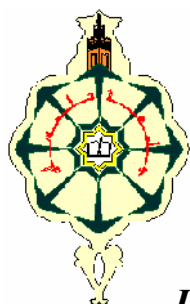
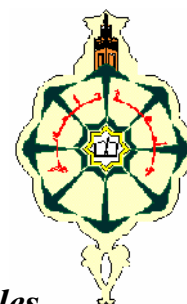


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID TLEMEN
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



Unité de recherche de matériaux et des énergies renouvelables
(U.R.M.E.R)

ECOLE DOCTORALE « ENERGIES RENOUVELABLES »

Mémoire de magister

Spécialité : Matériaux et énergies renouvelables

THEME :

Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat

Présenté par :

Mr. BESSENOUCI Mohammed Zakaria

Soutenu le **devant le jury :**

Mr. N.E. CHABANE SARI	Professeur à U.A.B.T.	Président de jury
Mr. B.BENYOUCEF	Professeur à U.A.B.T.	Examinateur
Mr. A.MERAD	Maître de Conférences à U.A.B.T.	Examinateur
Mr. D.ZENDAGUI	Maître de Conférences à U.A.B.T.	Examinateur
Mr. B. DAHMANI.	Professeur à U.A.B.T.	Invité
Mr. N.E.BIBI TRIKI.	Maître de Conférences à U.A.B.T	Encadreur

Année universitaire : 2009/2010

Dédicaces

*A mes parents,
A mon frère, sa femme et leurs enfants
A ma sœur*

*A ma femme, pour son soutien et sa patience
A mes enfants, Zineb et Riyad*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes plus sincères remerciements à M^r BIBI TRIKI N.E, Maître de Conférences à U.A.B.de Tlemcen. Son encadrement, son aide mais également ses critiques, son soutien, sa confiance, la liberté qu'il m'a accordé et sa disponibilité (pour ne citer que cela !) m'ont permis de mener à bien cette étude. Sans lui cette étude n'aurait pas pu être menée.

Je remercie M^r. N.E.CHABANE SARI, Professeur à U.A.B.de Tlemcen de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse. Ses nombreux conseils seront, j'en suis persuadé, d'une grande utilité pour moi dans le futur.

Je tiens à remercier également M^r B.BENYOUCEF (Professeur à l'U.A.B de Tlemcen), M^r D.ZENDAGUI (Maître de Conférences à U.A.B.de Tlemcen) et M^r A.MERAD (Maître de Conférences à U.A.B.de Tlemcen) pour avoir accepté de juger ce travail. Leurs commentaires, leurs critiques et leurs questions sont autant d'encouragements à poursuivre ce travail.

Mes remerciements vont également à M^r B. DAHMANI, professeur à l'université de Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Je ne saurais, oublier tous ceux qui, quotidiennement, m'ont soutenu moralement et qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail.

Résumé

Ce travail est une étude des pouzzolanes naturelles en tant que composants de base dans les matériaux de construction. Il est destiné à mettre en relief l'avantage thermique de ces matériaux. Il est économiquement intéressant d'utiliser la pouzzolane en substitution d'une partie du clinker comme ajouts hydrauliquement actives, et dans les compositions de bétons légers sous forme de mélange de granulats de pouzzolane, qui offrent des résistances mécaniques conformes aux normes en vigueur.

Nous décrivons d'une manière générale les différentes méthodes de mesures des propriétés thermophysiques, notamment de la conductivité thermique, en régime stationnaire et instationnaires

Une approche théorique est menée de la conductivité thermique apparente des matériaux de construction, en occurrence le béton à base de pouzzolane. Une modélisation thermique, apparente à celle utilisée habituellement pour les matériaux poreux, à été adoptée aux bétons de pouzzolane

Abstract

This work is a study of natural pozzolans as basic components in building materials. It is intended to highlight the thermal advantage of these materials. It is economically interesting to use the pozzolan to replace a portion of the clinker as hydraulically active additions, and the compositions of lightweight concrete as a mixture of aggregates of pozzolan, which provide mechanical strength in accordance with current standards.

Describing us generally various methods of measurements of the thermophysical, in particular of thermal conductivity, in stationary and non stationary mode.

A theoretical approach has led to the apparent thermal conductivity of building materials, in occurrence the concrete containing pozzolana. Thermal modeling, apparent to those normally used for porous materials, has been adopted for concrete pozzolan

ملخص

هذا العمل هو دراسة أساسية للبوزلان الطبيعية كمكونات أساسية في مواد البناء. فإنه يهدف إلى تسليط الضوء على الاستفادة من الجانب الحراري لهذه المواد. انها مثيرة للاهتمام من الناحية الاقتصادية لاستخدام البوزلان لتحل محل جزء من الكلنكر كإضافات هيدروليكية نشطة، والتراكيب من الخرسانة الخفيفة الوزن كخليط من الركام من البوزلان، والتي توفر القوة الميكانيكية وفقا للمعايير الحالية. تصف بشكل عام مختلف أساليب القياسات من قياسات للخصائص الحرارية و الفيزيائية، ولا سيما من التوصيل الحراري، في وضع ثابت وغير ثابت إنتهجنا نظرية أدت إلى الموصلية الحرارية للمواد البناء، في حالة الخرسانة من البوزلان ملموسة. النمذجة الحراري، المستخدمة عادة لمواد مسامية، قد اعتمدت للخرسانة من البوزلان

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

- Figure I.1** : Origine des matériaux pouzzolanique
- Figure I.2** : Pierre ponce; cliché Michelle Barbier, Préparation à l'Agrégation SVT, ENS Lyon.
- Figure I.3** : a) Bombe volcanique en fuseau b) Bombe en croûte de pain
- Figure I.4** : Puy de Dôme, France - 11 octobre 1999 - Hélène Janin
- Figure I.5** : Diagramme de pouzzolanicité
- Figure 6.I** : Évolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C3S (adapté de Vernet et Cadoret (1991))
- Figure II.1** : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée.
- Figure II.2** : Coupe du dispositif "des boîtes"
- Figure II.3** : Vue d'une sonde de type fil chaud
- Figure II.4** : Schéma du montage de la méthode du fil chaud.
- Figure II.5** : Schéma des transferts autour du fil chaud
- Figure II.6** : Principe expérimental du Hot Disk
- Figure II.7** : Montage standard du Hot Disk
- Figure II.8** : Courbe bleue : augmentation de la température du capteur ; Courbe rouge : augmentation de la température de la surface de l'échantillon
- Figure III.1** : Courbes granulométriques des granulats
- Figure III.2** : Courbe granulométrique et sédimentométrique de la pouzzolane de Béni-Saf.
- Figure III.3** : Comparaison des évolutions des résistances en compression B.T, béton témoin ; B.Z., 20, 25, 30, béton à base de ciment pouzzolanique à un dosage de 20, 25, ou 30 % de pouzzolane
- Figure III.4** : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps
- Figure III.5** : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression
- Figure III.6** : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la traction
- Figure III.7** : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la flexion
- Figure III.8** : Effet des agrégats légers de la pouzzolane sur la résistance à la compression
- Figure III.9** : Effet des agrégats légers de la pouzzolane sur la résistance à la traction
- Figure III.10** : Effet des agrégats légers de la pouzzolane sur la résistance à la flexion
- Figure IV.1** : Volume quelconque
- Figure IV.2** : Représentation schématique d'un milieu poreux
- Figure IV.3** : Echelle des porosités des matériaux cimentaires
- Figure IV.4** : Représentation des échelles et du VER tel qu'il est défini dans la prise de moyenne.
- Figure IV.5** : Représentation des échelles de description en homogénéisation
- Figure IV.6** : Modèle série et parallèle
- Figure IV.7** : Représentation schématique d'un milieu poreux selon Krischer
- Figure IV.8** : Représentation schématique d'un milieu poreux selon Willy et Soutwick
- Figure IV.9** : Modèle de Maxwell avec inclusions sphériques.
- Figure IV.10** : Inclusion sphérique simple(a) bicomposites (b) tricomposte (c)
- Figure IV.11** : Inclusion sphérique simple
- Figure IV.12** : Inclusion sphérique double
- Figure IV.13** : Equivalence entre milieu bicomposite à inclusions sphériques et milieu homogène
- Figure IV.15** : Inclusion sphérique tricomposite
- Figure V.1** : Représentation schématique du modèle mixte série-parallèle de la première approche

Figure V.2 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles série, parallèle et le modèle mixte série-parallèle en fonction de la porosité du béton caverneux.

Figure V.3 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles série, parallèle et le modèle mixte série-parallèle en fonction de la porosité des bétons pleins

Figure V.4 : Représentation schématique du modèle mixte série-parallèle deuxième approche

Figure V.5 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches

($\lambda_s=0,7$ W/m.K)

Figure V.6 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=0,7$ W/m.K)

Figure V.7 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches

($\lambda_s=0,9$ W/m.K)

Figure V.8 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches

($\lambda_s=0,9$ W/m.K)

Figure V.9 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches

($\lambda_s=1$ W/m.K)

Figure V.10 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches

($\lambda_s=1$ W/m.K)

Figure V.11 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches

($\lambda_s=1,2$ W/m.K)

Figure V.12 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches

($\lambda_s=1,2$ W/m.K)

Figure V.13 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches

($\lambda_s=1,5$ W/m.K)

Figure V.14 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches

($\lambda_s=1,5$ W/m.K)

Figure V.15 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches

($\lambda_s=1,7$ W/m.K)

Figure V.16 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=1,7$ W/m.K)

Figure V.17 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=2$ W/m.K)

Figure V.18 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=2$ W/m.K)

Figure V.19 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda s=0.9$ W/m.K)

Figure V.20 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda s=0.9$ W/m.K)

Figure V.21 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda s=1$ W/m.K)

Figure V.22 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda s=1$ W/m.K)

Figure V.23 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda s=1,2$ W/m.K)

Figure V.24 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda s=1,2$ W/m.K)

Figure V.25 : Représentation schématique du modèle mixte série-parallèle étendu aux trois phases

Figure V.26 : a) Coupe d'un béton caverneux ; b) Coupe d'un béton plein

Figure V.27 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda s=1,5$ W/m.K)

Figure V.28 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte à trois phases en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda s=1,5$ W/m.K)

Figure V.29 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte à trois phases en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda s=1,7$ W/m.K)

Figure V.30 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte à trois phases en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda s=1,7$ W/m.K)

Figure V.31 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda s=2$ W/m.K)

Figure V.32 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda s=2$ W/m.K)

Figure V.33 : Comparaison entre porosité calculées par la formule (V.8) de la première approche et la formule (V.9) de la deuxième approche pour les deux types de bétons

Figure V.34 : Structure scoriacée et alvéolaire de la pouzzolane de Beni-Saf

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

- Tableau III.1** : caractéristiques chimiques du ciment
- Tableau III.2** : Composition minéralogique du ciment
- Tableau III.3** : Désignation normalisée et composition du ciment courant
- Tableau III.4a** : Caractéristiques physiques de la pouzzolane gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien)
- Tableau III.4b** : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien)
- Tableau III.4c** : Caractéristiques physiques de la pouzzolane gisement de Saint Pierre (la réunion)
- Tableau III.5** : Caractéristiques chimiques de la fumée de silice
- Tableau III.6** : Caractéristiques chimiques du laitier
- Tableau III.7** : Caractéristiques chimiques du stérile de carrière
- Tableau III.8** : Compositions des bétons
- Tableau III.9** : Compositions des bétons
- Tableau III.10** : Résistance en compression en (MPa)
- Tableau III.11** : Résistance à la traction en (MPa)
- Tableau III.12** : Résistance à la traction par flexion et à la compression simple en fonction de l'âge des différents échantillons de mortier
- Tableau III.13** : Compositions des bétons
- Tableau III.14** : Compositions des bétons
- Tableau III.15** : Evolution de masse volumique en fonction de l'âge du béton
- Tableau III.16** : comparaison de la résistance à la compression entre la mixture LCW1 et le béton normale NCW
- Tableau III.17** : Composition, résistance mécaniques et masse volumiques apparentes des bétons secs caverneux de pouzzolane de Saint Pierre
Résistances mécaniques et masses volumiques à 28 jours
- Tableau III.18** : Composition, résistances mécaniques et masses volumiques apparentes des bétons secs pleins de pouzzolane de Saint Pierre, Résistance mécaniques et masses volumiques à 28 jours
- Tableau III.19** : Analyse chimique de la pouzzolane naturelle de Djoungo (Caméroun)
- Tableau III.20a** : Résistance à la compression des mélanges (L, LZ, LS) pour des éprouvettes âgées de 28 jours
- Tableau IV.1** : Porosité de quelques matériaux
- Tableau IV.2** : Perméabilité de quelques matériaux
- Tableau V.1** : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons caverneux
- Tableau V.2** : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons plein
- Tableau V.3** : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons caverneux saturés
- Tableau V.4** : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons plein saturés
- Tableau V.5** : Résultats des essais de conductivité thermique
- Tableau V.6** : Résultats des essais de conductivité thermique des bétons destinés à fabriquer des blocs (parpaing et hourdis)
- Tableau V.7** : Résultats des conductivités thermiques apparentes calculées par les modèles pour la valeur de $\lambda_s = 1,2 \text{ W/mK}$

NOMENCLATURE

Nomenclature

Acronyme des termes utilisés :

CEM : Ciment Portland
PVD Pulvérisation Vapour Deposition
CVD Chemical Vapour Deposition
LWA : Agrégats légers
LWC : Béton léger
VER : Volume élémentaire représentatif

Lettres grecques :

ϕ_0 : Puissance dissipée dans la résistance chauffante
(ε) : Porosité
 α : Compacité
 ϕ : Le flux de chaleur en W
 ϕ_j : Le flux de chaleur produit par effet joule de la résistance en W
 ϕ_d : Le flux de déperdition thermique à travers la boîte en W
 ϕ_c : Le flux de conduction à travers l'échantillon en W
 λ : Conductivité thermique en W/m.K
 λ : Conductivité thermique en W/m.K
 $\lambda_{Parallèle}$: Conductivité thermique du modèle parallèle en W/m.K
 $\lambda_{Série}$: Conductivité thermique du modèle série en W/m.K
 λ_f : Conductivité thermique de la phase fluide (l'air) en W/m.K
 λ_s : Conductivité thermique de la matrice solide en W/m.K
 $\lambda_{f'}$: Conductivité thermique de la phase fluide (l'eau) en W/m.K
 λ_l : Conductivité thermique de la matrice liante en W/m.K
 λ_g : Conductivité thermique du grain en W/m.K
 δ : L'épaisseur de la couche isolante
 Ψ : Moyenne volumique
 β : concentration volumiques
 ΔT : Différence de température en °C
 T_C, T_B : Température des faces chaude et froide de l'échantillon
 T_{atm} : Température atmosphérique
 ω_0 : Transformée de Laplace de la différence $T_0(t) - T_0(t=0)$
 ω : Transformée de Laplace de la différence $T(t) - T(t=0)$
 β : Concentration volumique

$\langle \nabla T_f \rangle^f$ et $\langle \nabla T_f \rangle_\infty^f$ Les moyenne intrinsèque des gradient des températures (phase solide)et (phase fluide):

ρ_{app} : Masse volumique apparente kg/m^3

ρ_{abs} : Masse volumique absolue kg/m^3

ρ_l : Masse volumique apparente du liant kg/m^3

ρ_g : Masse volumique apparente des grains kg/m^3

ρ_{ag} : Masse volumique apparente des grains kg/m^3

Lettres latines :

TA Température ambiante de la salle d'expérience °C

TB Température à l'intérieur de la boîte °C

R_c : Résistance de contact à l'interface résistance chauffante / échantillon

R résistance électrique Ω

C : Capacité calorifique du thermocouple+résistance

p Variable de Laplace

r₀ : Rayon du fil chauffant

L : Longueur du fil chauffant

n_w : La part de disposition en série modèle de Krischer

(1-n_w) : La part de la disposition en parallèle modèle de Krischer

n_w : La part de disposition en série modèle de Willy et Soutwik

(1-n_w) : La part de la disposition en parallèle modèle de Willy et Soutwik

$(q_f)^f$: La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase fluide)

$(q_s)^s$: La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase solide) :

S taux de saturation en eau des pores;

I₀, I₁, K₀, K₁ Fonctions de Bessel

K :: la diffusivité thermique de la matière de la couche isolante

R_c : Résistance à la compression

R_t : Résistance à la traction

R_{tf} : Résistance à la traction par flexion

r₀ : La dimension caractéristique du V.E.R

q : Densité du flux de chaleur

A : Surface en m²

a : Diffusivité thermique en m²/s

C_p : Chaleur massique

E : L'effusivité thermique

d/D : granulométrie

V : Tension V

F : charge maximale

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale..... 2

CHAPITRE I : LES MATERIAUX POUZZOLANQUES ET LEUR UTILISATION

I.1. Introduction..... 5

I.2. Historique..... 5

I.3. Matériaux à propriétés pouzzolaniques..... 6

I.3.1 Définitions..... 6

I.3.2 Types de pouzzolanes..... 6

I.3.2.1 Pouzzolanes naturelles..... 6

a. Verre volcanique..... 6

b. Tufs volcaniques compacts..... 6

I.3.2.2 Produits pyroclastiques..... 7

I.3.2.3 Pouzzolanes artificielles..... 8

a. Cendres volantes..... 8

b. Laitier granulé de haut fourneau (LGHF)..... 8

c. Argiles calcinées..... 9

d. Fumée de silice..... 9

I.4. Activité pouzzolanique..... 9

I.4.1 Evaluation de l'activité pouzzolanique..... 9

a. La détermination chimique (test chapelle)..... 10

b. Méthode physique..... 11

c. Essais mécaniques..... 12

I.5. Différentes utilisations de la pouzzolane..... 12

I.5.1 L'agriculture..... 12

a. La culture en plein champ..... 12

b. Horticulture..... 12

I.5.2 Applications routières..... 12

I.5.3 Dans l'industrie..... 12

I.6. Conclusion..... 13

CHAPITRE II : METHODES DE MESURES DES PROPRIETES THERMOPHYSIQUES

II.1. Introduction..... 15

II.2. Les principales méthodes de mesure des propriétés thermo physiques..... 16

II.2.1. Les méthodes en régime stationnaire..... 17

II.2.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée..... 17

II.2.1.2. Méthode des boîtes..... 18

II.2.2. Les méthodes en régime instationnaire..... 20

II.2.2.1. Méthode du fil chaud..... 20

II.2.2.2. Méthode du Hot Disk..... 23

II.3. Conclusion..... 27

CHAPITRE III : COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX DE POUZZOLANE

III.1. Introduction..... 29

III.2. Rappels théoriques..... 29

III.3. Le béton et le mortier à base de ciment pouzzolanique.....	30
III.3.1. Matériaux utilisés.....	30
III.3.1.1 Clinker.....	30
III.3.1.2 Les granulats.....	31
III.3.1.3. Les ajouts cimentaires.....	32
a. Pouzzolane naturelle.....	32
b. La fumée de silice.....	34
c. Le laitier des hauts fourneaux.....	34
d. Le stérile de carrière.....	35
III.4. Programmes expérimentaux.....	35
III.4.1. Le béton à base de ciment pouzzolanique.....	36
a. La résistance à la compression du béton.....	36
b. La résistance à la traction.....	37
III.4.2. Le mortier à base de ciment pouzzolanique.....	38
III.4.3. Le béton à base de ciment pouzzolanique et de granulats de pouzzolane naturelle.....	39
III.4.4 Le béton à base de granulats de pouzzolane naturelle et ciment sans ajout pouzzolanique	41
a. Mixtures de bétons à base de Granulat de pouzzolane du gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien).....	41
b. Mixtures de bétons à base Granulat de pouzzolane du gisement de Saint Pierre (La Réunion).....	43
III.4.5. La brique de terre à base de pouzzolane naturelle.....	44
a. Essais de résistance en compression et en traction simple.....	45
III.5. Conclusion.....	47
<u>CHAPITRE IV : OUTILS DE PREDICTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MILIEUX POREUX</u>	
IV.1. Introduction.....	49
IV.2. Caractérisation d'un milieu poreux.....	49
IV.2.1. Porosité et compacité.....	49
IV.2.2. Perméabilité.....	51
IV.2.3. Tortuosité et Connectivité.....	52
IV.2.4 Tailles des porosités.....	53
IV.3. Influence de la porosité sur les propriétés thermophysiques.....	53
IV.4. Mécanismes de transfert de chaleur dans les matériaux poreux.....	54
IV.5. Conductivité thermique des milieux poreux.....	54
IV5.1. Modèles analytiques.....	55
a. Prise de moyenne volumique.....	55
b. L'homogénéisation.....	56
IV.5.1.1. Modèles série et parallèle.....	57
IV.5.1.2 Modèle de Hashin-Shtrikman.....	58
IV.5.1.3. Modèle de Krischer.....	58
IV.5.1.4. Modèle de Willy et Soutwik	59
IV.5.1.4. Modèle de Maxwell	60
IV.5.1.5. Modèle par homogénéisation autocohérente (HAC).....	61
IV.5. Conclusion.....	67

CHAPITRE V : APPROCHES THEORIQUES DES MODELES DES MILIEUX POREUX DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPLIQUEE AU BETON DE POUZZOLANE

V.1. Introduction.....	69
V.2. Conductivité thermique apparente des mixtures de bétons à base de Granulat de pouzzolane à l'état sec du gisement de Saint Pierre (La Réunion).....	70
V.2.1. Composition des bétons.....	70
V.2.2. Première Approche des modèles.....	70
V.2.2.1. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon les modèle série et le modèle parallèle.....	73
V.2.2.2. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle mixte série-parallèle.....	73
V.2.3. Deuxième approche des modèles.....	75
V.2.3.1. Conductivité thermiques apparentes sec des bétons selon les modèle série et le modèle parallèle.....	76
V.2.3.2. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle mixte série-parallèle.....	76
V.2.3.3. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle de Hashin et Shtrikman.....	86
V.2.3.4. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle mixte série-parallèle étendu aux trois phases solide-liquide -gaz	90
V.3. L'évolution de la porosité en fonction de la masse volumique	96
V.4. Conductivité thermique apparente des mixtures de bétons à base de Granulat de pouzzolane à l'état sec du gisement Bou Hamidi de Béni-Saf (nord ouest algérien).....	96
V.4.1. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon les modèles : Série, parallèle et Hashin-Shtrikman.....	96
V.5. Sensibilité des modèles aux des différents paramètres.....	98
V.5.1. Sensibilité à la porosité.....	98
V.5.2. Sensibilité à la conductivité thermique de la phase solide.....	99
V.6. Conclusion.....	100

CONCLUSIONS GENERALE

Conclusions générales.....	102
----------------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques.....	106
----------------------------------	-----

ANNEXES

Annexe – 1 –

Annexe – 2 -

Annexe – 3 -

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La principale préoccupation des bâtisseurs concerne la pérennité de leurs constructions. Ce principe est justifié par l'emploi de matériaux performant du point de vue résistance mécanique et durabilité. Par contre, les aspects de confort thermique n'étaient traités qu'à posteriori. Ce pendant, ce concept séduit de moins en moins les bâtisseurs, car il devient couteux. Ce changement de point de vue explique le développement récent de quelques matériaux allégés de construction tel que les bétons légers, capables de jouer un rôle en tant qu'isolant, tout en conservant des niveaux de performances suffisants.

Une bonne partie de la déperdition de chaleur se faisant par les murs, les matériaux isolants ralentissent le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. La qualité de l'isolation à prévoir dépend du climat, de l'exposition des murs et aussi des matériaux employés pour la construction. Le choix d'un matériau utilisé comme isolant dépend naturellement de sa disponibilité et de son coût.

Les matériaux allégés, de masse volumique apparente inférieure à 1800 kgm^{-3} , sont confectionnés souvent à partir de granulats légers. Outre la réduction de poids mort et l'économie sur les engins de manutention et du coffrage qu'elle engendre, leur légèreté leur confère un pouvoir d'isolation thermique meilleur que celui des matériaux traditionnels compte tenu du volume d'air qu'ils contiennent. Ils permettent donc de réaliser des économies d'énergies substantielles tout en assurant le confort thermique dans l'habitat qu'il s'agisse de se protéger de la chaleur ou du froid.

Un second élément expliquant l'intérêt pour les bétons allégés, est une certaine prise de conscience environnementale. Cette dernière s'exprime dans le contexte de l'utilisation de la pouzzolane sous forme de granulats légers ou remplacer une partie du ciment sous forme d'ajout cimentaire. Elle présente l'avantage d'utiliser une matière première qui donne la faculté au béton d'acquérir une résistance mécanique acceptable à long terme sur une éventuelle réactivité pouzzolanique que présenteraient ses granulats constitutifs. Ainsi qu'un intérêt économique, puisque le cout de production est inférieur à celui du ciment.

Ce mémoire s'intéresse d'une part à la prédiction du comportement de matériaux biphasés à partir de quelques modèles de milieu poreux de relation porosité/conductivité thermique que nous avons relevés dans la littérature. D'autre part, dans une première approche, on considère le béton est composé de deux phases solides ; une matrice liante (la pâte du ciment hydratée), et l'ensemble des granulats [34], et une deuxième approche ou le béton est constitué d'une phase solide et d'eau ou bien d'une phase solide et d'air.

Le premier chapitre débute par des définitions générales de la pouzzolane comme matériau issu de projections volcaniques appelées, pouzzolanes naturelles, et les pouzzolanes artificielles produites par les centrales thermiques ou les hauts fourneaux pour la production de la fonte. Ce chapitre vise également à définir la notion de l'activité pouzzolanique à l'aide des essais chimiques, physiques et mécaniques.

Le deuxième chapitre aborde d'une manière succincte les modalités de mesures de propriétés thermophysiques d'un milieu granulaire. Nous listons les méthodes actuelles de mesures de la conductivité thermique qui se résument en méthodes stationnaires et instationnaires.

Le troisième chapitre est consacré au comportement mécanique des matériaux à base de pouzzolane tel que le béton à base d'ajout cimentaire, béton à base de granulats, le mortier et la brique de latérite. Nous nous sommes intéressés aux différentes formules de compositions de ces matériaux avec la pouzzolane comme ajout pouzzolanique sous forme de substitution d'une partie de ciment, aux mixtures des bétons avec les mélanges granulaires et au remplacement de 50% de la latérite par de la pouzzolane.

Dans le quatrième chapitre, sont exposées plusieurs approches, prise de moyenne, homogénéisation et analogie électrique pour prévoir la valeur de la conductivité thermique. D'autre part, le chapitre est aussi consacré à un panel de modèles de calculs de la conductivité thermique des milieux poreux, et définir les cas d'application de ces modèles pour les milieux granulaires.

Enfin, dans le cinquième chapitre, sont exposés les résultats expérimentaux de mesures de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane avec l'approche de [34]. On applique une deuxième approche théorique, comparative, qui sera également explicitée. Nous allons transposer quelques modèles de prédiction de la conductivité thermique apparente appliqués aux matériaux poreux aux bétons de pouzzolane. Les conclusions de ce chapitre nous permettront de déterminer la sensibilité des modèles par rapport aux conductivités thermiques de la phase solide, la phase fluide (l'eau et l'air) et la porosité.

Chapitre I

**LES MATERIAUX POUZZOLANIQUES ET LEUR
UTILISATION**

I. 1. INTRODUCTION

Les matériaux pouzzolaniques sont employés d'une manière globale comme additifs (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, le calcaire et les pouzzolanes naturelles) avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des mortiers et des bétons. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages. [63]

I. 2. Historique

Les Grecs et les romains avaient remarqué que les matériaux de dépôts volcaniques, lorsqu'ils sont moulus et mélangés avec de la chaux, donnent un mortier avec une bonne tenue à l'action de l'eau et une résistance mécanique très élevée.

Les Grecs employaient le tuf volcanique de l'île de Santorin, par contre les romains se servaient d'un tuf volcanique rouge de la région de Naples. Les romains ont beaucoup plus préférés un type de roche qui se trouve aux environs de la ville de Pozzuoli, d'où le nom de pouzzolane sous lequel était alors connu tout matériau ayant des propriétés comparables. Aujourd'hui cette dénomination s'étendue et s'applique à un grand nombre de matériaux d'origine diverses, selon la classification donnée par l'organigramme de la **figure I.1** [43]

La poudre de tuile ou de brique mélangé avec de la chaux en présence d'eau produit le même effet, les poudres de la terre cuite fabriquées spécialement pour cet usage, sont appelées aujourd'hui pouzzolanes artificielles

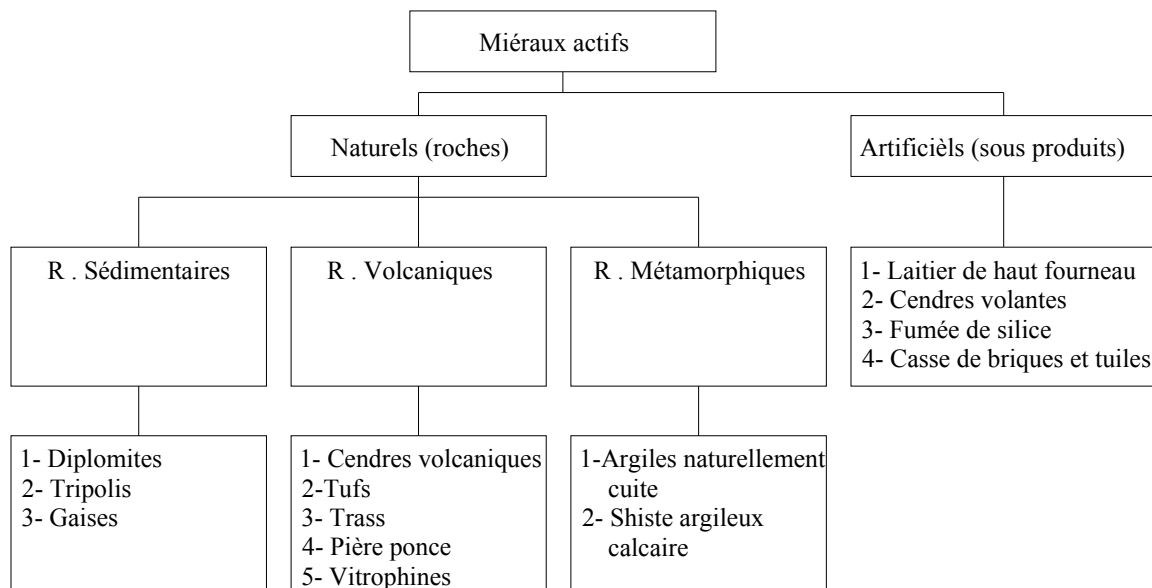


Figure I.1 : Origine des matériaux pouzzolanique

I. 3. Matériaux à propriétés pouzzolaniques

I. 3.1 Définitions

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques [44].

Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO). Elles sont généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.

Les pouzzolanes les plus acides, contenant de silice et peu de chaux (CaO) sont en général la plus vitreuses. La différence $\text{SiO}_2\text{-CaO}$ doit être supérieure à 34% pour que la teneur en verre soit appréciable. [43].

[62], définit les pouzzolanes comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes.

Selon la norme ASTM sur les ciments (désignation C 340-58 T), la définition est pratiquement similaire :

La pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux, qui ne possède pas de propriétés liantes, mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

Les deux dernières définitions attirent l'attention sur le fait que la pouzzolane est définie en fonction de son emploi comme matériau liant et non sur la nature du matériau lui-même. Puisque, les phénomènes responsables du durcissement du mélange pouzzolane + chaux du point de vue chimiques et physiques ne sont pas considérés.

I. 3.2 Types de pouzzolanes

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et les artificiels.

I. 3.2.1 Pouzzolanes naturelles

a. Verre volcanique

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

b. Tufs volcaniques compacts

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydrothermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de

composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte.

I. 3.2.2 Produits pyroclastiques

La roche pyroclastique est une désignation purement génétique, son origine est volcanique et elles sont sédimentaires de par leur mode de dépôt. Le terme pyroclaste, et employé pour définir de manière générale tout matériau fragmenté produit par les éruptions d'un volcan.

Selon l'état sous lequel la lave est émise, les produits pyroclastiques peuvent se subdiviser en plusieurs catégories :

Les cendres (ash), qui ont moins de 2 mm de diamètre, matériau résultant de la pulvérisation de roches préexistantes ou de l'éjection de magma finement fragmenté ou pulvérisé

Le lapilli, est un gravier dont la dimension maximale est comprise entre (2-64 mm), en général, il arrive à la surface déjà consolidés (consolidation des laves de la cheminée d'éjection), et il est le résultat de la fragmentation des vieilles roches..

Pierre ponce, Elle se forme généralement à partir des fragments de magmas solidifiés qui ont emprisonnés une très grande quantité de bulles, et se caractérise par une forme alvéole. Elle est très poreuse d'où sa faible densité.



Figure I.2 : Pierre ponce; cliché Michelle Barbier, Préparation à l'Agrégation SVT, ENS Lyon.

Les bombes ou blocs (plus de 64 mm de dimension). Elles ont des formes particulières selon leur projection, leur atterrissage et leur mode de refroidissement. On peut trouver des bombes en chou-fleur, en fuseau, en bouse de vache ou en boule (en basalte). Et des bombes en croûte de pain (en trachyte).

Pour former ce type de bombe volcanique, le magma doit être peu visqueux et donc dans la plupart des cas basaltiques.



Figure I.3 : a) Bombe volcanique en fuseau b) Bombe en croûte de pain

Les scories, sont des morceaux de lave déchiquetées, sombres, et bulleux. Elles peuvent avoir une taille variant de 1 à 10 cm de diamètre. La différence entre la pierre ponce se situe dans les formes et la structure vésiculaire emplie de bulle de gaz. Elle est aussi plus dense.



Figure I.4 Puy de Dôme, France - 11 octobre 1999 - Hélène Janin

I. 3.2.3 Pouzzolanes artificielles

a. Cendres volantes

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO). Les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90%. [48]

b. Laitier granulé de haut fourneau (LGHF)

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau, et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment.

Les analyses minéralogiques de LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100 %. [48]

c. Argiles calcinées

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment

L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice [63]

d. Fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

I. 4. Activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique c'est l'aptitude d'un matériau à fixer l'hydroxyde de calcium et durcir sous l'eau à des températures ordinaire et en un temps raisonnable. Cette propriété se constate à des degrés variables pour des matériaux riches en silice libre, qu'ils soient d'origine naturelles (gaize, diatomites, cendres volcaniques...) ou artificielles (Cendres volantes, fumée de silice, argile calcinée...).

L'activité pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.
- La rapidité de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane [42, 8].

Les différents matériaux pouzzolanique décrits ci-dessus possèdent tous la propriété, selon la définition, de réagir avec l'hydroxyde de calcium, en présence d'humidité, pour former des composés possédant des propriétés liantes. L'influence de la silice et de l'alumine ne peut pas être négligée, la silice participe dans le mélange par la fixation de la chaux et l'alumine augmente la résistance mécanique du matériau à court terme.

I. 4.1 Evaluation de l'activité pouzzolanique

Plusieurs méthodes ont été avancées pour expliquer les propriétés des pouzzolanes comme étant un matériau naturel ou artificiel riche en silice et l'alumine capable de :

- Réagir avec la chaux en présence d'eau,
- Former par cette réaction des produits aux propriétés liantes.

A partir de cette définition, on distingue deux catégories d'essais qui, en premier lieu caractérisent l'existence de la réaction pouzzolanique, et en second lieu, mettre en évidence les produits d'hydratation aux propriétés liantes et leur influence sur les caractéristiques mécaniques.

La première catégorie se base essentiellement sur les déterminations chimiques, tandis que la seconde s'appuie sur les méthodes physiques et plus particulièrement les essais mécaniques.

a. La détermination chimique (test chapelle)

Le matériau à propriétés pouzzolaniques sera mis en contact avec une solution bien connue de la chaux à une température de 90 °C. Après une durée de 24 heures, on estime la quantité d'hydroxyde de calcium fixée par la pouzzolane et la quantité de la chaux résiduelle.

Cette méthode peut être utile que pour un suivi du taux de fixation de l'hydroxyde de calcium à atteindre pour un matériau donné afin d'évaluer son activité pouzzolanique. Par contre, elle est insuffisante pour prévoir avec certitude la résistance mécanique espérée. [26].

De plus les études menées sur le test chapelle ont montrées qu'il n'existait pas une relation entre l'indice élevé de l'activité pouzzolanique et une résistance de compression élevée sur pâtes pures à 3 jours [13].

D'autres voix chimiques qui emploient l'acide chlorhydrique, peuvent fournir une indication quantitative des phases actives telles que la silice et l'alumine comme fraction pouzzolanique et qui est par nature acide. [43].

