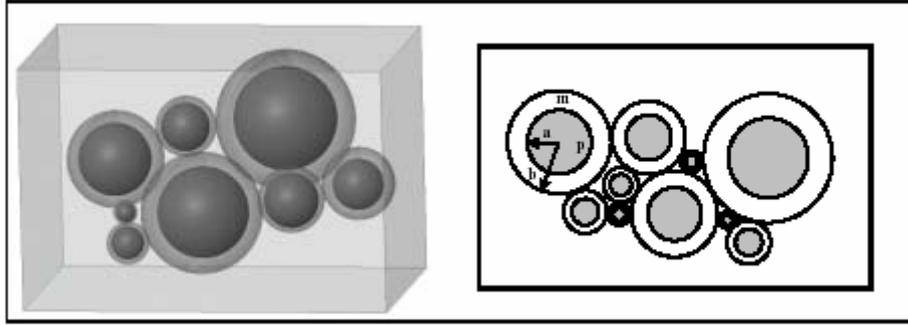


Figure II.9- Schéma équivalent de la modélisation géométrique de l'assemblage des sphères composites proposé par Hashin

La conductivité effective d'un matériau s'écrit

$$\lambda_{\text{inf}} = \lambda_s + \frac{\varepsilon}{\frac{1}{\lambda_f - \lambda_s} + \frac{(1 - \varepsilon)}{3\lambda_s}} \quad (\text{II.14.a})$$

$$\lambda_{\text{sup}} = \lambda_f + \frac{1 - \varepsilon}{\frac{1}{\lambda_s + \lambda_f} + \frac{\varepsilon}{3\lambda_f}} \quad (\text{II.14.b})$$

#### ◆ **Modèle de Maxwell**

Le modèle de Maxwell [33] est basé sur le schéma des particules sphériques isolées de rayon quelconque, homogènes, dispersées, régulièrement et suffisamment éloignées (Figure II.10), les interactions entre les champs thermiques des particules sont négligés.

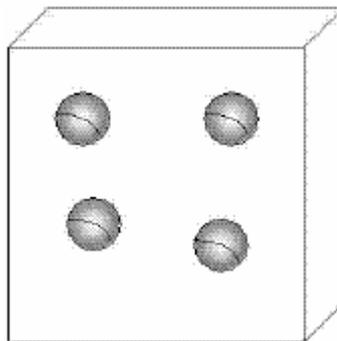


Figure II.10- Modèle de Maxwell

La conductivité thermique effective est calculée par l'équation suivante:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \frac{\lambda_f + 2\lambda_s + 2\varepsilon(\lambda_f - \lambda_s)}{\lambda_f + 2\lambda_s - \varepsilon(\lambda_f - \lambda_s)} \quad (\text{II.15})$$

◆ **Modèle de Rayleigh**

Rayleigh [34] s'appuie sur les mêmes hypothèses que Maxwell. Il considère le cas d'un arrangement cubique périodique de sphères de même diamètre. Ce modèle s'applique également à un assemblage périodique de cylindres (Figure II.11).

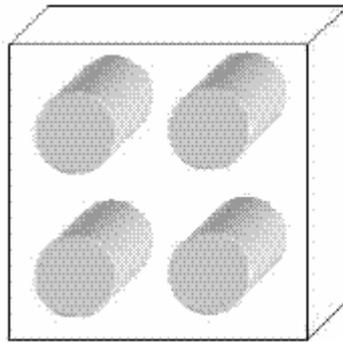


Figure II.11– Modèle de Rayleigh

La conductivité thermique dans la direction perpendiculaire à l'axe des cylindres est exprimée par:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \left[ \frac{\lambda_f + \lambda_s + \varepsilon(\lambda_f - \lambda_s)}{\lambda_f + \lambda_s + \varepsilon(\lambda_s - \lambda_f)} \right] \quad (\text{II.16})$$

**c) Théorie de la percolation du milieu effectif**

La percolation traduit le passage d'une information entre deux points d'un système. Dans le cas d'un corps poreux, la percolation représente la pénétration des pores entre deux faces du matériau (Figure II.12). D'un point de vue mathématique la percolation a été introduite en 1953 par Broadbent et Hammersley, qui ont étudié le passage hypothétique d'un fluide à travers un milieu poreux aléatoire [35].

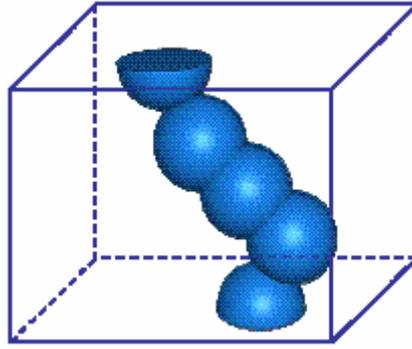


Figure II.12- Percolation de la phase solide

Antérieurement aux travaux de Broadbent et Hammersley, Bruggeman en 1935 propose une équation permettant le calcul de la conductivité thermique effective d'un matériau biphasé en considérant des phases interconnectées [36]. Cette approche considère chaque particule dispersée dans un milieu de conductivité thermique effective elle même déterminée en tenant compte des fractions volumique des différentes phases présentes. On parle alors de milieu effectif. Les deux phases sont considérées comme continues, elles jouent un rôle équivalent sur la conductivité thermique.

Landauer [37] propose une expression simple issue de la théorie de percolation de milieu effectif (E. M. P. T) pour des particules sphériques:

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{4} \left[ \lambda_f (3(1 - \varepsilon) - 1) + \lambda_s (3\varepsilon - 1) + \sqrt{8\lambda_s \lambda_f + [\lambda_f (3(1 - \varepsilon) - 1) + \lambda_s (3\varepsilon - 1)]^2} \right] \quad (II.17)$$

Ce modèle prend en compte, d'un point de vue purement analytique, la distribution des phases et les contacts susceptibles de s'établir entre les particules (ou interconnexion éventuelle des pores) lorsque la teneur en deuxième phase devient importante.

#### **d) Modèle de Hasselman**

Un autre modèle est basé sur les approches de Maxwell et Rayleigh, c'est le modèle développé par Hasselman [38] qui prend en compte une résistance interfaciale faisant office d'une barrière thermique entre la matrice et la phase gazeuse.

$$\lambda_{eff} = \lambda_s \frac{x \left( \frac{\lambda_f}{\lambda_s} - \frac{\lambda_f}{c.h} - 1 \right) \varepsilon + \frac{\lambda_f}{\lambda_s} + \frac{x\lambda_f}{c.h} + x}{\left( 1 - \frac{\lambda_f}{\lambda_s} + \frac{\lambda_f}{c.h} \right) \varepsilon + \frac{\lambda_f}{\lambda_s} + \frac{x\lambda_f}{c.h} + x} \quad (\text{II.18})$$

Avec:

$c$  : Représente le rayon des pores.

$1/h$  : Caractérise la résistance de contact.

$x$  : Constante égale à 2 ou 1 selon que l'on considère respectivement un assemblage de sphères ou de cylindres orientés perpendiculairement au flux de chaleur.

Lorsque  $h$  tend vers l'infini, la résistance interfaciale est négligée et l'on retrouve l'expression de Maxwell.

### II.3.2.2- Modèles à caractères phénoménologiques

Outre les modèles analytiques cités précédemment, il existe des modèles empiriques qui sont destinés à décrire l'allure des courbes expérimentales par des fonctions analytiques simples, le plus performant passant par un maximum de points expérimentaux. On peut distinguer notamment les modèles de:

- Woodside-Assaad [39], qui proposent une relation géométrique pondérée des conductivités thermiques de toutes les phases:

$$\text{Système à deux composants } \lambda = \lambda_f^\varepsilon \lambda_s^{(1-\varepsilon)} \quad (\text{II.19.a})$$

$$\text{Système à n composants } \lambda = \pi \lambda_i^{\theta_i} \quad (\text{II.19.b})$$

- Dubrickij [40], basé sur plusieurs expériences réalisées et pour divers milieux poreux. Pour le calcul de la conductivité thermique la relation suivante est proposée:

$$\lambda = \lambda_0 + A T e^{-B.S.\varepsilon} \quad (\text{II.20})$$

A et B sont déterminés à partir de deux expériences à deux taux de différentes saturations et à une température donnée.

$\lambda_0$  : Est la conductivité thermique du milieu poreux à l'état sec et à  $T=0^\circ \text{C}$ .

## II.4- TRANSFERTS COUPLES DE CHALEUR ET DE MASSE

Lorsque la porosité du milieu est partiellement saturée, il peut y avoir couplage entre les transferts de chaleur et de masse dans la phase liquide et gazeuse. Du fait de la présence d'un gradient de température dans le milieu poreux, l'eau qui s'évapore d'une zone chaude est transportée par diffusion gazeuse et se condense dans une zone froide en libérant sa chaleur de vaporisation. C'est le phénomène d'évaporation condensation. Il conduit à un accroissement notable du transfert de chaleur et donc de la conductivité thermique. [40], [41], [42]

De nombreux chercheurs se sont attachés à modéliser ces transferts couplés de chaleur et de masse. Les travaux les plus marquants dans le domaine restent ceux de Krischer et al [43], DeVries [44] et Luikov [45]. Ces chercheurs considèrent deux gradients moteurs à l'origine des transferts couplés: un gradient de température et un gradient d'humidité. Moyen [42] a complété cette description mathématique en y ajoutant la prise en compte d'un gradient de pression totale dans la phase gazeuse.

Moyen obtient la conductivité apparente d'un milieu soumis à des phénomènes internes d'évaporation- condensation sous la forme suivante:

$$\lambda_{app} = \lambda_0 + f \frac{D_{va}}{R_T} \frac{M_0 M_v}{M} L_v \frac{\partial p_v}{\partial T} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$\lambda_0$  : Conductivité thermique vraie.

$f$  : Facteur de résistance à la diffusion de la phase vapeur.

$D_{va}$  : Coefficient binaire de diffusion de la phase vapeur.

$R$  : Constante des gaz parfait.

$T$  : Température.

$M_a$  : Masse molaire de l'air.

$M_v$  : Masse molaire de la vapeur.

$M$  : Masse molaire du milieu.

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation de l'eau.

$p_v$  : Pression partielle de vapeur d'eau.



**Chapitre III**



**Matériaux étudiés et protocole  
expérimental**

Les propriétés thermophysiques d'un matériau caractérisent son comportement et sa réaction face à un gradient de température. Les mesures de flux de chaleur, de densités de flux et de propriétés thermophysiques telles que la conductivité et/ou la diffusivité thermiques sont essentielles dans l'étude des procédés thermiques. Elles permettent de prévoir la manière avec laquelle le matériau va réagir face à un environnement donné. En effet, dans un contexte à la fois de développement durable et d'amélioration de l'isolation afin d'économiser de l'énergie, ces valeurs s'avèrent cruciales. Généralement, des paramètres thermophysiques sont déterminés à partir de l'analyse de réponse en température d'un matériau à une excitation thermique. Il est important de rappeler ici que la conductivité thermique intervient en régime permanent, tandis que la diffusivité thermique intervient en régime transitoire.

Afin de ne pas faire perdre le béton ces qualités du matériau porteur, il nous a paru nécessaire de mener une étude sur les caractéristiques mécaniques (à la compression) en parallèle de la caractérisation thermophysiques.

Avant de présenter l'ensemble de résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de ce travail, nous exposerons dans ce qui suit différentes méthodes de mesure des caractéristiques thermiques, hydriques et mécaniques des matériaux de construction.

### **III.1- COMPORTEMENT THERMIQUE**

#### **III.1.1- Technique expérimentale utilisée**

Le dispositif de mesure de la conductivité et de la diffusivité thermiques, est celui de la méthode "des boîtes" qui a été élaborée par le laboratoire d'Etude Thermiques et Solaires de l'université Claude Bernard, un prototype similaire à été monté dans notre laboratoire.

La méthode "des boîtes", que nous utilisons au laboratoire, est un dispositif qui permet d'atteindre à l'aide d'une même cellule de mesure, toutes les caractéristiques thermophysiques internes des matériaux, de un ou deux échantillons suivant la configuration de la cellule de mesure. La précision de mesure est comparable à celle obtenue par les méthodes conventionnelles (annexe B). Elle utilise des échantillons de tailles significatives, et les mesures se font dans les conditions réelles d'utilisation du matériau.

#### **Limites de la méthode**

Deux limites importantes de la méthode sont à considérer:

- Appropriée à des matériaux homogènes pas trop conducteurs ( $\lambda < 3W / m^0 c$ ).
- La précision est moins bonne quand la température augmente.

### III.1.2- Matériels et procédure expérimentale

La figure III.1 donne une vue générale du dispositif expérimental utilisé dans le cadre de ce travail. Ce dispositif est essentiellement constitué des éléments suivants :

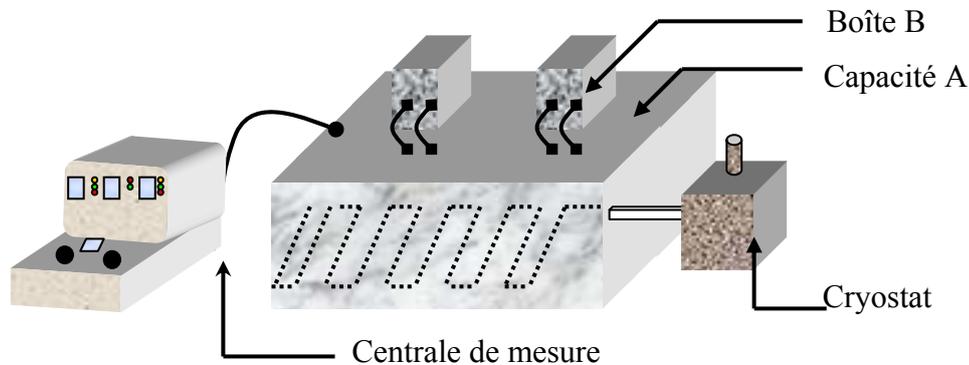


Figure III.1- Cellule de mesure par la méthode des boîtes

#### **III.1.2.1- Capacité isotherme**

C'est une enceinte fortement isolée par du "styrodur", de dimension  $2 \times 1 \times 0.45m$ , elle joue le rôle de l'ambiance froide maintenue à la température  $T=0^{\circ}C$  ( $\pm 0.1^{\circ}C$ ). Le refroidissement est assuré par un échangeur thermique placé à la base de la capacité, et dans lequel circule de l'eau glycolée. Il est alimenté par un cryostat.

#### **III.1.2.2- Boîtes chaudes**

Ce sont des boîtes en contre plaque, isolées de l'intérieur par du styrodur (excellent isolant), qui limite les pertes de chaleur par les surfaces des boîtes en contact avec l'extérieur. Chaque boîte contient une film chauffant et joue le rôle de l'ambiance chaude. L'échantillon testé est placé entre les deux ambiances. Le dispositif installé dans notre laboratoire est composé de deux boîtes identiques et permet ainsi de faire mesures simultanées.

#### **III.1.2.3- Capteurs de températures**

Les températures sont détectées par des thermosondes de platine. Dans chaque boîte trois sondes, deux de surface  $T_c$  (température chaude), et  $T_f$  (température froide), et une d'ambiance à l'intérieur de la boîte notée  $T_b$  sont placées. Plus une sonde notée  $T_a$  commune aux deux boîtes, et qui mesure l'ambiance de la salle, est utilisée.

### III.1.2.4- Echantillon E

Les échantillons à tester doivent avoir une forme parallélépipédique, de dimensions ( $27\text{cm} \times 27\text{cm}$ ) de côté et d'une épaisseur de 2 à 7 cm. Ils sont placés entre la boîte B et la capacité isotherme A, de tel sorte que les flux latéraux soient négligeables.

### III.1.3- Conductivité thermique

C'est le paramètre dont il faut le plus tenir compte pour le choix d'un matériau d'isolation thermique des bâtiments.

#### III.1.3.1- Evaluation de la conductivité thermique

L'équation fondamentale qui régit le transfert de chaleur en régime transitoire dans sa forme la plus générale s'exprime sous la forme :

$$\nabla(-\lambda_{app} \nabla T) + \rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = Q_j \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$\lambda_{app}$  : Conductivité thermique apparente du matériau (W/m. k).

$\rho c$  : Chaleur volumique du matériau à la température T.

$Q_j$  : Génération interne de la chaleur.

#### Hypothèses de travail

L'équation (III.1) est simplifiée en adoptant quelques hypothèses :

- L'étude des matériaux est entreprise en régime permanent.
- Transfert de chaleur unidirectionnel (hypothèse justifiée expérimentalement).
- Milieu supposé homogène et sans génération interne de chaleur.
- Conductivité thermique ne dépendant pas de la température et des variables d'espace.
- Parois latérales sans pertes thermiques (isolation utilisée).

On aboutit à l'équation finale :

$$\lambda_{app} \nabla T = 0 \quad (\text{III.2})$$

Cette équation ne s'applique que dans le cas d'un matériau homogène. Or le béton est un matériau composite pour lequel l'équation est à priori non valable. Cependant, l'équation de chaleur est exacte au niveau microscopique sur des volumes élémentaires du constituant homogène [46].

### ✚ Résolution de l'équation de la chaleur dans le cas d'une plaque

L'équation de la chaleur (III.2) se résout analytiquement dans le cas d'un échantillon simple dont les parois de surface S sont soumises à deux températures différentes. En régime permanent, le transfert de chaleur se fait suivant des lignes de flux perpendiculaires aux faces (figure III.2), c'est un écoulement de type monodimensionnel avec la température T variant linéairement en x.

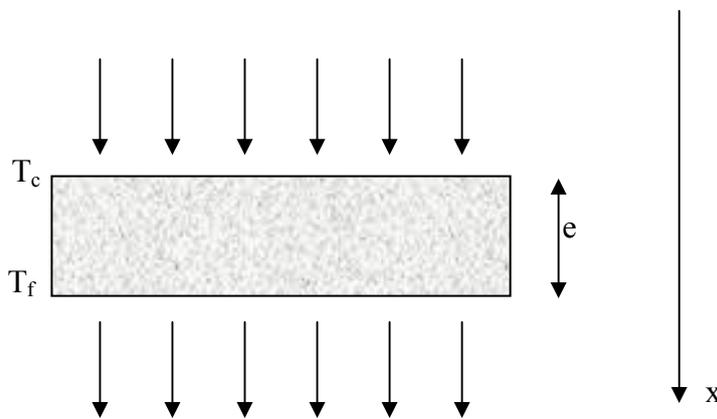


Figure III.2 – Ecoulement en régime permanent au travers d'un mur d'épaisseur e

En tenant compte des conditions aux limites, on en déduit :

$$T(x) = T_c + (T_f - T_c) \frac{x}{e} \quad (\text{III.3})$$

Le flux de chaleur par unité de temps vaut après la loi de Fourier :

$$d\phi = -\lambda \frac{dT}{dx} S \quad (\text{III.4})$$

En considérant qu'il n'y a pas de fuites par les parois latérales de l'échantillon, le flux de chaleur émis par la face chaude se trouve intégralement sur la face froide. Par intégration et en tenant compte des conditions aux limites, on obtient :

$$\phi = \frac{\lambda_{app}}{e} . S . (T_c - T_f) \quad (\text{III.5})$$

Pour les matériaux poreux, la conductivité thermique apparente s'écrit:

$$\lambda_{app} = \lambda_c + \lambda_v + \lambda_r + F \cdot \lambda_{diff} \quad (III.6)$$

Où  $\lambda_c$ ,  $\lambda_v$ ,  $\lambda_r$  et  $\lambda_{diff}$  sont respectivement les conductivités thermiques dues au transfert de chaleur par conduction pure, au transfert par convection, au rayonnement émis entre les parois des pores et aux effets d'évaporation condensation.

Nous supposant que les échanges dus au rayonnement et à la convection sont négligeables devant ceux par conduction, ceci est dû au faible écart de température et au faible volume de la boîte de mesure, de même que les effets d'évaporation condensation.

L'équation s'écrit alors:

$$\phi = \frac{\lambda_c}{e} \cdot S \cdot (T_c - T_f) \quad (III.7)$$

Cette configuration d'écoulement au travers d'un échantillon d'épaisseur  $e$  correspond à l'écoulement dans le dispositif de mesure utilisé.

### III.1.3.2- Étude expérimentale

#### a) Protocole expérimental

##### ➤ Etalonnage des sondes

Avant d'entamer les différentes manipulations nous avons procédé à l'étalonnage des diverses sondes utilisées:

- ◆ Etalonnage des sondes de surfaces:

Les sondes de surfaces  $T_c$  et  $T_f$  au niveau de chaque boîte sont fixées sur une même surface, généralement celle d'un échantillon parallélépipédique en polystyrène.

- ◆ Etalonnage des sondes d'ambiance:

Les sondes d'ambiances de la boîte  $T_b$ , de la capacité isotherme  $T_A$  et de l'ambiance de la salle  $T_a$  sont placées dans une même ambiance (à l'intérieur d'une même boîte).

Après quelques heures (2 à 4 heures) les températures se stabilisent, les températures des diverses sondes sont alors relevées. Les écarts entre les températures de surface d'une part et les températures d'ambiances sont relevées, et des corrections seront ainsi observées pour les mesures entreprises.

➤ **Détermination du coefficient de déperdition**

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. Dans un premier temps, ce coefficient est déterminé de manière théorique avec les formules de Garslaw et Jaeger [47], et celle de Langmuir [48]. Dans un second temps le coefficient C est calculé expérimentalement à l'aide d'un échantillon de polystyrène, dont les caractéristiques thermiques sont connues on obtient alors par ces deux approches les valeurs numériques suivantes:

|                             | <b>Valeur théorique</b> | <b>Valeur expérimentale</b> |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| <b>Coefficient C (W/°C)</b> | 0.16                    | 0.20                        |

Tableau III.1- Valeur du coefficient C

Le coefficient de déperdition thermique déduit expérimentalement est légèrement plus élevé que la valeur théorique. Ceci peut s'expliquer par des imperfections d'isolation du système. La détermination de la conductivité thermique du béton prend en compte les valeurs expérimentales des coefficients de déperdition thermique.

**b) Détermination expérimentale de la conductivité thermique**

On impose une température uniforme dans la boîte en modifiant la tension électrique V appliquée aux bornes de la plaque, une console indique la valeur de cette tension et un ohmmètre électronique permet de mesurer les résistances R de chaque boîte. On peut ainsi évaluer la quantité de chaleur dégagée par effet de joule dans le système.

Le gradient thermique imposé entre la boîte et l'enceinte crée un flux de chaleur entre les deux faces de l'échantillon. La mesure est réalisée en quelques heures (n'excédant généralement 3 à 6 heures) de façon à laisser le système se stabiliser et établir ainsi un régime permanent. Une vue d'ensemble de la cellule de mesure est donnée par la figure III.3.

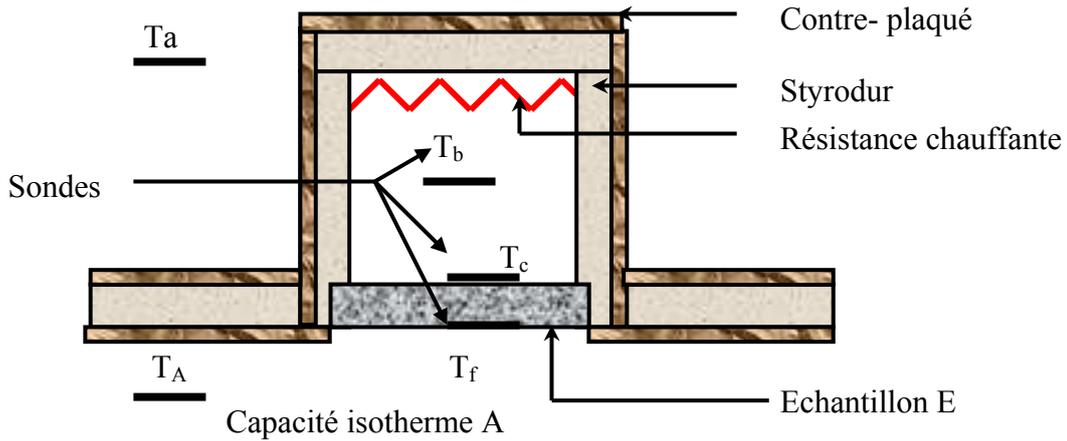


Figure III.3- Boîte de mesure de la conductivité thermique

Le régime permanent est obtenu par contrôle de l'évolution des températures  $T_b$  de la boîte et  $T_a$  de l'ambiance de la salle, il est atteint lorsque  $T_b - T_a < 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

La mesure est basée sur le principe de conservation de l'énergie dans le système constitué de la boîte en styrodur et de la plaque de béton. Les conventions d'écriture suivantes seront utilisées dans le cadre de ce travail.

$C$  : Coefficient global de déperdition thermique à travers les parois de la boîte.

$e$  : Epaisseur de l'échantillon.

$S_c$  : Surface corrigée de l'échantillon normale aux lignes de flux ( $0,0692 \text{ m}^2$ ).

En régime permanent, l'énergie fournie au système est dissipée à travers les parois de la boîte et à travers l'échantillon de béton. Le système reçoit l'énergie fournie par dissipation thermique dans la résistance (effet joule). En supposant que chaleur perdue à travers les parois de la boîte est  $C(T_b - T_a)$  et la chaleur passant à travers l'échantillon  $\lambda S(T_c - T_f)/e$ , on obtient alors:

$$\frac{V^2}{R} = C(T_b - T_a) + \frac{\lambda S_c (T_c - T_f)}{e} \quad (\text{III.8})$$

Finalement la conductivité thermique apparente en régime permanent est donnée par l'expression:

$$\lambda = \frac{e}{S_c (T_c - T_f)} \left[ \frac{V^2}{R} - C(T_b - T_a) \right] \quad (\text{III.9})$$

Avec:

$(T_c - T_f)$ : Différence de température entre les faces chaude et la face froide de l'échantillon.