Une méthode d'essai accéléré, basée sur la réduction de la chaux, à été proposée par Fratini en 1950, [26], cette étude consiste à laisser réagir pendant 8 jours une certaine quantité de ciment en contact avec de l'eau (le liant hydraté), avec la quantité d'hydroxyde de calcium pouvant saturer un milieu de même alcalinité. Les ciments donnent toujours des solutions sous-saturées en chaux

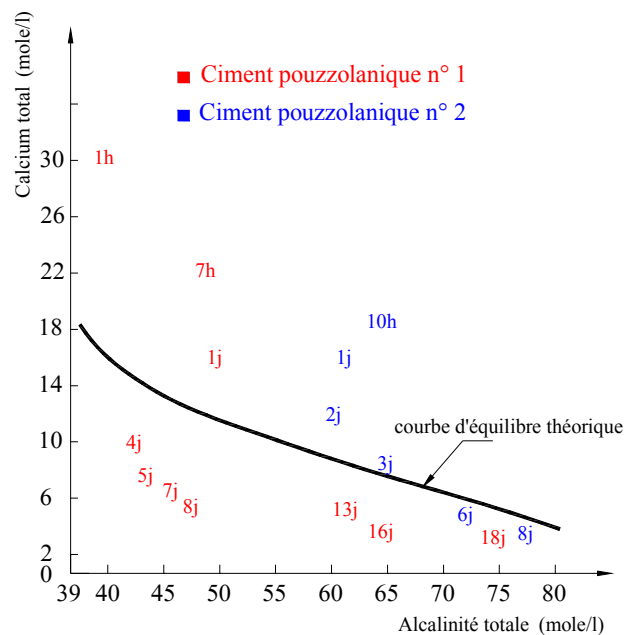


Figure I.5 Diagramme de pouzzolanité

L'essai à été effectuer sur deux ciments avec un pourcentage d'ajout bien connu d'où le chemin suivi est différent de la position des points représentatifs de l'évolution de l'alcalinité totale et du calcium total au dessus ou au dessous de la courbe théorique de solubilité de l'hydroxyde de calcium **figure I.5** . La réaction pouzzolanique sera effective pour les points au dessous de la courbe de saturation. .

b. Méthode physique

L'hydratation du ciment est un phénomène complexe au cours duquel les différentes phases du matériau s'hydratent selon des cinétiques très différentes [60, 33]. Au contact de l'eau, les silicates et les aluminates se dissolvent sous forme d'ions qui présentent une phase de diffusion.

La mesure de la chaleur d'hydratation suivant les normes britannique BS 4550 et Américaine ASTM C 186-94, consiste à mesurer la chaleur de solution du ciment hydraté et non hydraté dans un mélange d'acide nitrique et fluorhydrique. La différence entre les deux valeurs correspond à la chaleur d'hydratation [49].

Dans La **figure I.6**, les mesures de conductivité et de calorimétrie conduit à analyser à travers l'évolution de la chaleur et de la conduction électrique l'activité pouzzolanique du matériau.

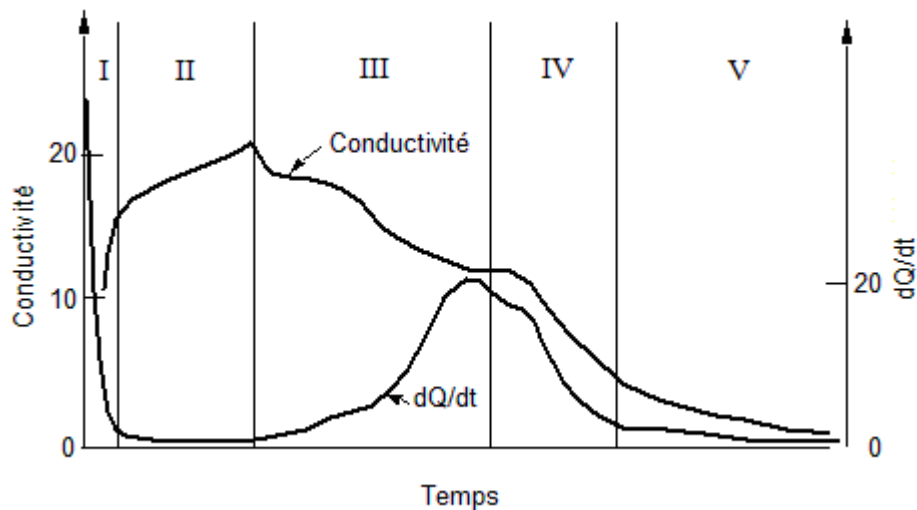


Figure : 6.I Évolution du dégagement de chaleur et de la conductivité électrique lors de l'hydratation d'une pâte de C_3S [62]

La progression de la réaction d'hydratation peut être suivie par des mesures de calorimétrie et de conductivité **figure I.6**. Comme on peut le voir, l'hydratation des silicates peut être séparée en cinq périodes distinctes.

Dans la Période 1, la présence des ions fait alors augmenter la conductivité du milieu

Durant la période 2 il y a un faible dégagement de chaleur. La conductivité augmente toujours. Se qui correspond à une faible activité chimique.

Par contre la période 3 est marquée par un fort dégagement de chaleur ce qui se traduit par une activité chimique intense et une baisse de la conductivité électrique. En général, c'est durant cette période que survient la prise.

A travers la période 4, on constate un ralentissement cinétique d'hydratation, qui correspond sur la courbe à une diminution de la chaleur dégagée. les hydrates se formes, moins il y a d'ions dans la solution, ce qui entraîne une diminution de la conductivité, ce phénomène se traduit aussi par un appauvrissement de la solution en chaux

En fin, la période 5, l'activité chimique diminue considérablement, dans cette période le ralentissement de la réaction d'hydratation, peut s'étaler sur des mois ou des années

c. Essais mécaniques

Pour déterminer l'efficacité d'une pouzzolane, on peut simplement comparer la résistance mécanique de deux séries d'éprouvettes de mortier, en remplace dans la première série une partie du ciment (exemple 30%) par de la pouzzolane et dans l'autre par une poudre inerte. Les résultats des essais (par exemple de compression) effectués à 14, 20 et 90 jours sur les éprouvettes et si les mélanges ciment + pouzzolane donnent des résistances supérieures, alors, la pouzzolane est active

I.5. Différentes utilisations de la pouzzolane

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants:

I. 5.1 L'agriculture

La culture en plein champ

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, offre pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, ainsi qu'un meilleur enracinement, un meilleur arrachage, la facilité de reprise des plantes, la réduction du risque de carences et de maladies.

Horticulture

L'herbe pousse mal sur la pouzzolane, son caractère minéral met les toiles plastiques à l'abri des rayons ultraviolets pour la culture horticole en serre.

I. 5.2 Applications routières

Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel). [44]

Dans les travaux publics, elle est utilisée comme matériaux de remblais légers, pour la réalisation de terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnée.

I. 5.3 Dans l'industrie

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche de couleur qu'apporte la pouzzolane).

I. 6. Conclusion

Vu que l'effet pouzzolanique pouvait être obtenu non seulement à partir de matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire mais aussi à partir de matériaux artificiels tels que : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumée de silice et autres, la pouzzolane en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle [4, 12] riche en silice et en alumine

Les pouzzolanes naturelles sont des produits émis essentiellement par une lave vitreuse, On peut citer comme produit provenant généralement d'une lave vitreuse, les formations volcaniques.

Selon beaucoup de chercheur, la réaction pouzzolanique est liée à certaines exigences chimiques et physiques. En effet l'activité pouzzolanique est vérifiée par le taux de fixation de la chaux et le temps nécessaire qu'il faut. On distingue deux catégories d'essais qui caractérisent les propriétés des pouzzolanes, comme étant un matériau riche en silice et l'alumine capable de réagir avec la chaux et former des produits aux caractères liant, de sorte à influencer les caractéristiques mécaniques. Ces essais se base essentiellement sur les déterminations chimiques, et s'appuie sur les méthodes physiques et mécaniques.

Chapitre II

**METHODES DE MESURES DES PROPRIETES
THERMOPHYSIQUES**

II. 1. Introduction

La faculté qu'a la chaleur de se propager dans un corps ou d'y être stockée est due aux caractéristiques thermo physiques des matériaux utilisés. Pour ce faire, nous allons rappeler quelques notions de base sur la propagation de la chaleur dans les solides et nous exposerons ensuite quelques méthodologies de mesures.

Les grandeurs thermo physiques sont :

- La conductivité thermique
- La diffusivité thermique
- L'effusivité thermique
- La chaleur massique

La conductivité thermique

En régime permanent, dans le cas le plus simple de l'écoulement unidimensionnel de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur e et de températures uniformes T_1 et T_2 , le flux de chaleur ϕ en W s'exprime sous la forme :

$$\phi = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2) A \quad (\text{II.1})$$

où A est l'aire des faces latérales en m^2

La conductivité thermique λ une valeur caractéristique et intrinsèque du matériau.

La Diffusivité thermique

Dans un milieu homogène et isotrope la conductivité thermique λ est une constante, l'équation de Fourier s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \Delta T \quad (\text{II.2})$$

Avec
$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T$$

Cette relation fait apparaître le rapport $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ en (m^2/s) qui représente la diffusivité thermique du milieu

La diffusivité thermique, est proportionnelle à la conductivité thermique, et inversement proportionnelle à la chaleur volumique (ρC_p). Elle caractérise l'inertie thermique des matériaux.

L'effusivité thermique

L'effusivité thermique mesure la propriété qu'a un corps d'arracher de la chaleur à un autre corps avec lequel il est mis en contact. Physiquement, elle représente la capacité d'un milieu à résister (en température) à une perturbation thermique. Elle se calcule à partir de l'expression suivante $E = \sqrt{\lambda \rho C_p}$:

La chaleur massique

L'équation calorimétrique classique : $Q = m C_p (T_2 - T_1)$ montre que la quantité de chaleur absorbée par un corps de masse m quand sa température augmente de T_1 à T_2 est proportionnelle à la chaleur massique C du solide considéré. Pratiquement, la chaleur massique C d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a besoin pour que la température d'une unité de sa masse s'élève d'un degré. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur massique pour tous les calculs de stockage de chaleur ou de transport de chaleur. D'autre part, la chaleur massique intervenant dans la diffusivité thermique α , sa mesure est souvent nécessaire.

II. 2. Les principales méthodes de mesure des propriétés thermo physiques

La conductivité thermique et la chaleur volumique sont des propriétés caractérisant le transfert thermique des milieux. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux mesures de propriétés thermiques notamment de la conductivité thermique des milieux granulaires. Les mesures de cette dernière sont souvent complexes car elles dépendent de plusieurs paramètres.

Les propriétés du milieu à considéré dépend de :

- Un milieu poreux constitué d'une phase solide et d'une phase gazeuse avec une porosité ouverte et/ou fermée.
- Un ensemble de particule de forme aléatoire ou bien définie.
- Existence de surface de contact entre les particules.

La conductivité thermique apparente doit prendre en compte certains paramètres tels que la conductivité thermique de chaque phase, la structure de la matière solide, et les zones de contacts entre particules. La mesure de la conductivité thermique est donc d'une grande importance quand on désire étudier les échanges de chaleur dans un système. Le développement des techniques de traitement de signal, la mesure de flux injectés, et l'utilisation des sondes de mesures, à permis de mettre au point des méthodes de mesures de la conductivité thermique apparente. [35].

Ces méthodes de mesure sont généralement basées sur les équations de conduction de chaleurs.

Le choix d'une méthode de mesures de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. à prendre en compte :

- Le type de produit : milieu granulaire, milieu semi-infini.
- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire, ou quasi établi.

- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.

On distingue les méthodes entre elles par le régime thermique temporel du milieu et peuvent être classées en deux grandes catégories : Les méthodes de mesures stationnaires, et instationnaires.

II. 2.1. Les méthodes en régime stationnaire

Ces méthodes sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants [35]. Elles exigent un temps assez important et nécessaire de manipulation pour des matériaux à faible conductivité thermique. Le milieu est soumis à un flux stationnaire et supposer en équilibre thermique. Les mesures de la température le long de la normale de l'échantillon et l'utilisation des équations de Fourier et les conditions aux limites nous permettent de déterminer les grandeurs physiques du milieu.

II. 2.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée

Son schéma de principe est représenté sur la **figure II.1**

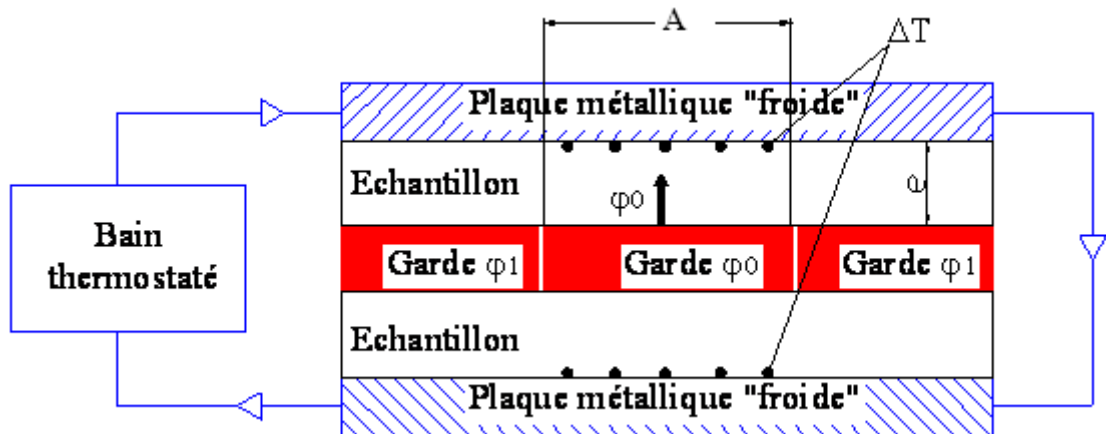


Figure II.1 : Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée, .[67]

Cette méthode impose à un échantillon plan du matériau à étudier, faiblement conducteur un flux de chaleur unidirectionnel, matérialisée par une plaque chauffante d'une puissance de chauffe ϕ_0 uniforme et constante qui est transmise aux plaques extérieures à travers les échantillons dont on veut mesurer la conductivité thermique.

On utilise une garde active, afin d'assurer le transfert 1D dans la zone chauffante de mesure par un anneau de garde auquel on fournit un flux ϕ_1 tel que la température de l'anneau soit égale à la température de la plaque chauffante. Le flux ϕ_1 est supérieur au flux ϕ_0 pour minimiser les pertes latérales aux extrémités. L'anneau de garde et la plaque chauffante sont séparés par une mince couche d'air.

Des thermocouples sont placés sur les deux faces des échantillons pour en mesurer les écarts de température ΔT

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent tel que la conductivité thermique s'en déduit par

$$\lambda = \frac{e\phi_0}{A(\Delta T)} \quad (\text{II.3})$$

Où A est la surface de la plaque chauffante.

Cette méthode n'est applicable qu'aux matériaux isolants utilisés en bâtiment, par ailleurs, les écarts de température relativement importants entre les deux faces peuvent être mesurés avec une bonne précision. ($\pm 1\%$). La méthode de la plaque chaude gardée a fait l'objet d'une normalisation ISO 8302 :1991, NF EN 1946-2.

Une autre extension de cette méthode a été développée, et qui fait appel à l'utilisation de mesures du flux unidirectionnel par deux fluxmètres dite méthode fluxmétrique utilisée pour la mesure de la conductivité thermique des matériaux sous forme de plaques mais, demande un temps de mesure de 1 à 3 jours

La conductivité de matériaux granulaires est mesurée selon le principe de la méthode du flux radial qui par analogie similaire à celui de la plaque chaude gardée [35] Le matériau est mis entre deux cylindres concentriques de rayons r_1 et r_2 et de hauteur h. Le flux de chaleur est créé par effet Joule dans le cylindre intérieur ; le cylindre extérieur est refroidi par une circulation d'eau. En régime permanent on a

$$\lambda = \frac{q}{2\pi(\Delta T)} Ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{II.4})$$

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

- Atteindre le régime permanent qui est particulièrement long et peut atteindre une durée de 1 à 3 jours.
- Obtenir un flux unidirectionnel dans l'échantillon

II. 2.1.2. Méthode des boites

Le principe de cette méthode, mise au point par le Laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'Université Claude Bernard de Lyon, est schématisé sur la **figure II.2**

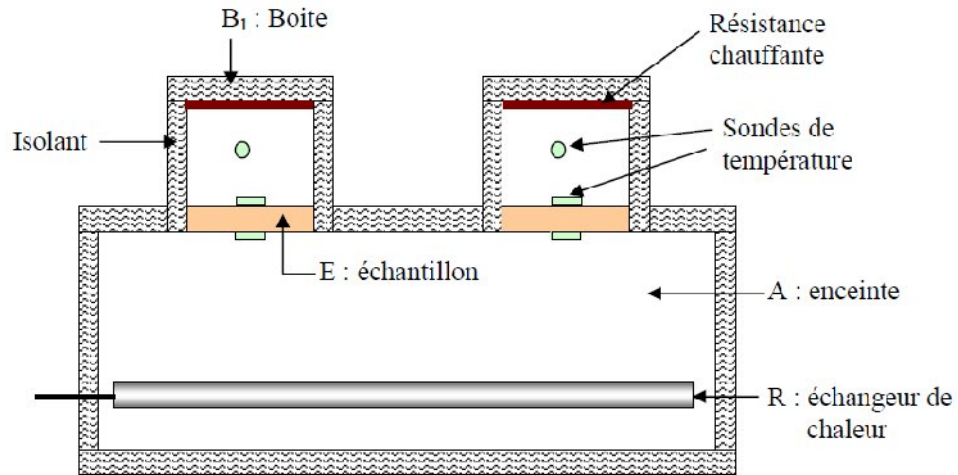


Figure II.2 : Coupe du dispositif "des boîtes"

L'enceinte A est maintenue à une température plus basse que les deux boîtes grâce à un échangeur basse température R. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E.

Les températures sur les faces supérieure et inférieure de l'échantillon E et le flux de chaleur émis par la résistance chauffante sont mesurées et permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon.

La stabilisation des températures T_C et T_F des faces chaude et froide de l'échantillon, nous conduit à conclure que le régime permanent est atteint (variation de l'ordre du $1/10^{\circ}$ de degré en une heure). Le temps nécessaire à atteindre est de 4 à 7 heures.

Le bilan énergétique du "local boîte" permet de considérer les trois flux suivants :

- Effet joule produit par la résistance chauffante

$$\phi_j = \frac{V^2}{R} \quad (\text{II.5})$$

- Déperdition thermique à travers la boîte

$$\phi_d = C_d (T_B - T_{am}) \quad (\text{II.6})$$

C_d : coefficient de déperdition

- Le flux de conduction à travers l'échantillon

$$\phi_c = \frac{\lambda_e A}{e} (T_C - T_F) \quad (\text{II.7})$$

On a $\phi_j = \phi_d + \phi_c \Rightarrow$

$$\lambda = \frac{e}{A(T_C - T_F)} \left[\frac{V^2}{R} \right] - C_d (T_B - T_{am}) \quad (\text{II.8})$$

II. 2.2. Les méthodes en régime instationnaire

Leur application est très vaste, le plus souvent utilisées pour des matériaux biologiques qui sont généralement hétérogènes et avec un pourcentage d'humidité élevé. Le principe de mesure s'appuie sur un modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées.

Nous pouvons citer quelques méthodes de mesure de la conductivité thermique dont nous exposons rapidement les principes. Nous allons, nous appuyés sur les travaux de [67, 35, 56], parmi ces méthodes de mesures des propriétés thermophysiques, on rencontre la méthode du fil chaud, Hot Disk, le plan chaud, ruban chaud, et la méthode flash. Les deux premières méthodes sont adoptées aux milieux solides et aux milieux poreux.

II. 2.2.1. Méthode du fil chaud



Figure II.3 : Vue d'une sonde de type fil chaud

La méthode de caractérisation la plus utilisée dans le monde industriel par sa facilité de mise en œuvre, et sa rapidité. Elle fut développée en premier lieu pour l'étude de la conductivité thermique de liquide, et étendue par la suite à la caractérisation de milieux solides et aux milieux poreux, [16]. Le principe expérimental est simple : on place un fil métallique entre deux blocs du matériau à étudier pour les matériaux solides et dans une enceinte fermée pour les gaz et les liquides. On applique un échelon de flux de chaleur constant ($\phi = 0$ si $t < t_0$ et $\phi = \phi_0$ si $t > t_0$) au fil chauffant et on relève l'évolution de la température $T_s(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide (**figure II.4**).

Dans le cas des solides pulvérulents (grains, poudres...), le fil chauffant est placé avec le thermocouple dans un cylindre de très petit diamètre. Ce cylindre est inséré dans le matériau à caractériser avant de démarrer le chauffage et l'acquisition de la température.

On peut considérer que le transfert au centre de l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de :

- La conductivité thermique λ ,
- La capacitance thermique (mC) de l'ensemble sonde + résistance chauffante,
- La résistance de contact R_c à l'interface sonde/échantillon.

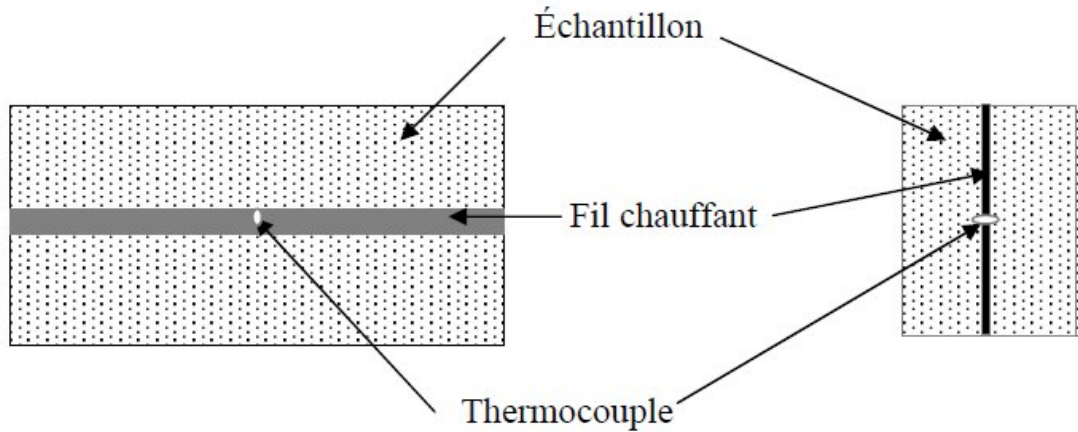


Figure II.4 : Schéma du montage de la méthode du fil chaud.

- Modélisation du fil chaud

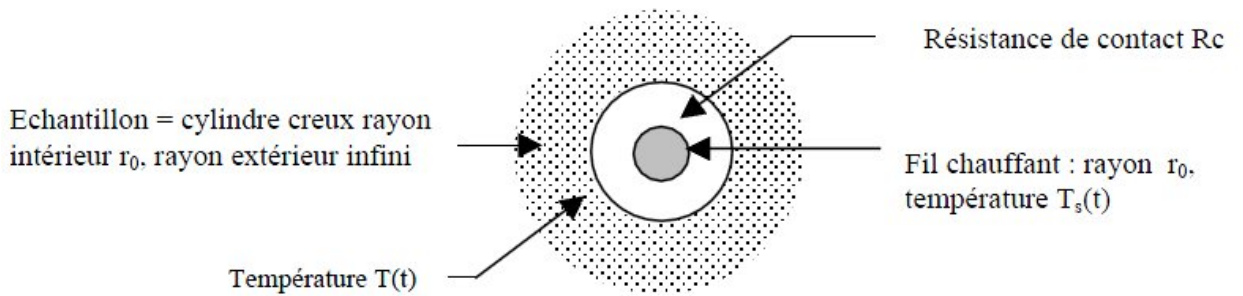


Figure II.5 : Schéma des transferts autour du fil chaud

Dans le cadre d'une modélisation simple du phénomène, on considère un fil infiniment long produisant une densité source de chaleur radiale, appliquée à l'instant initial. On suppose que l'énergie est dissipée uniquement par conduction. L'échantillon est de dimensions infinies et ses propriétés thermophysiques sont constantes. L'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.10})$$

Avec les conditions aux limites

$$\begin{cases} T(r, 0) = T_s(0) = T \\ T(\infty, t) = T_i \\ h[T_0(t) - T(0, t)] = -\lambda \frac{\partial T(0, t)}{\partial r} \\ \phi_0 = mc \frac{dT_0}{dt} + hS[T_0(t) - T(0, t)] \end{cases}$$

La modélisation du système à l'aide du formalisme des quadripôles permet d'écrire

$$\begin{bmatrix} \omega_0 \\ \phi_0 \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2\pi\lambda L q_0} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} - \frac{1}{\rho c \pi r_0^2 L p} \\ \rho c \pi r_0^2 L p & \frac{qr_0}{2} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ 2\pi\lambda L q r_0 \frac{K_1(qr_0)}{K_0(qr_0)} \end{bmatrix} \text{ avec } q = \sqrt{\frac{p}{\alpha}} \quad (\text{II.11})$$

où :

: Transformée de Laplace de la différence $T_0(t) - T_0(t=0)$

Transformée de Laplace de la différence $T(t) - T(t=0)$

R_c Résistance de contact à l'interface résistance chauffante / échantillon

c Capacité calorifique du thermocouple+résistance

λ Conductivité thermique de l'échantillon

a Diffusivité thermique de l'échantillon

p Variable de Laplace

r_0 Rayon du fil chauffant

L Longueur du fil chauffant

ϕ_0 Puissance dissipée dans la résistance chauffante

I_0, I_1, K_0, K_1 Fonctions de Bessel (**voir annexe -1-**)

On en déduit θ_0 :

$$\omega_0 = \frac{\phi_0}{p} \frac{A_0 + (A_0 R_c + B)/Z}{C_0 + (C_0 R_c + D_0)/Z} \quad (\text{II.12})$$

$$A_0 = 1 \quad B_0 = \frac{1}{2\pi\lambda L q_0} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)} - \frac{1}{\rho c \pi r_0^2 L p};$$

$$C_0 = \rho c \pi r_0^2 L p; \quad D_0 = \frac{qr_0}{2} \frac{I_0(qr_0)}{I_1(qr_0)}; \quad \frac{1}{Z} = 2\pi\lambda L q r_0 \frac{K_1(qr_0)}{K_0(qr_0)}$$

Si l'on considère un fil fin (r_0 petit) et si l'on se place aux temps longs ($p \rightarrow 0$), nous pouvons utiliser les développements limités des fonctions de Bessel au voisinage de 0 :

$$K_0(x) \approx -\ln(x); \quad K_1(x) \approx 1/x; \quad I_0(x) \approx 1; \quad I_1(x) \approx x/2$$

Ce qui conduit à :

$$A_0 = 1 \quad B_0 = 0;$$

$$C_0 = \rho c \pi r_0^2 L p; \quad D_0 = 1; \quad \frac{1}{Z} = \frac{2\pi\lambda L}{\ln(qr_0)}$$

D'où

$$\omega_0 = \frac{\phi_0}{p} \frac{Z + R_c}{mcp(R_c + Z) + 1} = \frac{\phi_0}{p} (Z + R_c) = \frac{\phi_0}{p} \left[\frac{\ln\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{\alpha}}\right)}{2\pi\lambda L} + R_c \right] = \frac{\phi_0}{p} \left[\frac{-\ln(p)}{4\pi\lambda L} - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{\alpha}}\right)}{4\pi\lambda L} + R_c \right]$$

L'utilisation des tables de la transformée inverse, permet de calculer la température $T_0(t)$ aux temps longs :

$$T_0(t) - T_0(0) = \frac{\phi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \phi_0 R_c - \frac{\gamma\phi_0}{4\pi\lambda L} - \frac{\phi_0 \ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{\alpha}}\right)}{2\pi\lambda L}$$

avec $\gamma = 0.57721$ la constante d'Euler

Soit finalement :

$$T_0(t) - T_0(0) = \frac{\phi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \phi_0 \left[R_c - \frac{\gamma\phi_0}{4\pi\lambda L} - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{\alpha}}\right)}{2\pi\lambda L} \right] \quad (\text{II.13})$$

L'allure de $T_0(t) - T_0(0)$ est une droite de pente $\frac{\phi_0}{24\lambda L}$ dont la détermination nous permet de calculer la conductivité λ .

A priori, la méthode est d'une grande simplicité, mais certaines difficultés pratiques peuvent avoir lieu à cause de l'inertie du fil et la résistance de contact entre l'échantillon et la sonde en engendrant des erreurs significatives. Par contre ces difficultés n'influent pas sur la température aux temps longs

II. 2.2.2. Méthode du Hot Disk

La méthode du Hot Disk consiste à imposer un flux de chaleur uniforme dans un plan séparant deux échantillons symétriques (**figure II.6**). Les résultats de la mesure sont exploités pour la détermination simultanée de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique ainsi que la capacité thermique des matériaux

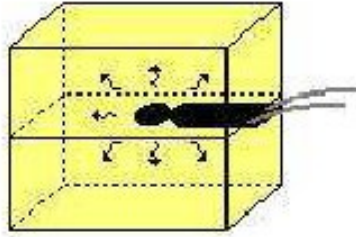


Figure II.6 : Principe expérimental du Hot Disk

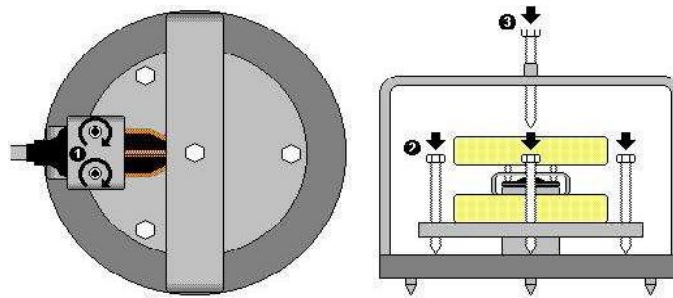


Figure II.7 : Montage standard du Hot Disk

La sonde sert de source de chaleur et de capteur de mesure dynamique, constituée d'anneaux concentriques (avec un rayon noté r_s). On enregistre l'augmentation de la résistance de la sonde qui correspond à l'augmentation de la température.

La mesure de la variation de la résistance interne de l'élément chauffant (la sonde Hot Disk) en fonction du temps peut être exprimée par :

$$R(t) = R_0 \{1 + u. [\nabla T_i + \nabla T_{ate}(\tau)]\} \quad (\text{II.14})$$

R_0 est la résistance du disque à $t = 0$,

u est le coefficient thermique de résistance (ou TCR),

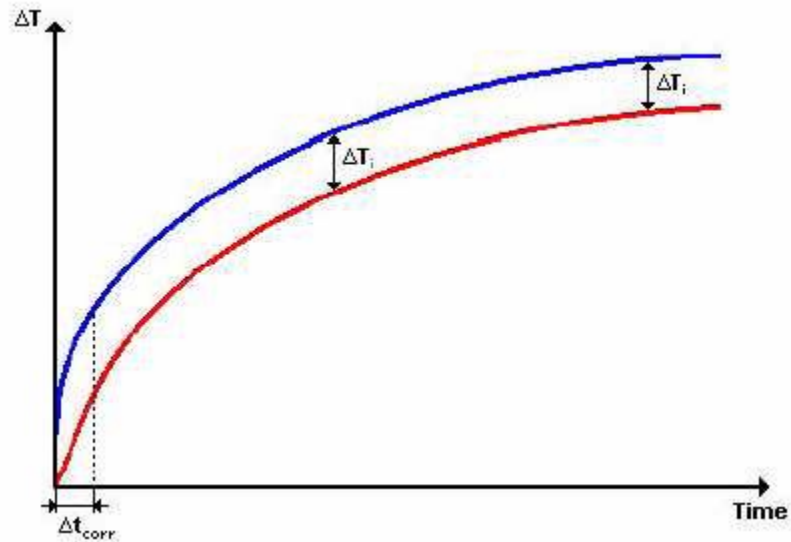
ΔT_i est la différence de température qui se développe presque instantanément sur les couches isolantes minces qui couvrent les deux côtés de la matière du capteur Hot Disk (nickel) et qui font du Hot Disk un capteur approprié.

$\Delta T_{ate}(\tau)$ est l'augmentation de température de la surface de l'échantillon sur l'autre côté de la couche isolante en face du capteur (spirale double).

On à

$$\nabla T_i + \nabla T_{ate}(\tau) = \frac{1}{u \left(\frac{R(t)}{R_0} - 1 \right)} \quad (\text{II.15})$$

ΔT_i peut être nulle si le « contact thermique » est parfait. Ceci peut être réalisé par dépôt (PVD ou CVD) d'une couche mince ou d'un échantillon isolant électrique.



**Figure II.8 : Courbe bleue : augmentation de la température du capteur
 Courbe rouge : augmentation de la température de la surface
 de l'échantillon [56]**

ΔT_i devient constant après un moment très court, ΔT_i , qui peut-être estimé comme $\nabla T_i = \frac{\delta^2}{K_i}$

Où

δ est l'épaisseur de la couche isolante

K_i : la diffusivité thermique de la matière de cette couche.

On suppose le milieu cylindrique de rayon r et considéré semi-infini par rapport à la sonde. L'évaluation de la conductivité thermique est établi avant que le flux de chaleurs n'atteigne les bords de l'échantillon, L'augmentation de température est dépendante du temps et est théoriquement définie par la relation (II.16), qui lie la température moyenne enregistrée par la sonde à la puissance de chauffe et aux caractéristiques de l'échantillon [23].

$$\nabla T_{ate}(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r_s \lambda} D(\tau) \quad (II.16)$$

Où

P_0 est la puissance totale fournie par le capteur

r_s le rayon des anneaux sources concentriques (sonde)

λ la conductivité thermique de l'échantillon

$D(\tau)$ une fonction caractéristique du Hot Disc dépendante du temps sans dimension

Avec $\tau = \sqrt{\frac{ta}{r_s^2}}$ et a la diffusivité de l'échantillon

τ : est la durée mesurée à partir du début de l'enregistrement du transitoire

En traçant $\nabla T_{ate}(\tau)$ en fonction de $D(\tau)$, on obtient une droite dont l'augmentation de température entre le point de départ et le point final est ΔT_i (on le lit en ordonnée) et la pente est $\frac{P_0}{\pi^{3/2} r_s \lambda}$, pour des durées expérimentales beaucoup plus longues .

II. 3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés d'une manière générale les différentes méthodes de mesures des propriétés thermophysiques, notamment de la conductivité thermique. En régime stationnaire, la méthode de la plaque chaude gardée [18] et la méthode des boîtes [39], on peut encore citer d'autres méthodes comme la méthode de la barre [18], et la méthode du flux radial [29].

Pour le régime instationnaires, on a cités : la méthode du fil chaud [28,6], et la méthode Hot Disk [61,38], mais d'autres méthodes peuvent être mentionnées comme celle du plan chaud [64, 65], ruban chaud [61,38], et pastille chaude [5].

Le choix d'une méthode de mesure va dépendre de plusieurs facteurs dont les importants sont :

- La fiabilité des résultats et la durée de mesure
- L'aspect physique du milieu
 - Milieux granulaires \Rightarrow méthodes en régime instationnaire
 - Milieux sous forme compactes \Rightarrow méthodes en régime stationnaire
- Des moyens disponibles

Pour un gain de temps appréciable et une facilité de mise en œuvre de l'échantillon, les méthodes instationnaires sont de loin les plus conseillées

Chapitre III

**COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX DE
POUZZOLANE**

III. 1. Introduction

Le principe de l'action et réaction que les matériaux de constructions subit pendant les sollicitations simples tel que la compression et la traction, intéressent les chercheurs en raison de leur importance pour la construction. En effet, les matériaux subissent en premier lieu l'action de leur propre poids puis des charges qu'ils supportent, en deuxième lieu, la réaction se fait en fonction de la contrainte au sol. L'action simultanée du poids et de la réaction du sol provoque dans le matériau une résistance à la compression.

On définit la résistance à la traction et la compression par la mesure de la capacité d'une pièce à résister à l'arrachement et à une pression dus aux efforts appliqués. Ces deux sollicitations, représentent des phénomènes mécaniques tout à fait différents, la traction c'est l'effort strictement opposé à la compression, en conséquence, les matériaux qui résistent bien à la compression peuvent ne pas l'être à la traction.

Le granulat de la pouzzolane naturelle appartient au milieu des granulats légers et poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le comportement mécanique et le mode de rupture des matériaux contenant de la pouzzolane sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques travaux qui ont permis de concevoir trois types de matériaux à base pouzzolanique à usage d'habitation, le béton, le mortier et la brique de terre stabilisée à base de pouzzolane naturelle.

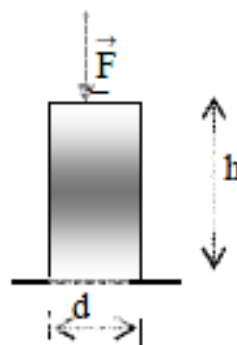
L'introduction des ajouts dans les matériaux à construction pousse les chercheurs à élaborer un programme expérimental de caractérisation du comportement mécanique de ces différents matériaux et qui nécessite la réalisation des essais, en compression, en traction par flexion ainsi que des essais en traction par fendage.

III. 2. Rappels théoriques

Résistance à la compression : éprouvette cylindrique norme NFP 18-406.