$(T_b - T_a)$ : L'écart de température entre l'extérieur et l'intérieur de la boîte.

### **III.1.4- Diffusivité thermique**

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

Ainsi, le pouvoir isolant du matériau dépend non seulement de la valeur de la conductivité thermique mais également de la vitesse de transfert thermique traduite par la diffusivité thermique. L'intérêt de la notion de diffusivité thermique apparaît dans les problèmes de régime variable.

#### **III.1.4.1- Appareillage de mesure**

Le dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la diffusivité thermique est proche de celui de la conductivité thermique, à la différence que le couvercle est muni d'une lampe à incandescence de 1000 W et que les parois internes de la boîte sont réfléchissantes (figure III.4).

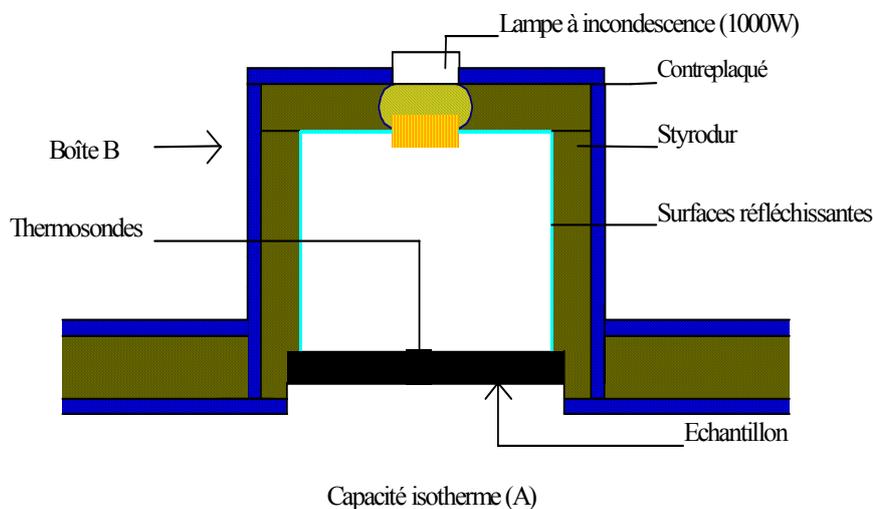


Figure III.4- Boîte de mesure de la diffusivité thermique

Les capteurs de températures sont deux sondes de surface à résistance en platine. Une est placée sur la face irradiée et l'autre sur la face non sollicitée.

Les hypothèses adoptées pour cette étude expérimentale sont:

- Le modèle est supposé linéaire : les grandeurs thermophysiques seront considérées comme étant indépendantes de la température. (Les élévations maximales de température restent de l'ordre de quelques degrés au dessus de la température d'équilibre).

- Les transferts sont supposés unidirectionnels.

- La face supérieure de l'échantillon est soumise au rayonnement thermique de la source impulsionnelle pendant un temps  $t_0$ .

- Les conditions d'essai sont telles qu'il faut laisser un régime permanent s'installer dans la boîte avant d'envoyer le flash.

La diffusivité thermique est déterminée à partir du dépouillement des thermogrammes de la face non irradiée en utilisant un modèle théorique.

### III.1.4.2- Méthodes d'identification des thermogrammes

Le modèle de Parker [49] fut à l'origine de ces techniques d'identification. Le calcul proposé par l'auteur fait les hypothèses suivantes :

- Le matériau est homogène.

- L'impulsion est assimilée à un pic de Dirac.

- L'énergie est apportée uniformément sur l'échantillon qui après l'impulsion est supposé adiabatique.

On considère un transfert de chaleur dans la direction  $x$  et on appelle  $\omega$  l'épaisseur de la couche ayant absorbée l'énergie lors de l'impulsion. A l'instant  $t=0$  la couche d'absorption est supposée à la température  $T(x)=T_0+DT$  où  $DT$  est l'augmentation de température due à l'impulsion énergétique.  $T_0$  est la température hors de la couche d'absorption à  $t=0$ .  $DT$  est donnée par l'équation suivante:

$$DT = \frac{E}{A\rho C_p \omega} \quad (\text{III.11})$$

Où:

$E$  : Energie absorbée.

$A$  : Section de l'échantillon qui reçoit la chaleur.

$C_p$ : Chaleur spécifique du matériau.

L'équation de diffusion de la chaleur au sein du matériau est résolue avec les conditions initiales précédentes.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{III.12})$$

Cette résolution est simplifiée par l'utilisation de la température  $T^*$  et du temps réduit  $t^*$  donnés par les équations :

$$T^*(e, t) = \frac{T(e, t) - T_0}{T_{\max} - T_0} \quad (\text{III.13})$$

$$t^* = \frac{\pi^2 a t}{e^2} \quad (\text{III.14})$$

Finalement la température réduite de la face arrière de l'échantillon est liée au temps réduit par l'équation :

$$T^*(e, t) = 1 + 2 \sum_n^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 t^*) \quad (\text{III.15})$$

La diffusivité thermique est calculée par l'équation III.16 qui fait intervenir l'épaisseur  $e$  de l'échantillon et le temps ( $t_{1/2}$ ) nécessaire pour que la face arrière atteigne la moitié de sa température maximale.

$$a = 0.139 \frac{e^2}{t_{1/2}} \quad (\text{III.16})$$

Cette approche fait abstraction des pertes de chaleur par conséquent d'autres méthodes ont été développées. Parmi lesquelles nous citerons la méthode des moments temporels partiels [50] et celle des temps partiels qui a été utilisée dans le cadre de ce travail, cette dernière est basée sur le modèle de Degiovanni que nous présentons dans ce qui suit.

### - Méthode de Degiovanni

Les équations données par Degiovanni [51], [52] prennent en compte les pertes de chaleurs sur toutes les faces d'un échantillon cylindrique. Les conditions aux limites ne sont plus adiabatiques mais font intervenir des coefficients d'échange de chaleur qui peuvent être différents sur les surfaces supérieure, inférieure et latérale. La détermination de la diffusivité fait intervenir des points particuliers de la courbe  $T=f(t)$ . En notant  $t_{1/3}$ ,  $t_{1/2}$ ,  $t_{2/3}$ , et  $t_{5/6}$  les temps nécessaires pour que la température de la face arrière atteigne les fractions correspondantes de la température maximale, Degiovanni propose trois équations permettant de calculer la diffusivité thermique.

$$a_1 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} (1.15t_{5/6} - 1.25t_{2/3}) \quad (\text{III.17})$$

$$a_2 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} (0.761t_{5/6} - 0.926t_{1/2}) \quad (\text{III.18})$$

$$a_3 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} (0.618t_{5/6} - 0.862t_{2/3}) \quad (\text{III.19})$$

## **III.2- COMPORTEMENT HYDRIQUE**

### **III.2.1- Techniques de mesure la teneur en eau**

La teneur en eau d'un matériau peut être définie par:

- Teneur massique

$$\theta(\%) = \frac{\text{Masse humide} - \text{masse sèche}}{\text{Masse humide}} \times 100$$

- Teneur en eau volumique

$$\omega\% = \frac{\text{Masse volumique apparente sèche}}{1000} \times \theta$$

De nombreuses techniques de mesure de la teneur en eau existent. Parmi celles-ci nous citerons à titre indicatif, la mesure de l'humidité par résonance magnétique (RMN) [53], par la méthode neutronique [54], par absorption de particules  $\gamma$  [55], par des méthodes électriques, la mesure de l'humidité par pesées successives, technique utilisée dans le cadre de ce travail.

Le processus consiste à plonger un échantillon dans une enceinte remplie d'eau à température ambiante jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, cet état correspond à l'état de saturation.

Par ailleurs l'état sec est obtenu par séchage dans une étuve ventilée jusqu'à ce que la masse ne varie plus.

Afin d'obtenir différentes teneurs en eau, les échantillons sont immergés dans l'eau pendant des temps déterminés.

### **III.3- COMPORTEMENT MECANIQUE**

Les matériaux composant un édifice peuvent être sollicités par différentes charges. Dans l'étude de l'équilibre externe et interne des solides constituant les constructions, il est donc nécessaire de connaître les réponses du matériau aux sollicitations mécaniques.

#### **III.3.1- Résistance à la compression**

L'essai a été réalisé sur les éprouvettes cylindriques. Elles sont centrées entre les plateaux de la presse et chargées de manière continue avec la charge maximale P, la résistance en compression est calculée à partir de la formule:

$$R_c = P/S \quad (III.20)$$

Avec:

P: Charge maximale.

S: Surface de compression.

R<sub>c</sub>: Résistance en compression.

La résistance mécanique à la compression a été étudiée pour une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur de formulation TOI 3, le résultat figure dans le tableau IV.2.

|                  |    |    |      |
|------------------|----|----|------|
| Résistance (MPa) | 21 | 22 | 22.5 |
|------------------|----|----|------|

Tableau IV.2- Valeur de la résistance mécanique pour la formulation TOI 3

### **III.4- ELABORATION DES ECHANTILLONS**

#### **III.4.1- Caractérisation des différents constituants**

##### **III.4.1.1- Les granulats**

Les granulats disponibles en Algérie sont en majorité issus du concassage de roches calcaires.

#### a) Les graviers

Les différents mélanges granulaires utilisés ont été élaborés à partir de 3 classes granulométriques 8/16, 5/15 et 15/25.

#### b) Les sables

Les sables utilisés sont des sables de carrière corrigés en incorporant un sable de mer fin. Une composition usuellement utilisée est de 85% sable de carrière et 15% sable de mer.

#### III.4.1.2- Les ciments

Les ciments utilisés proviennent de l'entreprise des ciments et dérivés Est « ERCE ». (Tableau III.3).

| Notation | Désignation              |
|----------|--------------------------|
| C01      | CPJ 45 de Hamma Bouziane |
| C02      | CPJ 45 Ain Touta         |
| C03      | CPJ 45 de Hadjar soud    |
| C04      | CRS Ain El Kebira        |
| C05      | CPJ 45 Ain El Kebira     |
| C06      | CPJ 45 Tebessa           |

Tableau III.3- Repérage des ciments

Dans le cadre de ce travail, les deux premiers ciments ont été utilisés. Les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques ainsi que la composition minéralogique de ces ciments sont détaillées sur les fiches techniques ci-jointes, délivrées par le fabricant.

## FICHE TECHNIQUE (AIN TOUTA/ CPJ 45)

### 1/. COMPOSITION CHIMIQUE

| ELEMENTS                       | TENEUR % |
|--------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 26.96    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.36     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.71     |
| CaO                            | 58.90    |
| MgO                            | 2.32     |
| SO <sub>3</sub>                | 2.00     |
| Na <sub>2</sub>                | -        |
| K <sub>2</sub> O               | -        |
| Chlorures                      | 0.00     |
| CaO libre                      | -        |
| Res. Insol                     | 10.91    |
| P.A.F                          | 2.15     |

### 2/. COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CLINKER

| C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 55.42            | 19.6             | 8.99             | 9.89              |

### 3/.ESSAIS PHYSIQUES

|                              |              |       |
|------------------------------|--------------|-------|
| <b>TEMPS DE PRISE</b>        | <b>DEBUT</b> | 2h:10 |
|                              | <b>FIN</b>   | 3h:15 |
| <b>EXPANSION LECHATelier</b> | <b>CHAUD</b> | 1.0   |
|                              | <b>FROID</b> | -     |
| <b>SURFACE SPEC.BLAIN</b>    | 3705         |       |
| <b>CONSISTANCE NORMALE</b>   | 25.20        |       |

### 4/. ESSAIS MECANQUES

|   |                 |       |
|---|-----------------|-------|
| <b>RESISTANCE A LA FLEXION (bars)</b>     | <b>2 JOURS</b>  | 53.0  |
|   | <b>7 JOURS</b>  | 71.0  |
|   | <b>28 JOURS</b> | 83.0  |
| <b>RESISTANCE A LA COMPRESSION (bars)</b> | <b>2 JOURS</b>  | 241.0 |
|   | <b>7 JOURS</b>  | 373.0 |
|   | <b>28 JOURS</b> | 458.0 |

## FICHE TECHNIQUE (HAMMA BOUZIANE/ CPJ 45)

### 1/. COMPOSITION CHIMIQUE

| ELEMENTS                       | TENEUR % |
|--------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 23.06    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.50     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.37     |
| CaO                            | 64.69    |
| MgO                            | 0.60     |
| SO <sub>3</sub>                | 2.54     |
| Na <sub>2</sub>                | -        |
| K <sub>2</sub> O               | -        |
| Chlorures                      | -        |
| CaO libre                      | 0.75     |
| Res. Insol                     | 1.91     |
| P.A.F                          | 1.50     |

### 2/. COMPOSITION MINERALOGIQUE DU CLINKER

| C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 57.35            | 20.77            | 9.94             | 7.95              |

### 3/.ESSAI PHYSIQUE

|                              |              |       |
|------------------------------|--------------|-------|
| <b>TEMPS DE PRISE</b>        | <b>DEBUT</b> | 2h:59 |
|                              | <b>FIN</b>   | 4h:14 |
| <b>EXPANSION LECHATelier</b> | <b>CHAUD</b> | 1.0   |
|                              | <b>FROID</b> | 0.0   |
| <b>SURFACE SPEC.BLAIN</b>    | 3542         |       |
| <b>CONSISTANCE NORMALE</b>   | 26.00        |       |

### 4/. ESSAIS MECANQUES

|   |                 |       |
|---|-----------------|-------|
| <b>RESISTANCE A LA FLEXION (bars)</b>     | <b>2 JOURS</b>  | 48.0  |
|   | <b>7 JOURS</b>  | 68.0  |
|   | <b>28 JOURS</b> | 94.0  |
| <b>RESISTANCE A LA COMPRESSION (bars)</b> | <b>2 JOURS</b>  | 216.0 |
|   | <b>7 JOURS</b>  | 406.0 |
|   | <b>28 JOURS</b> | 594.0 |

### **III.4.2- Formulation des échantillons**

Les caractéristiques que le béton acquiert à sa maturité, c'est-à-dire à l'état du béton durci, dépendent de la nature de ses constituants.

Etablir la composition d'un béton consiste à déterminer les divers proportions de granulats (sable et gravillon), de ciment et d'eau qu'il importe de mettre en présence pour obtenir un mètre cube de béton.

Les mesures des propriétés thermiques ont porté sur des matériaux consolidés. Nous avons testé onze (11) échantillons.

#### **III.4.2.1- Béton classique**

Trois séries d'éprouvettes ont été confectionnées avec la même composition. En utilisant pour les deux premiers le ciment de Hamma avec des granulats différentes, et pour la troisième le ciment de Ain Touta.

La formulation des échantillons est présentée respectivement dans les tableaux III.4, III.5 et III.6.

#### **-Pour le ciment de Hamma**

| Désignation  | Nombre d'échantillon | Gravier (litre) |      | Sable (litre) | Ciment (kg) | Eau (litre) |
|--------------|----------------------|-----------------|------|---------------|-------------|-------------|
|              |                      | 15/25           | 5/15 |               |             |             |
| <b>TOI 1</b> | 2                    | 5.7             | 17.2 | 11.4          | 10.00       | 5.00        |
| <b>TOI 2</b> | 1                    | 14.3            | 8.6  | 11.4          | 10.00       | 5.00        |

Tableau III.4- Formulation des échantillons à base de ciment de Hamma

| Désignation  | Nombre d'échantillon | Gravier (kg) |      | Sable de carrière (kg) | Ciment (kg) | Eau (litre) |
|--------------|----------------------|--------------|------|------------------------|-------------|-------------|
|              |                      | 15/25        | 8/16 |                        |             |             |
| <b>TOI 3</b> | 5                    | 16.8         | 16.2 | 17.8                   | 10.00       | 6.00 à 7    |

Tableau III.5- Formulation des échantillons à base de ciment de Hamma

**-Pour le ciment de Ain Touta**

| Désignation | Nombre d'échantillon | Gravier (kg) |      | Sable de carrière (kg) | Ciment (kg) | Eau (litre) |
|-------------|----------------------|--------------|------|------------------------|-------------|-------------|
|             |                      | 15/25        | 8/16 |                        |             |             |
| TOI 4       | 1                    | 15           | 16   | 17                     | 10          | 7.00        |

Tableau III.6- Formulation des échantillons à base de ciment de Ain Touta

**III.4.2.2- Béton allégé avec polystyrène**

Pour ces nouveaux échantillons nous avons rajouté aux compositions précédentes des billes de polystyrène.

| Désignation | Nombre d'échantillon | Gravier (kg) |      | Sable de carrière (kg) | Ciment (kg) | Eau (litre) | Polystyrène (kg) |
|-------------|----------------------|--------------|------|------------------------|-------------|-------------|------------------|
|             |                      | 15/25        | 8/16 |                        |             |             |                  |
| TOI 5       | 2                    | 15           | 16   | 17                     | 10          | 7.00        | 2.5              |

Tableau III.7- Formulation des échantillons de béton allégé



**Chapitre IV**



**Résultats et discussion**

Pour répondre à l'objectif fixé dans le cadre de cette recherche, à savoir le comportement hygrothermique de matériaux de construction, trois types de matériaux ont été élaborés. Des échantillons de béton avec divers granulats, divers ciments et un béton allégé à base de polystyrène "bétostyrène".

Des mesures expérimentales de la conductivité thermique et de diffusivité thermique à différentes teneurs en eau ont été entreprises.

## IV.1- LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

### IV.1.1- Influence de la masse volumique

Avant d'entamer les essais du comportement thermique des divers échantillons élaborés, en présence d'humidité, nous avons cherché à connaître l'effet de la masse volumique sur la conductivité thermique d'un matériau poreux.

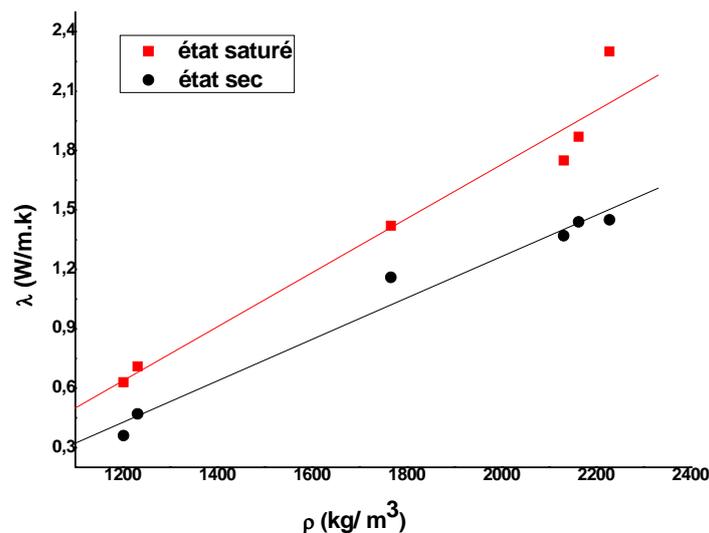


Figure IV.1- Influence de la masse volumique à l'état sec et saturé sur la conductivité thermique

Les résultats présentés sur les courbes de la figure IV.1, montrent sans ambiguïté que la conductivité thermique augmente en fonction de la masse volumique apparente. Il est évident que le facteur déterminant dans cette croissance est la porosité du matériau qui diminue au fur et à mesure que le matériau est dense. La porosité étant liée à la masse volumique apparente par la relation théorique :

$$P_T = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_{th}}$$

$\rho_a$  et  $\rho_{th}$  étant respectivement les masses volumiques apparente et théorique du matériau ; plus la masse volumique apparente augmente et plus la porosité diminue. La densification du matériau obture les pores et élimine l'air qui s'y trouve.

En outre, l'observation de ces courbes montrent que la conductivité thermique du béton à l'état saturé est plus élevée que celle du béton à l'état sec. Ceci s'explique aisément par le fait qu'en ajoutant de l'eau au béton sec, nous remplaçons un constituant de faible conductivité thermique (conductivité thermique de l'air de l'ordre de 0.026 W/m. k) par un constituant de beaucoup plus grande conductivité (l'eau de conductivité thermique égale à 0.6 W/m.k), trente fois supérieure à celle de l'air sec. Il en résulte une augmentation de la conductivité thermique globale du matériau.

#### IV.1.2- Etude statistique

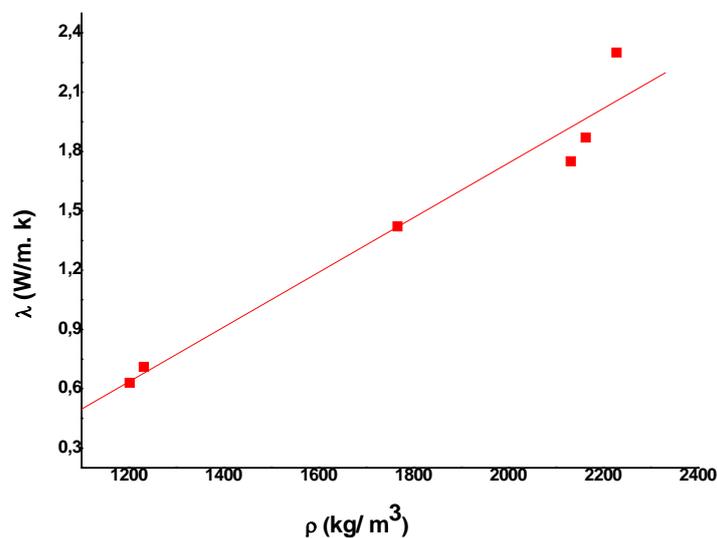


Figure IV.2- Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la masse volumique à l'état saturé

L'étude statistique montre que l'équation  $\lambda_a = A + B\rho_a$ , donne une meilleure approximation de l'évolution réelle de la conductivité thermique apparente en fonction de la masse volumique. Cette équation présente le plus grand coefficient de corrélation : 98.85 %.

Les valeurs numériques des paramètres A, B sont respectivement:

A= - 0.82738 ; B= 0.00105.

### IV.1.3- Influence de l'humidité

Nous avons entrepris des mesures de conductivité thermique sur des échantillons de béton de différentes formulations, et à différents teneurs en eau.

#### **IV.1.3.1- Béton classique**

La figure IV.3 donne l'allure des courbes expérimentales exprimant la variation de la conductivité thermique apparente  $\lambda$ , en fonction de la teneur en eau, à température moyenne voisine de l'ambiance, de deux échantillons de béton pour la formulation TOI 1.

Les courbes obtenues de forme générale très proches de celles trouvées dans la littérature [11], [56], [57], [58] montrent une augmentation de la conductivité thermique avec la croissance de la teneur en eau. En outre elles permettent d'observer un accroissement très important pour de faibles teneurs volumiques en eau (0- 10 %), puis une augmentation plus lente pour des valeurs moyennes de teneurs en eau et de nouveau une croissance plus rapide pour des teneurs proches de l'état de saturation.

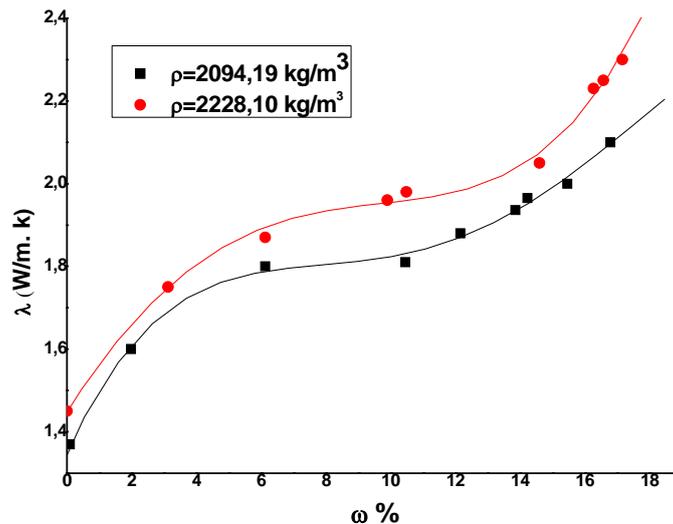


Figure IV.3- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité pour la formulation TOI 1

Par ailleurs, l'effet de l'épaisseur est nettement mis en évidence sur la figure IV.4, qui montre une croissance de la conductivité thermique quand l'épaisseur augmente.

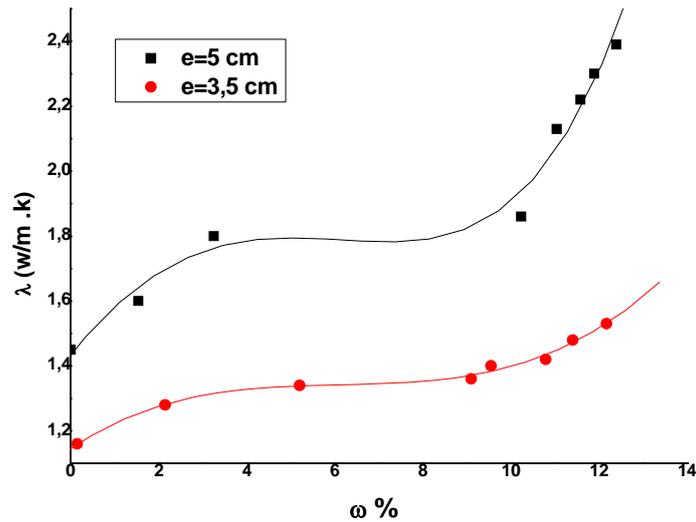


Figure IV.4- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité pour la formulation TOI 3

Nous avons également entrepris des mesures de conductivité thermique en fonction de la teneur en eau pour des bétons de formulations différentes, TOI 2 (figure IV.5) et TOI 4 (figure IV.6)

La forme générale de la courbe de variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau illustrée par les figures IV.5 et IV.6 très proche de celles trouvées pour les formulation TOI 1 et TOI 3.