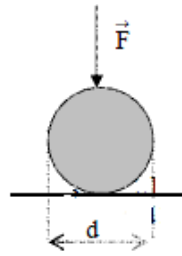
Diamètre $d = 16$ cm

Hauteur $h = 2d = 32$ cm.



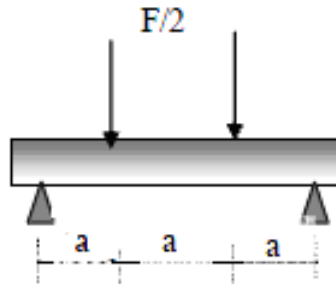
$$R_c = \frac{4F}{\pi d}$$

Résistance à la traction par fendage : éprouvette cylindrique norme NF P 18-408.



$$R_t = \frac{2F}{\pi dh}$$

Résistance à la traction par flexion : éprouvette parallélépipédique norme NF P 18-407



$$R_{tf} = \frac{300F}{a^2}$$

Ces essais consistent à mesurer à l'aide d'une presse la résistance à la rupture, à une échéance d'au moins 28 jours, d'une éprouvette normalisée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux trouvés dans la littérature

III. 3. Le béton et le mortier à base de ciment pouzzolanique

III. 3.1. Matériaux utilisés

III. 3.1.1 Clinker

C'est le composé de base des ciments portland composés, il est constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium (3 CaO. SiO₂ et 2 CaO. SiO₂). Son apport est de 80 à 94% pour les ciments types CEM II/ A et de 65 à 79% pour les types CEM II/ B, le pourcentage restant est constitué de l'un des trois ajouts énumérés précédemment, ou bien de deux de ces trois ajouts, ou bien des trois ajouts en plus des 5% de gypse. Les compositions chimiques et minéralogiques sont données par les tableaux III.1 et III.2. [9]

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Perte au feu	Insolubles	Total
19.54	65.04	4.42	2.88	1.30	2.79	2.80	0.50	99.47

Tableau III.1 : caractéristiques chimiques du ciment

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
70.84	2.61	6.84	8.76	0.90

Tableau III.2 : Composition minéralogique du ciment

Le ciment courant est fabriqué par mélange et cobroyage de clinker et d'autres constituants minéraux, avec une certaine quantité de sulfate de calcium, nécessaire pour réguler la prise.

On définit 5 types de ciment dont la composition doit être conforme au tableau 10 :

- Ciment Portland
- Ciment portland composé
- Ciment de haut fourneau
- Ciment pouzzolanique
- Ciment composé

Le **tableau III.3** indique à titre indicatif les dénominations normalisées des ciments de même que les notations abrégées correspondantes comme suit :

-CEM pour indiquer que le produit est un ciment Un chiffre romain I, II, III, IV ou V pour indiquer le type de ciment

-Pour les ciments II, III, IV et V une lettre A, B ou C pour indiquer la proportion des constituants

-Le nombre indiquant la classe de résistance 32.5, 42.5, 52.5, suivi, le cas échéant de la lettre R pour signaler une résistance élevée au jeune âge (2 jours).

	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland	CEM I	95 - 100	--	0 - 5
Ciment Portland composé	CEM II A	80 - 94	6 - 20	--
	CEM II B	65 - 79	21 - 35	--
Ciment de haut fourneau	CEM III A	35 - 64	36 - 65	0 - 5
	CEM III B	20 - 34	66 - 80	0 - 5
	CEM III C	5 - 19	81 - 95	0 - 5
Ciment pouzzolanique	CEM IV A	65 - 90	10 - 35	0 - 5
	CEM IV B	45 - 64	36 - 55	0 - 5
Ciment composé	CEM V A	40 - 64	18 - 30	0 - 5
	CEM V B	20 - 39	31 - 50	0 - 5

Tableau III.3 : Désignation normalisée et composition du ciment courant

III. 3.1.2 Les granulats

L'analyse granulométrique caractérise les granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent et les pourcentages des grains de chaque grosseur. Les courbes granulométriques des granulats sont données par la **figure III.1**.

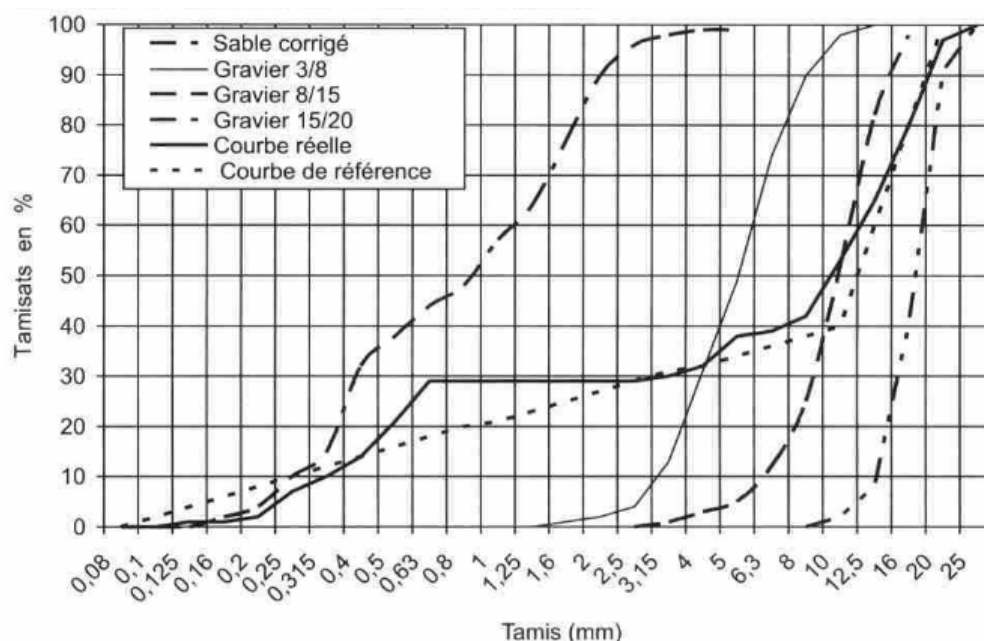


Figure III.1 : Courbes granulométriques des granulats

L'analyse granulométrique nous permet le dosage des granulats, qui par suite donne les compositions finales des bétons et des mortiers pour les programmes expérimentaux.

III. 3.1.3. Les ajouts cimentaires

a. Pouzzolane naturelle

Deux types de pouzzolanes d'origine volcanique extraite du gisement de Bou Hamidi situé à Béni-Saf (nord ouest algérien) et gisement de Saint Pierre (La réunion).

- **Gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien)**

La pouzzolane naturelle est utilisée comme granulat ou liant selon ses caractéristiques et ses propriétés dans les matériaux.

Ses caractéristiques physiques et chimiques sont données sur les tableaux III.4a, III.4b, III.4c et III.4d..

Caractéristiques	Valeurs
Surface spécifique BLAINE de poudre (cm ² /g)	3560
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.75
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.02
Porosité (%)	57.1
Absorption (%)	32
Humidité (%)	2.5
Pouzzolanicité (%)	85

Tableau III.4a : Caractéristiques physiques de la pouzzolane gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien) [47]

Composant	Symbole	Unité	Teneurs
La silice	S_iO_2	%	46,60
L'alumine	Al_2O_3	%	17,50
L'oxyde de fer	Fe_2O_3	%	9,52
La chaux	CaO	%	10,10
La magnésie	MgO	%	2,40
Les sulfates	SO_3	%	0,40
Les chlores	Cl	%	0,0
Les oxydes de potassium	K_2O	%	1,47
Les oxydes de sodium	Na_2O	%	3,23

Tableau III.4b : Caractéristiques chimiques de la pouzzolane gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien) [47]

- **Pouzzolane naturelle du gisement de Saint Pierre (la réunion)**

Composant	Symbole	Unité	Teneurs
La silice	S_iO_2	%	38,35
L'alumine	Al_2O_3	%	16,65
L'oxyde de fer	Fe_2O_3	%	8,72
La chaux	CaO	%	4,64
La magnésie	MgO	%	1,68
Les oxydes de potassium	K_2O	%	3,10
Les oxydes de sodium	Na_2O	%	5,12
Les oxydes de titanium	TiO_2	%	5,12

Tableau III.4c : Caractéristiques physiques de la pouzzolane gisement de Saint Pierre (la réunion) [34]

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,80
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.028
Porosité (%)	65

Tableau III.4d : Caractéristiques physiques de la pouzzolane gisement de Saint Pierre (la réunion) [34]

L'analyse chimique montre que la pouzzolane contient plus de 46,0 % de silice et environ 10 % de chaux (**tableau III.4b**). La pouzzolane naturelle de Béni-Saf possède donc une structure vitreuse, de plus la différence entre la silice et la chaux est d'environ 36,44 %, qui est supérieure à 34 % [14], ce qui veut dire que la teneur en verre est appréciable. La même analyse est faite pour la pouzzolane de Saint Pierre **tableau III.4c**.

L'analyse sédimentométrique de la pouzzolane est illustrée par la **figure III.2**.

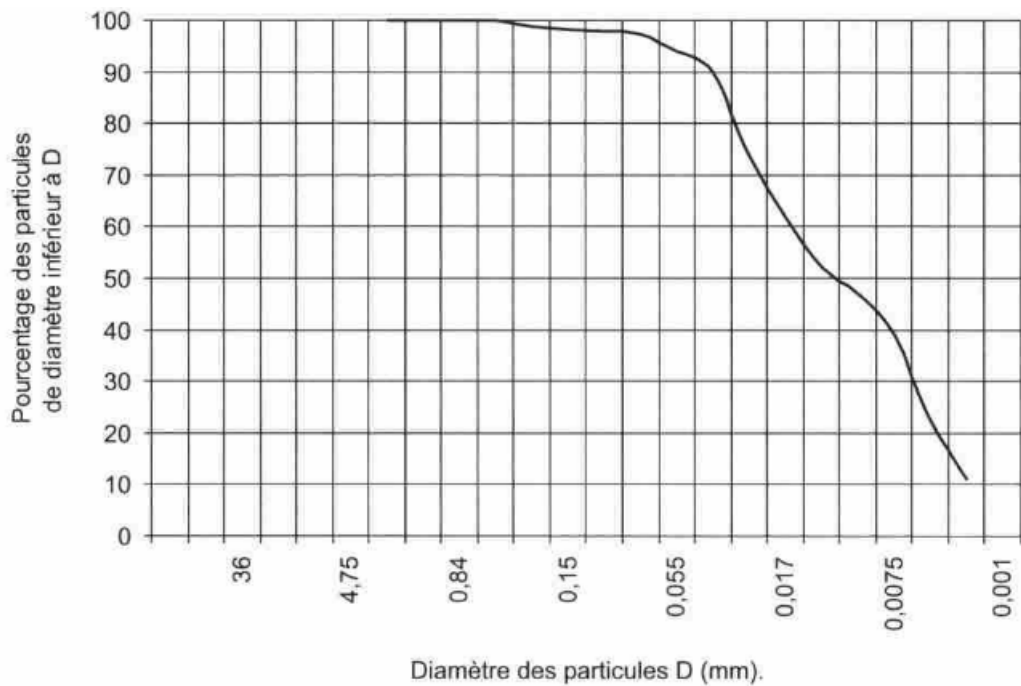


Figure III.2 : Courbe granulométrique et sédimentométrique de la pouzzolane de Béni-Saf.

b. La fumée de silice

Ses caractéristiques chimiques et physiques sont données sur le **tableau III.5**. [3, 50].

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	PF
87.3	0.4	1.0	4.4	0.3	0.2	0.6	0.6

Tableau III.5 : Caractéristiques chimiques de la fumée de silice

c. Le laitier des hauts fourneaux

En provenance du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (annaba). Ses caractéristiques chimiques et physiques sont reportées sur le **tableau III. 6**.

SiO ₂ (%)	CaO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	
35.85	37.22	5.08	7.77	3.55	
MnO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	PF (%)
2.02	0.12	0.27	0.17	0.09	1.74

Tableau III.6 : Caractéristiques chimiques du laitier

d. Le stérile de carrière

Sa composition chimique est donnée sur le **tableau III. 7** [21].

PH	CaCO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	PF (%)
9	99	0.09	0.02	0.01	0.01	43.8

Tableau III.7 : Caractéristiques chimiques du stérile de carrière

III. 4. Programmes expérimentaux

Dans le cadre du programme expérimental élaboré par [47], où ils ont confectionnés trois types de bétons en substituant un certain pourcentage en poids du ciment par la pouzzolane naturelle à (20, 25 et 30 %) Les compositions des quatre bétons sont indiquées dans le **tableau III.8**.

Pour l'étude faite par [2], cinq compositions de bétons différentes ont été confectionnées sont présentées dans le **tableau III.9**. Le pourcentage de l'ajout cimentaire est fixé à 10 % en poids du ciment et le rapport E/C= 0.30. En plus de la pouzzolane naturelle utilisée comme ajout, ils ont employés de la fumée de silice, le laitier du haut fourneau et le stérile de carrière.

Les mesurés effectuées de la résistance à la compression à différentes échéances, par rapport à un béton témoin de référence pour le besoin de la comparaison sont reportées dans le tableau 10

Désignation des bétons	Ciment (Kg)	Pouzzolane Z (Kg)	Sable (Kg)	Graviers (Kg)			Eau (L)	E/Liant
				3/8	8/15	15/20		
B-T.(0 % Z)	400	0	579	176	545	457	184	0,46
B-Z.20 (20% Z)	320	80	579	176	545	457	186	0,47
B-Z.25 (25% Z)	300	100	579	176	545	457	187	0,47
B-Z.30 (30% Z)	280	120	579	176	545	457	188	0,47

Tableau III.8 : Compositions des bétons [47]

Désignation des bétons	Ciment (Kg)	Ajout (Kg)	Gravier 3/15	G/S	E/C
B-T.(béton témoin)	500	0	525	2,50	0,30
B-PZ (béton de pouzzolane)	480	50	525	2,50	0,30
B-FS (béton fumée de silice)	480	50	525	2,50	0,30
B-LT (béton au laitier)	480	50	525	2,50	0,30
B-SC (béton stérile de carrière)	480	50	525	2,50	0,30

Tableau III.9 : Compositions des bétons [2]

III. 4.1. Le béton à base de ciment pouzzolanique

a. La résistance à la compression du béton

L'évolution des résistances mécanique en compression des bétons à la pouzzolane naturelle, suivant des proportions variantes à hauteur de (20%, 25%, et 30%) est illustrée par **la figure III.3**. On remarque l'augmentation de la résistance mécanique aux différents âges de durcissement pour tous les bétons pouzzolaniques. Pour le pourcentage de 20 % donne, à long terme, des performances mécaniques pratiquement analogues à celles du béton témoin. Cela prouve que l'effet pouzzolanique a joué un rôle pour ce béton: l'activité pouzzolanique est le principal paramètre responsable de l'augmentation des résistances.

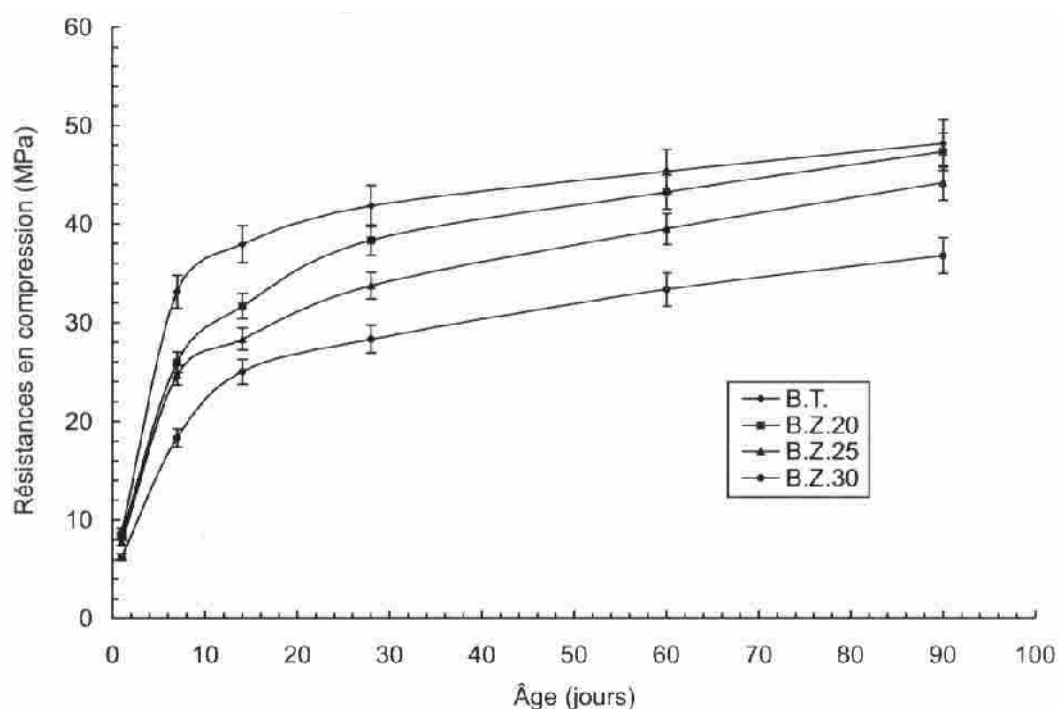


Figure III.3 : Comparaison des évolutions des résistances en compression B.T, béton témoin ; B.Z.,20, 25, 30, béton à base de ciment pouzzolanique à un dosage de 20, 25, ou 30 % de pouzzolane [47]

L'étude faite par [2] a mis en évidence l'influence de l'ajout cimentaire de la pouzzolane dans le béton qui a montré une assez bonne résistance à la compression par rapport au béton avec ajouts (B-FS, B-LT, B-SC) et le béton sans ajouts. Les courbes de la **figure III.4** montrent l'évolution de la résistance à la compression du béton aux différents âges de durcissement avec les divers ajouts et le béton témoin. On constate que le béton témoin présente la plus basse valeur de la résistance à la compression et que le béton à la fumée de silice possède la plus grande valeur de la résistance à la compression à long terme, cela est vrai aussi, pour le béton de pouzzolane et qui prouve que l'activité pouzzolanique joue un rôle important dans l'augmentation des résistances. L'évolution de la résistance est liée au phénomène de l'hydratation plus la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le ciment est grande, plus les produits d'hydratation des ajouts formés sont denses.

Type de béton	Age en jour		
	3	7	28
B-PZ	41.83	46.74	50.11
B-FS	-	-	63.20
B-LT	33.27	36.89	42.29
B-SC	38.52	46.52	52.23
B-T	21.71	26.34	35.09

Tableau III.10 : Résistance en compression en (MPa) [2]

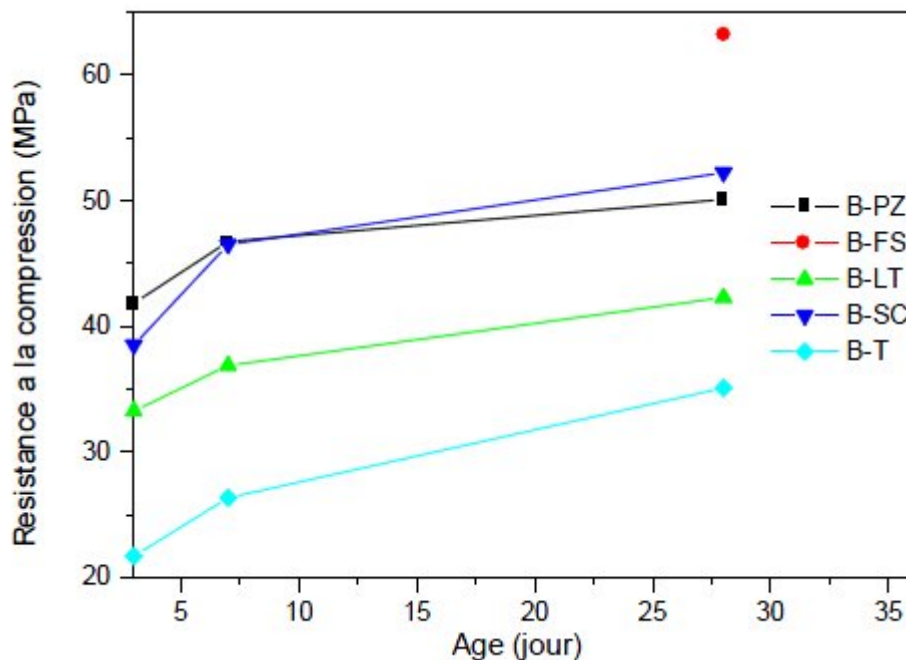


Figure III.4 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps [2]

b. La résistance à la traction

La résistance à la traction a été calculée par la formule de BAEL : $f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$

$f_{t,j}$: est la résistance moyenne en fendage à l'âge de (j) jours,

$f_{c,j}$: est la résistance caractéristique en compression à l'âge de (j) jours.

Vu que la résistance à la traction est déterminée à partir de la résistance à la compression, les mêmes constatations faites pour cette dernière sont valables pour la résistance à la traction [7].

Type de béton	Age en jour		
	3	7	28
B-PZ	3.11	3.40	3.60
B-FS	-	-	4.39
B-LT	2.59	2.81	3.13
B-SC	2.91	3.39	3.73
B-T.	1.90	2.18	2.70

Tableau III.11 : Résistance à la traction en (MPa) [2]

III. 4.2. Le mortier à base de ciment pouzzolanique

Le mortier se compose en masse d'une partie de liant, de trois parties de sable normalisé et d'une demi - partie d'eau. Les essais mécaniques (flexion et compression simple) sont appliqués sur des éprouvette prismatiques de dimensions 4 x 4 x 16 cm.

Les essais d'écrasements à la compression et de traction sont effectués à 2, 7, 14 et 28 jours, en substituant un certain pourcentage en poids du ciment par les ajouts (la pouzzolane, le laitier et le calcaire) variant de (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, et 30%) Les résultats des résistances mécaniques sont donnés par le **tableau III.12.** [31].

N°de l'échantillon	Résistance à la traction par flexion en MPa à l'âge de			Résistance à la compression simple en MPa à l'âge de		
	2 jours	7 jours	28 jours	2 jours	7 jours	28 jours
01 (0% d'ajout)	5,8	7,0	10,0	28,6	41,8	56,0
02 (05% laitier)	5,6	6,6	9,7	27,0	41,7	54,1
03 (10% laitier)	5,4	6,4	9,5	24,8	39,7	50,2
04 (15% laitier)	5,2	6,3	9,5	21,5	38,5	49,8
05 (20% laitier)	4,9	5,9	9,0	20,6	36,5	49,0
06 (25% laitier)	4,7	5,8	8,8	20,4	34,5	47,9
07 (30% laitier)	4,3	5,3	8,5	20,0	33,6	46,5
08 (05% pouzz)	4,9	5,7	8,3	21,7	34,6	48,0
09 (10% pouzz)	4,6	5,3	8,0	21,0	34,0	47,2
10 (15% pouzz)	4,2	4,9	7,8	20,3	33,6	46,4
11 (20% pouzz)	4,0	4,8	7,3	18,2	33,1	45,8
12 (25% pouzz)	3,6	4,7	6,8	16,8	29,4	42,8
13 (30% pouzz)	3,2	4,1	6,3	15,0	25,8	39,2
14 (05% calcaire)	5,4	5,8	7,9	23,1	35,9	45,6
15 (10% calcaire)	5,0	5,5	7,5	22,7	35,8	45,5
16 (15% calcaire)	4,5	5,0	7,1	22,1	34,3	43,8
17 (20% calcaire)	4,2	4,8	6,4	21,1	33,3	42,0
18 (25% calcaire)	4,0	4,8	6,7	18,9	30,0	40,6
19 (30% calcaire)	3,5	4,5	6,1	18,8	28,9	39,0

Tableau III.12 : Résistance à la traction par flexion et à la compression simple en fonction de l'âge des différents échantillons de mortier [31]

Il est évident que les résistances mécaniques à la compression simple du ciment CPA sont meilleures comparées à celles des CPJ-CEM II/ A ou B. On remarque aussi que les résistances mécaniques augmentent avec l'âge et diminuent avec le taux d'ajout. Le mélange à la pouzzolane donne des résistances mécaniques à la compression simple pour tous les âges et pour tous les pourcentages assez proches comparés au laitier [30].

Les matériaux utilisés sont aptes à jouer le rôle d'ajouts d'après leurs compositions chimiques et les résistances mécaniques qu'ils offrent aux ciments Portlands composé (CPJ-CEM II/ A ou B).

III. 4.3. Le béton à base de ciment pouzzolanique et de granulats de pouzzolane naturelle

Dans la construction le béton représente une très grande proportion de toute la charge sur la structure et il ya clairement des avantages considérables en réduisant sa densité. L'utilisation du béton à granulats légers est une nouvelle manière de réduire le poids d'une structure.

Les matériaux utilisés pour la confection de ce type de béton sont respectivement le ciment Portland sans ajout et avec ajout de la pouzzolane à hauteur de (10%, 20%, 30%, 40% et 50%), l'emploi des agrégats légers de pouzzolane (LWA) du gisement de BOUHAMIDI de Béni Saf séparés selon leur taille en deux catégories, le 2/8 et 8/16 respectivement nommés (LWCA1) et (LWCA2).

Pour tous les six types de bétons légers confectionnés dans le cadre d'un programme expérimental mis en place par [36], l'agrégat final brut est composé d'un mélange des deux granulats légers où le (LWCA2) est nominal, combinés dans les proportions de 2 :1 en poids. Le détail des six mélanges de bétons est indiqué dans le **tableau III.13**

Désignation du mélange	Ciment (Kg)	Pouzzolane (Kg)	Sable (Kg)	Granulat léger (LWCA) (Kg)	Eau (L)	Absorption d'eau	Eau/Liant
LWC0	400	0	606	583	176	58	0,44
LWC10	360	40	592	583	178	58	0,445
LWC20	320	80	572	583	181	58	0,453
LWC30	260	120	559	583	184	59	0,46
LWC40	240	160	551	583	187	59	0,468
LWC50	200	200	540	583	192	60	0,48

Tableau III.13 : Compositions des bétons [36],

(LWC) : désigne l'identification du mélange et les numéros 0,10,20,30,40,50, représentent le pourcentage de substitution en pouzzolane du ciment de Portland.

Les essais à la compression, de traction et de flexion sont effectués à 3, 7, 28, 90 et à 365 jours pour les six mélanges. Les **figures III.5, III.6 et III.7** montrent les effets de la combinaison des agrégats légers et de l'ajout cimentaire de la pouzzolane sur les différents mélanges des bétons.

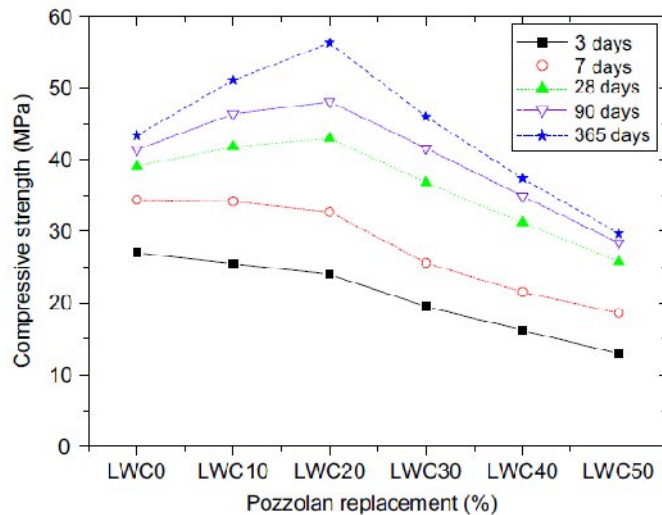


Figure III.5 : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression [36]

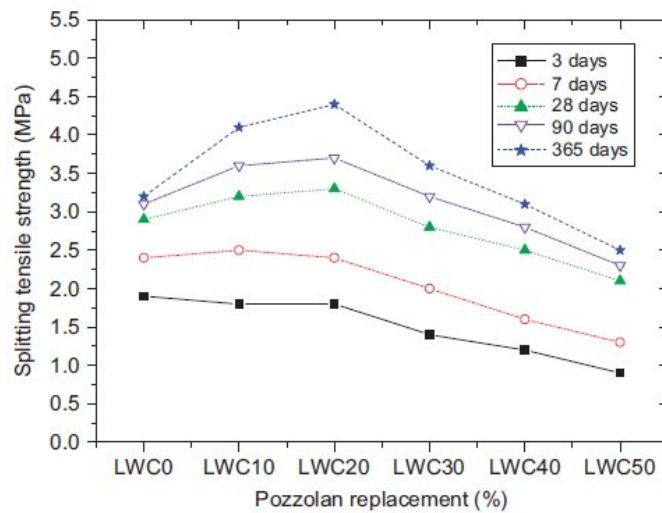


Figure III.6 : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la traction [36]

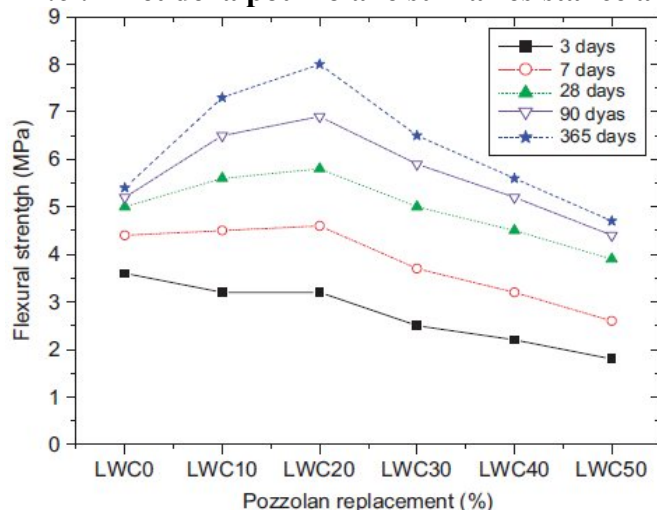


Figure III.7 : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la flexion [36]

Les résultats donnés par ces courbes montrent l'évolution des résistances (Compression, traction et flexion) durant les échéanciers de 3, 7, 28, 90 et 365 jours et prouvent encore une fois que l'incorporation de 20% de pouzzolane comme ajout cimentaire

donne les plus grandes résistances par rapport au béton témoin après 7 jours jusqu'à 365 jours.

L'ajout de 30% de pouzzolane développe des résistances acceptables, mais à partir de 90 jours et plus par rapport au béton témoin.

On remarque que les pourcentages de 40% et 50% affichent les résistances les plus faibles pour tous les âges et donc doivent être évités

III. 4.4 Le béton à base de granulats de pouzzolane naturelle et ciment sans ajout pouzzolanique

a. Mixtures de bétons à base de Granulat de pouzzolane du gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien)

Dans un autre programme expérimental élaboré par [68], les compositions des bétons sont consignées dans le **tableau III.14**. Trois classes granulaires ont été utilisées 0/2, 2/8, 8/16 du gisement de Bou Hamidi (nord ouest algérien).

Désignation du mélange	Ciment (Kg)	Sable (Kg)	Granulat léger (LWCA)(Kg)	Eau (L)
LWC1	414	613	585	168
LWC2	410	604	578	189
LWC3	405	600	574	190
LWC4	366	654	575	173
LWC5	312	704	564	177

Tableau III.14 : Compositions des bétons [68],

(LWC) : désigne l'identification du mélange et les numéros 1,2,3,4,5, représentent les différentes mixtures de bétons.

L'influence des agrégats légers de la pouzzolane sur les différentes compositions du béton peut être distinguée par l'évolution de la masse volumique apparente du béton qui est représentée dans le **tableau III.15**. Si en compare ces valeurs à un béton normal de masse volumique apparente 2300 kg/m^3 , on constate une réduction qui peut atteindre les 20%.

Mixture	Masse volumique, kg/m^3											
	H	1 j	3 j		7 j		28 j		90 j		365 j	
			H	S	H	S	H	S	H	S	H	S
LWC1	1834	1832	1844	1806	1847	1791	1850	1781	1855	1775	1862	1764
LWC2	1825	1821	1831	1789	1836	1771	1841	1760	1853	1754	1853	1748
LWC3	1821	1820	1834	1784	1837	1771	1840	1759	1849	1752	1848	1749
LWC4	1820	1818	1827	1783	1832	1766	1836	1754	1840	1750	1842	1741
LWC5	1810	1805	1812	1778	1817	1763	1823	1745	1826	1741	1832	1736

Tableau III.15 : Evolution de masse volumique en fonction de l'âge du béton [68],

H : humide ; S : sec

Les essais mécaniques à la compression, à la traction et à la flexion sont effectués à 3, 7, 28, 90 et à 365 jours pour les Cinq mélanges. Les figures III.8, III.9 et III.10 montrent les effets de la combinaison des agrégats légers et du ciment sans ajout de la pouzzolane sur les différents mélanges des bétons.

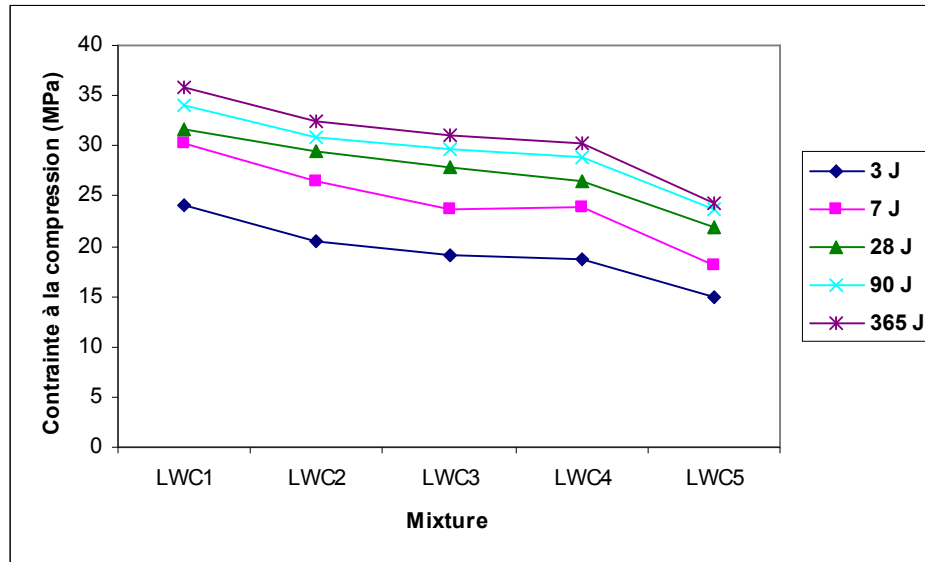


Figure III.8 : Effet des agrégats légers de la pouzzolane sur la résistance à la compression [68]

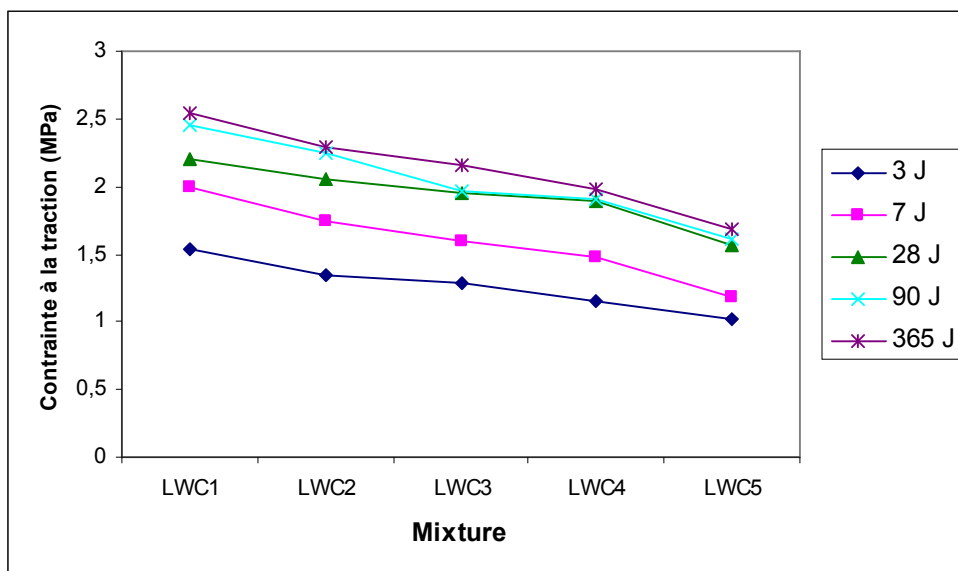


Figure III.9 : Effet des agrégats légers de la pouzzolane sur la résistance à la traction [68]

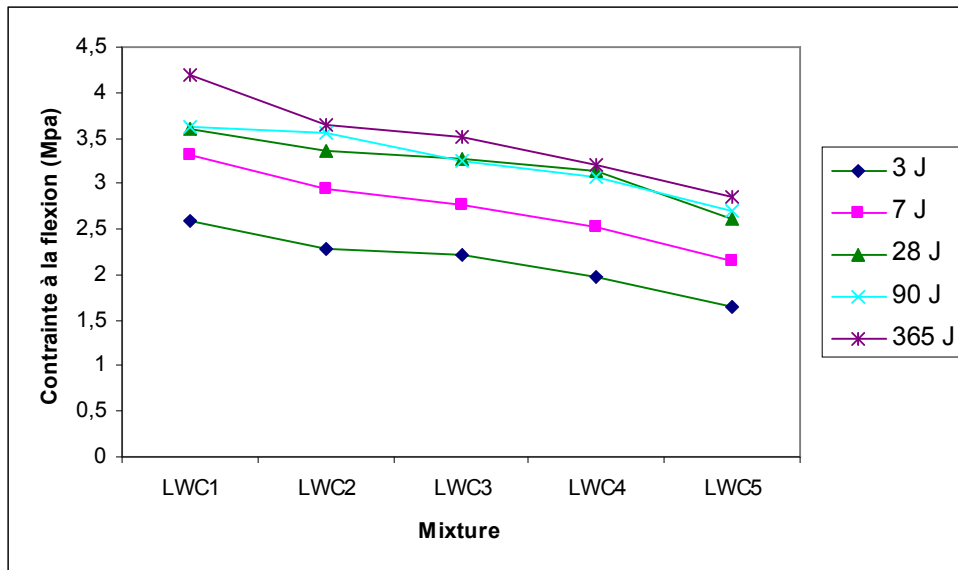


Figure III.10 : Effet des agrégats légers de la pouzzolane sur la résistance à la flexion [68]

Désignation du mélange	Résistance à la compression (MPa)
LWC1	35.2
NWC	39.5

Tableau III.16 : comparaison de la résistance à la compression entre la mixture LWC1 et le béton normale NWC [68], H :humide ; S : sec

Encore une fois, les résultats donnés par ces courbes montrent l'évolution des résistances (Compression, traction et flexion) durant les échéanciers de 3, 7, 28, 90 et 365 jours pour les différentes mixtures utilisées. On constate que le mélange LWC1 donne les plus grandes résistances par rapport aux autres mixtures à tous les âges et à titre indicatif le **tableau III.16** montre la valeur de la résistance à la compression d'un béton témoin comparée à celle de la mixture LWC1 à l'âge de 28 jours.