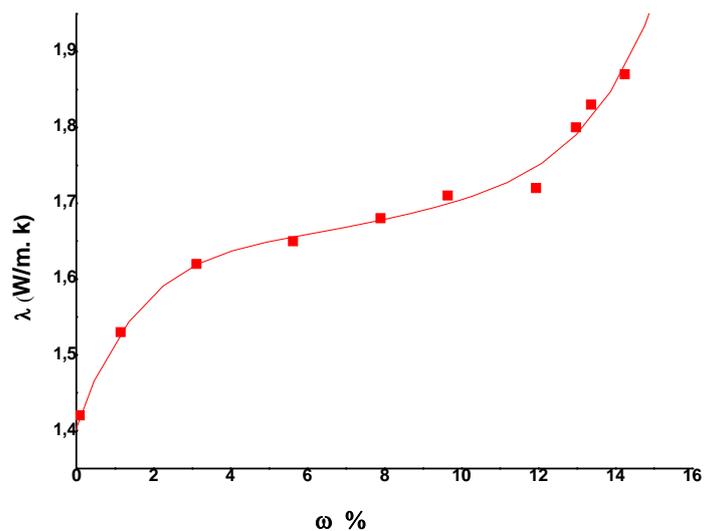


Figure IV.5- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité pour la formulation TOI 2

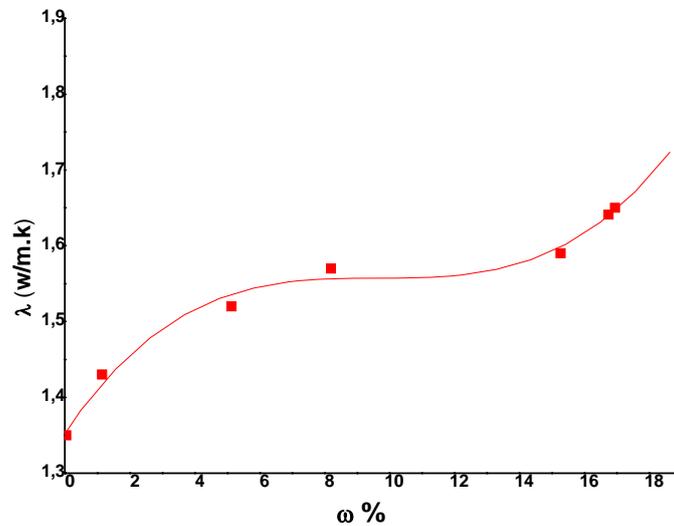


Figure IV.6- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité pour la formulation TOI 4

Tous les résultats obtenus montrent clairement que la variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau n'est pas linéaire [59].

Selon la quantité d'eau présente dans le matériau, on distingue trois répartitions des phases liquide et gazeuse.

Dans le cas d'un milieu saturé ou quasi saturé, la phase liquide occupe la quasi-totalité du réseau poreux. Les quelques bulles d'air persistantes sont collées le long des parois de la phase solide. La phase liquide est connexe, contrairement à la phase gazeuse. Dans le cas où la phase liquide et la phase gazeuse seraient présentes toutes les deux d'une manière non négligeable, on parle de fixation funiculaire. Ceci signifie que des anneaux de liquide entourent les grains. Les deux phases (liquide et gazeuse) sont connexes. Dans le cas où la phase gazeuse occuperait un espace très nettement supérieur à celui à la phase liquide, on parle de fixation pendulaire. La phase liquide sert de contact entre les grains et de nombreux ménisques sont observables. On considère que la phase gazeuse est non connexe [46].

La distribution de l'humidité dans les matériaux poreux révèle quatre structures différentes :

- l'état sec où le transfert de chaleur s'effectue par conduction pure aux niveaux des points de contact entre les granulats formant le matériau.
- L'addition d'eau au milieu sec entraîne la formation autour des points de contact d'un ménisque liquide qui représente un pont thermique, d'où l'augmentation brutale de la conductivité thermique apparente de certains matériaux pour les faibles teneurs en eau.
- En augmentant l'humidité du matériau, la surface mouillée s'élargit autour des points de contact favorisant moins le transfert de chaleur par conduction. Il en résulte ainsi une augmentation moins importante des propriétés thermiques pour les moyennes teneurs en eau.
- Quand la teneur en eau atteint une valeur qui correspond à la formation de chemins continus (état de saturation), la conductivité thermique augmente de nouveau plus rapidement.

#### IV.1.3.2- Béton allégé

Nous présentons sur la figure IV.7 les valeurs de la conductivité thermique d'un béton allégé (formulation TOI 5) mesurées à différents taux d'humidité. La forme générale des courbes obtenues est proche de celle du béton classique étudié. Une comparaison des courbes de la figure IV.6 avec celles de la figure IV.7 permet de conclure que l'ajout de polystyrène au béton conduit à de meilleures qualités d'isolation.

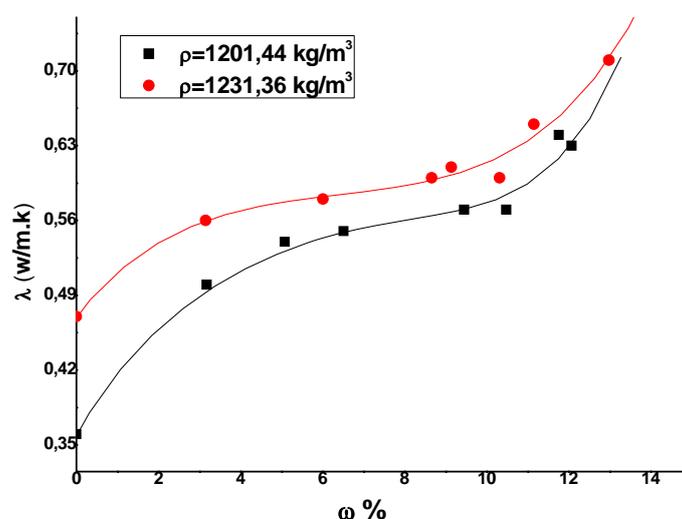


Figure IV.7- Variation de la conductivité thermique en fonction de l'humidité pour la formulation TOI 5

## IV.1.4- Effet des différents ajouts sur la conductivité thermique

### IV.1.4.1- Effet des granulats

La taille des granulats a une influence sur les propriétés thermiques des matériaux de construction. La figure IV.8 permet d'observer que les propriétés du béton réalisé avec les granulats de classe granulaire 8/16 sont meilleures que celui avec des granulats 5/15.

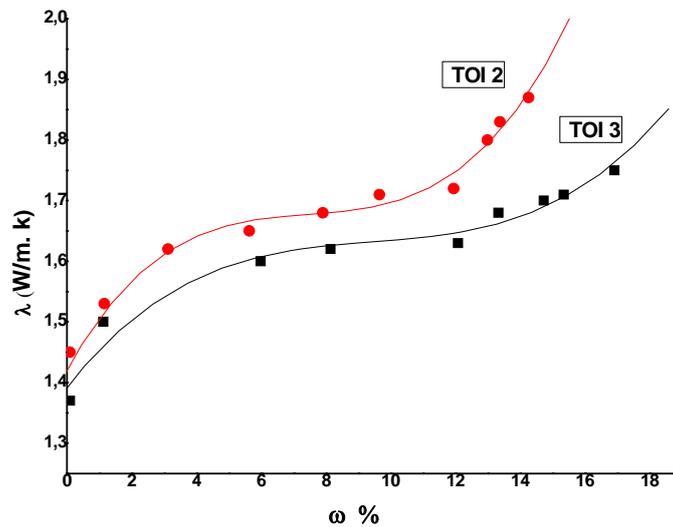


Figure IV.8- Comparaison de l'effet de type de granulats

### IV.1.4.2- Effet du type de ciment

L'effet du type de ciment est nettement mis en évidence sur la figure IV.9 qui montre que la conductivité thermique du béton à base de ciment de Hamma est plus élevée que celle du béton conçu avec le ciment d'Ain Touta et qui a par conséquent de meilleures qualités d'isolation.

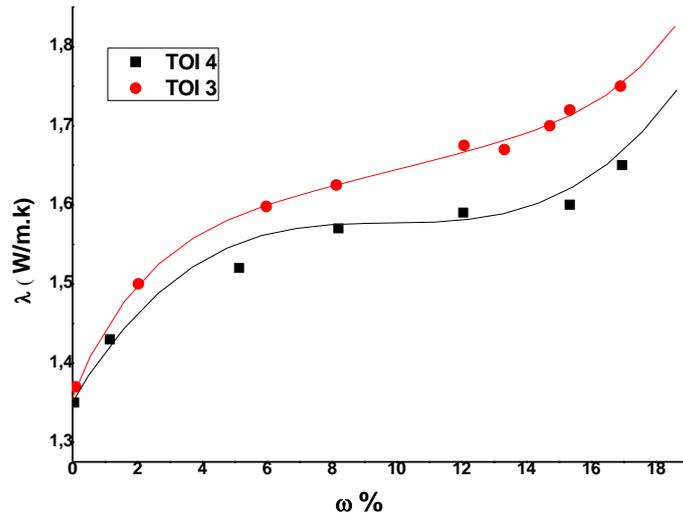


Figure IV.9- Comparaison de l'effet de type de ciment

#### IV.1.4.3- Effet de l'ajout des billes de polystyrène

L'ajout de granulats légers (polystyrène) a non seulement une influence directe sur la masse volumique des bétons mais également et comme le montre la figure IV.10 sur la conductivité thermique du matériau.

L'une des caractéristiques les plus importantes des billes de polystyrène est sa masse volumique très basse de 10 à 15 kg/m<sup>3</sup>. Le grand nombre de cellules à l'intérieur des billes confère un haut pouvoir calorifuge [60].

Les billes de polystyrène ne possèdent pas de résistance de grain si bien que le polystyrène ne sert qu'à la formation d'espaces isolants dans les bétons constitués (béton allégés).

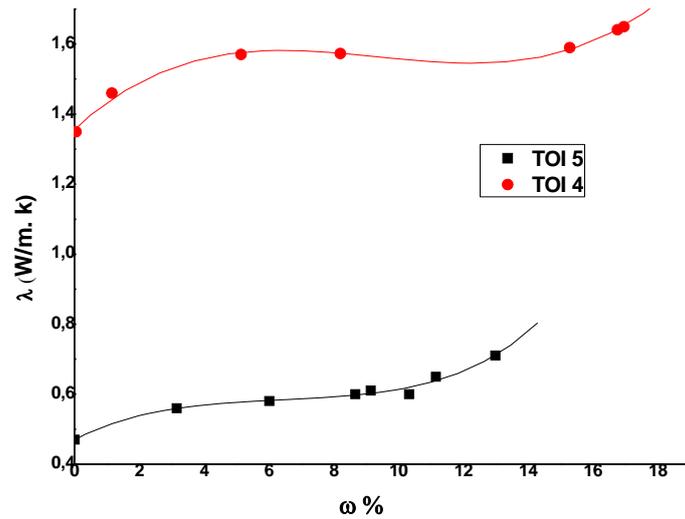


Figure IV.10- Effet de fibre sur la conductivité thermique

## IV.2- LA RESISTANCE THERMIQUE

Nous rappelons que la résistance thermique a pour expression:

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (IV.1)$$

### IV.2.1- Influence de l'épaisseur

L'effet de l'épaisseur sur la résistance thermique du matériau béton a été également étudié. Pour cela des mesures de conductivité thermique d'échantillons de béton élaborés à différentes épaisseurs ont été effectuées à l'état sec pour la formulation TOI 3, la résistance thermique est déduite de la relation IV.1.

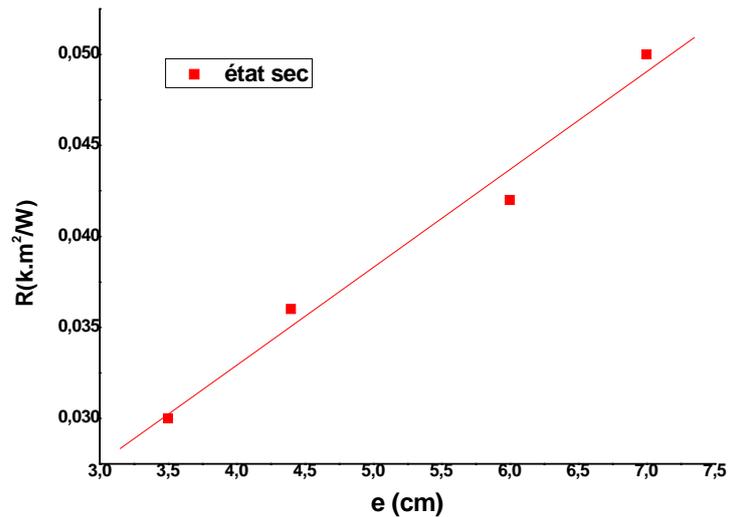


Figure IV.11- Effet de l'épaisseur sur la résistance thermique pour la formulation TOI 3

Les résultats obtenus permettent de remarquer que l'augmentation de l'épaisseur conduit à un accroissement linéaire de la résistance thermique. Ce qui justifié, en se referant à l'expression de la résistance thermique (équation IV.1).