On remarque que la mixture LCW5 affiche les résistances les plus faibles pour tous les âges.

b. Mixtures de bétons à base Granulat de pouzzolane du gisement de Saint Pierre (La Réunion)

[34], ont effectués au centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics, Sainte-Clotilde, REUNION un programme de recherche pour valoriser la pouzzolane du gisement de Saint-Pierre (Réunion). Les résultats des essais de compression et de traction sur deux type de bétons à base de granulats de pouzzolane (bétons pleins et bétons cavernaux) et les masses volumique apparentes de ces bétons ainsi que leur composition sont consignées dans les **tableaux III.17** et **III.18**. Trois classes granulaires sont utilisées : 0/5, 5/10, et 10/20.

Désignation du béton	1c	2c	3c	4c	5c	6c	7c
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1484	1424	1397	1351	1244	1148	1079
Dosage en ciment (kg/m ³)	250	150	250	250	250	250	150
0/5 (en l)		100			100	100	
5/10 (en l)							
10/20 (en l)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Eau (% en poids de béton)	33,0	28,6	30,4	29,3	27,2	21,22	27,7
Contraintes de compression à 28 j MPa	10,7	4,5	8,1	6,2	5,2	4,5	3,2
Contraintes de traction à 28 j MPa	1,1	0,3	1,4	1,3	1,2	0,9	0,5

Tableau III.17 : Composition, résistances mécaniques et masses volumiques apparentes des bétons secs caverneux de pouzzolane de Saint Pierre [34]
 Résistances mécaniques et masses volumiques à 28 jours

Désignation du béton	1p	2p	3p	4p	5p	6p	7p	8p	9p	10p	11p
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1550	1525	1484	1479	1464	1452	1447	1438	1422	1397	1356
Dosage en ciment (kg/m ³)	300	260	260	350	260	260	350	260	260	350	350
0/5 (en l)	387	246	372	387	387	387	317	372	280	387	280
5/10 (en l)	186	294	186	186	186	186	186	186	286	186	286
10/20 (en l)	574	590	574	574	574	574	574	574	1672	574	1672
Sable lourd (en l)	25		25	25				25		25	
Eau (% en poids de béton)	27,4	32,2	28,9	28,1	30,1	29,4	28,4	28,3	29,8	29,3	26,3
Contraintes de compression à 28 j MPa	19,7	14,0	18,7	20,5	17,5	15,7	22,5	15,7	15,7	21,7	21,8
Contraintes de traction à 28 j MPa	1,4	1,7	1,1	1,4	1,3	1,1	1,2	1,0	1,0	1,5	1,5

Tableau III.18 : Composition, résistances mécaniques et masses volumiques apparentes des bétons secs pleins de pouzzolane de Saint Pierre [34]
 Résistance mécaniques et masses volumique à 28 jours

Si en compare les résultats obtenus des essais mécaniques à la compression et la traction des deux types de bétons étudiés, les bétons pleins sont nettement plus résistants que les bétons caverneux.

La substitution du sable léger par du sable lourd dans la composition du béton en améliore la résistance.

III. 4.5. La brique de terre à base de pouzzolane naturelle

Les matériaux utilisés pour réaliser les trois types de briques de terre sont : la latérite, le ciment, la pouzzolane naturelle, et la sciure de bois: Les trois mélanges confectionnés pour la réalisation des différentes briques sont comme suit :

- La latérite enrichie de 8% de ciment (L)

- La latérite + pouzzolane enrichie de 8% de ciment (LZ, la pouzzolane remplace la latérite à 50%)
- La latérite + sciure de bois enrichie de 8% de ciment.(LS)

D'après l'étude faite par [10] la pouzzolane naturelle utilisée possède une porosité des grains 0,49 tandis que sa masse volumique absolue est de 2850 Kg/m³.L'analyse chimique de cette pouzzolane est présentée dans le **tableau III.19**

	Constituants											
	S _i O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	M _n O	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Ti ₂ O ₃	P ₂ O ₅	PF	Total
Teneur en %	45,79	15,88	12,83	0,17	6,26	9,60	3,54	1,39	2,84	0,60	0,31	99,01

Tableau III.19 : Analyse chimique de la pouzzolane naturelle de Djoungo (Caméroun) [10],

a. Essais de résistance en compression et en traction simple

Des essais de compression simple et de traction simple ont été effectués afin de connaître la résistance mécanique des matériaux. par [51] Les tableaux III20a et III20b indiquent la charge de rupture et la résistance moyenne de chaque échantillon testé.

Echantillon	Fc (kN)	Rc (MPa)	Moyenne Rc (MPa)
L1	3,6	2,25	2,34
L2	4,1	2,56	
L3	3,6	2,25	
L4	3,7	2,50	
L5	4,0	2,19	
L6	3,5	2,31	
LZ1	1,6	1,0	1,01
LZ2	1,5	0,94	
LZ3	1,6	1,0	
LZ4	1,6	1,0	
LZ5	1,7	1,06	
LZ6	1,7	1,06	
LS1	2,0	1,25	2,59
LS2	2,4	1,5	
LS3	3,4	2,12	
LS4	4,5	2,8	
LS5	6,0	3,7	
LS6	6,7	4,2	

Tableau III.20a : Résistance à la compression des mélanges (L, LZ, LS) pour des éprouvettes âgées de 28 jours [51]

Comme on peut le constater dans le tableau 20a et 20b, la résistance en compression moyenne des mélanges de type (L) c'est-à-dire Latérite avec 8% de ciment est de 2,34 MPa. Par contre la résistance à la traction simple est inférieure par rapport au mélange latérite + pouzzolane

Avec l'incorporation de pouzzolane naturelle. La résistance en compression pour ce matériau est plus faible et elle est de l'ordre de 1,01 MPa. La résistance à la compression est divisée en deux lorsqu'on en remplace la moitié de la latérite par de la pouzzolane naturelle. En effet, la pouzzolane étant plus poreuse, son incorporation dans les briques contribue à

augmenter la porosité du matériau obtenu et par conséquent à faire baisser sa résistance en compression. Le résultat de la résistance à la traction pour la brique en pouzzolane peut s'expliquer par le caractère liant de la pouzzolane en contact avec le ciment et l'eau et le rôle de l'hydratation.

Pour la sciure de bois. On constate dans ce cas une légère amélioration de la résistance en compression. Cela peut s'expliquer par la présence dans le matériau de petites fibres de bois qui renforcent les propriétés mécaniques des briques obtenues.

Echantillons	Ft (kN)	Rt (MPa)	Moyenne Rt (MPa)
L1	200	0,51	0,52
L2	215	0,54	
L3	210	0,52	
LZ1	225	0,54	0,56
LZ2	230	0,56	
LZ3	235	0,58	
LS1	195	0,49	0,47
LS2	190	0,46	
LS3	180	0,45	

Tableau III.20a : Résistance à la traction des mélanges (L, LZ, LS) pour des éprouvettes âgées de 28 jours [51]

III. 5. Conclusion

A l'issue de ces différentes études, on constate que la substitution de la pouzzolane naturelle au ciment de portland donne au béton, des résistances mécaniques qui égalent et parfois surpassent à long terme celle du béton témoin. L'incorporation d'un taux de 20% de pouzzolane que se soit chez [47] et [36], présente de bonnes résistances mécaniques. Les pourcentages d'ajouts de 30%, 40%, 50% développent des résistances inférieures par rapport au béton témoin.

Dans le cas du mortier, l'incorporation de la pouzzolane donne des résistances mécaniques qui sont inversement proportionnelles aux pourcentages d'ajouts. D'après une étude statistique menée sur les ciments II/A, B, 32,5 durant les 12 mois de l'année 2000 auprès de cimenterie de Ain Touta (algérie), afin de déterminer le pourcentage optimal de chaque ajouts (pouzzolane, laitier et le calcaire) et concernant la pouzzolane, le pourcentage optimal obtenu est de 18% [31].

La mixture LWC1 confectionnée par les trois classes granulaires utilisées du gisement de Bou Hamidi par [68], peut être utilisée comme béton de structure puisque sa contrainte à la compression est réduite de 10% par rapport à un béton normal. Dans le cas de [34], les performances des contraintes à la compression pour les deux types de bétons (plein et caverneux) nous conduisent à son utilisation comme habillage dans le bâtiment.

La substitution de la latérite par une quantité équivalente de pouzzolane naturelle (50 % en masse) se traduit par une diminution de la résistance à la compression. La porosité élevée de cette pouzzolane explique largement ces résultats.

Chapitre IV

**OUTILS DE PREDICTION DE LA CONDUCTIVITE
THERMIQUE DES MILIEUX POREUX**

IV. 1. Introduction

La conductivité thermique apparente d'un matériau poreux dépend de nombreux paramètres. Les conductivités thermiques du solide et du fluide, le taux de porosité, la taille, la forme et la distribution des pores. L'étude thermique d'un échantillon de matériaux poreux, exige de bonnes connaissances sur la microstructure d'une part et d'un autre côté avoir les outils analytiques ou numériques nécessaires pour le traitement des informations requises.

Il existe des modèles analytiques considérer comme des outils de prédictions développés afin d'appréhender les mécanismes de transfert thermique dans les milieux granulaires. Ces modèles devraient permettre la prise en compte de la microstructure (forme de particules, zones de contact) et de la macrostructure (conditions aux limites, porosité). La problématique est multiple, d'une part, il faut développer des modèles faisant intervenir des phénomènes physiques différents (transfert/condensation, loi de contact entre particules, conduction, et convection), vérifier la microstructure du milieu (taille, forme des particules). La détermination de la conductivité par simulation numérique concerne essentiellement des microstructures en deux dimensions, ou des géométries simples en trois dimensions.

IV. 2. Caractérisation d'un milieu poreux

On désigne communément par milieu poreux un solide de forme compliquée délimitant et englobant des espaces vides interconnectés ou non connectés, remplis avec un ou plusieurs fluides [1]. On rencontre plusieurs matériaux poreux dans la nature ou l'industrie. Il peut s'agir d'empilement de billes, de panneaux de fibre de verre, de béton, de roche, de gisement de pétrole, de sable, ..., etc.

Un milieu poreux est caractérisé principalement par, deux propriétés macroscopiques liées entre elles et qui sont la porosité et la perméabilité.

IV. 2.1. Porosité et compacité

Tout milieu poreux est constitué de deux domaines distincts : la charpente du milieu (bordure solide) et son complément que constitue le volume poreux.

La porosité (ε) d'un matériau poreux est la fraction de volume total occupée par les vides [45].

La porosité du milieu ε est définie par le rapport du volume des vides, au volume total du milieu

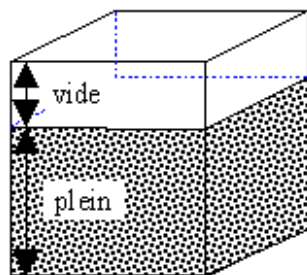


Figure IV.1 : Volume quelconque

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume du vide}}{\text{Volume total}}$$

La compacité est le rapport du volume des pleins au volume total.

$$\alpha = \frac{\text{Volume du Plein}}{\text{Volume total}}$$

La porosité et la compacité sont liées par la relation:

$$\varepsilon = 1 - \alpha \quad (\text{IV.1})$$

Avec $\alpha = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}$, l'équation (IV.1) devient :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \quad (\text{IV.2})$$

On peut différencier deux types de porosité :

1. La porosité ouverte (ou libre) accessible à la pénétration du fluide
2. La porosité fermée (occluse) non accessible à la pénétration du fluide.

La **figure IV.2** présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur :

- les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins).
- les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur.
- les pores ou bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités. Ils peuvent donc être accessible a un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.

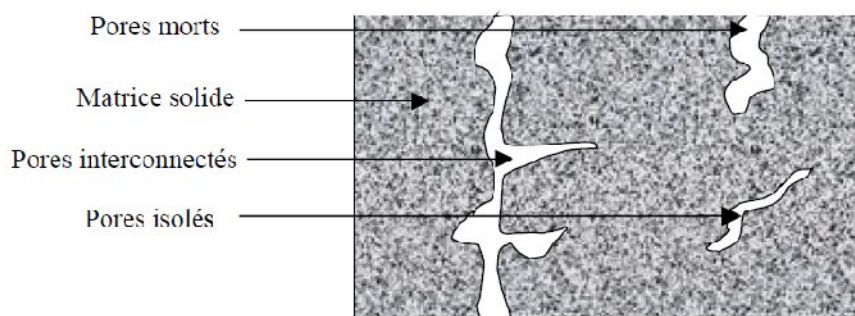


Figure IV.2 : Représentation schématique d'un milieu poreux

Des mesures expérimentales faites par Kaviany, [37] donnent dans le **tableau IV.2** ci dessous quelques valeurs de la porosité pour différents matériaux.

Matériaux	Porosité
Matériau mousseux	0.98
Fibre de verre	0.88 – 0.93
Fil à tisser	0.68 – 0.76
Grains de silice	0.65
Poudre d'ardoise noire	0.57 – 0.66
Cuir	0.56 – 0.59
Catalyseur	0.45
Granulé de pierres	0.44 – 0.45
Terre	0.43 – 0.54
Sable	0.37 – 0.50
Poudre de silice	0.37 – 0.49
Sphère bien empilée	0.36 – 0.43
Filtre de cigarettes	0.17 – 0.49
Briques	0.12 – 0.34
Poudre de cuivre	0.09 – 0.34
Pierre à chaud, Dolomite	00.04 – 0.10
Houille	0.02 – 0.07

Tableau IV.1 : porosité de quelques matériaux

IV. 2.2. Perméabilité

La perméabilité traduit la facilité avec laquelle le fluide s'écoule dans le milieu poreux sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité notée K dépend uniquement de la porosité et de la géométrie de la matrice solide. La relation de (IV.3) donne une estimation de la perméabilité K pour un milieu poreux non consolidé constitué d'éléments identiques de géométrie simple [69]:

$$K = \frac{d^2 \cdot \varepsilon^3}{36C_0(1 - \varepsilon)^2} \quad (IV.3)$$

ou d désigne une dimension caractéristique des éléments constituant la matrice poreuse et C_0 une constante dépendant de la forme des grains ($3.6 < C_0 < 5$).

Le **tableau IV.2**, ci-dessous représente la perméabilité de quelques matériaux poreux définis d'après Sheidegger [17]

Matrice	Perméabilité [m ²]
Briques	$4.8.10^{-15} - 2.2.10^{-13}$
Pierre à chaud, Dolomite	$2.0.10^{-15} - 4.5.10^{-14}$
Cuir	$9.5.10^{-14} - 1.2.10^{-13}$
Poudre d'ardoise noire	$4.9.10^{-14} - 1.2.10^{-13}$
Terre	$2.9.10^{-13} - 1.4.10^{-11}$
Fibres de verre	$2.4.10^{-11} - 5.1.10^{-11}$
Sable	$2.0.10^{-11} - 1.8.10^{-10}$
Cheveux artificiels	$8.3.10^{-10} - 1.2.10^{-9}$
Plaque de liège	$3.3.10^{-10} - 1.5.10^{-9}$
Fils à tisser	$3.8.10^{-9} - 1.10^{-8}$
Cigarette	$1.1.10^{-9}$

Tableau IV.2 : Perméabilité de quelques matériaux

IV. 2.3. Tortuosité et Connectivité

La tortuosité τ , est définie par le rapport entre la distance parcourue par le fluide L_e et la distance effective du déplacement L . Selon d'autres auteurs, elle est définie par le carré de ce rapport. Cette dernière définition est celle proposée par [52, 70].

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

Avec :

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

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

La connectivité est définie grâce à la relation suivante

$$C_n = b - n + 1 \quad (IV.5)$$

Avec :

b : Nombre de branches (ou d'orifices d'une cavité).

n : Nombre de noeuds (ou de cavité).

IV. 2.4 Tailles des porosités

Le réseau poreux des matériaux recouvre une large gamme d'échelles (du picomètre au centimètre). La **figure IV.3** présente les différents types de porosités que l'on rencontre dans les matériaux cimentaires en fonction de leur taille et de leur géométrie. .

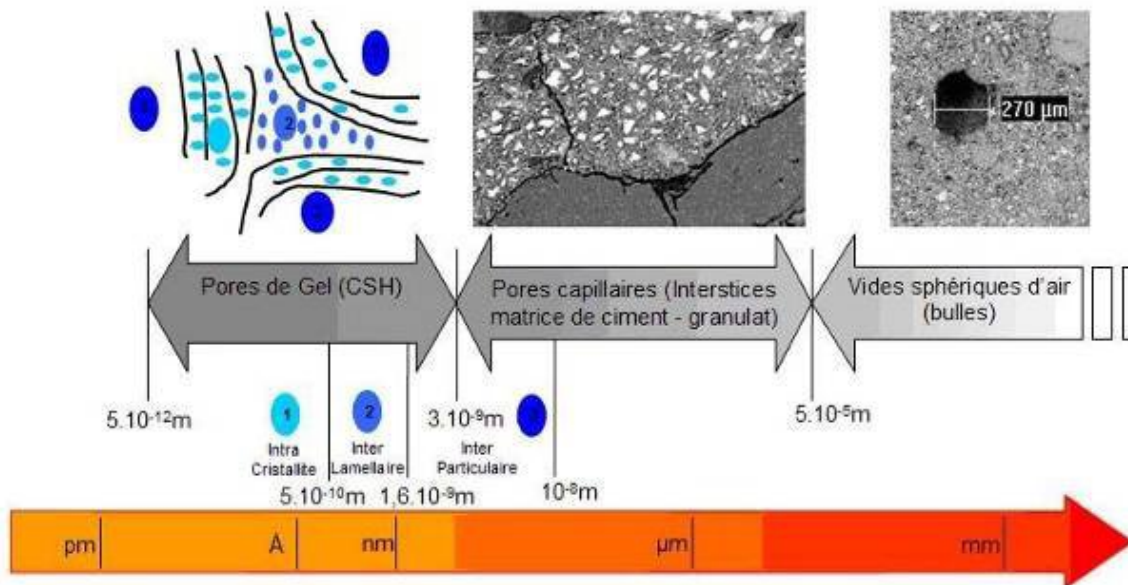


Figure IV.3 : Echelle des porosités des matériaux cimentaires [15]

IV. 3. Influence de la porosité sur les propriétés thermophysiques

La conductivité thermique est plus difficile à obtenir pour un corps poreux à cause de l'hétérogénéité que présente le milieu poreux et de la multiplicité des phases en présence. Sur le plan structural, la conductivité thermique des pores dépend de leur taille et de leur nombre, à cause des effets du rayonnement à prendre en compte à l'intérieur de ces pores [32]. La conductivité thermique des corps poreux obtenue par l'expérience est dite apparente à cause de la diversité des mécanismes de transfert de chaleur dont ces corps sont le siège. La notion de conductivité vraie est réservée à λ , qui provient directement de l'écriture de la loi de Fourier pour un milieu continu homogène équivalent à un milieu poreux.

La structure des bétons et en particulier celle des bétons de pouzzolane naturelle laisse apparaître des cavités qui peuvent selon les conditions d'élaboration et les conditions thermo hygrométriques de traitement et de conservation, comporter une phase liquide ou une phase gazeuse ou un mélange des deux.

La caractérisation d'un solide est liée à la taille des pores, cette taille aura une influence sur les caractéristiques mécaniques et thermophysiques du matériau. La porosité est un paramètre important à prendre en compte lors de l'étude de caractérisation d'un produit. La taille des pores de dimensions variables dans un même matériau, influence en partie le caractère hygroscopique du matériau. Un autre phénomène qui dépend de la taille des pores, se traduit par la quantité d'eau liée présente dans le matériau [54].

IV. 4. Mécanismes de transfert de chaleur dans les matériaux poreux

Les différents mécanismes de transfert de chaleur pouvant être en jeu sont :

- la convection. Une mise en mouvement de l'air ou de tout autre gaz présent dans la cellule peut intervenir. Mais l'expérience montre que le gradient de température est tel que le mouvement de convection dans les cellules est négligeable. Dans la gamme de taille de pores ($< 100 \mu\text{m}$) la convection est négligeable. La convection devient importante lorsque le nombre de Grashof, traduisant le rapport de la force dirigeant la convection sur la force de viscosité s'y opposant, est supérieur à 1000 [Holman].

- la conduction. La transmission de chaleur par conduction pure s'effectue dans les gaz inclus dans les pores et dans la structure solide.

- le rayonnement. L'épaisseur des matériaux utilisés dans le bâtiment est suffisante pour admettre que le corps est non transparent c'est-à-dire que la fraction du rayonnement transmise est nulle. Le seul transfert par rayonnement qui intervient se fait au sein des cellules dont les parois possèdent un gradient de température. Comme les températures des parois sont en général voisines de la température ambiante, ce phénomène est souvent très faible vis-à-vis de la valeur correspondant à la conduction pure.

- Evaporation-condensation. Ce mécanisme s'apparente au transfert de masse. Il intervient lors de l'évaporation sur la face chaude et de la condensation sur la face froide du matériau. L'évaporation-condensation est favorisée par une porosité ouverte importante. Ce phénomène peut être négligé dans le cas de matériaux secs.

IV. 5. Conductivité thermique des milieux poreux

A partir de la résolution de l'équation de l'énergie, beaucoup de modèles de calculs de la conductivité thermique ont été développés. Ces modèles recouvrent en réalité deux grands types d'approches :

- Par analogie électrique
- Par une résolution exacte de l'équation de chaleur.

Dans le cas d'un milieu polyphasique, la conductivité thermique est fonction de [20].

1. La conductivité thermique de chaque composant.
2. Leur fraction massique.
3. La manière dont les différentes phases sont distribuées ; notamment,
 - La continuité ou la discontinuité des phases dans la direction du flux de chaleur.
 - Le caractère ordonné ou aléatoire de la distribution des constituants.
 - La taille, la forme et l'orientation des éléments de chaque phase.
4. La nature des contacts entre les différentes phases.

5. Les propriétés d'absorption et d'émission des composants, dans le cas où les transferts de chaleur par rayonnement à travers ces phases seraient non négligeables.

Les modèles proposés dans ce chapitre ne concernent que les milieux granulaires diphasiques. La phase solide est constituée d'une seule phase représentée par des particules solides. Par ailleurs, le fluide est représentée par des pores remplis exclusivement avec de l'air.

IV. 5.1. Modèles analytiques

De nombreux modèles analytiques permettent de calculer la conductivité thermique apparente λ_{app} de matériaux biphasés en fonction des conductivités thermiques λ_s et λ_f des deux phases présentes et de leur porosité ε , ainsi que leur compacité $\alpha = 1 - \varepsilon$

Les approches classiquement utilisées pour prédire le comportement de systèmes multiphasés sont les méthodes dites "déterministes périodiques" comme la prise de moyenne ou l'homogénéisation

a. Prise de moyenne volumique

Son principe consiste à définir les variables à grande échelle comme les moyennes des variables locales sur un volume élémentaire représentatif (VER), deux échelles s'imposent pour la description des phénomènes [57, 64] :

- L'échelle des pores, ou microscopique, à l'intérieur de laquelle les grandeurs locales peuvent très largement varier. En général cette échelle est associée au diamètre moyen des pores, d .
- L'échelle du milieu poreux, ou macroscopique, caractéristique de variations significatives de ces mêmes grandeurs, définies en moyennes, sur un certain volume de milieu poreux. Cette échelle macroscopique est associée à une dimension géométrique du milieu, L_a .

Les grandeurs macroscopiques, caractérisant le milieu poreux, ont donc des moyennes de grandeurs microscopiques correspondantes, sur une taille grande devant l'échelle de leurs fluctuations microscopiques, mais petite devant celle des variations à l'échelle macroscopique. Ainsi si r_0 désigne la dimension caractéristique du V.E.R., un volume de prise de moyenne V de dimension r_0 doit vérifier l'inégalité suivante, qui est une formalisation de la contrainte de séparation des échelles $d < r_0 < L_a$

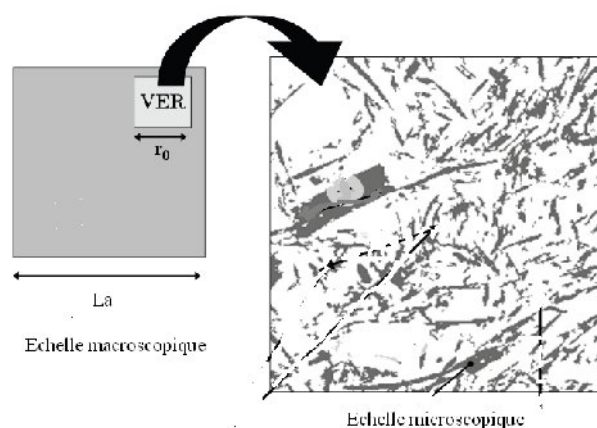


Figure IV.4 : Représentation des échelles et du VER tel qu'il est défini dans la prise de moyenne.

Pour toute grandeur microscopique notée Ψ la moyenne volumique est définie par :

$$\langle \Psi \rangle = \frac{1}{V} \int_V \Psi . dV \quad (IV.6)$$

Les équations macroscopiques sont obtenues en appliquant l'opérateur moyenne aux équations locales. Les coefficients effectifs sont quant à eux accessibles par la résolution de problèmes différentiels, qui font le lien entre les variables locales et macroscopiques..

b. L'homogénéisation

L'homogénéisation est une technique de modélisation qui assimile un matériau hétérogène à un matériau homogène fictif équivalent, dont on doit déterminer les caractéristiques. Ce matériau homogène doit avoir le même comportement global que le milieu hétérogène et respecter le principe de la conservation de l'énergie entre les deux milieux.

Diverses techniques d'homogénéisation existent :

L'homogénéisation périodique, basée sur une hypothèse de périodicité de la structure, permet de définir la loi de comportement suivie par le matériau au niveau macroscopique à partir des lois de comportement de chaque constituant. On détermine de manière exacte tous les coefficients de la loi, ainsi qu'un domaine de validité pour la modélisation.

L'homogénéisation autocohérente permet d'accéder directement à une estimation des grandeurs thermiques du matériau hétérogène. Il suffit de considérer que le matériau au niveau macroscopique et les constituants suivent la même loi de comportement. Les résultats obtenus à l'aide de cette méthode des grandeurs macroscopiques sont sous forme de fonction explicite des caractéristiques de chaque constituant et de leur concentration volumique.

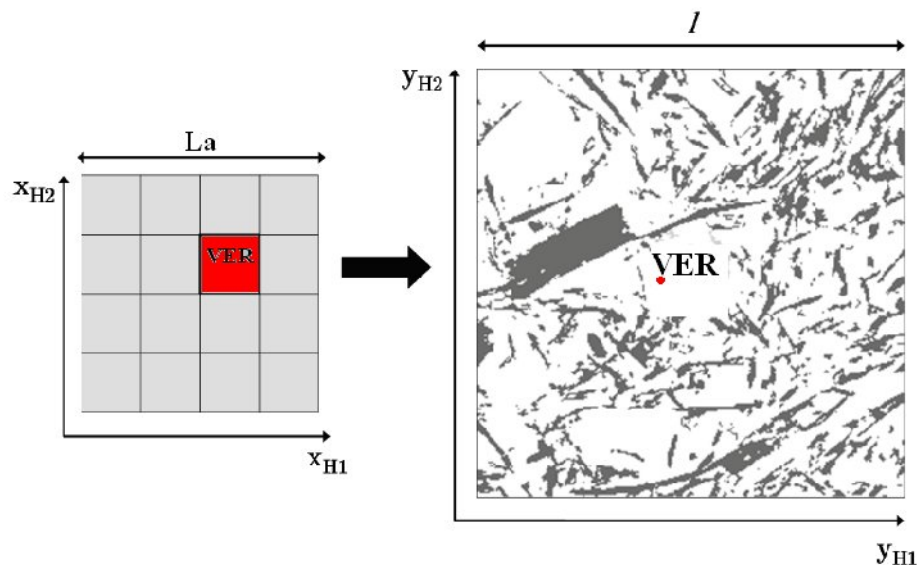


Figure IV.5 Représentation des échelles de description en homogénéisation

Dans le cadre de l'homogénéisation, [25,59], ont associé respectivement les variables adimensionnées x et y à la grande échelle de longueur caractéristique L_a et à l'échelle locale

de longueur caractéristique l , **figure IV.5**. Ces variables sont reliées au vecteur position, noté r , par les relations

$$X_H = \frac{r}{La} \quad (IV.7)$$

$$Y_H = \frac{r}{l} \quad (IV.8)$$

Le milieu hétérogène est considéré à grande échelle comme un assemblage d'un très grand nombre de cellules périodiques élémentaires qui correspondent à la variable VER. Le lien entre les deux échelles apparaît suivant la relation **(IV.9)** :

$$Y_H = \frac{X_H}{\xi} \text{ avec } \xi = \frac{l}{La} \quad (IV.9)$$

Y_H représente la position du VER dans l'échelle microscopique et macroscopique

IV. 5.1.1. Modèles série et parallèle

La conductivité thermique λ réelle du milieu et quel que soit le modèle utilisé, est toujours comprise entre deux valeurs extrêmes, la borne inférieure (modèle série, **figure IV.6**) correspond à un milieu où le vecteur densité de flux de chaleur est perpendiculaire aux strates. et La borne supérieure (modèle parallèle, **figure IV.6**) correspond à une disposition des strates parallèlement à la direction de la densité du flux de chaleur. [46].

$$\lambda_{série} < \lambda < \lambda_{parallèle} \quad (IV.10)$$

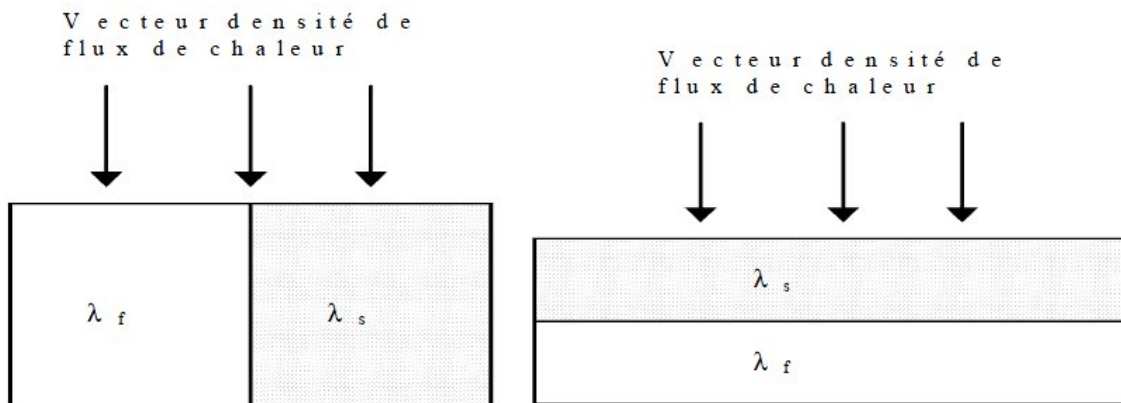


Figure IV.6 : Modèle série et parallèle

La conductivité thermique apparente du milieu s'écrit

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{\alpha}{\lambda_s}} \quad (IV.11)$$

$$\lambda_{parallèle} = \alpha\lambda_s + \varepsilon\lambda_f \quad (IV.12)$$

- λ_f : la conductivité thermique de la phase fluide [W m⁻¹ K⁻¹]
- λ_s : la conductivité thermique de la phase solide [W m⁻¹ K⁻¹]
- ε : la porosité du milieu (fraction volumique de la phase fluide)

IV. 5.1.2 Modèle de Hashin-Shtrikman [24]

Hashin et Shtrikman proposent quant à eux un modèle donnant un encadrement des valeurs de conductivité thermique de matériaux multiphasés. De manière générale, la borne inférieure de la conductivité correspond au cas où l'inclusion possède des propriétés thermiques supérieures à celles de la matrice (inversement pour la borne supérieure). Ces bornes sont valables quelle que soit la morphologie de la phase inclusionnaire du matériau. [24]

Comme les modèles série et parallèle ce modèle calcul les bornes inférieure et supérieure de la conductivité thermique apparente d'un matériau biphasé. Il considère que le champ de température est uniforme dans chaque inclusion représentée sous la forme d'une sphère. Les équations (IV.13 et IV.14) donnent respectivement les bornes inférieure et supérieure de la conductivité.

$$\frac{\lambda_{app.min}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \frac{\varepsilon}{\frac{1}{1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_f}} + \frac{\alpha}{3 \frac{\lambda_s}{\lambda_f}}} \quad (IV.13)$$

$$\frac{\lambda_{app.max}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\alpha}{\frac{1}{\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1} + \frac{\varepsilon}{3\lambda_f}} \quad (IV.14)$$

IV. 5.1.3. Modèle de Krischer [71]

Dans ce modèle, **figure IV.7**, le matériau sera formé de trois strates : deux ensembles de plaques en série et en parallèle. Le premier ensemble, de conductivité thermique $\lambda_{série}$, le second ayant pour conductivité thermique $\lambda_{parall.}$, en plus les trois strates sont en série par

rapport à la direction du flux thermique. La conductivité thermique est une fonction de deux conductivités série et parallèle.

n_{kr} : représente la part de disposition en parallèle et $(1-n_{kr})$ celle de la disposition en série.

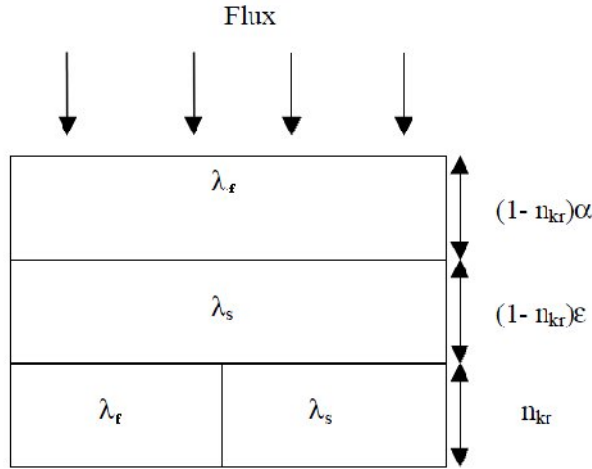


Figure IV.7 : Représentation schématique d'un milieu poreux selon Krischer

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{n_{kr} \lambda_{série} + (1 - n_{kr}) \lambda_{parallèle}} \quad (IV.15)$$

IV. 5.1.4. Modèle de Willy et Soutwik [41]

Le modèle sera formé de deux ensembles de plaques en parallèle et en série par rapport à la direction du flux de chaleur. Le premier ensemble de conductivité thermique $\lambda_{série}$ est constitué de plaques en série ; le second ayant pour conductivité thermique $\lambda_{parallèle}$, est formé de plaques en parallèle. La part de disposition en série sera notée n_w et celle de la disposition en parallèle $(1-n_w)$.

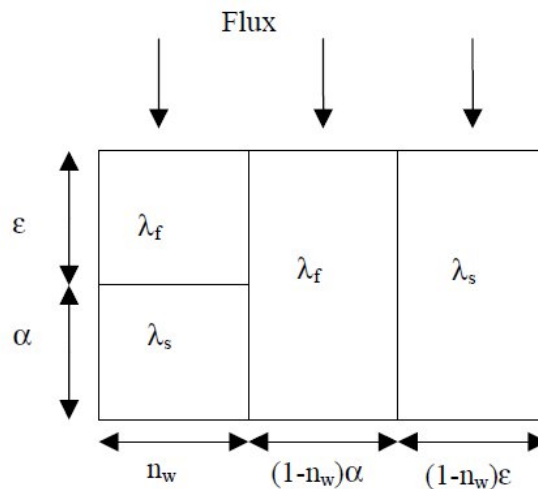


Figure IV.8 : Représentation schématique d'un milieu poreux selon Willy et Soutwik

$$\lambda_{app} = \frac{n_w \lambda_s}{\varepsilon \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \alpha} + (1 - n_w)(\alpha \lambda_s + \varepsilon \lambda_f) \quad (IV.16)$$

IV. 5.1.5. Modèle de Maxwell [72]

L'approche de Maxwell citée dans [20], suppose que le milieu granulaire est constitué de plusieurs particules sphériques de même diamètre D_p . L'ensemble du modèle est représenté par un milieu bi-phasique, constitué d'une phase continue et de particules sphériques non poreuses **figure IV.9**. Ce modèle de calcul concerne les milieux granulaires de forte porosité. Les particules sont séparées d'une distance, et il n'y a pas d'interaction mutuelle entre deux particules, par conséquent le milieu est fortement dilaté (pas de contact entre les particules).

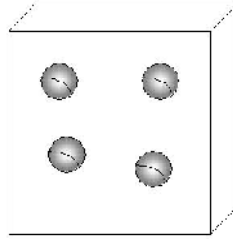


Figure IV.9 : Modèle de Maxwell avec inclusions sphériques.

La densité de flux de chaleur dans le milieu s'écrit :

$$(q) = \varepsilon (q_f)^f + \alpha (q_s)^s \quad (IV.17)$$

Avec

$(q_f)^f$: La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase fluide)

$(q_s)^s$: La moyenne intrinsèque des densités de flux de chaleur (phase solide) :

$$(q_s)^s = \frac{1}{V_s} \int_{V_s} (-\lambda_s \nabla T_s) dV = -\lambda_s \langle \nabla T_s \rangle^s \quad (IV.18)$$

$$(q_f)^f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} (-\lambda_f \nabla T_f) dV = -\lambda_f \langle \nabla T_f \rangle^f \quad (IV.19)$$

La densité de flux de chaleur moyenne peut être exprimée en fonction de la conductivité thermique apparente du milieu :

$$\langle q \rangle = -\lambda_{app} \left[\varepsilon \langle \nabla T_f \rangle^f + \alpha \langle \nabla T_s \rangle^s \right] \quad (IV.20)$$

Dans le cas d'une sphère unique placée dans un milieu où le gradient de température à l'infini $\langle \nabla T_f \rangle_\infty^f$ est constant, on démontre que le gradient de température à l'intérieur de la sphère est constant et vaut :

$$\langle \nabla T_s \rangle^s = \frac{3\lambda_f}{2\lambda_f + \lambda_s} \langle \nabla T_f \rangle_\infty^f \quad (IV.21)$$

En confondant $\langle \nabla T_f \rangle^f$ et $\langle \nabla T_f \rangle_\infty^f$, l'application des relations précédentes conduit à l'expression de la conductivité thermique du milieu donnée par Maxwell :

$$\lambda_{app} = \frac{\varepsilon\lambda_f(2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha\lambda_s\lambda_f}{\varepsilon(2\lambda_f + \lambda_s) + 3\alpha\lambda_f} \quad (IV.22)$$

IV. 5.1.6. Modèle par homogénéisation autocohérente (HAC)

Le motif générique est constitué d'inclusions sphériques simples ou composites [73]. La modélisation peut se faire avec une seule homogénéisation ou en double homogénéisation [74].

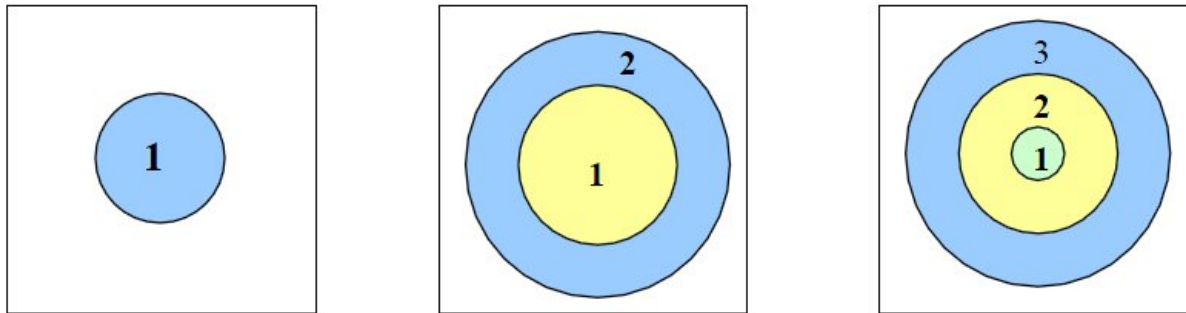


Figure IV.10 : Inclusion sphérique simple (a) bicomposites (b) tricomposite (c)

Le principe est simple, un matériau hétérogène est assimilé à un matériau homogène équivalent dont on doit déterminer les caractéristiques. Comme ça, on effectue un n d'échelle microscopique (les constituants) vers une échelle macroscopique (le matériau).

Le milieu est soumis à un gradient de température uniforme unitaire G à l'infini.

Le champ de température solution de l'équation de la conduction (IV.23), avec l'hypothèse que le régime est permanent $\frac{dT}{dt} = 0$, Pas de source de $g = 0$, est sous la forme (24). La résolution de l'équation de la chaleur est établie en respectant les conditions aux limites.

$$\lambda \cdot \Delta T = 0 \quad (IV.23)$$

$$T_i = \left(A_i r + \frac{B_i}{r^2} \right) \cos \theta \quad (IV.24)$$

- Pour une inclusion sphérique simple les conditions aux limites imposent que :

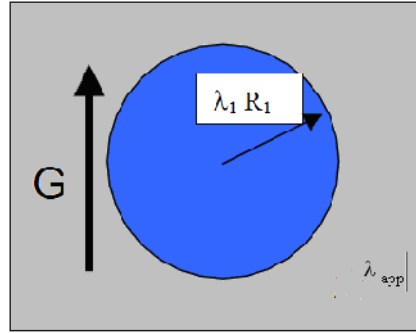


Figure IV.11 : Inclusion sphérique simple

- En $r = 0$ T_1 est finie donc $B_1=0$
- En $r = \infty$ $(grad T)_{app}$ tend vers G donc $A_{app}= 1$
- En $r = R_1$ T est continue donc $\frac{B_{app}}{R_1^2} + R_1 = A_1 R_1$
- En $r = R_1$ le flux est continu donc $\lambda_{app} \left(1 - \frac{2B_{app}}{R_1^3} \right) = \lambda_1 A_1$

On aura un système à deux équations et deux inconnues A_1 et B_1 .

$$A_i = \frac{3\lambda_{app}}{\lambda_1 + 2\lambda_{app}} \quad (IV.25)$$

$$\frac{B_i}{R_1^3} = \frac{\lambda_{app} - \lambda_1}{\lambda_1 + 2\lambda_{app}} \quad (IV.26)$$

- Pour deux inclusions sphériques simples : 1 et 2, soumises au même gradient de température à l'infini, possédant des concentration volumiques β_1 et β_2 avec $\beta_1 + \beta_2 = 1$

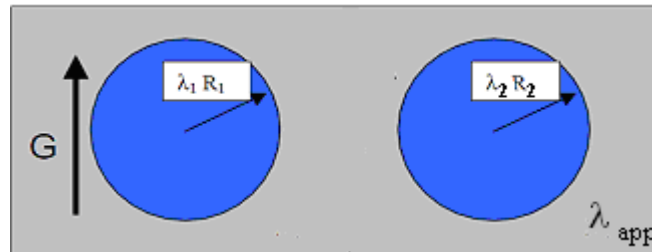


Figure IV.12 : Inclusion sphérique double

Le flux dans l'ensemble du matériau s'écrit :

$$\lambda_{app} (gradT)_{app} = \beta_1 \lambda_1 (gradT)_1 + \beta_2 \lambda_2 (gradT)_2 \quad (IV.27)$$

$$(\text{grad}T)_{app} = \beta_1(\text{grad}T)_1 + \beta_2(\text{grad}T)_2 \quad (\text{IV.28})$$

D'où

$$\lambda_{app}(\beta_1(\text{grad}T)_1 + \beta_2(\text{grad}T)_2) = \beta_1\lambda_1(\text{grad}T)_1 + \beta_2\lambda_2(\text{grad}T)_2 \quad (\text{IV.29})$$

On pose

$$(\text{grad}T)_1 = A_1 \text{ et } (\text{grad}T)_2 = A_2$$

$$\lambda_{app}(\beta_1 A_1 + \beta_2 A_2) = \beta_1 \lambda_1 A_1 + \beta_2 \lambda_2 A_2 \quad (\text{IV.30})$$

$$\beta_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{app}}{\lambda_1 + 2\lambda_{app}} + (1 - \beta_1) \frac{\lambda_2 - \lambda_{app}}{\lambda_2 + 2\lambda_{app}} = 0 \quad (\text{IV.31})$$

On pose les paramètres suivant :

$$X = \frac{\lambda_{app}}{\lambda_2} \quad \text{et} \quad Y = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (\text{IV.32})$$

On aura l'équation du second ordre en λ

$$2X^2 + X[3\beta_1 - 2 + Y(1 - 3\beta_1)] - Y = 0 \quad (\text{IV.33})$$

A partir de la résolution de l'équation (IV.33), on obtient les valeurs de X afin de déduire λ_{app}

Dans le cas où $\lambda_1 \ll \lambda_2$ (λ_1 représente l'air), (31) devient :

$$2X^2 + X[3\beta_1 - 2] = 0 \quad (\text{IV.34})$$

$$\lambda_{app} = (1 - \frac{3}{2}\beta_1)\lambda_2 \quad (\text{IV.35})$$

L'équation (IV.35) donne la conductivité du milieu apparent qui est une fonction linéaire par rapport à la conductivité du milieu 2.

Pour une inclusion sphérique bi composite

Inclusion bi composite peut être modélisé (**figure IV.13**) par :

- Une sphère de rayon R_1 , de conductivité λ_1 et de masse volumique ρ_1 qui correspond au matériau 1.
- Le matériau 1 est entouré d'un autre constituant 2 de caractéristiques R_1, λ_2, ρ_2

On définit un paramètre β qui caractérise la concentration volumique de la phase 1

$$\beta = \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 \quad (IV.36)$$

L'équation de la chaleur (IV.23) est résolue en respectant les conditions aux limites telque la continuité des flux et des températures aux deux interfaces.

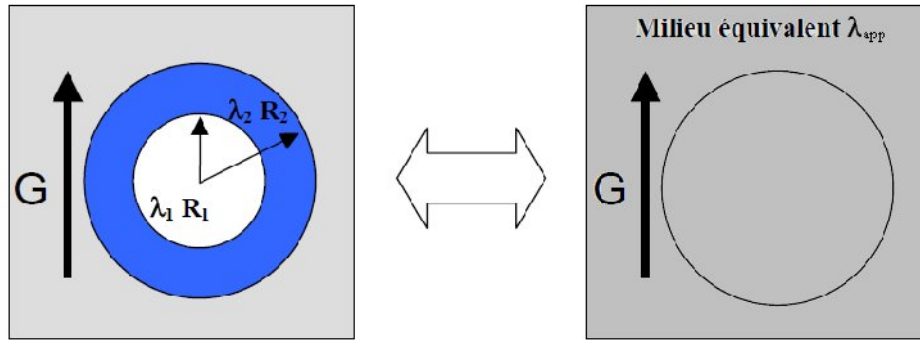


Figure IV.13 : Equivalence entre milieu bicomposite à inclusions sphériques et milieu homogène

Le champ de température est de la forme de l'équation (IV.24) et les conditions aux limites donnent les résultats suivants :

- En $r = 0$ T_1 est finie donc $B_1=0$
- En $r = \infty$ $(\text{grad } T)_{\text{app}}$ tend vers G donc $A_{\text{app}}= 1$
- En $r = R_1$ T est continue donc $\frac{B_2}{R_1^2} + A_2 R_1 = A_1 R_1$
- En $r = R_1$ le flux est continu donc $\lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_1^3} \right) = \lambda_1 A_1$
- En $r = R_2$ T est continue donc $\frac{B_2}{R_2^2} + A_2 R_2 = R_2 + \frac{B_{\text{app}}}{R_2^3}$
- En $r = R_2$ le flux est continu donc $\lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_1^3} \right) = \lambda_{\text{app}} \left(1 - \frac{2B_{\text{app}}}{R_2^3} \right)$

On faisant l'identité entre les énergies thermiques présentes dans le milieu homogène équivalent sans inclusion et dans le milieu avec inclusion composite. Cela nous conduit à dire que la moyenne du gradient de température dans la sphère composite est égale au gradient G d'où $B_{\text{app}}=0$.

Le système devient :

$$\begin{cases} \frac{B_2}{R_1^2} + A_2 R_1 = A_1 R_1 \\ \lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_1^3} \right) = \lambda_1 A_1 \\ \frac{B_2}{R_2^2} + A_2 R_2 = R_2 \\ \lambda_2 \left(A_2 - \frac{2B_2}{R_2^3} \right) = \lambda_{app} \end{cases}$$

Le système aura une solution que si son déterminant est nul. On obtient ainsi la conductivité λ_{app} du milieu homogène bicomposite [73].

$$\lambda_{app} = \lambda_2 \left[1 + \frac{\beta}{\frac{1-\beta}{3} + \frac{1}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1}} \right] \quad (IV.37)$$

- Pour une inclusion sphérique tricomposite

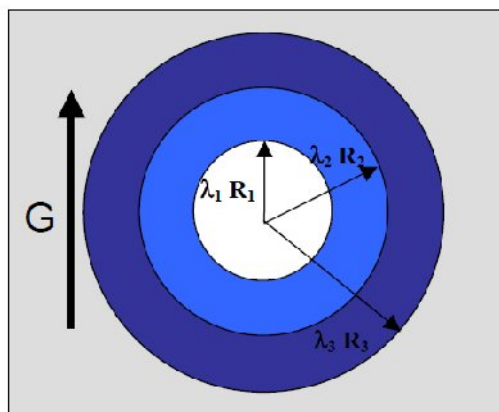


Figure IV.15 : Inclusion sphérique tricomposite

Avec

$$\beta = \frac{V_2}{V_3} = \left(\frac{R_2}{R_3} \right)^3 \quad (\text{IV.38})$$

$$\delta = 1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 \quad (\text{IV.39})$$

$$\lambda_{app} = \lambda_3 \left[1 + \frac{\beta}{\frac{1-\beta}{3} + \frac{(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}-1)\delta}{1 + \frac{(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}-1)\delta}{3}} - \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_3}-1 - \frac{\delta(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}-1)(2\frac{\lambda_2}{\lambda_3}-1)}{3}}}{3} \right] \quad (\text{IV.40})$$

IV. 5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé une méthode utilisée pour prévoir la valeur de la conductivité thermique et qui est basée sur plusieurs approches, prise de moyenne, homogénéisation et analogie électrique. Les différents modèles alors établis font apparaître les propriétés intrinsèques des constituants et la structure géométrique du milieu étudié..

Les modèles analytiques sont classés en deux catégories suivant que l'on considère des inclusions isolées dans une matrice ou un mélange de deux phases interconnectées et plus ou moins continues suivant leur fraction volumique.

Chapitre V

**APPROCHES THEORIQUES DES MODELES DES MILIEUX
POREUX DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE APPLIQUEE
AU BETON DE POUZZOLANE**

V. 1. Introduction

L'élaboration des modèles représentant la transmission thermique dans les matériaux poreux a pour but d'interpréter la conductivité thermique apparente en considérant le matériau formé d'une phase solide et une ou plusieurs phases (phase liquide, phase gazeuse).

Le matériau poreux peut être constitué essentiellement de :

D'une phase solide et une phase liquide (eau)

D'une phase solide et d'une phase gazeuse (air)

D'une phase solide et de deux phases gazeuse (air) et liquide (eau)

D'une part, on peut concevoir le béton comme étant un matériau poreux composé d'une phase solide et d'eau ou bien d'une phase solide et d'air ; dans la première combinaison l'eau est présente sous diverses formes ; absorbée par les granulats à porosité ouverte, combinée dans les hydrates du ciment, absorbée à la surfaces des constituants solide et libre dans les capillaires

D'autre part, le béton est composé de deux phases solides différentes ; une matrice liante (la pâte du ciment hydratée), et l'ensemble des granulats. Cette approche est celle choisie par [34], dans le cadre d'une caractérisation mécanique et thermique du béton de pouzzolane de Saint Pierre (la réunion).

Nous nous proposons d'exposer l'approche de [34], et ensuite d'étudier quelques modèles de transfert thermique décrit dans la littérature des milieux poreux, afin de déterminer et d'interpréter la conduction thermique apparente des bétons de pouzzolane en considérant en premier lieu, le matériau constitué d'une phase solide et d'une phase gazeuse (air), et en deuxième lieu, le matériau est composé d'une phase solide, d'une phase liquide (eau) et d'une phase gazeuse (air). Pour cela, nous allons transposer quelques modèles de prédiction de la conductivité thermique apparente appliqués aux matériaux poreux aux bétons de pouzzolane. Ce dernier étant supposé un matériau poreux, nous pouvons considérer que :

La transmission de la chaleur par conduction pure s'effectue dans les gaz inclus dans les pores et dans la structure solide et aussi par la phase liquide.

Le mouvement de convection dans les cellules est négligeable dans la gamme de taille de pores ($< 100 \mu\text{m}$).

La fraction du rayonnement transmise est nulle puisque les températures des parois sont en général voisines de la température ambiante.

V. 2. Conductivité thermique apparente des mixtures de bétons à base de Granulat de pouzzolane à l'état sec du gisement de Saint Pierre (La Réunion)

V. 2.1. Composition des bétons

Les compositions des bétons caverneux sont consignées dans le **tableau IV.16**, celles des bétons pleins dans le **tableau IV.17** du **chapitre III**

La conductivité thermique apparente ainsi que la masse volumique du béton ont été déterminées à l'âge de 28 jours.

V. 2.2. Première Approche des modèles

L'approche effectuée par [34], dans le cadre d'une caractérisation thermique du béton de pouzzolane avec l'hypothèse d'un modèle composé de deux interfaces solides liant – granulat qui sont assimilés à des plaques planes juxtaposées en modèle série, en modèle parallèle et en une deuxième juxtaposition des modèles série et parallèle. Ce dernier s'inspire du modèle de structure poreuse établie par Krischer et de Willy et Soutwik cité au chapitre précédent.

Dans les trois modèles cités dans ce paragraphe, [34], introduit la notion de la conductivité thermique de la matrice liante λ_l et la conductivité thermique du grain λ_g .

λ_l est déterminée expérimentalement en utilisant la méthode de la boîte pour la mesure de la conductivité apparente et calculée avec la relation :

$$\lambda_l = \frac{\dot{q}e}{A\Delta T} \quad (V.1)$$

\dot{q} : Quantité de chaleur par unité de temps créé par effet joule dans la résistance

A : Aire de la surface de zone de mesure

e : Epaisseur de l'échantillon

ΔT : Différence de température entre les faces

La conductivité apparente de la matrice liante déterminée à partir de la méthode des boîtes est égale à $\lambda_l = 0.70 \text{ W / mK}$

La conductivité thermique λ_g est déterminée expérimentalement à partir d'une conception d'un cadre de forme parallélépipédique de dimensions données. Le fond et le haut du cadre sont constitués par des plaques minces de cuivres et les bords par du polystyrène avec une certaine épaisseur (**Voir annexe -2-**)

L'expression de la conductivité thermique apparente λ_g des granulats est donnée par la formule (V.2)

$$\lambda_g = \frac{702.25\lambda^* - 19.92}{380.25} \quad (V.2)$$

λ^* : La conductivité thermique mesurée équivalente des quatre éléments de polystyrène montés parallèlement avec le granulat

Les différents bétons étudiés par [34], sont des compositions des trois mélanges granulaires 0/5, 5/10 et 10/20. Les conductivités thermiques apparentes λ_g de ces différentes combinaisons et après calcul donne une moyenne de $\lambda_g = 0.22 \text{ W / mK}$

La conductivité thermique du milieu pour les modèles en série et parallèle s'écrit :

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{\alpha}{\lambda_l}} \quad (V.3)$$

$$\lambda_{parallèle} = \alpha\lambda_l + \varepsilon\lambda_g \quad (V.4)$$

Dans le modèle mixte série-parallèle, l'auteur considère que la part de la disposition en série sera noté θ et celle de la disposition en parallèle $(1-\theta)$. La valeur de θ est telle que la conductivité thermique du modèle ainsi réalisé, exprimé par la relation (V.5), soit égale à la conductivité thermique apparente mesurée λ_m .

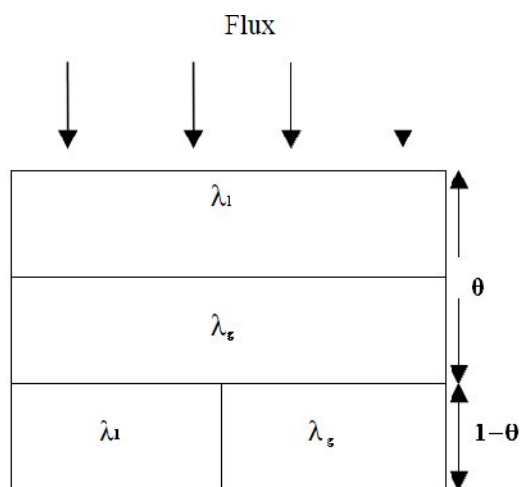


Figure V.1 : Représentation schématique du modèle mixte série-parallèle de la première approche [34]

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{\theta \lambda_{parallèle} + (1 - \theta) \lambda_{série}} \quad (V.5)$$

$$\theta = \frac{\lambda_{série} (\lambda_m - \lambda_{parallèle})}{\lambda_m (\lambda_{parallèle} - \lambda_{série})} \quad (V.6)$$

D'après les calculs effectués par la relation (V.6) sur les bétons pleins et cavernaux, nous avons comme valeur moyenne de θ , $\theta = 0,57$. La formule (V.5) devient :

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{0.57 \lambda_{parallèle} + 0.43 \lambda_{série}} \quad (V.7)$$

La porosité ε qui intervient dans les trois modèles est déterminée par la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\rho_{app} - \rho_l}{\rho_g - \rho_l} \quad (V.8)$$

ρ_{app} : Masse volumique apparente du béton

ρ_l : Masse volumique apparente du liant

ρ_g : Masse volumique apparente des grains

Les masse volumiques ρ_{app} , ρ_l et ρ_g sont déterminées expérimentalement.

Les résultats de mesures de la masse volumique apparente, la conductivité thermique du béton et la porosité sont regroupées dans les **tableaux V.1 et V.2**.

Masse volumique du béton apparente ρ en kg/m^3	1484	1424	1397	1351	1244	1148	1079
Porosité ε en %	31	38	40	47	57	66	71
λ mesurée en w/m K	0,46	0,41	0,42	0,39	0,29	0,26	0,25

Tableau V.1 : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons cavernaux [34]

Masse volumique du béton apparente ρ en kg/m^3	1550	1525	1484	1479	1464	1452	1447	1438	1422	1397	1356
Porosité ε en %	36	33	38	38	40	42	42	43	,41	40	48
λ mesurée en W/m K	0,48	0,47	0,47	0,48	0,46	0,45	0,44	0,43	0,44	0,46	0,41

Tableau V.2 : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons plein [34]

V. 2.2.1. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon les modèle série et le modèle parallèle

Les calculs ont été effectués à partir des deux modèles simples pour les deux types de bétons (pleins et caverneux), les résultats sont reportés sur les figures 2 et 3 montres la comparaison et l'évolution de la conductivité thermique apparente en fonction de la porosité du béton. On constate que :

- La variation de la conductivité thermique apparente est décroissante en fonction de la porosité. Lorsque la porosité augmente, la conductivité thermique apparente diminue. [19].
- Les conductivités thermiques mesurées sont comprises entre les valeurs obtenues par le modèle parallèle et le modèle série.
- Dans le cas des bétons caverneux, c'est le modèle série qui semble se rapprocher le plus des résultats expérimentales. Par contre, quand la porosité atteint la valeur de 57 %, les valeurs du modèles série sont au dessus des valeurs expérimentales. Cela peut être expliquer par le faite que les mélanges des granulat pour les valeurs des masses volumiques 1244, 1148 et 1079 présentes des vides d'air assez important entre les grains..

V. 2.2.2. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle mixte série-parallèle

Les résultats des calculs par ce modèle sont reportés sur les figures V.2 et V.3, on remarque que :

- Le modèle mixte se rapproche des valeurs de la conductivité apparente mesurée dans le cas du béton plein.
- Les valeurs des conductivités thermiques apparentes sont comprises entre les valeurs obtenues par le modèle parallèle et le modèle série.
- Dans le cas des bétons caverneux, les valeurs du modèle sont nettement au dessus des valeurs expérimentales pour une porosité supérieure à 50 %. L'écart entre les valeurs mesurées et le modèle est dû à l'incertitude des mesures

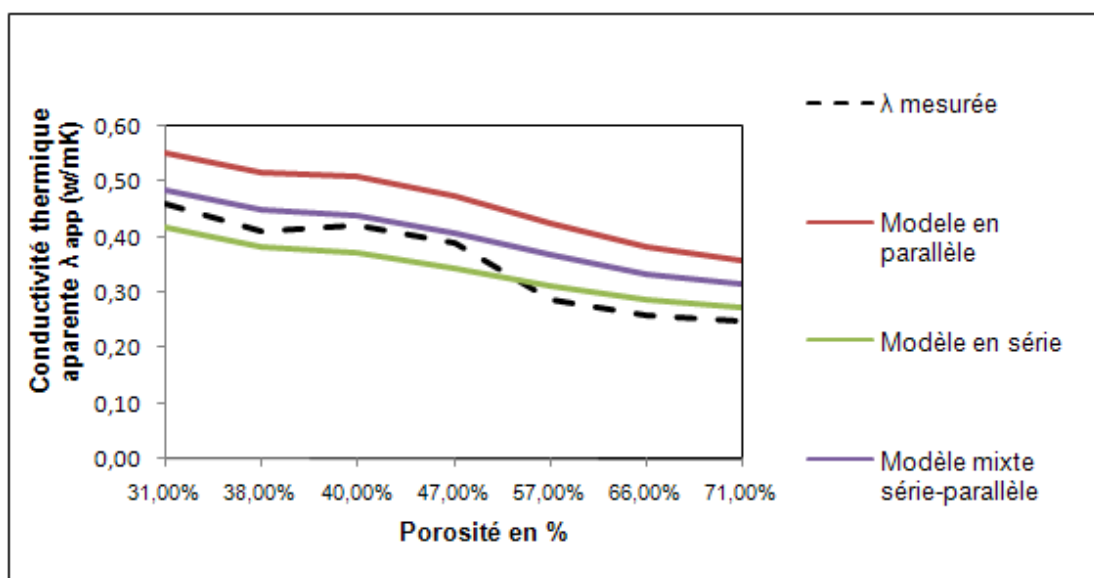


Figure V.2 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles série, parallèle et le modèle mixte série-parallèle en fonction de la porosité du béton caverneux. [34]

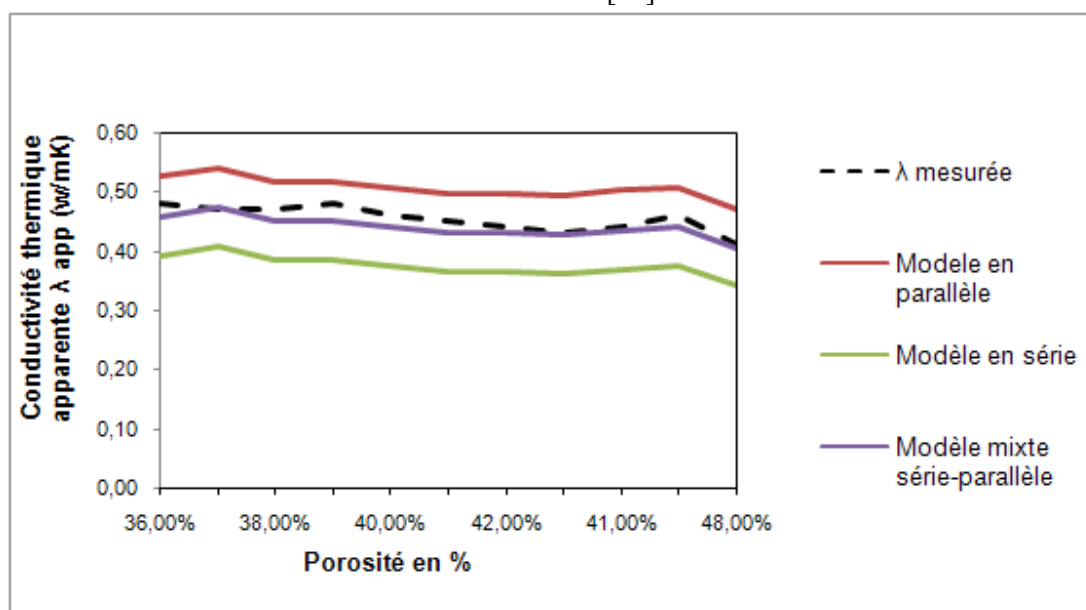


Figure V.3 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles série, parallèle et le modèle mixte série-parallèle en fonction de la porosité des bétons pleins [34]

En conclusion, il apparaît que les conductivités thermiques des bétons pleins sont supérieures à celles des bétons caverneux, cela est du peut être au faible dosage du ciment, à l'absence du sable et surtout, la structure caverneuse du béton. Cette approche semble convenir avec les différents modèles pour le béton plein, mais dans le cas du béton caverneux, seul le modèle en série donne les valeurs les plus proches. Aussi, on note que pour une porosité >60%, la phase fluide (air) impose la conductivité thermique apparente.

V.2.3. Deuxième approche des modèles

La structure des bétons et en particulier celle des bétons de pouzzolane naturelle laisse apparaître des cavités qui peuvent selon les conditions d'élaboration et les conditions thermo-hygrométriques de traitement et de conservation, comporter une phase liquide ou une phase gazeuse ou un mélange des deux.

Dans cette approche on considère les deux conceptions suivantes :

- Le béton de pouzzolane constitué d'une phase solide et d'une phase fluide (air)
- Le béton est constitué de trois phases : solide, fluide (air) et liquide

Ces deux approches nous conduisent directement vers les paramètres suivants :

- La conductivité thermique de la phase fluide (air) $\lambda_f, \lambda_f = 0.026 \text{ w/mK}$
- La conductivité thermique de la phase liquide (eau) $\lambda_l, \lambda_l = 0.60 \text{ w/mK}$
- La conductivité thermique de la matrice solide λ_s

La conductivité thermique d'un milieu granulaire dépend étroitement de la conductivité thermique de la phase solide. Les mesures de la conductivité d'une particule, présentent un défi qu'on ne peut pas surmonter avec les méthodes existantes. Par contre, la conductivité thermique d'un milieu non poreux est facile à mesurer avec les méthodes décrites auparavant.

Afin d'estimer son influence sur la conductivité thermique apparente, on introduit dans les modèles quelques valeurs de la conductivité de la phase du solide. Les valeurs de la conductivité du solide sont comme suit :

$$\lambda_s = 0.7, 0.9, 1, 1.2, 1.5, 1.7 \text{ et } 2 \text{ w/mK}$$

La porosité représente un paramètre physique très déterminant pour les propriétés au niveau macroscopique. Celle-ci peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{ag}}, \quad [27] \quad (V.9)$$

ρ : Masse volumique apparente du béton

ρ_{ag} : Masse volumique absolue du grain [34]

Les évolutions des conductivités thermiques en fonction de la porosité calculée par la formule (V.9) ont été représentées sur les figures V.5 à V.18 pour chaque valeur de la conductivité solide introduite.

V. 2.3.1. Conductivité thermiques apparentes sec des bétons selon les modèle série et le modèle parallèle

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{\alpha}{\lambda_s}} \quad (V.9)$$

$$\lambda_{parallèle} = \alpha\lambda_f + \varepsilon\lambda_s \quad (V.10)$$

λ_s : Conductivité thermique de la matrice solide en W/m.K

λ_f : Conductivité thermique de la phase fluide (air) W/m.K

Dans les figures V.5 et V.6, pour $\lambda_s = 0,7$ w/mK, les valeurs du modèle parallèle et du modèle série sont aux dessous des valeurs mesurées. On note aussi, dans le béton caverneux, le modèle parallèle se rapproche de la conductivité mesurée pour les valeurs de porosité variant entre 55% jusqu'à 61%. Dans la première approche les deux bornes sont assez proches, par contre dans la deuxième l'écart entre les bornes est important.

Pour $\lambda_s = 0,9$ w/mK, les figures V.7 et V.8, montrent les valeurs des conductivités thermiques apparentes mesurées se rapproches de la borne supérieur pour des porosités variant entre 47% jusqu'à 51% dans le cas du béton caverneux. Concernant le béton plein les valeurs sont proches pratiquement pour toute les porosités Par rapport à la première approche les valeurs du modèle parallèle sont assez proches. On constate que les valeurs mesurées se trouvent entre les deux modèles représentant la borne supérieure et inférieure limite.

Pour $\lambda_s = 1$ w/mK, les figures V.9 et V.10, On observe que les valeurs des conductivités thermiques apparentes mesurées se trouvent entre les deux bornes des deux modèles. En remarque que les valeurs du modèle parallèle sont très proches des valeurs du modèle parallèle de la première approche.

Pour les autres valeurs de λ_s , dans les courbes des figures V.11 à V.18, on constate que les valeurs mesurées restent toujours entre les deux modèles représentant la borne supérieur et inférieur limite. L'écart entre les deux bornes est plus important au fur et à mesure que λ_s augmente, cela veut dire que la phase solide impose la conductivité total.

V. 2.3.2 Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle mixte série-parallèle

On considère que la part de la disposition en parallèle sera noté θ et celle de la disposition en séries $(1-\theta)$. La valeur de θ est telle que la conductivité thermique du modèle ainsi réalisé, exprimé par la relation (V.11), soit égale à la conductivité thermique apparente mesurée λ_m .

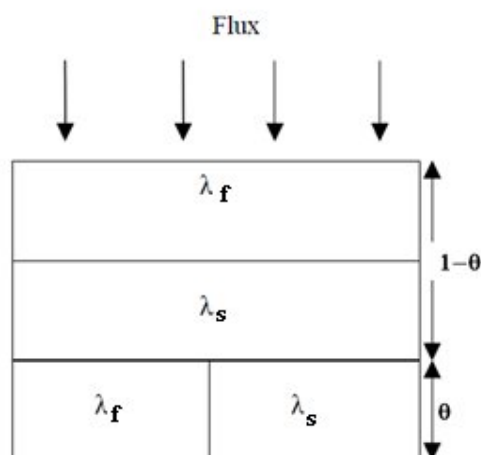


Figure V.4 : Représentation schématique du modèle mixte série-parallèle deuxième approche

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{\theta \lambda_{série} + (1 - \theta) \lambda_{parallèle}} \quad (V.11)$$

$$\theta = \frac{\lambda_{parallèle} (\lambda_m - \lambda_{série})}{\lambda_m (\lambda_{parallèle} - \lambda_{série})} \quad (V.12)$$

Pour $\lambda_s = 0,7$ w/mK, les valeurs du modèle sont au dessus des valeurs limite représentées par le modèle parallèle et le modèle série, cela est vraie pour les deux types de bétons **figure V.5 et V.6**. On constate aussi que les valeurs du modèle mixte se rapprochent des valeurs de la conductivité thermique apparente mesurée pour le béton plein.

Pour des porosités qui varient de 47% à 51%, les conductivités du béton cavernoux calculées se rapprochent avec les valeurs mesurées, mais dès que la porosité dépasse ce seuil, un écart apparaît entre les valeurs.

Pour les autres valeurs de λ_s , **Les figures V.7 à V18**, montrent l'évolution des valeurs du modèle sont toujours entre les bornes maximum et minimum. On générale le modèle mixte série-parallèle aboutit à une bonne concordance avec les valeurs mesurées dans le cas du béton plein et ce pour toute les valeurs de la conductivité solide introduite. En comparaison avec le modèle mixte série-parallèle de la première approche, les valeurs du modèle restent quasiment proches.

D'après l'observation des différentes courbes des trois modèles (série, parallèle et mixte parallèle-série) des deux approches, il semble que les **figures V.7, V.8, V.9 et V.10**, présentent

des résultats par les quelles en déduit la valeur de la conductivité thermique de la matrice solide λ_s , on constate que :

- Les résultats du modèle parallèle de la deuxième approche sont très proches des valeurs du modèle parallèle de la première approche.
- Les courbes de la conductivité thermique mesurée, du modèle mixte parallèle-série de la première approche et de la deuxième approche sont comprises entre les valeurs obtenues par les modèles parallèles de la première et la deuxième approche et le modèle série de la deuxième.