#### **IV.2.2- Influence de l'humidité**

L'observation des courbes de la figure IV.12 présentant la variation de la résistance thermique en fonction de la teneur volumique en eau montre une forte décroissance de la résistance thermique quand l'humidité augmente.

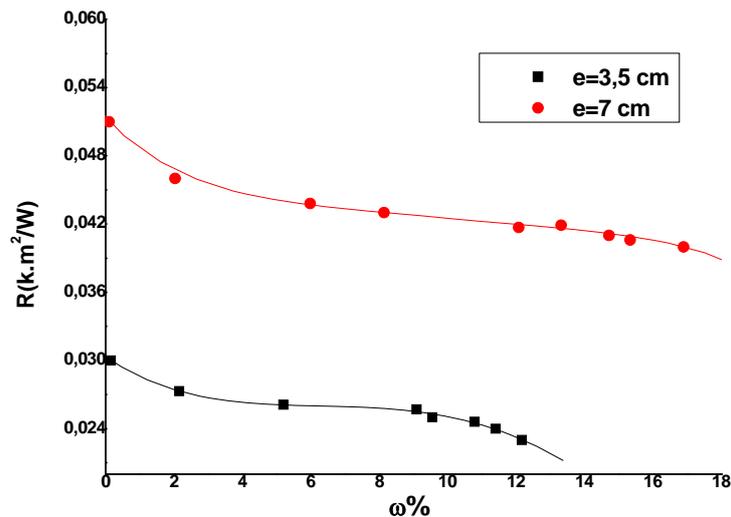


Figure IV.12- Variation de la résistance thermique en fonction de l'humidité pour la formulation TOI 3

La résistance thermique d'un mur de 7 cm, d'épaisseur passe de 0.052 k. m<sup>2</sup>/W à l'état sec, à 0.04 k. m<sup>2</sup>/W à l'état saturé. Ainsi, un élément de construction (paroi) est d'autant plus " résistant thermiquement" qu'il est plus sec.

En effet, en se referant d'un part à l'expression de la résistance thermique en fonction de la conductivité thermique (équation IV.1) et sachant d'autre part que la conductivité d'un matériau à l'état humide est nettement plus élevée que celle du matériau à l'état sec, il en résulte que la résistance thermique de ce dernier est moindre (moins isolant).

#### **IV.2.3- Influence de la formulation**

L'analyse des courbes illustrant la variation de la résistance thermique en fonction de l'humidité de trois échantillons élaborés avec des formulations différentes permet de constater d'une part que la résistance thermique d'un béton à base du ciment d'Ain Touta est plus élevée que celle d'un béton constitué du ciment de Hamma et d'autre part que le bétostyrène à de meilleurs qualités d'isolation (résistance thermique plus grande). Ces résultats confirment ceux obtenus précédemment.

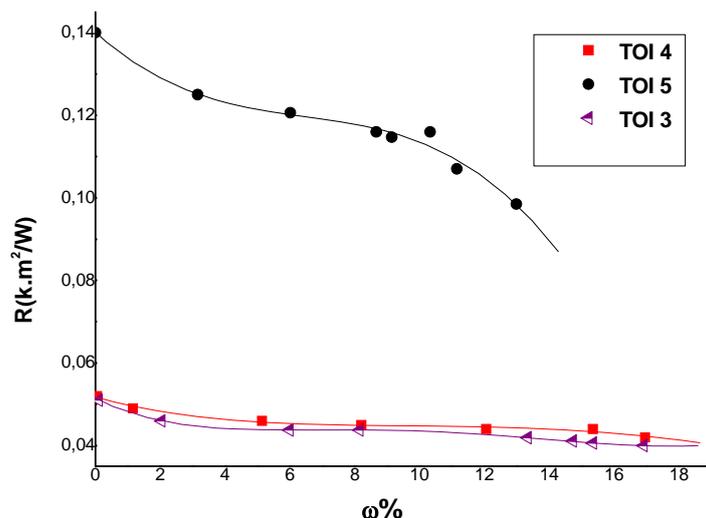


Figure IV.13- Comparaison de l'effet de la formulation sur la résistance thermique

### IV.3- LA DIFFUSIVITE THERMIQUE

Dans le cadre de ce travail, des mesures de diffusivité thermique de quelques échantillons ont été également entreprises.

Principaux résultats obtenus à l'état sec sont regroupés dans le tableau IV.1

|                  | $\rho_{\text{sec}}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | e (cm) | $a \times 10^7$ (m <sup>2</sup> /s) |
|------------------|--|--------|-------------------------------------|
| Béton            | 2100                                     | 4      | 4.39                                |
| Béton allégé BA1 | 1570                                     | 4      | 4.16                                |
| Béton allégé BA2 | 1225                                     | 4.4    | 3.47                                |

Tableau IV.1- Diffusivité thermique de béton et de bétostyrène



**Annexe A**



**Transferts couplés**

## **A.1- COUPLAGE DES TRANSFERTS**

Différentes approches pour décrire les transferts couplés de chaleur et de masse sont proposées dans la littérature. La mise en place des équations de couplage des différents transferts est essentiellement le fruit du travail de quatre chercheurs : Krischer et Kroll [43], Philip et DeVries [44] et Luikov [45]. Les formulations exprimant les différents bilans, proposées par ces équipes, présentent de nombreuses analogies. Ces trois théories supposent que le milieu poreux est continu et localement en équilibre thermodynamique.

### **A.1.1- Modèle de Krischer**

Cette théorie est basée sur l'analyse des transferts de chaleur et de masse d'une grande variété de milieu poreux. Elle suppose que l'humidité peut se déplacer sous forme liquide par capillarité, et sous forme vapeur sous l'action d'un gradient de concentration en vapeur. Les flux de vapeur et de liquide ont respectivement pour expressions :

$$\vec{j}_l = -D_l \rho_l \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) \quad (\text{A.1})$$

$$\vec{j}_v = -D_v \rho_v \overrightarrow{\text{grad}}(P_v) \quad (\text{A.2})$$

Avec  $D_v$  et  $D_l$  respectivement les valeurs des coefficients de diffusion de la vapeur et du liquide. La valeur de  $P_v$  peut être déterminée à l'aide des isothermes de sorption.

Cette approche fut le point de départ de plusieurs théories, en particulier celle de Berger, qui accepte les hypothèses émises par Krischer en ce qui concerne le transport de l'humidité en considérant également que le liquide peut se déplacer par diffusion.

### **A.1.2- Modèle de Philip et De Vries**

Ce modèle propose une description des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux non saturés. Cette approche est basée sur l'étude des comportements thermique et hydrique des sols pour lesquels le mouvement de l'humidité est supposé s'effectuer par capillarité et diffusion ou sous l'action des gradients d'humidité et de température et également de gravité. Les flux de liquide et de vapeur sont calculés individuellement, ce qui permet d'obtenir le taux de changement de phase.

Les flux de liquide et de vapeur, en fonction des gradients d'humidité et de température ont pour expression :

$$\vec{j}_l = -D_l \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) - D_{LT} \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(T) - D_i \quad (\text{A.3})$$

$$\vec{j}_v = -D_v \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) - D_{vT} \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{A.4})$$

Les coefficients  $D_l$  et  $D_{LT}$  de migration de la phase liquide sont déterminés à partir de la courbe de succion capillaire.

Le système d'équations gouvernant la migration de l'humidité et de chaleur est tel que :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} \left[ D_m \left[ \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) + D_{mT} \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right] \right] \quad (\text{A.5})$$

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left[ D_T \left( \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) \right] + L_v \text{div} \left[ D_m \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) \right] \quad (\text{A.6})$$

Avec :

$D_T$  et  $D_m$  : Etant respectivement les diffusivité thermiques et massique.

### A.1.3- Modèle de Luikov

Luikov a mis en évidence le phénomène de thermo diffusion et établit qu'un thermo gradient provoque le déplacement de l'humidité à l'intérieur du matériau.

Pour modéliser les transferts de chaleur et de masse dans les corps poreux, il propose la division des flux de liquide et de vapeur en deux parties, l'une induite par un gradient de concentration, et l'autre par un gradient thermique ; ce qui donne le système d'équations suivant :

$$\vec{j}_l = -D_l \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) - D_{LT} \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{A.7})$$

$$\vec{j}_v = -D_v \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(\theta) - D_{vT} \rho_s \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{A.8})$$

Avec :

$\rho_s$  : Masse volumique du solide sec.

$D_{LT}$  : Coefficient de thermo migration du liquide.

$D_{vT}$  : Coefficient de thermo migration de vapeur.

Ce système d'équations est ensuite associé aux bilans d'énergie et de matière. Cependant il ne donne pas accès aux taux de changement de phase. C'est pourquoi Luikov fait intervenir un paramètre supplémentaire.

Le système équations différentielles peut être formulé comme suit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} \left[ D_m (\overrightarrow{\text{grad}}(\theta) + \delta_s \overrightarrow{\text{grad}}(T)) \right] \quad (\text{A.9})$$

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left[ D_T (\overrightarrow{\text{grad}}(\theta)) \right] - L_v \varphi \rho_s \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{A.10})$$

Avec :

$L_v$  : La chaleur latente de vaporisation.

$D_m = D_v + D_l$  : Le coefficient de diffusion total.

$\delta_s = \frac{D_{VT} + D_{LT}}{D_v + D_l}$  : Le coefficient de thermo migration.

## **Annexe B**

**Techniques de mesure des propriétés  
thermiques**

## **B.1- TECHNIQUES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE**

De nombreuses méthodes expérimentales de détermination de la conductivité thermique des matériaux sont utilisées. La diversité de ces techniques dans leur principe et leur théorie est telle qu'il est toujours très difficile de procéder à une classification unique. Le mode de chauffage de matériau (électrothermique, photothermique) et la nature du régime obtenu sont les plus habituellement utilisés, ce qui permet généralement de considérer deux grandes catégories.

Nous allons exposer dans ce qui suit quelques méthodes de mesure de ces propriétés.

### **B.1.1- Méthodes en régime permanent**

Dans ces méthodes le temps n'intervient pas, les expressions permettant de calculer la conductivité découlent directement de la loi de Fourier, ce qui facilite sa détermination à partir d'un équipement expérimental très simple. Il existe cependant deux inconvénients à ce type de régime, l'établissement de l'équilibre thermique est parfois très long et les mesures ne peuvent être effectuées que sur des échantillons de dimensions relativement importantes. Parmi ces méthodes nous pouvons citer :

#### **B.1.1.1- La plaque chaude gardée**

Cette technique est particulièrement adaptée à la détermination de la conductivité thermique de matériaux isolants [61]. Le principe de l'appareillage consiste à reproduire les conditions du transfert de chaleur à travers une plaque de surface infinie prise en sandwich entre deux plans parallèles et isotherme. C'est le cas d'un champ thermique uniforme et unidirectionnel. En pratique le montage expérimental se compose de deux plaques froides B et d'une plaque chaude A (figure B.1) portées respectivement aux températures constantes  $T_A$  et  $T_B$ . Deux échantillons identiques d'épaisseur connue  $e$  sont placés entre l'élément chauffant (plaque chaud A) et les sources froides (plaque B). L'ensemble est isolé thermiquement pour réduire l'effet perturbateur de l'ambiance. On mesure le flux de chaleur  $Q$  dissipé par effet de Joule dans l'élément chauffante et qui se divise en deux parties égales traversant chacune un échantillons, la conductivité thermique est déterminée par la loi de Fourier:

$$\lambda = \frac{e}{2S\Delta T} Q \quad (\text{B.1})$$

$\Delta T$  : Etant la différence de température des faces chaudes et froides.

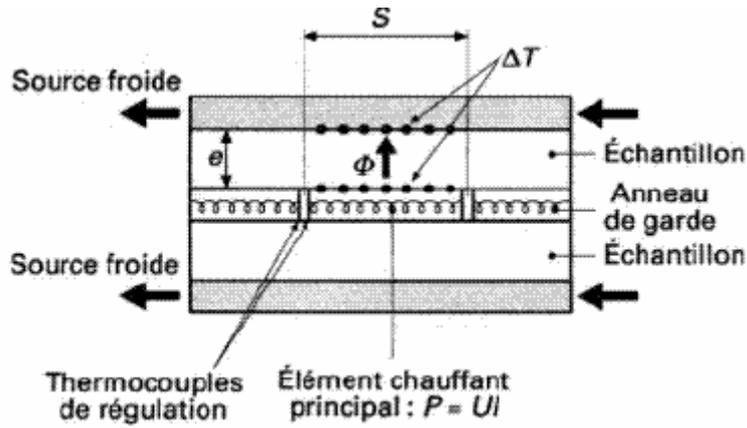


Figure B.1- La plaque chaude gardée

### B.1.1.2- Le fil chaud

On applique un échelon de flux de chaleur constant au fil métallique chauffant de rayon  $r_0$  situé dans l'axe d'un échantillon cylindrique (figure B.2). On peut considérer que le transfert au centre de l'échantillon autour du fil est radial. L'échantillon est limité à l'extérieur par un cylindre de rayon  $r_c$  porté à la température constante  $T_c$ . La température du fil chauffant peut être déterminée en mesurant la résistance du fil chauffant. La conductivité thermique est calculée par l'expression suivante:

$$\lambda = \frac{Q \ln(r_c / r_f)}{2\pi(T_f - T_c)} \quad (B.2)$$

$Q$ , étant la puissance thermique par unité de longueur dégagée dans le matériau.

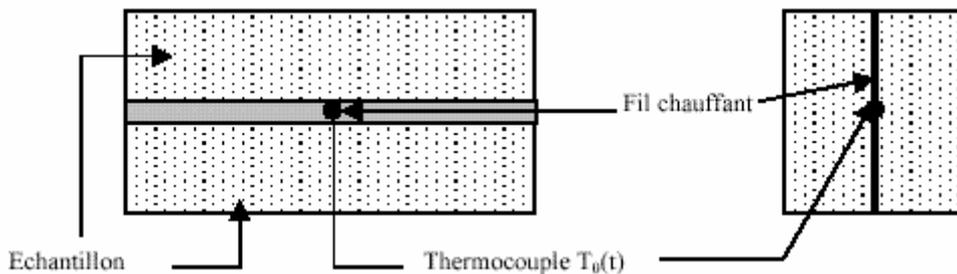


Figure B.2- Méthode du fil chaud

### B.1.2- Méthodes en régime instationnaire

Ces méthodes consistent à appliquer sur un échantillon à l'équilibre une perturbation thermique et à mesurer une ou plusieurs températures ou flux en fonction du temps. Les

perturbations peuvent être classées suivant leur type, échelon (flux constant), Dirac (flux impulsionnel), périodique ou encore de forme quelconque mais finie.

Ces méthodes sont plus rapides, les variations de température sont mesurées puis comparées à des modèles théoriques. Dans ce qui suit, nous présenterons quelques méthodes conduisant à la détermination directe de la conductivité thermique.

### B.1.2.1-Fil chaud

Cette méthode de mesure de la conductivité thermique peut être appliquée aussi bien pour les solides que pour les liquides. Un mince fil conducteur chauffé par effet de Joule est situé dans l'axe d'une longue enceinte cylindrique chauffante remplie du matériau dont on veut mesurer la conductivité. Un flux radial de chaleur s'établit. Simultanément, on relève la variation de la température du fil, soit par un thermocouple soudé sur le fil, soit directement par la mesure de la résistance du fil.

Dans le cas du fil chaud, la géométrie est cylindrique, et on montre que pour les temps longs, la température peut être approximée par la relation [55].

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln T \quad (\text{B.3.a})$$

$$\frac{Q}{4\pi\lambda} = \frac{\Delta T}{\Delta \ln T} = \text{tg } \alpha \quad (\text{B.3.b})$$

Il en résulte que la conductivité thermique est donnée par l'expression suivante:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi g \alpha} \quad (\text{B.3.c})$$

### B.1.2.2- Méthodes à deux fluxmètres

Dans cette technique, l'échantillon d'épaisseur  $e$ , est soumis brutalement au contact de deux éléments, l'un chaud et l'autre froid respectivement aux températures imposées et uniformes  $T_c$  et  $T_f$ . Deux fluxmètres disposés sur les surfaces de contact de l'échantillon avec les plaques, (figure B.3) mesurent les densités du flux thermique traversant l'échantillon à ses frontières en fonction du temps exprimés par:

$$q_c = q(0,t) = \lambda \frac{T_c - T_f}{e} \left[ 1 - 2 \exp\left(-\frac{a\pi^2 t}{e^2}\right) + 2 \exp\left(-\frac{4a\pi^2 t}{e^2}\right) \right] \quad (\text{B.4.a})$$

$$q_f = q(e,t) = \lambda \frac{T_c - T_f}{e} \left[ 1 + 2 \exp\left(-\frac{a\pi^2 t}{e^2}\right) + 2 \exp\left(-\frac{4a\pi^2 t}{e^2}\right) \right] \quad (\text{B.4.b})$$

$a$ , Etant la diffusivité thermique du matériau.

On montre que  $q_c$  et  $q_f$  atteignent leurs valeurs finales en régime stationnaire au même temps et que la constante de temps associée est:

$$\tau = \frac{\rho c_p e^2}{\lambda \pi^2} \quad (\text{B.4.c})$$

La mesure de  $\tau$  permet la détermination de la conductivité  $\lambda$

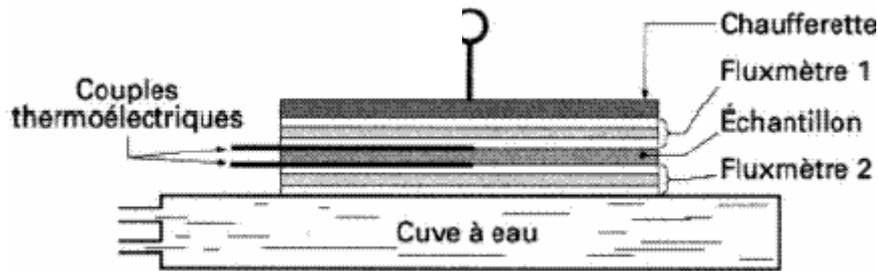


Figure B.3- Méthode à deux fluxmètres

## **B.2- TECHNIQUES DE MESURE DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE**

Les méthodes expérimentales de détermination directe de la diffusivité thermique d'un solide sont très nombreuses. Dans le cas où la valeur de  $\rho C_p$  est connue, la conductivité peut être déduite de la relation connue  $\lambda = a\rho c_p$  [63], [64].

Elles peuvent être classées en fonction de la nature de la sollicitation appliquée, la méthode du signal périodique et les méthodes impulsionnelles ces dernières sont actuellement les plus utilisées.

### **B.2.1- Les méthodes en régime périodique**

Elles consistent à imposer une variation sinusoïdale de température sur une des faces d'un milieu et à mesurer la variation et l'amplitude de phase de l'onde thermique se propageant à travers l'échantillon.

## **B.2.2- Les méthodes impulsives**

Elles utilisent la réponse en température d'un échantillon soumis sur l'une de ces faces à une impulsion thermique très brève. Dans la plupart des cas, l'impulsion est obtenue par une source de rayonnement (lampe à éclats, système laser, bombardement électronique...).

Les variations de températures sont mesurées puis comparées à des modèles théoriques. C'est le cas pour les méthodes photothermiques comme les techniques "flash laser" classique ou "effet mirage".

### **B.2.2.1- Méthode de flash laser**

Cette méthode permet d'estimer la diffusivité thermique des solides. On envoie sur l'une des faces d'un échantillon à faces parallèles un flux lumineux de forte puissance pendant un temps très court. Un thermocouple en contact avec la face arrière permet d'enregistrer l'élévation de sa température à partir du moment où la face avant a reçu le flash (figure B.4) [65].

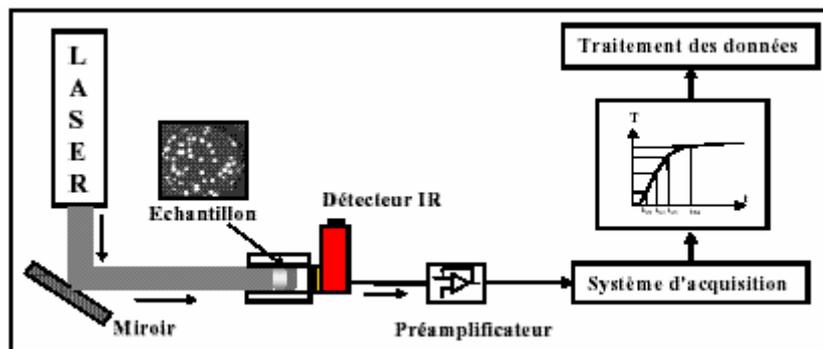


Figure B.4- Dispositif expérimental

Plusieurs auteurs proposent des méthodes d'estimation de la diffusivité thermique, à partir d'un thermogramme expérimental.

Parker [49] propose une méthode qui ne s'applique que dans le cas où la durée de l'éclair de flash est très petite et où les pertes thermiques sur les différentes faces de l'échantillon sont négligeables, Degiovanni [51] propose une expression parabolique de la diffusivité thermique en fonction des temps tenant compte des pertes thermiques latérales par convection. La conductivité thermique  $\lambda$  peut être ensuite déterminée à partir de la masse volumique  $\rho$  et de la chaleur massique  $c_p$  du matériau en utilisant la relation.

$$\lambda = a\rho c_p \quad (B.5)$$

### B.2.2.2- La méthode d'effet mirage

La technique de mesure de la diffusivité thermique par effet mirage appartient aux méthodes photothermiques dont le principe est de mesurer les variations locales de température induites à la surface d'un échantillon par absorption d'un flux lumineux modulé. Le faisceau d'excitation (faisceau pompe) est focalisé sur la surface de l'échantillon par l'intermédiaire d'un objectif de microscope. Les variations de température induisent, dans l'air au voisinage de la surface, un gradient d'indice de réfraction modulé. La détection des variations de température est effectuée indirectement par la mesure de la déflexion, créée par le gradient, d'un faisceau se propageant parallèlement à la surface.

La solution de l'équation de diffusion de chaleur dans un milieu semi infini comportant une source de chaleur ponctuelle modulée et positionnée en  $r=0$  s'écrit comme suit:

$$T(r, t) = T_0 \cdot \frac{e^{-\frac{r}{\sqrt{a/\pi f}}}}{r} e^{j(\omega t - r/\sqrt{a/\pi f})} \quad (B.6)$$

Où:

$T(r, t)$ : Est la température à une distance  $r$  de la source  $T_0$ , proportionnelle à l'amplitude délivrée par la source de fréquence  $f = \omega / 2\pi$ .

La technique par effet mirage, opérant en régime instationnaire, donne accès à la diffusivité thermique  $a$ .

## Références bibliographiques

- [1] **MELANIE, S.** *Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers* ; thèse de doctorat, Université de Laval, Québec. (2003).
- [2] **ANDRAMANANTSILVANO, N.R.** *Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage: expérimentation, modélisation et simulation de la pousse et du processus de maturation* ; thèse de doctorat, Université Bretagne Sud. (2003).
- [3] **DAL PONT, S.** *Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température* ; thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (2004).
- [4] **MASO, J.C.** *La liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydraté.* 7<sup>ème</sup> congrès international de la chimie des ciments, rapport principal, Paris. (1980).
- [5] **PERRATON, D.** *La perméabilité au gaz des bétons hydrauliques* ; thèse de doctorat, INSA de Toulouse. (1992).
- [6] **NEVILLE, A.** *Propriété des bétons*, Ed. Eyrolles, p.805. (1992).
- [7] **PICADET, V.** *Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydraulique des bétons* ; thèse de doctorat, Université de Nantes. (2001).
- [8] **DREUX, G ; GORISSE, F ; SIMONET, J.** *Composition des bétons : méthode Dreux-Gorisse.* Bilan de cinq années d'application en côte d'Ivoire. Annales de l'ITBTP N<sup>o</sup> 414. (1983).
- [9] **BARON, J ; LESAGE, R.** *La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier.* Rapport de recherche LCPC N<sup>o</sup> 64. (1976).
- [10] **MANSOUTRE, S.** *Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés, étude des pâtes de silicate tricalcique* ; thèse de doctorat, Université d'Orléans. (2000).
- [11] **DAKHMUCHE, F.Z.** *Etude de l'effet des super plastifiants sur les propriétés des bétons frais et durcis et leur interaction avec les ciments actuels algériens* ; thèse de magister, Université de Constantine. (2000).
- [12] **LAQUERBE, M.** *Le béton*, Institut National Des Sciences Appliquées, INSA de Renne. (1974).
- [13] **CHAKER, A.** *Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien* ; thèse de doctorat d'Etat, Université de Constantine. (1999).
- [14] **BOUDJEDIR, A.** *Contribution à l'étude du retrait des variétés de mortier et bétons influence des paramètres de composition et de conservation* ; thèse de magister, Université de Constantine. (2002).
- [15] **DULLIEN, F.A.L.** *Porous media: fluid transport and pore structure*, Academic Press. (1979).