Ces deux observations, nous amènes à un constat préliminaire sur la conductivité thermique de la matrice solide λ_s qui sera proche de la valeur de 1 W/mK

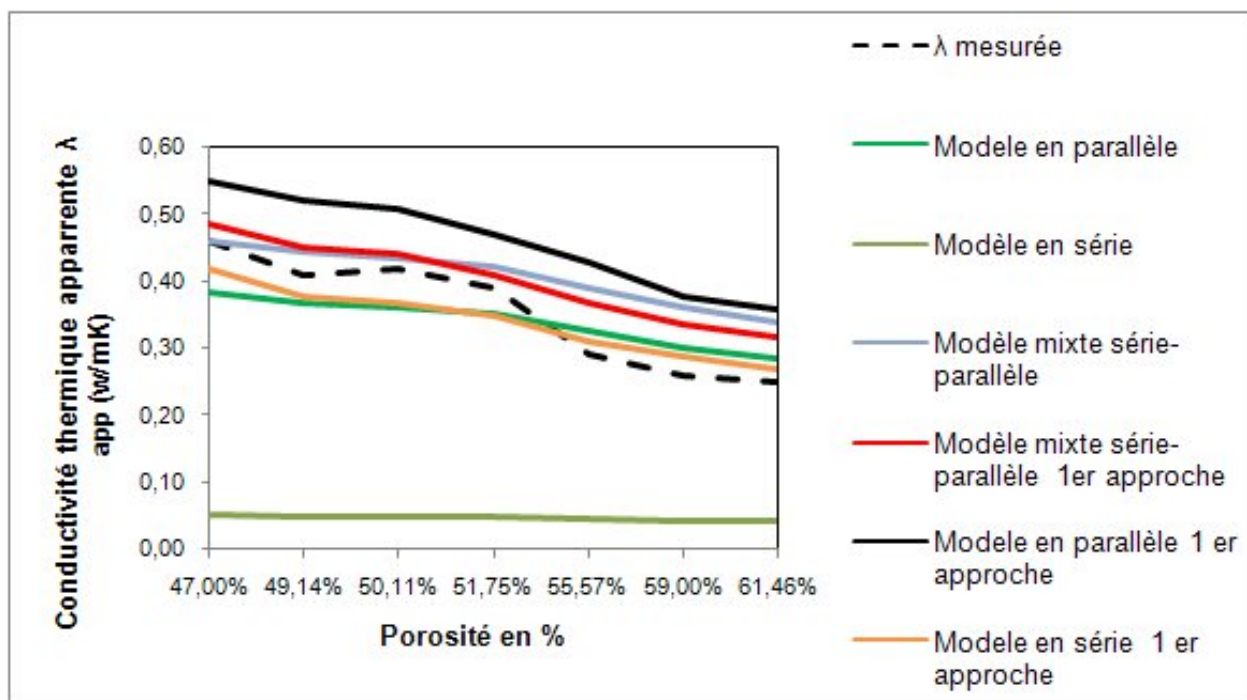


Figure V.5 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=0,7$ W/m.K)

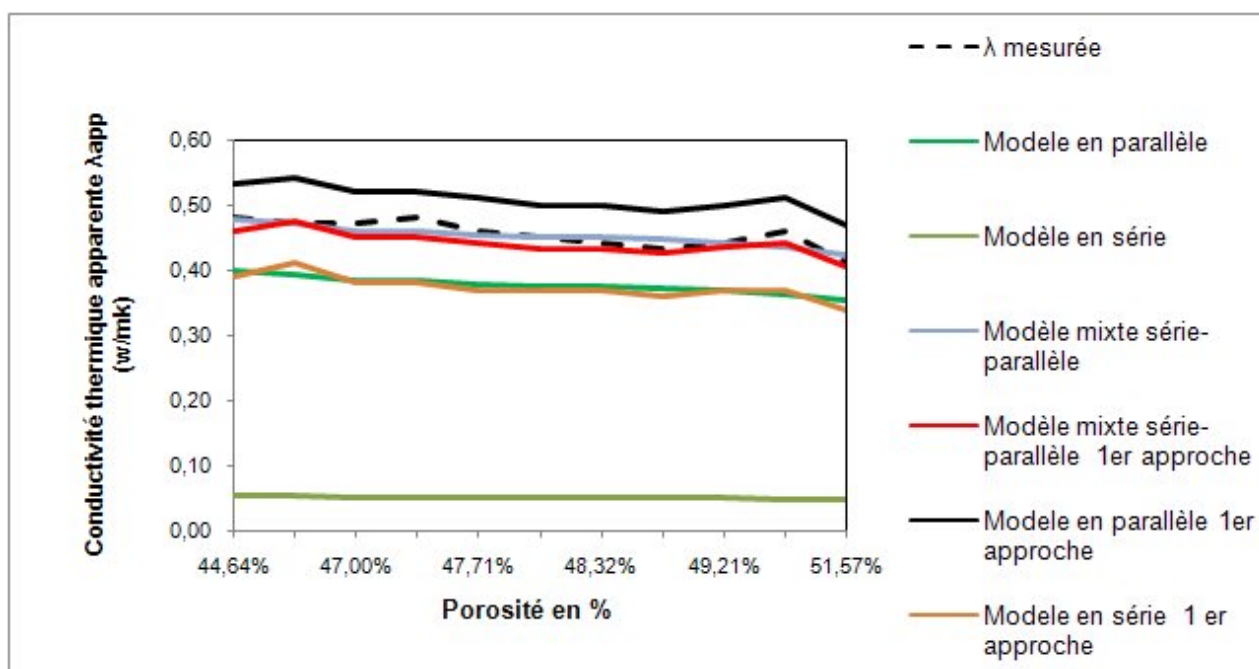


Figure V.6 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=0,7$ W/m.K)

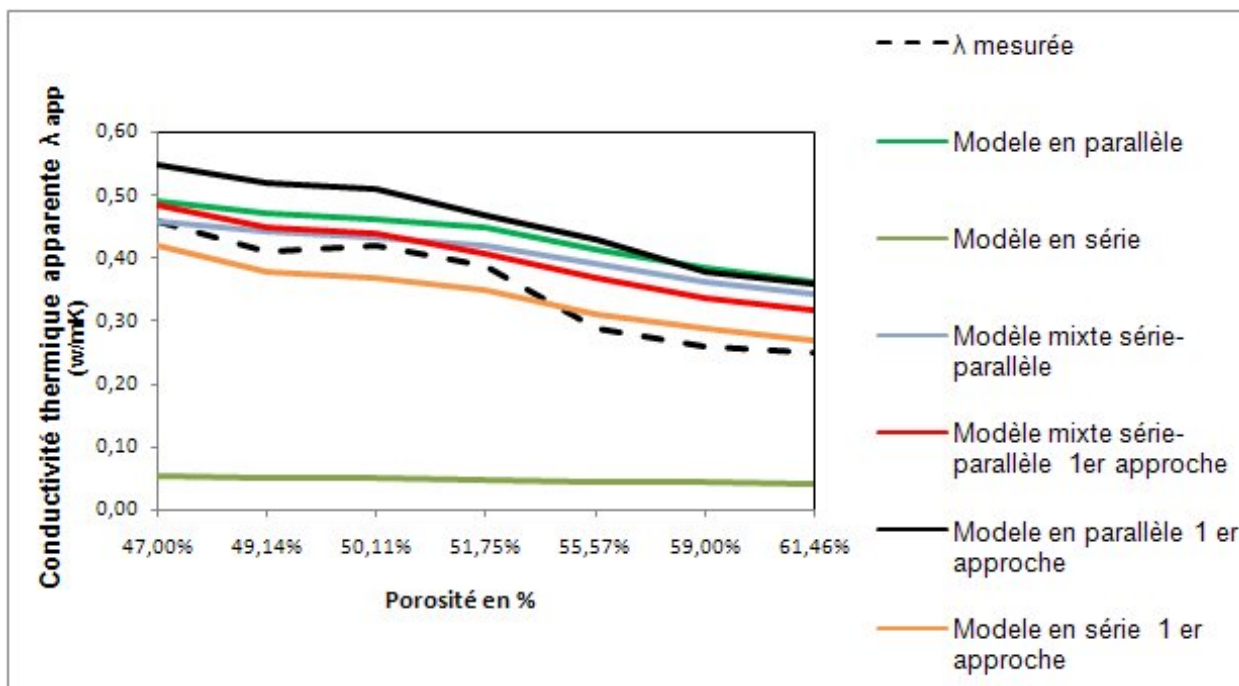


Figure V.7 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=0,9$ W/m.K)

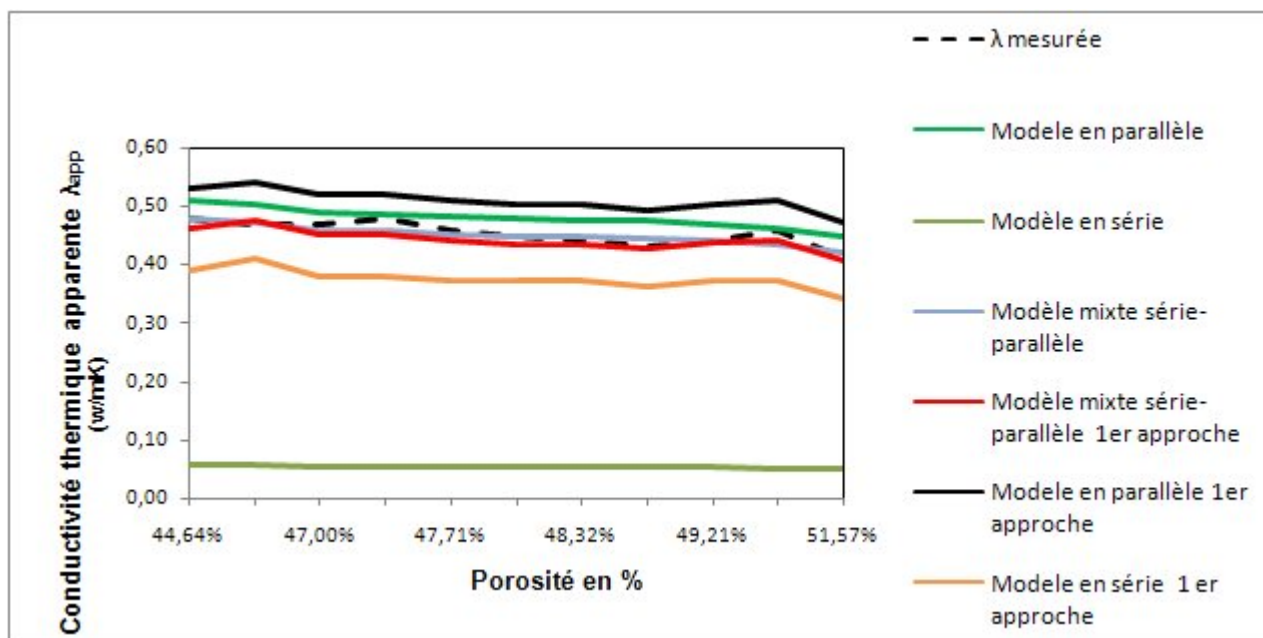


Figure V.8 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=0,9$ W/m.K)

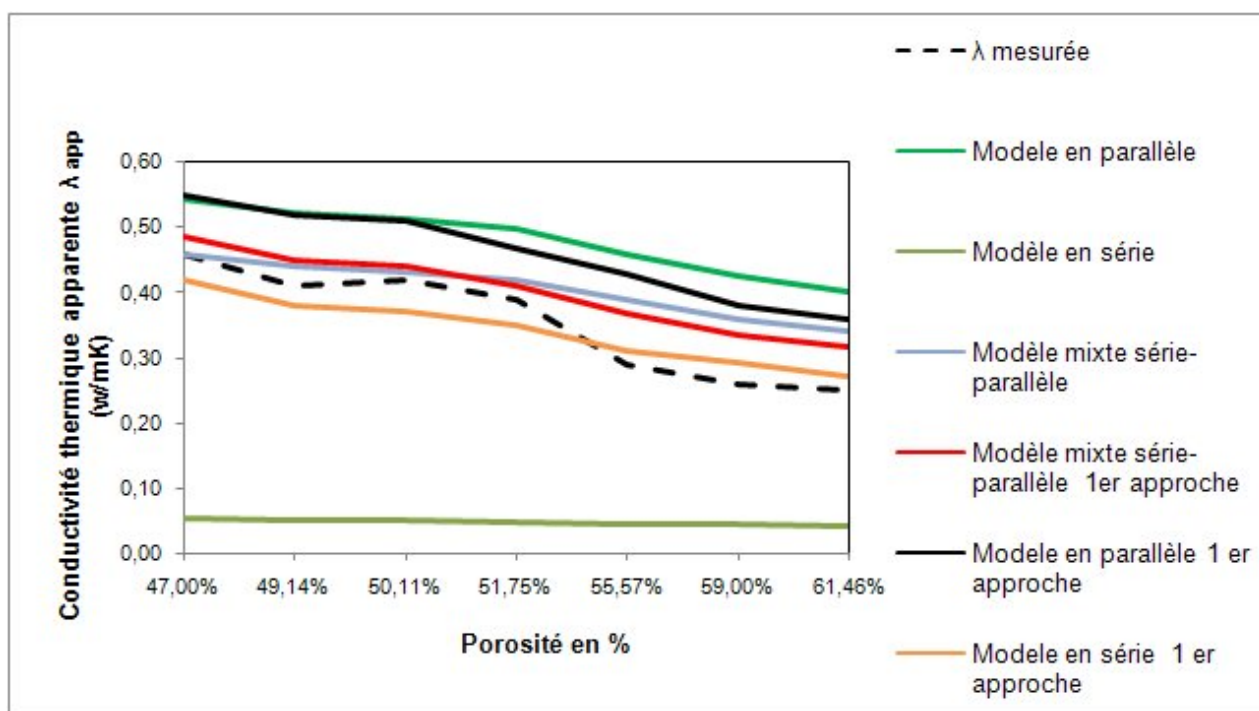


Figure V.9 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=1$ W/m.K)

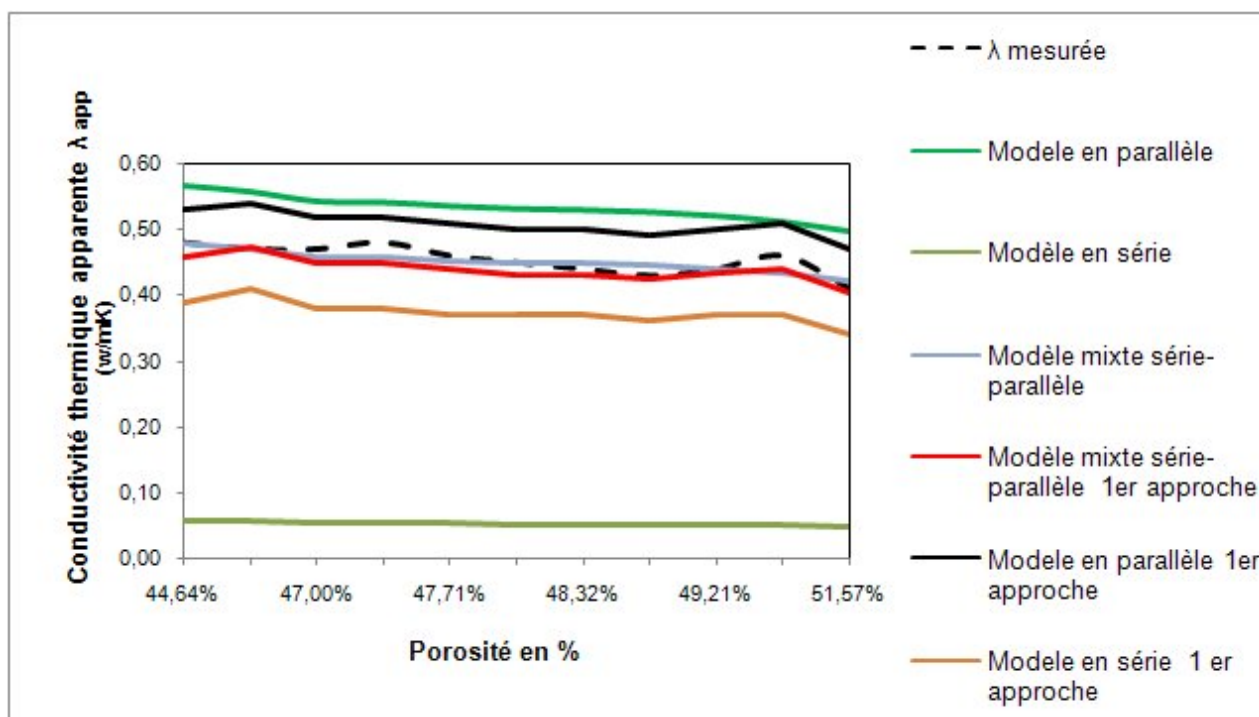


Figure V.10 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=1$ W/m.K)

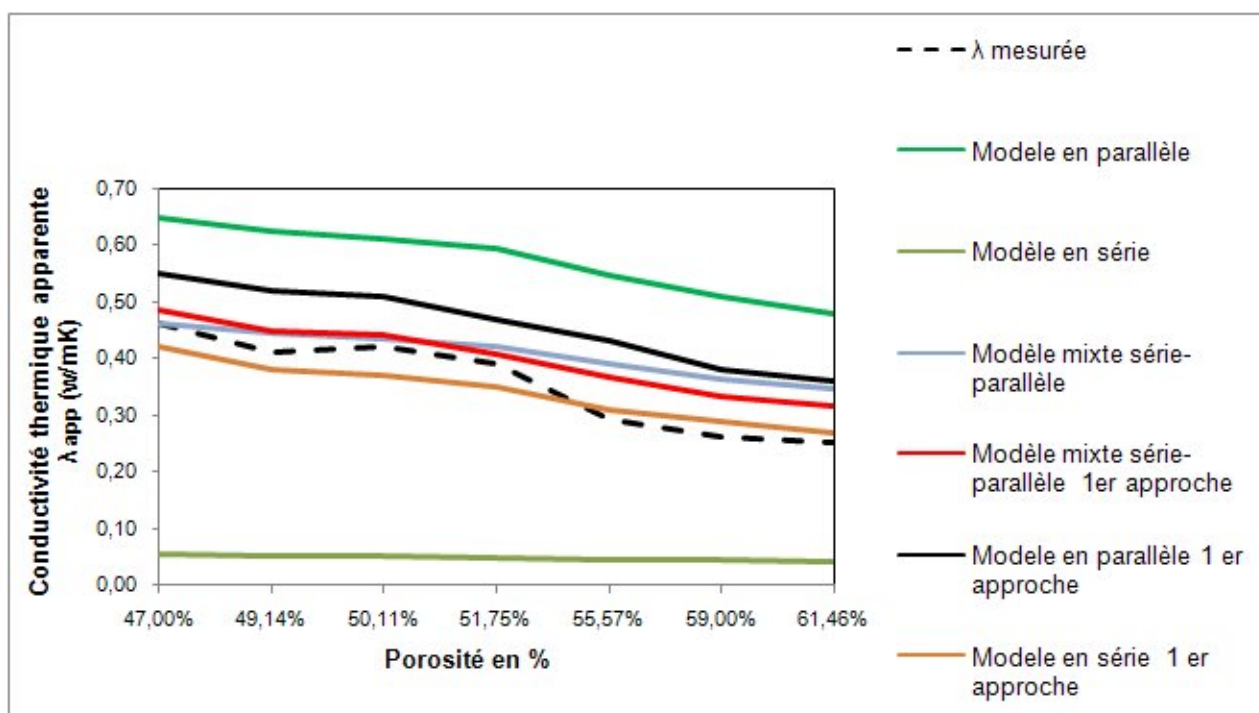


Figure V.11 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=1,2 \text{ W/m.K}$)

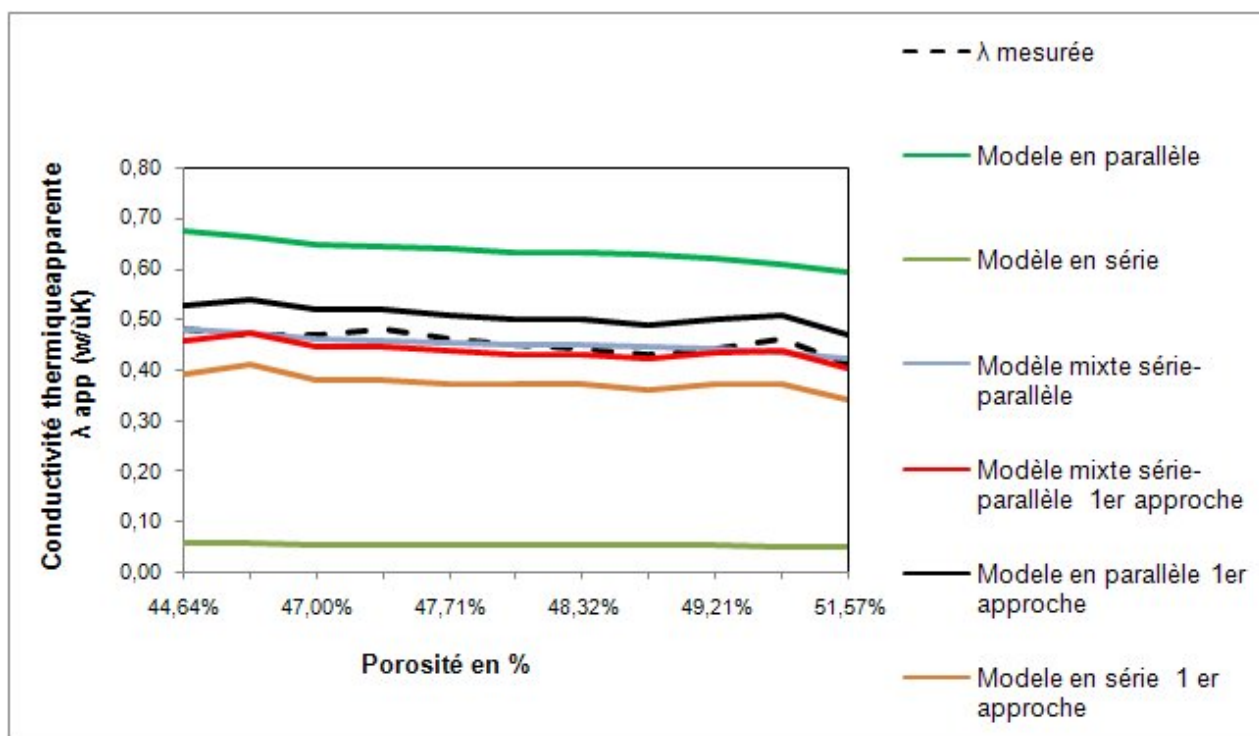


Figure V.12 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=1,2 \text{ W/m.K}$)

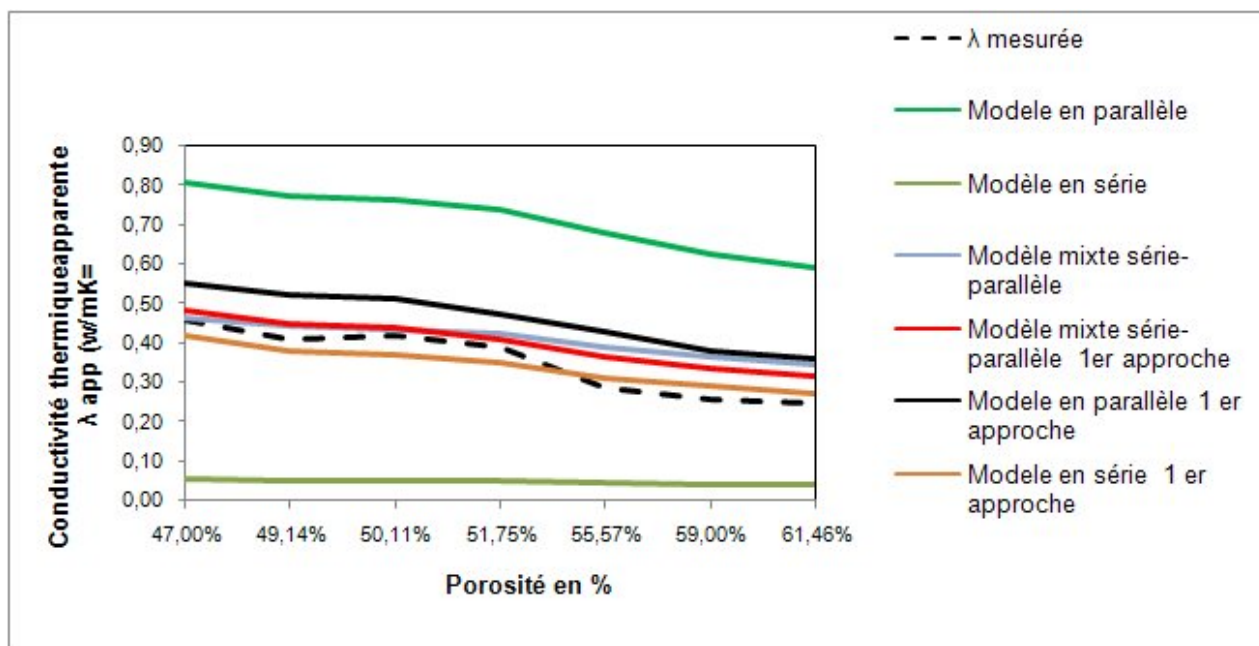


Figure V.13 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=1,5$ W/m.K)

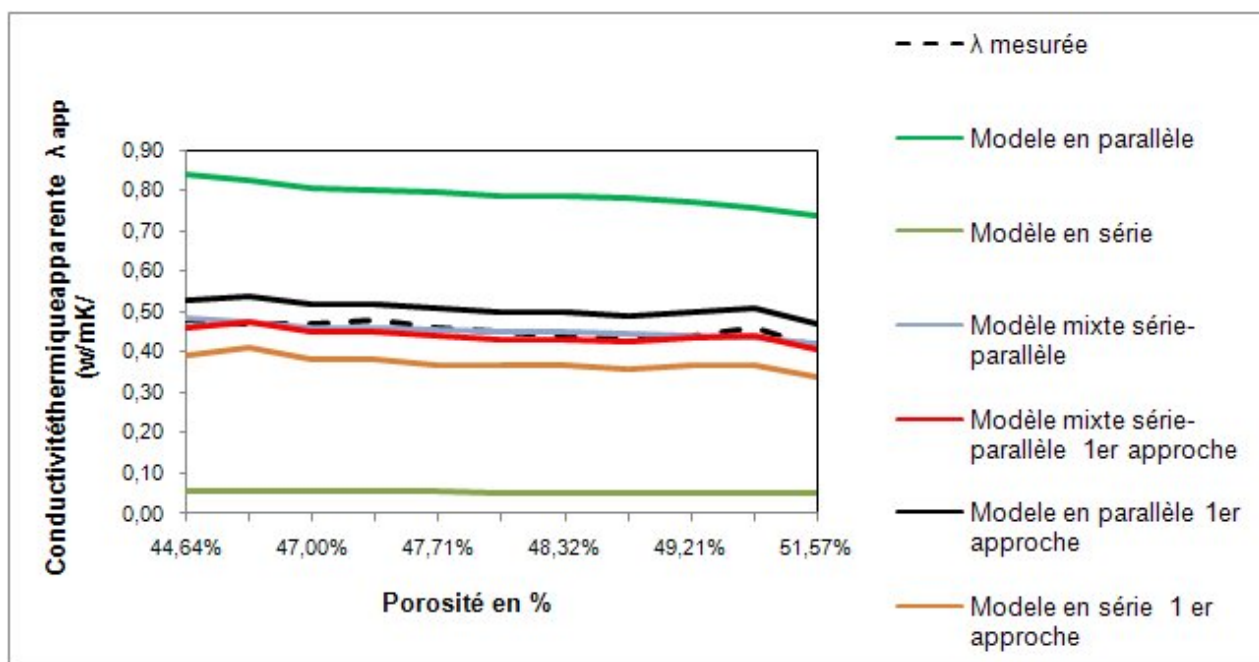


Figure V.14 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=1,5$ W/m.K)

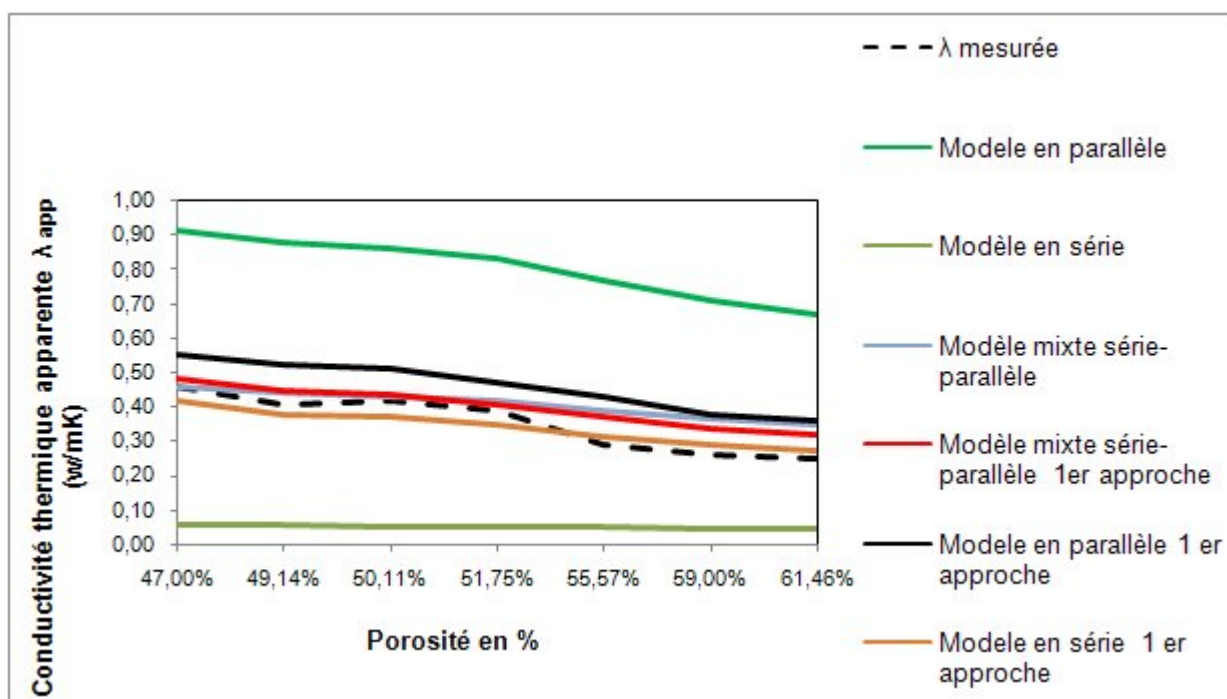


Figure V.15 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=1,7$ W/m.K)

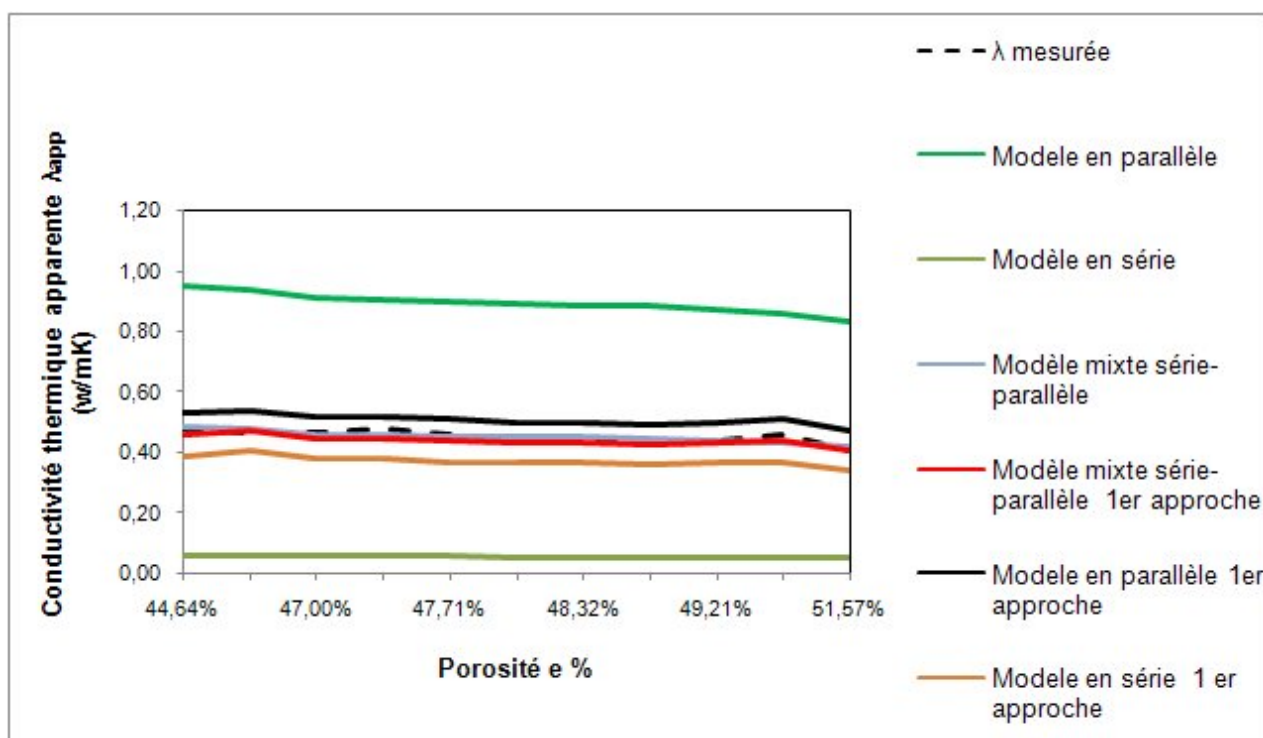


Figure V.16 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=1,7$ W/m.K)

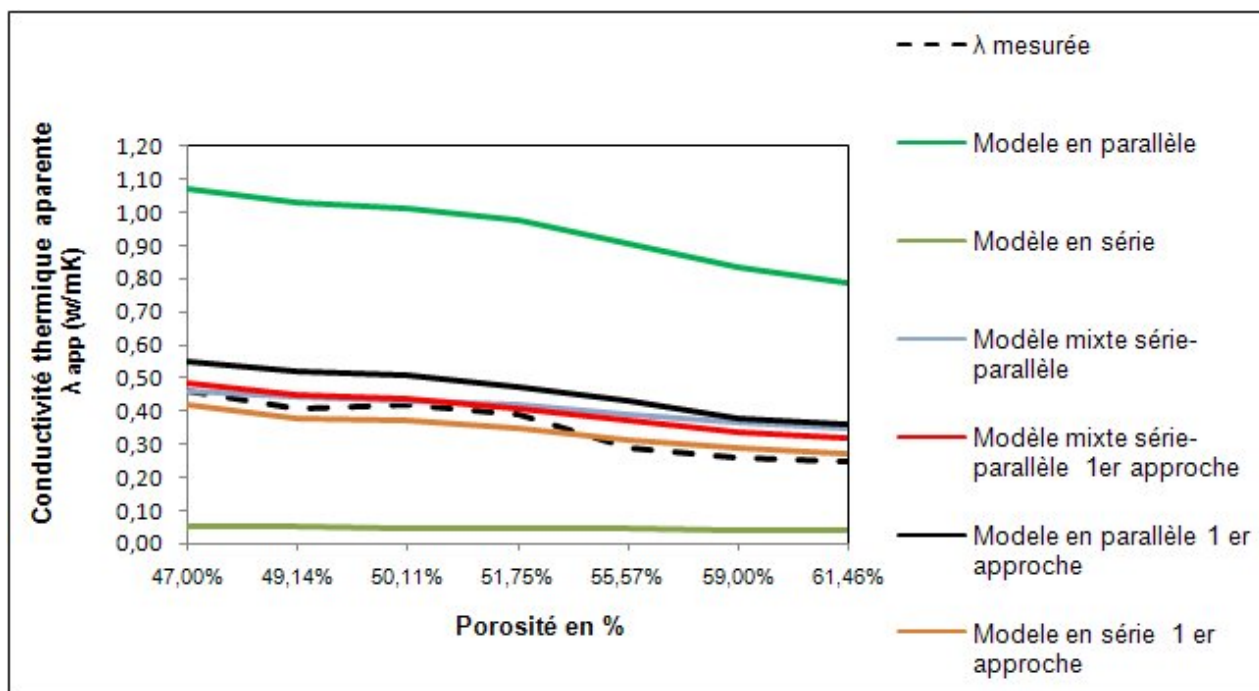


Figure V.17 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons caverneux pour les deux approches ($\lambda_s=2$ W/m.K)

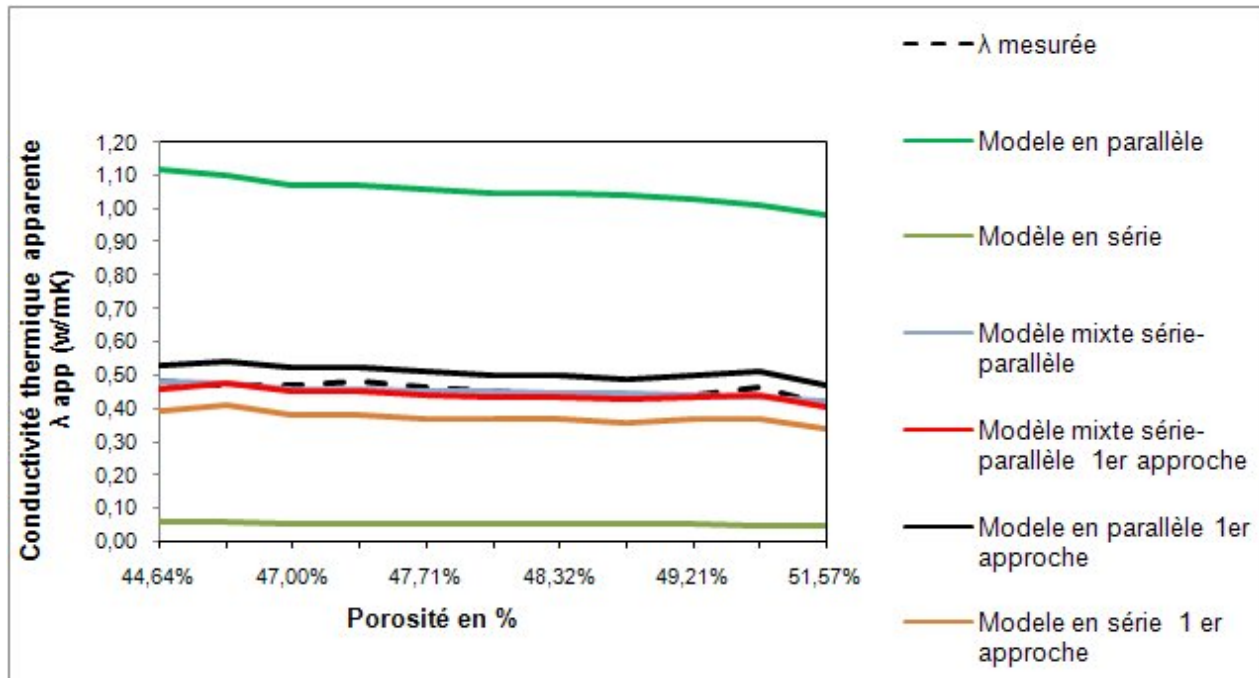


Figure V.18 : L'évolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pleins pour les deux approches ($\lambda_s=2$ W/m.K)

V. 2.3.3 Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle de Hashin et Shtrikman

Comme les modèles série et parallèle qui représentent deux valeurs extrêmes de la conductivité thermique avec une borne supérieur et une borne inférieur, ce modèle se base sur la même hypothèse sauf que ces bornes sont restrictives. les équations (V.13) et (V.14) donnent respectivement les bornes inférieure et supérieure de la conductivité.

$$\frac{\lambda_{app.min}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \frac{\varepsilon}{\frac{1}{1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_f}} + \frac{\alpha}{3 \frac{\lambda_s}{\lambda_f}}} \quad (V.13)$$

$$\frac{\lambda_{app.max}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\alpha}{\frac{1}{\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1} + \frac{\varepsilon}{3\lambda_f}} \quad (V.14)$$

Pour les deux types de bétons des calculs ont été effectués à partir de ce modèle pour les valeurs de la conductivité thermique solide λ_s , $\lambda_s=0,9, 1$ et $1,2$ W/mK. Nous pouvons observer sur les **figures V.21** et **V.22**, que les valeurs de la conductivité thermique du modèle se trouvent entre les bornes série et parallèle. On note que pour le béton plein, La courbe du modèle mixte série-parallèle de la deuxième approche et celle de la conductivité mesurée sont comprise entre la valeur maximum et minimum du modèle de Hashin et Shtrikman. Les valeurs de la conductivité mesurée du béton caverneux sont très proches de la borne minimum de Hashin dans un intervalle de porosité variant entre 47% et 51%, ensuite on constate pour une porosité supérieur à 51%, la conductivité mesurée diminue jusqu'à atteindre des valeurs plus bas que le modèle série de la première approche.