- [16] **BESNARD, K.** *Modélisation du transport réactif dans les milieux poreux hétérogènes, application aux processus d'adsorption cinétique non linéaire*; thèse de doctorat, Université de Rennes. (2003).
- [17] **GOYHENECHÉ, J ; VIGNOLES, G ; COINDREAU, O.** *Modélisation thermique des composites thermostructuraux*, Congrès Français de Thermique, SFT. (2004).
- [18] **SOTEHI, N.** *Etude des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux humides; application au séchage* ; thèse de magistère, Université de Constantine. (2003).
- [19] **MIHOUBI, D.** *Déshydratation d'argiles par compression et séchage, aspects de modélisation et de simulation* ; thèse de doctorat, Université De Pau Et Des Pays De l'Adour. (2004).
- [20] **MOURTADA, A.** *Transfert de chaleur et d'humidité dans les matériaux isolants, applications aux matériaux poreux en conditions réelles d'utilisation*, thèse de doctorat, Lyon. (1979).
- [21] **MOUMANGA, P.** *Etude expérimentale du comportement de pâte de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques*, thèse de doctorat, Toulouse. (2004).
- [22] **NEYANDER, L.E.** *Isolation hygrométrique. Rapport de la commission isolation. T. B. E.* (1980).
- [23] **BENARD, J.** *Ecoulements diphasiques en milieux poreux: Modélisation et simulation de cas d'imbibition, de drainage et d'ébullition* ; thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée. (2004).
- [24] **BORIES, S et PRAT, M.** *Transfert de chaleur dans les milieux poreux.* Techniques de l'ingénieur, traité énergétique, B 8250.
- [25] **COLLARD, J.** *Etude des transferts d'humidité et des déformations pendant le séchage d'une plaque d'argile* ; thèse de l'université de Poitiers. (1989).
- [26] **YEZOU, R.** *Contribution à l'étude des propriétés thermophysiques des matériaux de construction cohérents et non cohérents* ; thèse de doctorat, Lyon. (1978).
- [27] **SACADURA, J.F.** *Initiation aux transferts thermiques, Techniques et documentations*, Paris. (1982).
- [28] **MATHIEU, J.P. ; KASLER, A et FLEURY, P.** *Dictionnaire de la physique.* Masson édition, 2<sup>e</sup>Edition, 185 P, Paris. (1985).
- [29] **NAITALI, B.** *Elaboration, caractérisation et modélisation de matériaux poreux. Influence de la structure poreuse sur la conductivité thermique effective* ; thèse de doctorat, Université de Limoges. (2005).
- [30] **TESSIER-DOYEN, N.** *Etude expérimentale et numérique du comportement thermomécanique de matériaux réfractaires modèles* ; thèse de doctorat, Université de Limoges. (2003).

- [31] JACKSON, K.W. and BLACK, W.Z. *A unit cell model for predicting thermal conductivity of a granular medium containing an adhesive binder*. Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, N<sup>o</sup> 1, PP. 87-89. (1983).
- [32] HASHIN, Z. and SHTRIKMAN, A. *A variational approach to the theory of effective magnetic permeability of multiphase materials*. J. Applied Physics. Vol. 33, PP. 3125-3131. (1962).
- [33] MAXWELL, J.C. *A Treatise on electricity and magnets*, 3<sup>rd</sup> edition. New-York: Dover, Chap 9, Article 314, Vol. 1, PP. 194-447. (1954).
- [34] RALEIGH, L. *On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium*, Phil. Mag. Vol. 34, PP. 481-502. (1892).
- [35] BROADBENT, S.R; HAMMERSLEY, J.M. Proc. Camb. Phil. Soc. 53, 629. (1957).
- [36] BRUGGEMAN, D.A.G. *Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I : Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen*. Ann. Der Physik. 5, PP. 636-664. (1935).
- [37] LANDAUER, R. *The electrical resistance of binary metallic mixtures*, J. Appl. Phys, Vol. 23, N<sup>o</sup>7, PP. 779-784. (1953).
- [38] HASSELMAN, D.P.H and JOHSON, L.F. *Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance*, J CP. Mat, Vol.21, PP. 508-515. (1987).
- [39] WOODSIDE, W et MESSMER, J.H. *Thermal conductivity of porous media I. unconsolidated sands*. Journal of Applied Physics. Vol.32, N<sup>o</sup>9, PP. 1688 – 1698. (1961).
- [40] CRAUSSE, P. *Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé* ; thèse d'état Lyon. (1983).
- [41] PERRIN, B et JAVELAS, R. *Transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux consolidés utilisés en génie civil*. Heat Mass Transfert. Vol. 10, N<sup>o</sup>2, PP.297-309. (1987).
- [42] MOYEN, C.H. *Transferts couplés chaleur masse lors du séchage: Prise en compte du mouvement de la phase gazeuse* ; thèse de doctorat, INPL Nancy. (1987).
- [43] KRISCHER, D. *Über die Bestimmung des Diffusionswiderstands in der kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären und instationären Vorgängen*. V.D.I. Forschungsheft, P 473. (1959).
- [44] PHILIP, J.R. et DE VRIES, D.A. *Moisture movement in porous materials under temperature gradients*, Trans American Geoph Union. Vol. 38, N<sup>o</sup>2, PP. 222-232. (1957).
- [45] LUIKOV, A.V. *System of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous*. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 18, PP.1-14. (1975).

- [46] **CEREZO, V.** *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique* ; thèse de doctorat, Lyon. (2005).
- [47] **CARSLAW, H. S and JAEGER, J. C.** *Conduction of heat in solids.* 2<sup>nd</sup> édition. London: Oxford at the Clarendon Press, 510P. (1959).
- [48] **LANGMUIR, I; ADAMS, E.G and MEIKLE, F.S.** *Flaw of heat through Furnace Walls.* Trans. Am. Electrochem. Soc. Vol.24, PP. 53-61. (1913).
- [49] **PARKER, W.J.** *Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity.* J. Appl. Phys. Vol. 32. PP.1679-1684. (1961).
- [50] **DEGIOVANNI, A.** *Identification de la diffusivité thermique par l'utilisation des moments temporels partiels.* High Temperatures- High Pressures. Vol.17. PP.683-689. (1985).
- [51] **DEGIOVANNI, A.** *Contribution à l'étude de la diffusivité thermique* ; thèse de doctorat, Lyon. (1975).
- [52] **DEGIOVANNI, A.** *Diffusivité et méthode flash.* Rev. Gen. Therm. Fr. N<sup>o</sup>185, PP. 420-441. (1977).
- [53] **GIRAUD, J.M.** *Répartition de l'humidité dans un composite carbone- résine : analyse par RMN.* Société Berlin et Cie - Septembre (1979).
- [54] **THONY, J.L.** *Mesure de l'humidité par la méthode neutronique.* Groupement Universitaire de Thermique (GUT)- Avril (1984).
- [55] **DAIAN, J.F ; DERRIEN, F.** *mesure de la teneur en eau et détermination de la diffusivité hydrique de matériaux de construction au moyen de la gammamétrie.* Groupement Universitaire de Thermique (GUT)- Avril (1984).
- [56] **LOUKOU, K.** *Etude expérimentale des caractéristiques acoustiques de bétons de terre stabilisée au ciment* ; thèse de doctorat, Lyon. (1994).
- [57] **KHABAZI, A ; LAHRAHAR, N et TERHMINA, O.** *Etude expérimentale hygrothermique d'un nouveau matériau isolant à base de granulats de liège.* Phys. Chem. News 14, PP. 22-25. (2003).
- [58] **BAKKOURI, A ; EZBAKHE, H ; AJZOUL, T et BOUARDI, A.** *Etude thermomécanique du béton allégé avec du liège et du béton allégé avec des grignons d'olive.* 12<sup>ème</sup> JITH, PP. 307-310. (2005).
- [59] **BOUTIN, C.** *Conductivité thermique du béton cellulaire autoclave : modélisation par méthode auto cohérente.* Matériaux de constructions, Vol.29, PP. 609-615. (1996).
- [60] **BOUARDI, A. ; EZBAKHE, H AJZOUL, T et WITTEWER, V.** *Propriétés thermophysiques lors de changement de structure granulaire- compact. Mesures et identifications ; application*

*aux matériaux à matrice déformable et expansés à l'air : cas de la vermiculites et polystyrène.*  
12<sup>ème</sup> JITH, PP. 311-314. (2005).

- [61] **FILALI, M.** *Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures ;* thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. (2006).
- [62] **ZHANG, X.** *Métrologie thermique par méthode quasi-stationnaire, modélisation, identification et application à la caractérisation de solides ;* thèse de doctorat, INPL. (1993).
- [63] **AZIZI, S.** *Conductivité thermique des matériaux poreux humides: Mesure par la méthode Flash et interprétation ;* thèse d'Etat, Institut National polytechnique de Lorraine, 199P. (1988).
- [64] **AZIZI, S et al.** *Mesure de la conductivité thermique de milieux poreux non saturés: analyse théorique et expérience.* High Températures – High pressures. Vol. 21, PP. 383-389. (1989).
- [65] **FAYETTE, S.** *Conduction thermique dans les matériaux hétérogènes, influence de joints de grains ;* thèse de doctorat, Université de limoge. (2001).

---

---

دراسة تأثير الرطوبة على الخواص الحرارية في مواد البناء  
وتطبيقاتها في الأسقف

---

---



إن تطوير الأوساط المسامية يعتمد على المعرفة الدقيقة للخواص الفيزيائية لهذه الأوساط، أين تعتبر الناقلية الحرارية و النفاذية من أهم الخصائص من الناحية الحرارية. من بين المشاكل المطروحة في المباني العمرانية هو وجود الرطوبة، هذه الأخيرة التي تؤدي إلى أضرار كبيرة في إتلاف المباني كما تؤدي إلى استهلاك كبير للطاقة من أجل التسخين.

إن عملنا هذا يهدف بدرجة أولى إلى دراسة تجريبية باستعمال طريقة العلب وذلك لتبيين تأثير الرطوبة على الخواص الفيزيائية للخرسانة المستعملة في أسقف المباني.

النتائج المتحصل عليها تجريبيا توضح بدقة أن الرطوبة تؤدي إلى تغيرات معتبرة في الخواص الفيزيائية، أين تنقص من الخواص العازلة لمواد البناء، كما سمحت لنا بتحديد اثر تشكيلة الخرسانة (خرسانة عادية، خرسانة مخففة) و كذلك تأثير المكونات ( نوعية الاسمنت، نوعية حصى البناء) وبينت أن الخواص العازلة أحسن في حالة الخرسانة المخففة.

الكلمات الدالة :

وسط مسامي - ناقلية - نفاذية - رطوبة - سقف.

---

---

## ETUDE DU COMPORTEMENT HYGROTHERMIQUE D'ELEMENTS DE CONSTRUCTION: APPLICATION AUX TOITURES

---

---



### Résumé

Le développement des matériaux poreux nécessite une connaissance approfondie de leurs propriétés physiques. Lorsqu'ils sont utilisés comme isolant thermique, les propriétés qui gouvernent leur pouvoir d'isolation sont la conductivité et la diffusivité thermiques. La présence de l'humidité, quelque soit son origine (pluie, condensation capillaire, fuite d'eau, hygroscopicité), dans les parois de bâtiments provoque des dégâts qui s'étendent de la formation de moisissures à l'imprégnation complète en passant par la dégradation des performances thermiques et mécaniques. De structure poreuse, le béton est un matériau apte à fixer une certaine quantité d'eau (selon l'humidité du milieu environnant). Cette humidité peut modifier considérablement ses propriétés thermophysiques. La mesure expérimentale est le moyen le plus efficace qui permet d'accéder à la valeur de la conductivité et de la diffusivité thermique.

L'objectif majeur de cette étude est la détermination des propriétés physiques des matériaux utilisés comme toiture (béton classique et bétostyrène). Un travail expérimental a été mis en place de façon à comprendre et évaluer les caractéristiques thermophysiques de ces matériaux en fonction de la teneur en eau. Il est important de retenir que la présence d'eau diminue le pouvoir isolant des matériaux.

Les résultats expérimentaux ont permis également de préciser l'effet de la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux), constituant (type de ciment, type de granulats) sur les propriétés thermophysiques et de montrer les propriétés isolantes du béton allégé.

**Mots clés** : matériaux poreux- conductivité- diffusivité- humidité- toiture.

---

---

## STUDY OF THE HYGROTHERMIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL COMPONENTS: APPLICATION TO THE ROOFS

---

---



### Abstract

The development of porous materials requires a thorough knowledge their physical properties. When they are used as heat insulator, the properties which control their capacity of insulation are conductivity and diffusivity thermics. The presence of moisture, some is its origin (rain, capillary condensation, water leakage, hygroscopicity), in the walls of buildings causes damage which extends from the formation of moulds to the complete impregnation while passing by the degradation of the thermal and mechanical performances. Of porous structure, the concrete is a material ready to fix a certain quantity of water (according to the moisture of the surrounding medium). This moisture can modify its thermophysical properties considerably. Experimental measurement is the most effective means which gives access the value of conductivity and thermal diffusivity.

The major objective of this study is the determination of the physical properties of materials used like roof (traditional concrete and betostyrene). An experimental work was set up in order to include/understand and to evaluate the thermophysical characteristics of these materials according to the water content. It is significant to retain that the presence of water decreases the capacity isolated from materials.

The experimental results also made it possible to specify the effect of the morphology of the medium (solid matrix and porous network), component (standard of cement, type of aggregates) on the thermophysical properties and to show the insulating properties of the reduced concrete.

**Key words:** porous materials – conductivity – diffusivity – moisture - roof.