Par contre, sur les **figures V.20** et **V.23, V.24**, la courbe du modèle mixte série-parallèle et celle des valeurs mesurées, sont soit au dessus ou dessous du modèle de Hashin et Shtrikman. A l'exception de la **figure V.19**, Les valeurs de la conductivité mesurée sont très proches de la borne maximum de Hashin dans un intervalle de porosité variant entre 47% et 51%, ensuite on note la même évolution de conductivité mesurée que dans la figure V.21 pour un seuil de porosité dépassant les 51%.

Les résultats obtenus pour les autres valeurs de la conductivité thermique de la phase solide, ne permettent pas de trancher en faveur d'une telle ou telle conductivité du solide introduite.

Globalement, les résultats obtenus pour la valeur de $\lambda_s= 1$ W/mK, concernant ce modèle confirment la conclusion de la deuxième approche sur la valeur de la conductivité de la phase solide. Qui peut être choisie entre l'intervalle 0,9 jusqu'à 1 W/m.K

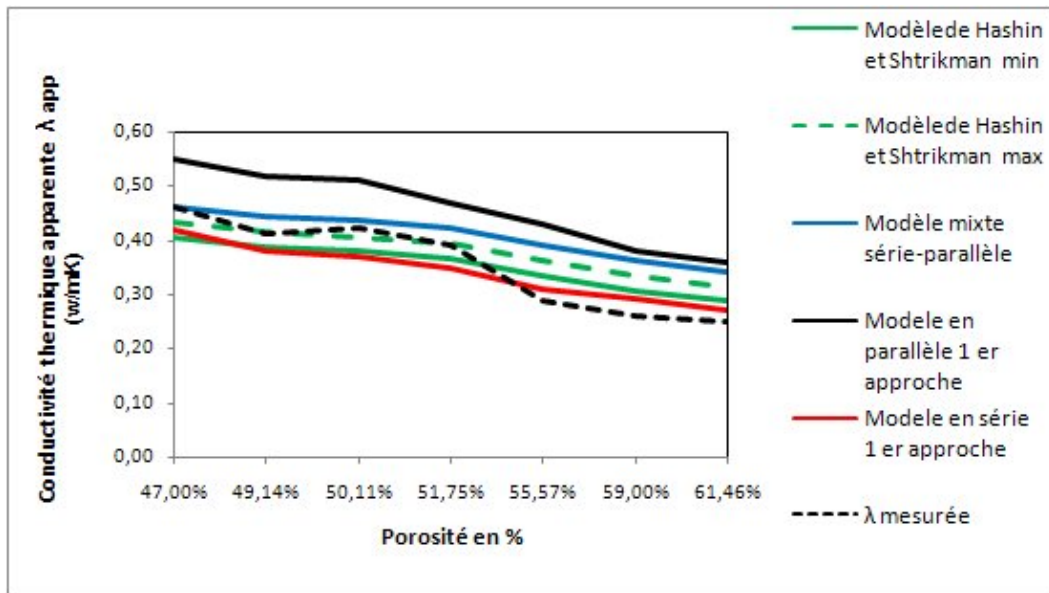


Figure V.19 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda_s=0.9$ W/m.K)

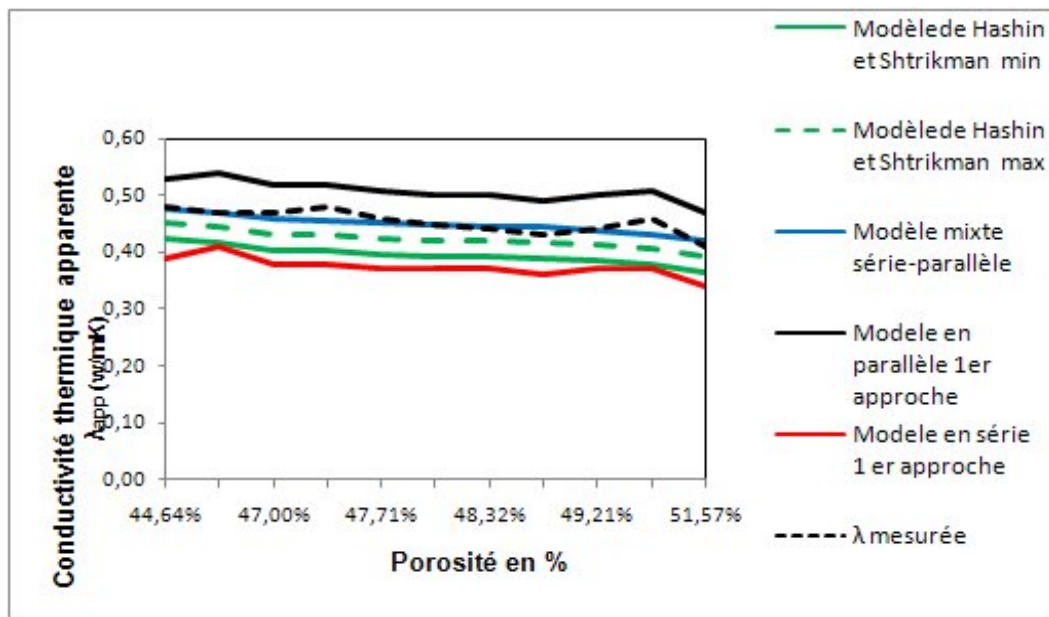


Figure V.20 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda_s=0.9$ W/m.K)

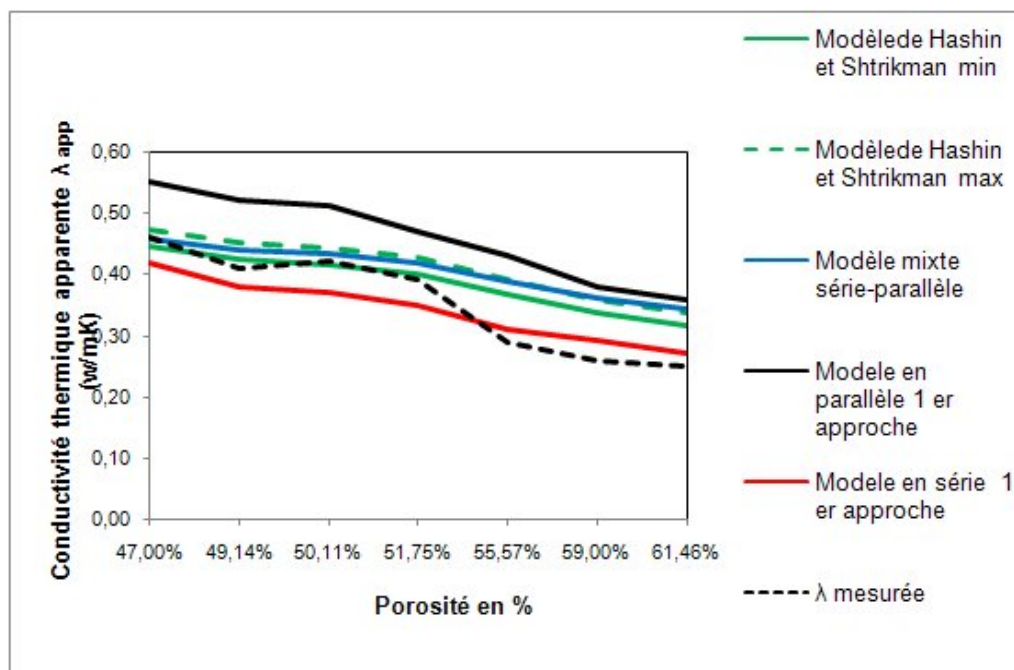


Figure V.21 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda_s=1$ W/m.K)

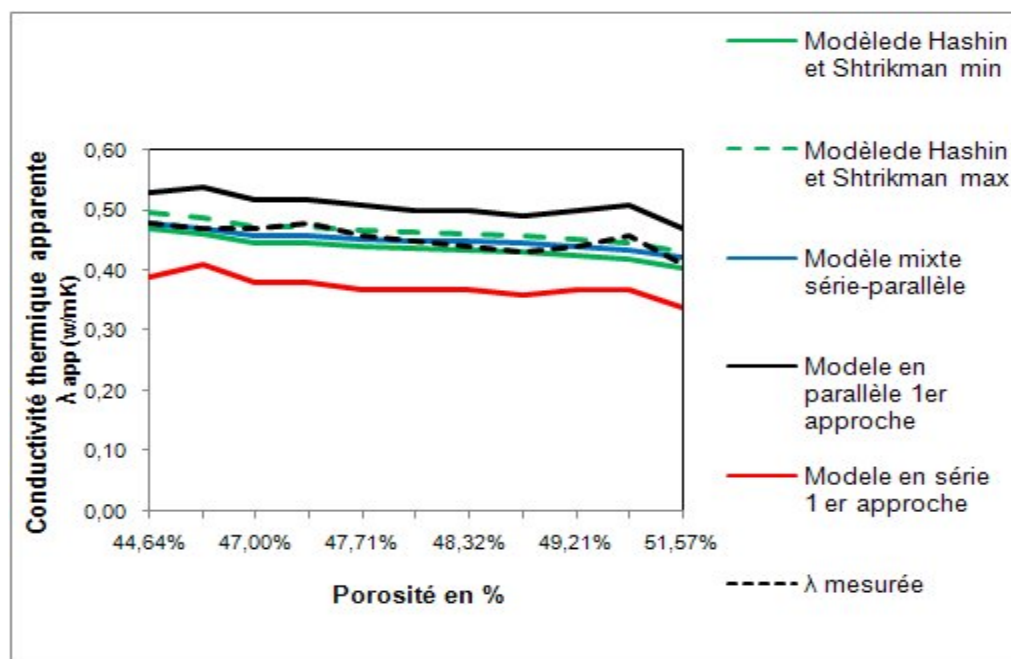


Figure V.22 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda_s=1$ W/m.K)

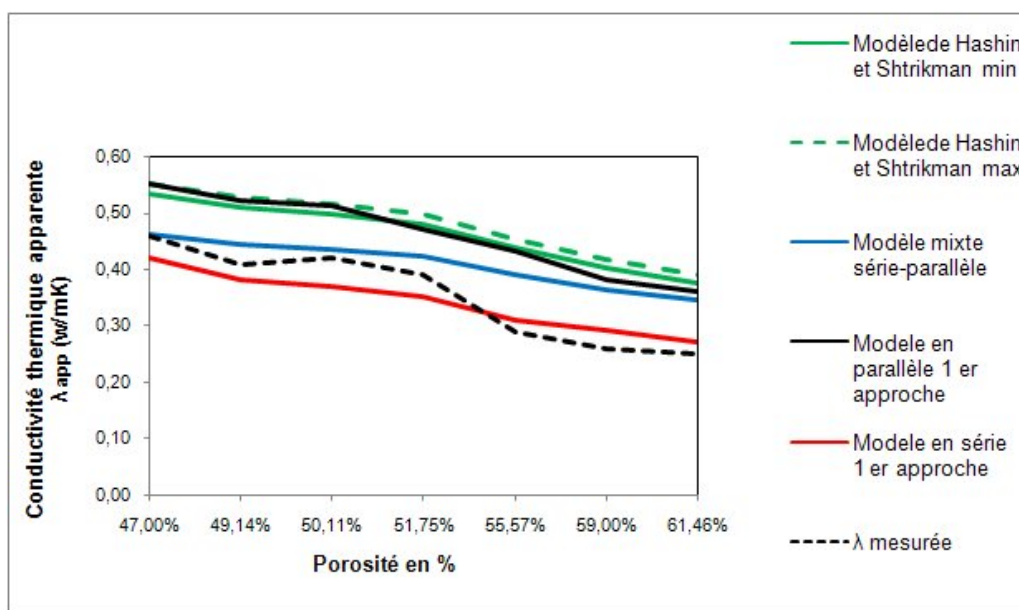


Figure V.23 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda_s=1,2$ W/m.K)

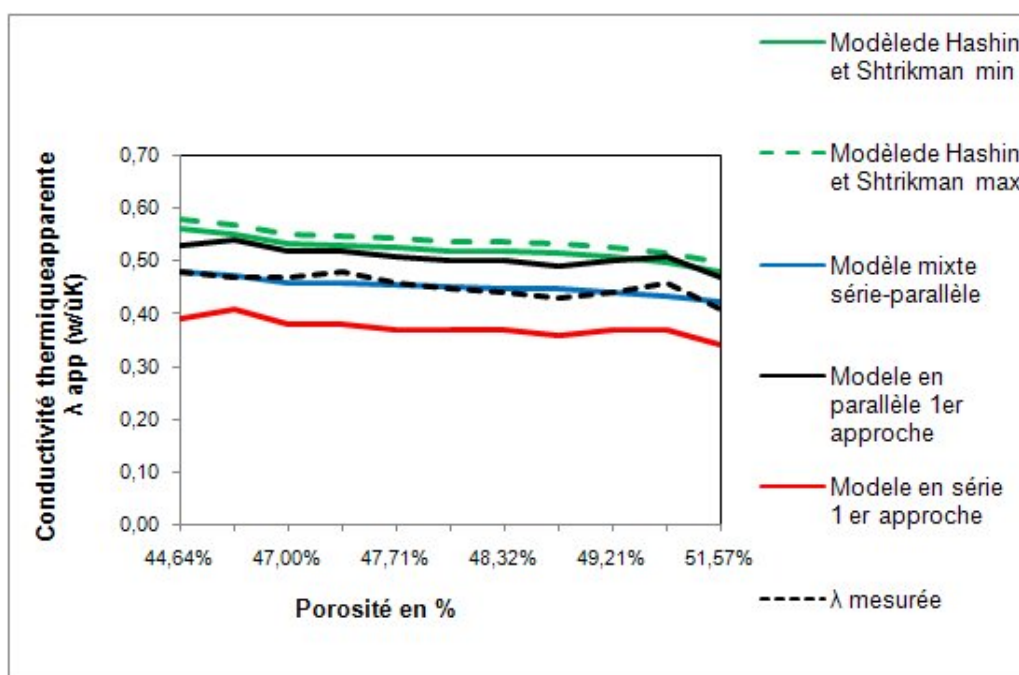


Figure V.24 : Comparaison de l'évolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda_s=1,2$ W/m.K)

V. 2.3.4. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon le modèle mixte série-parallèle étendu aux trois phases solide-liquide -gaz

Les conductivités thermiques apparentes les masses volumiques ainsi que le taux de saturation des bétons ont été déterminées à l'âge de 28 jours.

Taux de saturation S en %	4,3	4,8	5,7	5,6	7,0	3,2	3,0
Masse volumique du béton apparente ρ en kg/m^3	1548	1493	1477	1427	1330	1184	1111
λ mesurée en w/m K	0,550	0,430	0,540	0,520	0,360	0,300	0,290

Tableau V.3 : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons cavernaux saturés [34]

Taux de saturation S	4,5	6,3	8,6	7,3	7,0	5,7	3,4	6,0	4,8	4,9	6,0
Masse volumique du béton	1620	1616	1612	1571	1548	1535	1530	1525	1490	1465	1438
λ mesurée	0,63	0,61	0,66	0,59	0,59	0,60	0,55	0,58	0,55	0,57	0,53

Tableau V.4 : Masses volumiques, porosités et conductivités thermiques apparentes mesurée des bétons plein saturés [34]

Le modèle mixte série-parallèle étendu aux trois phases **Figure V.25** est décrit par la relation qui ressemble globalement au modèle mixte série-parallèle à deux phases. Formule (V.15).

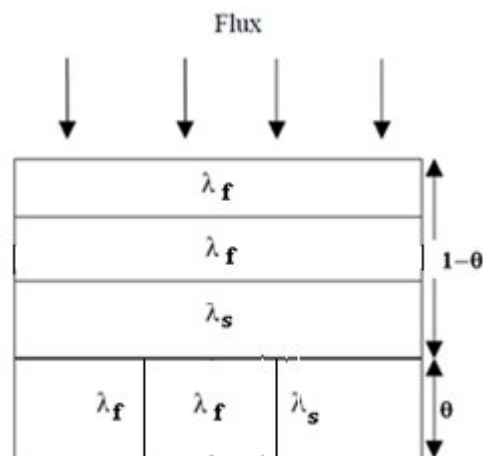


Figure V.25 : Représentation schématique du modèle mixte série-parallèle étendu aux trois phases

$$\lambda_{app \text{ trois phases}} = \frac{\lambda_{série} \lambda_{parallèle}}{\theta \lambda_{série} + (1 - \theta) \lambda_{parallèle}} \quad (V.15)$$

$\lambda_{série}$ et $\lambda_{parallèle}$ Représentent respectivement la conductivité thermique des couches disposées en série et celle disposées en parallèle. et qui sont déterminés par les relations (V.16) et (V.17). [S Gaye]

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\alpha}{\lambda_s} + \frac{(1-S)\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{S\varepsilon}{\lambda_{f'}}} \quad (V.16)$$

$$\lambda_{parallèle} = \alpha\lambda_s + (1-S)\varepsilon\lambda_f + S\varepsilon\lambda_{f'} \quad (V.17)$$

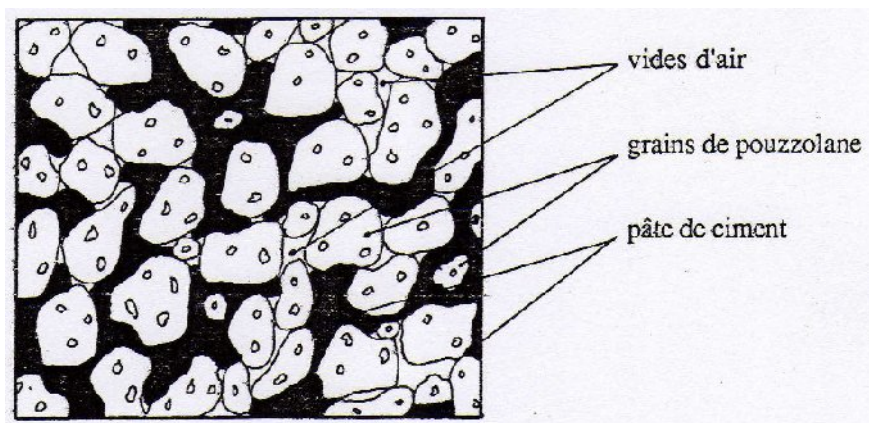
.Les résultats relatifs au modèle mixte série-parallèle étendu aux trois phases, sont représentés sur les courbes des **figures V.27 à V.32** et ce pour les trois valeurs de λ_s égales à 1,5, 1,7 et 2 W/mK, montrant l'évolution de la conductivité thermique apparente du béton à l'état saturé en comparaison avec les valeurs mesurées

Les conductivités thermiques calculées et mesurées se trouvent entre les bornes des modèles simples

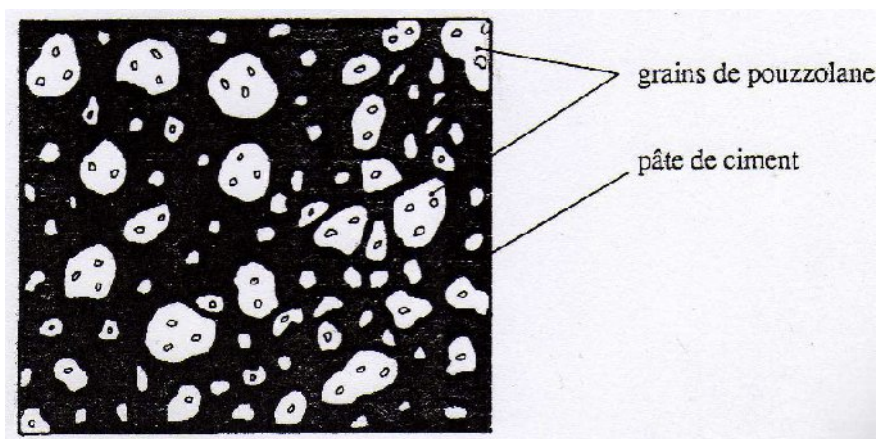
Les conductivités thermiques apparentes mesurées à l'état humide, à 28 jours, sont légèrement plus élevées que celles des bétons secs. L'eau liquide constitue un élément défavorable vis-à-vis de l'isolation. Les résultats du modèle étendu appui cette hypothèse puisque les valeurs calculées sont aussi légèrement supérieurs.

.Pour les bétons caverneux les valeurs sont assez proches. Ces résultats s'expliquent par la présence des vides d'air inter granulaires et un taux de porosité fermée important. **Figure V.26 (a)**

Pour les bétons pleins l'évolution des valeurs du modèle et les valeurs mesurées sont presque des lignes parallèles, celles du modèle sont inférieurs aux conductivités mesurées. Cela peut être causé par l'incertitude des mesures effectuées. Les valeurs plus élevées de la conductivité humide par rapport à la conductivité sec, sont peut être du à l'absence des vides d'air entre les grains, et entre la matrice liante et les grains **Figure V.26 (b)**.



a)



b)

Figure V.26 : a) Coupe d'un béton caverneux ; b) Coupe d'un béton plein

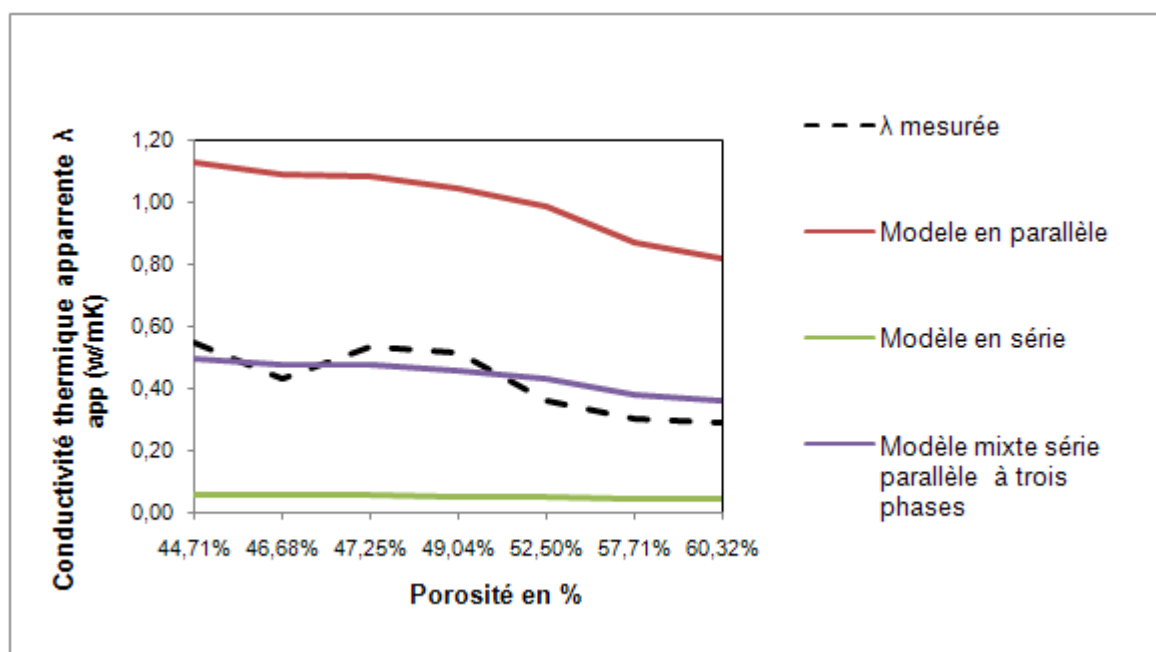


Figure V.27 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda_s=1,5$ W/m.K)

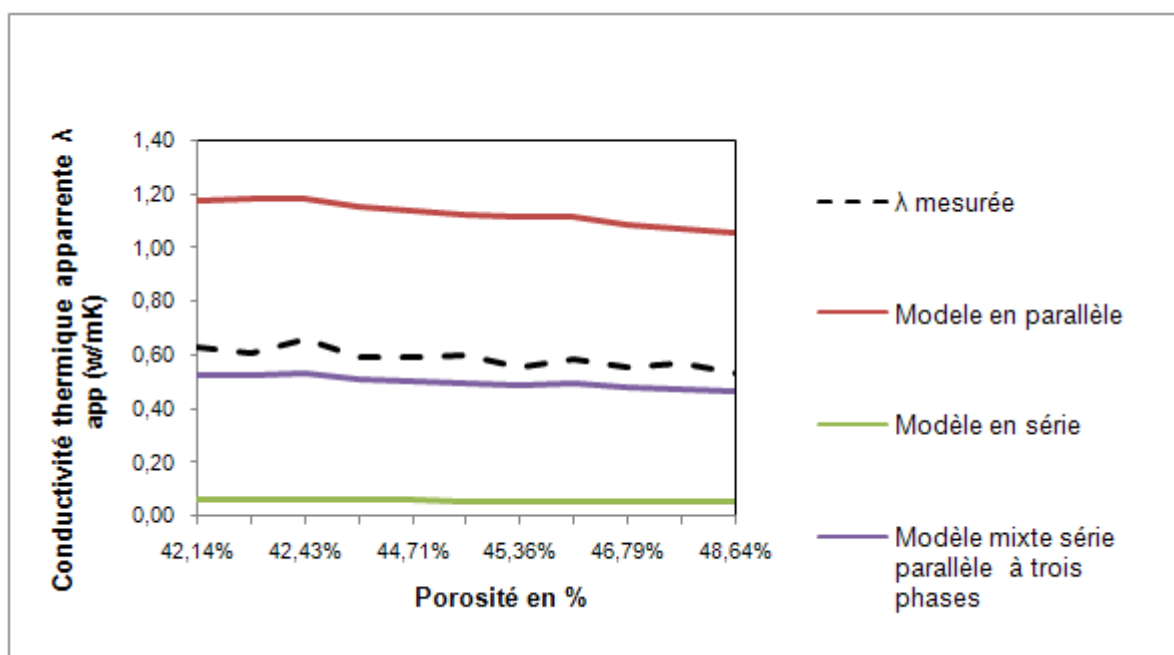


Figure V.28 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte à trois phases en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda_s=1,5$ W/m.K)

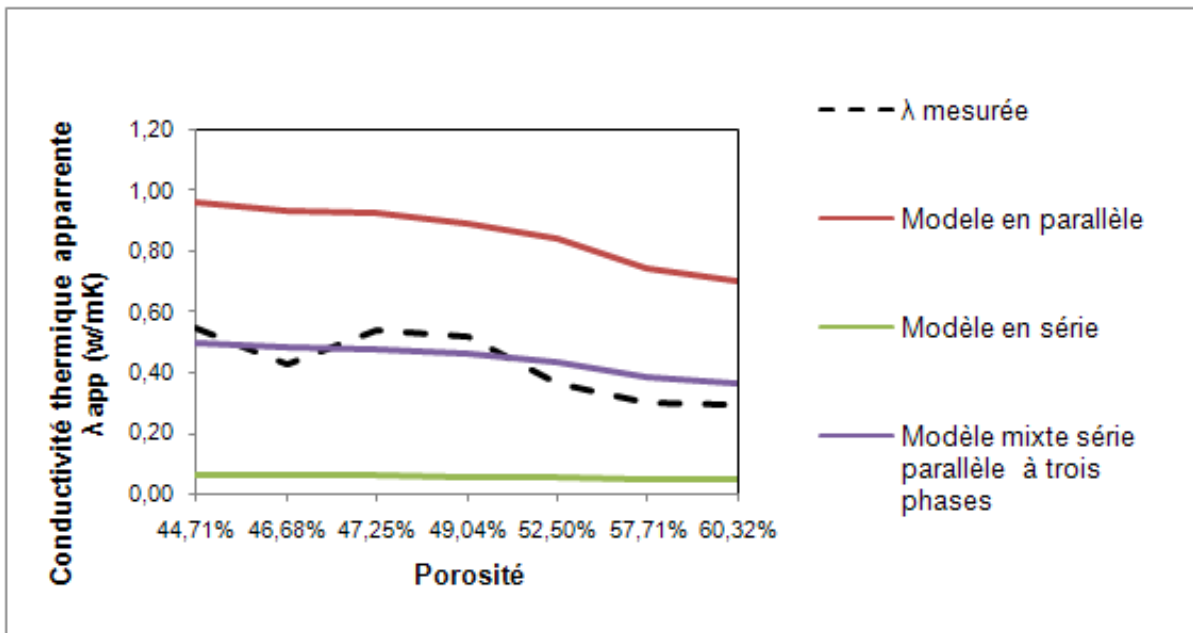


Figure V.29 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte à trois phases en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda_s=1,7$ W/m.K)

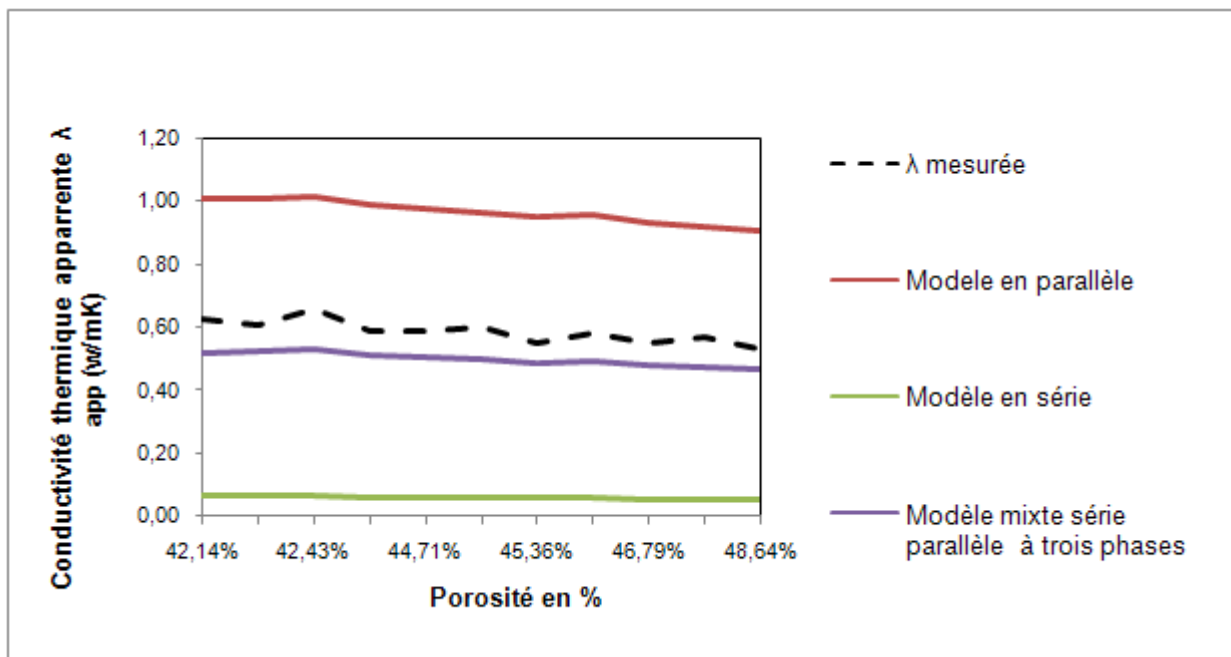


Figure V.30 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte à trois phases en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda_s=1,7$ W/m.K)

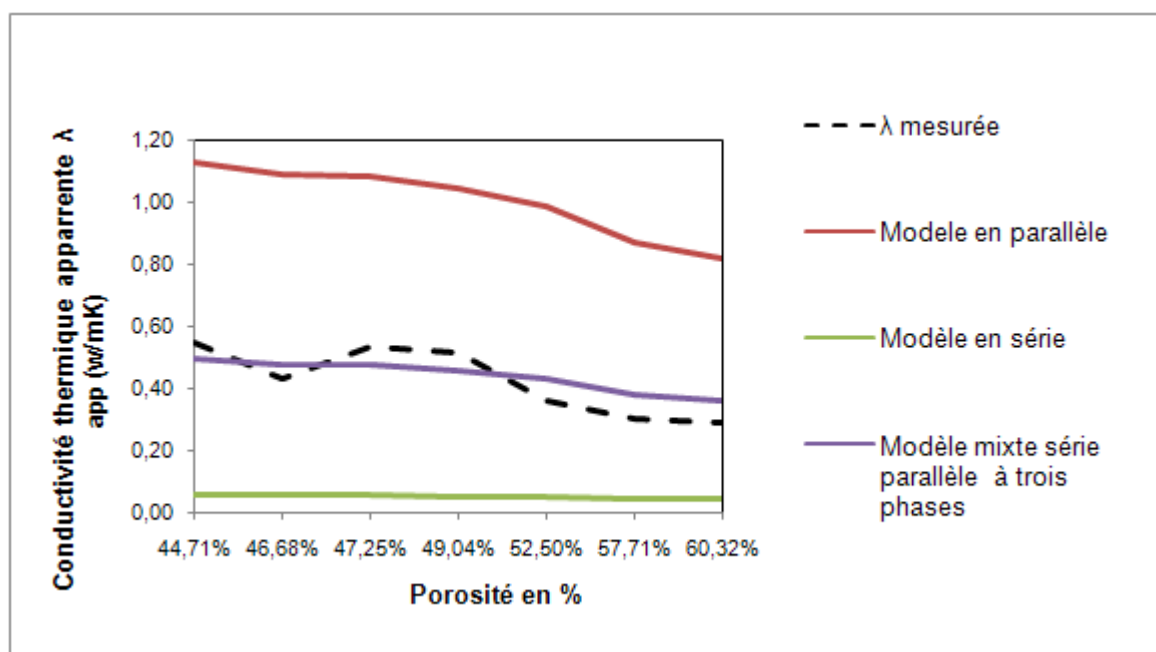


Figure V.31 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons caverneux ($\lambda_s=2$ W/m.K)

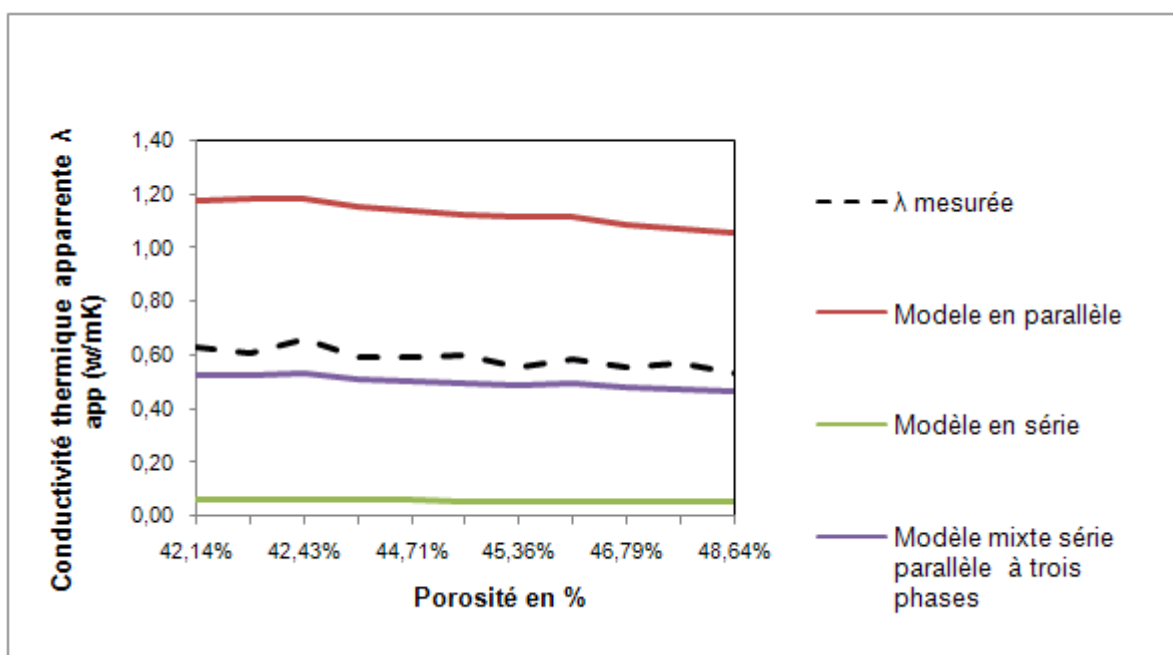


Figure V.32 : L'évolution de la conductivité thermique apparente humide mesurée et calculée par les modèles série,-parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons pleins ($\lambda_s=2$ W/m.K)

V. 3. L'évolution de la porosité en fonction de la masse volumique

On note que dans Les coubes de la figure V.33, la porosité à tendance à diminuée quand la masse volumique augmente, cela est vrais pour les deux approches. On constate également par les résultats obtenus à l'aide de la formule (V.9) diffèrent globalement par rapport à la première approche. On peut avancer les explications suivantes :

- Les compositions du bétons varient d'une masse volumique à l'autre et qu'il aurait lieu de déterminer les caractéristiques de toute les matrices solides.
- Les mesures effectuées dans la première approche des differntes masse volumiques constituant le béton tel que la matrice liante et les granulats peuvent prendre un côté aléatoire.

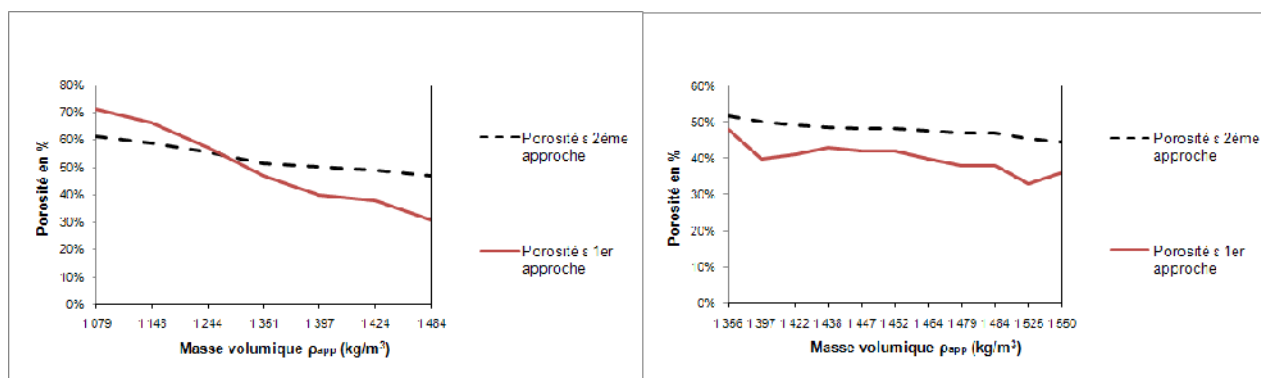


Figure V.33 : Comparaison entre porosité calculées par la formule (V.8) de la première approche et la formule (V.9) de la deuxième approche pour les deux types de bétons

V. 4. Conductivité thermique apparente des mixtures de bétons à base de Granulat de pouzzolane à l'état sec du gisement Bou Hamidi de Béni-Saf (nord ouest algérien)

V. 4.1. Conductivité thermiques apparentes des bétons selon les modèles : Série, parallèle et Hashin-Shtrikman

La recherche des matériaux et des techniques de mise en œuvre susceptibles de réduire les déperditions thermiques à travers l'enveloppe des bâtiments est l'une des préoccupations du CNERIB. La pouzzolane de Beni-Saf, grâce à sa structure alvéolaire, possède une légèreté relativement appréciable par rapport aux autres roches naturelles. La légèreté, conséquence de la porosité des grains qui peut atteindre les 60% (Figure V.34), est la principale propriété recherchée dans la fabrication des matériaux légers et isolants (bétons, agglomérés, panneaux, etc.). [11]

Pour estimer la caractéristique thermique du béton à base de granulats légers de la pouzzolane de Beni-Saf, en comparaison avec un béton de granulats courants, des mesures de conductivités thermiques ont été effectuées sur des éprouvettes cubiques normalisées de 15 cm x 15 cm x 15 cm.

Des éprouvettes de 160 mm de longueur, de 85 mm de largeur et de 40 mm d'épaisseur ont été confectionnées, pour les bétons destinés à la fabrication des blocs (parpaing et hourdis), des éprouvettes de 160 mm de longueur, de 85 mm de largeur et de 40 mm d'épaisseur ont été confectionnées.



Figure V.34 : Structure scoriacée et alvéolaire de la pouzzolane de Beni-Saf[11]

La mesure de λ_{app} a été réalisée en régime transitoire grâce à l'utilisation de sondes à choc thermique méthode de Hot-Disk. :

Les valeurs des conductivités thermiques obtenues sur les bétons sont résumées dans les **tableaux V.5 et V.6**

Désignation	Masse volumique sèche (kg/m³)	Conductivité
		Thermique λ (W/m.K)
Béton léger (BP)	1813	0.7015
Béton courant	2296	2.312

Tableau V.5 : Résultats des essais de conductivité thermique [11]

Caractéristiques	Compositions		
	C3	C4	C5
Masse volumique (kg/m ³)	1536	1575	1614
Conductivité Thermique λ_{app} (W/m.K)	0.6011	0.6321	0.6435

Tableau V.6 : Résultats des essais de conductivité thermique des bétons destinés à fabriquer des blocs (parpaing et hourdis) [11]

Les valeurs des conductivités thermiques apparentes calculées par les modèles des différents bétons sont résumées dans le **tableau V.7**

Masse volumique du béton	1813	1614	1575	1536
Porosité ϵ	0,341	0,413	0,427	0,441
λ mesurée (W/m.K)	0,702	0,601	0,632	0,644
Modèle en parallèle	0,80	0,72	0,70	0,68
Modèle en série	0,07	0,06	0,06	0,06
Modèle de Hashin et Shtrikman min	0,69	0,60	0,58	0,57
Modèle de Hashin et Shtrikman max	0,71	0,62	0,60	0,59

Tableau V.7 : Résultats des conductivités thermiques apparentes calculées par les modèles pour la valeur de $\lambda_s = 1,2$ W/mK

On note que les résultats obtenus par les trois modèles, sont sensiblement proches des valeurs mesurées. Mais, les valeurs du modèle série et du modèle parallèle, présentent toujours un écart important entre les deux bornes.

V. 5. Sensibilité des modèles aux des différents paramètres

Cette partie est destinée à déterminer le domaine de définition de certains paramètres pour lesquels le modèle a une plus grande sensibilité au paramètre à estimer, et qui est la conductivité thermique. Dans la deuxième approche, nous avons utilisé des modèles dont la conductivité thermique est fonction des conductivités thermiques de la phase solide, la phase fluide (l'eau et l'air) et la porosité.

V. 5.1. Sensibilité à la porosité

La porosité de l'assemblage a une influence importante sur le calcul de la conductivité thermique apparente. Nous pouvons observer que pour de fortes valeurs de porosité, il existe une sensibilité de la conductivité thermique apparente à la porosité. Une petite variation de la porosité

affecte directement la conductivité thermique. Cela est vérifié surtout pour le béton caverneux. et si le milieu est isolant, car le transfert se fait à travers les pores.

V. 5.2. Sensibilité à la conductivité thermique de la phase solide

Nous pouvons observer, qu'il existe une forte sensibilité des modèles à la conductivité thermique solide du milieu, Une variation de la conductivité thermique de la phase solide du milieu entraîne une augmentation de la conductivité thermique apparente du milieu. Cela est vérifié pour le modèle parallèle et le modèle de Hashin-Shtrikman. A l'échelle microscopique, pour de fortes valeurs de la conductivité thermique de la phase solide, le transfert thermique dans le milieu s'effectue essentiellement dans la phase solide.

V. 6. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons pu voir deux approches, la première, introduit la notion d'un modèle de conception de béton de pouzzolane en deux phases représentées par la matrice liante et le granulat. Le concept de La deuxième approche, considère que le béton est constitué d'une matrice solide combinée avec une ou deux phases fluide

Dans la première approche, l'écart entre les bornes des modèles parallèle et série n'est pas très important. Par contre dans la deuxième approche, l'intervalle entre les bornes est trop important pour constituer une modélisation prédictive de la conduction thermique.

Nous nous sommes intéressés au modèle mixte qui couplé les modèles séries et parallèles. Ce modèle repose sur l'hypothèse que la microstructure du matériau ne varie pas lorsque sa masse volumique change (pas de réarrangement du squelette sous l'effet du compactage) et que la répartition de l'air dans le matériau reste uniforme. En plus, le calage expérimental représenté par la part de la disposition de chaque modèle (série et parallèle) dans le modèle mixte, fait en sorte que ce modèle dépend fortement de la qualité des mesures expérimentales.

Le modèle de Hashin-Shtrikman à montré une grande sensibilité par rapport à la conductivité thermique de la phase du solide de sorte que pour des valeurs dépassant 1 W/mK, les bornes maximum et minimum s'égalisent et parfois le minimum dépasse le maximum. Le choix de ce modèle pour une éventuelle prédiction de la conductivité thermique dans un matériau poreux tel que le béton de pouzzolane, exige la connaissance de la valeur de la conductivité thermique de la matrice du solide.

Globalement, Les prédictions de la conductivité thermique apparente obtenues par des calculs analytiques sont fortement influencées par les hypothèses faites par les modèles sur la structure poreuse.

Par ailleurs, ces modèles font apparaître l'augmentation de la conductivité thermique lorsque la porosité diminue.

Nous avons également montré l'influence non négligeable de la valeur de la conductivité thermique de l'air lorsque le taux de porosité devient important (>50%).

CONCLUSIONS GENERALES

Conclusions générales

Avec le développement des nouvelles technologies de conception et de réalisation, l'heure est à la construction d'habitation à structures légères. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, les matériaux à base de granulats légers de la pouzzolane naturelle, connaissent un véritable regain d'intérêt à travers le monde [75]. Beaucoup d'économies peuvent en résulter. En effet, le poids des structures en béton normal est très élevé comparé à la charge normale qu'elles peuvent supporter. Une réduction relativement modeste en poids peut assurer une économie considérable en argent et en main d'œuvre

Par ailleurs, l'industrie cimentaire étant en pleine expansion, une prolifération croissante de ce matériau sous forme d'ajouts cimentaires présente un intérêt économique et écologique très important.

La considération quantitative des matériaux à base de pouzzolane comme un milieu poreux fait apparaître une structure composée d'un squelette solide et d'un réseau des vides. Ce dernier est décrit de manière globale par un volume total relatif et par une porosité du milieu ε . Celle-ci est le lieu où se produisent de nombreuses interactions physicochimiques (absorption/désorption de vapeur, effets capillaires...) et les phénomènes de transfert hydriques ou thermiques. La modélisation de ces phénomènes suppose le choix d'une échelle pertinente de description géométrique du milieu.

Les prédictions par des modèles analytiques qui découlent des méthodes tel que, la prise de moyenne, d'homogénéisation et analogie électrique, représentent un enjeu important pour la compréhension et la maîtrise des matériaux poreux. Les différents modèles alors établis font apparaître les propriétés intrinsèques des constituants et la structure géométrique du milieu étudié. Il existe de nombreux modèles qui permettent de prédire la conductivité thermique apparente en fonction du taux de porosité et des conductivités des phases.

Pour estimer la caractéristique thermique du béton à base de granulats légers de la pouzzolane, des mesures expérimentales ont été effectuées sur ce matériau par les méthodes de mesures des propriétés thermophysiques.

La mesure de λ_{app} a été réalisée en régime stationnaire à l'aide de la méthode des boîtes pour les deux types de bétons à base de granulats de pouzzolane du gisement de Saint Pierre [34].

Pour le béton à base de granulats de pouzzolane du gisement de Bou Hamidi, les mesures ont été effectuées grâce à une sonde à choc thermique en régime transitoire (méthode Hot-Dik) [11]

Au cours de ce mémoire, nous nous sommes intéressés en premier lieu, au comportement mécanique des matériaux à base pouzzolanique, et en deuxième lieu à la conductivité thermique apparente des bétons à bases de granulats de pouzzolane.

Pour pouvoir utiliser les matériaux dans la construction des bâtiments, il est nécessaire de s'assurer qu'ils possèdent des propriétés mécaniques suffisantes. Les matériaux incorporant de la pouzzolane naturelle sous forme d'ajouts cimentaire à un taux de 20% présente de bonnes résistances mécaniques [47, [36]

Les performances des contraintes à la compression pour les bétons à base de granulats de pouzzolane du gisement de Bou Hamidi et ceux, du gisement de Saint Pierre, nous

conduisent à leur utilisation comme béton de structure et comme habillage dans le bâtiment pour une éventuelle isolation thermique.

La pouzzolane naturelle fournit une possibilité économique de production dans l'industrie du béton et améliore les propriétés mécaniques et sa longévité. Les effets de la pouzzolane sur les propriétés du béton varient avec le type et le pourcentage ajouté. On cherche à déterminer la quantité maximum avec l'efficacité optimale pour une meilleure durabilité. L'efficacité obtenues à partir des différentes combinaisons des mélanges sont semblables et ces valeurs diminuent avec l'augmentation du rapport pouzzolane/ciment.

Il est possible d'approcher les performances mécaniques d'un béton de référence, c'est-à-dire d'un béton sans pouzzolane, mais toutefois des essais complémentaires sont nécessaires pour assurer une large utilisation de ce matériau, ainsi que le contrôle de sa durabilité.

L'étude de la conductivité thermique apparente s'est basée sur deux approches qui s'appuient sur les démarches suivantes :

Une approche avec l'hypothèse d'un matériau composé de deux interfaces solides liant – granulat en introduisant la notion de la conductivité thermique de la matrice liante et la conductivité thermique du grain [34].

Le concept de la deuxième approche, considère que le matériau est constitué d'une matrice solide combinée avec une ou deux phases fluide (l'eau et l'air). Dans ce cas, la conductivité thermique apparente sera en fonction des conductivités thermiques de la phase solide, la phase fluide (l'air) et la phase fluide (l'eau).

L'étude de l'influence de la porosité et de la conductivité des deux phases, sur la conductivité thermique a été conduite selon des comparaisons entre les résultats expérimentaux et des prédictions, par des calculs analytiques à l'aide des modèles théoriques. Les modèles de Hashin - Shtrikman et mixte série-parallèle ont servi de références pour comparer les résultats expérimentaux et lier la microstructure aux valeurs de la conductivité thermique.

Dans la deuxième approche, l'écart entre les bornes des modèles série et parallèle est trop important pour constituer une modélisation prédictive de la conduction thermique.

Le modèle de Hashin et Shtrikman, basé sur des inclusions sphériques dans une matrice, permet de déterminer les bornes les plus restrictives entre lesquelles les résultats expérimentaux sont nécessairement compris. Il a montré une grande sensibilité par rapport à la conductivité thermique de la phase du solide de sorte que pour des valeurs dépassant 1 W/mK, les bornes maximum et minimum s'égalisent et parfois le minimum dépasse le maximum. Le choix de ce modèle pour une éventuelle prédiction de la conductivité thermique dans un matériau poreux tel que le béton de pouzzolane, exige la connaissance de la valeur de la conductivité thermique de la matrice du solide.

Le modèle mixte qui couple les modèles séries et parallèles. Ce modèle repose sur l'hypothèse que la microstructure du matériau ne varie pas lorsque sa masse volumique change (pas de réarrangement du squelette sous l'effet du compactage) et que la répartition de l'air dans le matériau reste uniforme. En plus, le calage expérimental représenté par la part de la disposition de chaque modèle (série et parallèle) dans le modèle mixte, fait en sorte que ce modèle dépend fortement de la qualité des mesures expérimentales.

Le modèle mixte étendu aux trois phases de bétons de pouzzolane, montre et confirme que la teneur en eau est un paramètre essentiel pour l'évaluation des paramètres thermiques. Les écarts observés, notamment pour la conductivité thermique d'un matériau sec et celle d'un matériau humide, impliquent que l'humidité ne peut être dissociée des autres paramètres pour une éventuelle prédiction de la conductivité thermique.

On observant l'évolution des valeurs des modèles mixtes de la deuxième approche, sur les **figures V.5 à V.18**, La conductivité thermique apparente reste du même ordre de grandeur, quelque soit la valeur de la conductivité de la matrice solide.

Il convient de préciser que les modèles théoriques de conductivité thermique apparente ne constituent que des approximations. Toutefois, de cette étude de modélisation, nous dégageons les points suivants :

Globalement, Les prédictions de la conductivité thermique apparente obtenues par des calculs analytiques sont fortement influencées par les hypothèses faites par les modèles sur la structure poreuse. Par ailleurs, ces modèles font apparaître l'augmentation de la conductivité thermique lorsque la porosité diminue.

Nous avons également montré l'influence non négligeable de la valeur de la conductivité thermique de l'air lorsque le taux de porosité devient important (>50%).

Pour les deux approches l'objectif été de prédire la valeur de la conductivité thermique d'un matériau poreux cette prédiction nécessite plusieurs étapes :

Une étape de caractérisation, comprenant la mesure du taux de porosité et de l'observation de l'organisation de la porosité.

Une deuxième étape consiste à déterminer les conductivités thermiques des deux phases (solide et gaz) intégrant la taille des grains et des pores.

Enfin, l'étape la plus délicate concerne le choix d'un modèle, analytique, dont les hypothèses sur la géométrie et l'arrangement des phases se rapprochent de la microstructure réelle. Les résultats obtenus au cours de cette étude donnent des éléments qui permettent de guider ce choix.

Finalement, l'intégration des matériaux à base de pouzzolane et en particulier le béton de pouzzolane parmi les matériaux locaux de construction est d'un intérêt économique et écologique certain. En effet, le secteur des matériaux de construction cherche à optimiser ses dépenses en énergétiques, ainsi il se dirige de plus en plus vers l'utilisation d'ajout minéraux dont le cout de production est inférieur à celui du ciment. Et qui pourrai partiellement le remplacé. D'un autre côté, le ciment libère du dioxyde de carbone (CO₂), pendant sa fabrication, contribuant ainsi à l'augmentation de l'effet de serre alors que la pouzzolane est utilisée directement et ne nécessite aucune transformation énergétique.

Le béton de pouzzolane peut être utilisé comme cloison de séparation dans l'habitat. L'emploi de bloc léger pour la construction des maisons présente ainsi de nombreux avantages notamment:

- la grande légèreté des éléments, ce qui constitue une qualité très appréciable pour la main d'œuvre et permet des économies sur les transports et les engins de manutention.
- une meilleure isolation thermique, ce qui conduit à des économies très importantes sur la consommation d'énergie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1]. **Adler P.M.**, "Porous Media : Geometry and Transports", Butterworth-Heinemann Boston London Oxford, 544pg, 1992-ISBN0-7506-9236-7
- [2]. **Aissa Asroun**, Mohamed Bachir Bouiadjra, Habib Trouzine, « Influence des ajouts cimentaires sur le comportement des bétons » XXIII^{ème} rencontres universitaires de Génie Civil 2005, risque et environnement, Laboratoire de Matériaux et Hydrologie Département de Génie Civil. Université Djillali LIABES, Sidi Bel-Abbès , Algérie
- [3]. **Aitcin P.C.** « Bétons à hautes performances » Editions Eyrolles
- [4]. **A.Komar**, « Matériaux et éléments de construction » 3^{ème} édition MIR 1976
- [5]. **B.Ladevie**, Mise au point de dispositifs de caractérisation thermophysique de matériaux isolants solides ou pâteux, extension aux fluides cisailles, thèse de doctorat de l'ENSAM Bordeaux, 1998.
- [6]. **B.Stalhane** et S.Pyk, Teknisk Tidsskrift, vol 61, 1931, pp 389-393
- [7]. **Bachir Bouiadjra M.** « Influence des ajouts cimentaires sur le comportement des bétons à hautes performances » Mémoire de magister, Université de sidi Bel-Abbès, Algérie. 2003
- [8]. **Barret P, Menetrier D**, Cottin B, study of silicate lime solution reaction. Cement and concrete research, n° 07, p 61-67
- [9]. **Benachour A.** « Etude des caractéristiques physico- mécaniques des bétons à granulats pouzzolaniques » Mémoire de magister, Université d'Oran, Algérie 2002
- [10]. **Bidjocka, C** Conception de bétons légers isolants porteurs. Applications aux pouzzolanes naturelles du Cameroun. Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon ; 1990.
- [11]. **CNERIB** Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment. Cité Nouvelle EL-Mokrani Souidania, Wilaya d'Alger.
- [12]. **CANMET**, 1987, centre canadien de la technologie, des matériaux et de l'énergie « Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton »
- [13]. **Cristelle Bich**, contribution à l'activité thermique du kaolin : évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique, Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de lyon, 2005
- diffusivity measurements of solid materials, Rev. Sci. Instrum., Vol 62, N°3, pp 797-804, 1991
- [14]. **Dron, R.**, et Brivot, F. 1977. Bases minéralogiques de sélection des pouzzolanes. Bulletin du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, n° 92: novembre-décembre. p. 105-112
- [15]. **Delmas, L.** and T. Baillot, *Influence de la mise en oeuvre sur la porosité des bétons*, Projet de Recherches Technologiques, Institut National des Sciences Appliquées, Projet de Recherches Technologiques, 2006 62 pages
- [16]. **D.A. DE. Vries, A.J.Peck**, on cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils, Aust.j.phys, n°11, pp 225,271, 1958.
- [17]. **E. Scheidegger**, The Physics of flow through porous media. 3rd Edition, University of Toronto Press, (1974).
- [18]. **F.Deponte, P.Phillipo**, desing criteria for the hot plate appartus, Heat transmission measurement in thermal insulations, ASTM STP 544, American society for testing and materials, 1997, pp 97-117.
- [19]. **F.Tehrani, M.Abdou, M.S.Tillack**, effects of external pressure on particle bed effective thermal conductivity, J.Nuclear Materials, pp 212-215, (1985).

- [20]. **Flynn, D.R.** Response of high performance concrete to fire conditions: Review of thermal property data and measurement techniques. Final report, NIST GCR 99- 767, 1999, 108 p. + annexes.
- [21]. **Guemmadi Z., Toumi B.** (2003) « L'effet des déchets de carrière sur le comportement des bétons hydrauliques » 2ème séminaire national de génie civil, Sidi bel-abbès, Algérie
- [22]. **H.Ezbakhe**, Caractérisation thermiques et mécaniques des matériaux poreux utilisés comme isolants simples ou porteurs, Thèse de doctorat, UCPB Lyon 1, 1986.
- [23]. **Gustafson .S.E**, Transient plane source technique for thermal conductivity and thermal diffusivity measurement of solid materials, Rev-Sci instrum 62 (3) 1991
- [24]. **Hashin, Z. & Shtrikman, S.**, A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. J. Appl. Phys. 1962, 33,
- [25]. **Hornung, U.** (1997). Homogenization and porous media. Springer, New-York.
- [26]. **ISO**, essai de pouzzolanité pour le contrôle des ciments pouzzolaniques, recommandation ISO R 863 Genève 1968
- [27]. **J.P. Laurent**, la conductivité thermique à sec des bétons cellulaires autoclavés : un modèle conceptuel, materials and structures, pp 221-226 24 1991
- [28]. **J.P.Cull**, thermal conductivity probes for rapid measurement in rock. J.Phys.E: Sci.Instrum, vol 7, pp 771-774, 1974
- [29]. **J.Tama J**, Mise au point d'un appareillage de mesure de la conductivité thermique des matériaux de construction, mémoire d'Ingénieur, ENSPY (1990)
- [30]. **Kacimi L** le 18, 19 et 20 février 2001. La qualité du ciment par l'optimisation des laboratoires des cimenteries. Séminaire concernant la fonction laboratoires, son amélioration, son organisation et son optimisation. Université des Sciences et de la technologie, Oran.
- [31]. **Khelifa R.**, Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, thèse de magistère. Université de Constantine.2001
- [32]. **Kittel**, 1972Introduction à la physique de l'état solide. Paris : Dunod, 350p.
- [33]. **Lea, F.M.** Lea's chemistry of cement and concrete. Edité par P.C. Hewlett. Londres : Wiley, John and Sons, 1998, 1092 p.
- [34]. **Leveau J.; Ranaivo Rabehaja. B. ; Menguy G. ; Ezbakhe H. ;** Caractérisation thermique de bétons de pouzzolane utilisés dans le bâtiment, journées internationales de thermique. 1987 , pp. 534-542
- [35]. **M FILALI**, Conductivité thermique apparente des milieux granulaires soumis à des contraintes mécaniques : modélisation et mesures, thèse de doctorat, institut national polytechnique de toulouse, 2006
- [36]. **M Mouli, H.Khelafi**, "Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan " Building and Environment , vol 43, 2008, pp 31–36
- [37]. **M. Kaviany**, Principles of heat transfer in porous media.Springer, (1995).
- [38]. **M.Gustafson, E.Karawacki, S.E.Gustafsson**, Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of thin samples from transient measurements with hot disk sensor, Rev.Sci.Instrum, vol 65, pp 3856-3859, 1994.
- [39]. **M.J.Laubitz**, Axial heat flow method of measuring thermal conductivity, compendium of thermophysical property measurement methods, vol 1, pp 11-60, Edited by K.D.Magelic,
- [40]. **A.Cezailigan and V.E.Peletsky**, plenum press, New York, 1984
- [41]. **M.R.J.Willey, A.R.Soutwick, J.Petrol.technol**, vol 6, pp 44-, 1954
- [42]. **Massaza F**, chimie des additions pouzzolaniques et ciments mélangés, II cemento, 1976, 73, vol 1, p 3-38

- [43]. **MEATF**, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, les pouzzolanes et les basalts, bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978 p 61-69
- [44]. **Meukam P.** « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.
- [45]. **Monicard, R.**, *Caractéristiques des roches et réservoirs. Analyse des carottes, Cours de production de l'IFP*. 1975: Ed Technip 2eme édition. 94.
- [46]. **Moyne, Ch.** Transferts couplés chaleur-masse lors du séchage : Prise en compte du mouvement de la phase gazeuse. Thèse de Doctorat, INPL :Nancy, 1987, 291p.
- [47]. **N Belas Belarbi, M Semcha, L Laoufi** « Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons » Canadian Journal of Civil Engineering 30 no3 580-584 Je 2003 canada.
- [48]. **Nabil Bouzoubaâ et Simon Foo**, utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton : guide des règles de l'art, laboratoire de la technologie des matériaux,cCanada, 2005
- [49]. **Neville, A.M.** Propriétés du béton. Paris: Editions Eyrolles (traduction du CRIB),2000, 806 p
- [50]. **Normes Algériennes** (2000) « Liants hydrauliques, ciments courants, composition, spécification et critères de conformité ».
- [51]. **P. Meukam, A. Noumowe, Y. Jannot et R. Duval** « Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment » *materials and Structures*, vol. 36, August-September 2003, pp 453-460
- [52]. **P.C. Carman.** «Flow of gases through porous media» Academic press, NewYork, 1956.
- [53]. **P.Vermotte, C.R.Acd**, Paris, vol 204, p 563, 1937
- [54]. **Perrin**, Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en Génie civil. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse. 1985
- [55]. **Quénard, H. Sallée.** « Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment», Cahiers de CSTB, n° 2525, 1991
- [56]. **Rapport d'essais**, mesures de propriétés thermophysiques de liquides, THERMOCONCEPT, TREFLE - ENSAM - 33405 Talence Cedex,12/01/2007
- [57]. **S. A. Bories**, Fragment de description de la physique des transferts thermiques dans le sous – sol. La Houille Blanche, Vol. 3 pp. 312-219 (1985).
- [58]. **S.E. Gustafsson**, Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal
- [59]. **Sanchez-Palancia, E.** (1980). Non-homogeneous media and vibration theory.Springer,Berlin
- [60]. **Schwarz, W., Sujata, K., Jennings, H.M., Gerdes, A., Wittmann, F.H.** Chemically modified hydration of Portland cement and its implication for the kinetics of the hydration of ordinary Portland cement. Why does cement set? Second RILEM Workshop on Hydration and Setting, Dijon (France), 1997, p. 235-253.
- [61]. **Thomas Nganya**, Intérêt d'utilisation d'isolants locaux dans l'habitation au Cameroun, thèse doctorat, ENSP de Yaoundé, 2000
- [62]. **Vernet, C.et Cadoret, G. (1991)**, Compte- rendus du Colloque «Voies Nouvelles du Béton», *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours*, Cachan, France,pp.p. 17.
- [63]. **V. Furian et Y.Houst**, les matériaux pouzzolaniques et leurs utilisation, laboratoire des matériaux pierreux de l'EPF, Lausanne, chronique du LMP 1980.
- [64]. **Whitaker, S.** (1967). Diffusion and dispersion in porous media. *AIChEJ*, 13 :14–28.

- [65]. **X.Zhang**, Métrologie par méthode quasi-instationnaire: modélisation, identification, et application à la caractérisation des solides, thèse de doctorat de l'INPL, 1993
- [66]. **Yves Jannot and Zoubir Acem**, a quadrupolar complete model of the hot disc, measurement science and technology, 18 , pp 1229–1234, 2007
- [67]. **Yves Jannot**, séminaire de formation à la Métrologie Thermique, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), Laboratoire d'Energie Appliquée (LEA), Dakar, 12-18 novembre 2008
- [68]. **M.Mouli, H.Khelafi**, properties of lightweight concrete made with crushed natural pozzolana as coarse aggregate, technicological and economic development of economy, vol 13, n° 4, pp 259-265, 2007
- [69]. **R.Younsi**, simulation numérique du transfert de chaleur et de masse en milieux fluides et poreux, Thèse de doctorat, université de sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger 2002.
- [70]. **D.Quénard, H.Sallée**, « le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du batiments, cahiers de CSTB, n°2525, 1991
- [71]. **D.Krischer, K.Kroll**, technique de séchage, centre technique des industries aérialitiques et thermiques, traduction du springer-verlag, Berlin 1963.
- [72]. **D.C.Maxwell**, A treatise on electricity and magnetism, 3rd edh, vol1, et 2, chap, 9, vol 1, article 314, Dover, New York, 1954
- [73]. **Hashin.Z**, the assessment of the self consistent sheme approximation conductivity of particulate composites, J composite materials, 1968, vol 2, pp284-300.
- [74]. **Boutin .C**, conductivité thermique du béton cellulaire autoclave, modélisation par la method autocohérente, matériaux et construction, 1996, vol 29, pp 609-615.
- [75]. **S.Gaye, et al**, « Caractérisation des propriétés thermiques et mécanique du béton de polymere recyclé », journal des sciences, vol 1, N°1, pp 53-66, 2001

ANNEXES

Annexe -1-

Equations particulières de Bessel et leurs solutions

$$\begin{aligned}
 y'' + \frac{y'}{x} + m^2 y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 J_0(mx) + k_2 Y_0(mx) \\
 x^2 y'' + x y' + (x^2 - n^2) y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 J_n(x) + k_2 Y_n(x) \quad (n \text{ entier}) \\
 y'' + \frac{y'}{x} - m^2 y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 I_0(mx) + k_2 K_0(mx) \\
 x^2 y'' + x y' - (x^2 + n^2) y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 I_n(x) + k_2 K_n(x)
 \end{aligned}$$

J_n Fonction de Bessel de 1^{ère} espèce non modifiée d'ordre n
 I_n Fonction de Bessel de 1^{ère} espèce modifiée d'ordre n
 Y_n Fonction de Bessel de 2^{ème} espèce non modifiée d'ordre n
 K_n Fonction de Bessel de 2^{ème} espèce modifiée d'ordre n.

Principales propriétés des fonctions de Bessel

Récurrance

$$\begin{aligned}
 J_{n+1}(u) &= -J_{n-1}(u) + \frac{2n}{u} J_n(u) & Y_{n+1}(u) &= -Y_{n-1}(u) + \frac{2n}{u} Y_n(u) \\
 I_{n+1}(u) &= I_{n-1}(u) - \frac{2n}{u} I_n(u) & K_{n+1}(u) &= K_{n-1}(u) - \frac{2n}{u} K_n(u)
 \end{aligned}$$

Dérivée

$$\frac{dJ_0(u)}{du} = -J_1(u) \quad ; \quad \frac{d[u J_1(u)]}{du} = u J_0(u) \quad ; \quad \frac{dI_0(u)}{du} = I_1(u) \quad ; \quad \frac{dK_0(u)}{du} = -K_1(u) \quad ; \quad \frac{dY_0(u)}{du} = -Y_1(u)$$

Limites des fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1

Si $u \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow 1 & J_1(u) &\rightarrow 0 & Y_0(u) &\rightarrow -\infty & Y_1(u) &\rightarrow -\infty \\
 I_0(u) &\rightarrow 1 & I_1(u) &\rightarrow 0 & K_0(u) &\rightarrow +\infty & K_1(u) &\rightarrow +\infty
 \end{aligned}$$

Si $u \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow 0 & J_1(u) &\rightarrow 0 & Y_0(u) &\rightarrow 0 & Y_1(u) &\rightarrow 0 \\
 I_0(u) &\rightarrow +\infty & I_1(u) &\rightarrow +\infty & K_0(u) &\rightarrow 0 & K_1(u) &\rightarrow 0
 \end{aligned}$$

Comportement asymptotique des fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1

Si $u \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow 1 & J_1(u) &\rightarrow u/2 & Y_0(u) &\rightarrow (2/\pi) \ln(u) & Y_1(u) &\rightarrow 2/\pi u \\
 I_0(u) &\rightarrow 1 & I_1(u) &\rightarrow u/2 & K_0(u) &\rightarrow -\ln(u) & K_1(u) &\rightarrow 1/u
 \end{aligned}$$

Si $u \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow \sqrt{2/\pi u} \cos\left(u - \frac{\pi}{4}\right) & J_1(u) &\rightarrow \sqrt{2/\pi u} \cos\left(u - \frac{u}{2} - \frac{\pi}{4}\right) & Y_0(u) &\rightarrow \sqrt{2/\pi u} \sin\left(u - \frac{u}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \\
 Y_1(u) &\rightarrow \sqrt{2/\pi u} \sin\left(u - \frac{\pi}{4}\right) & I_0(u), I_1(u) &\rightarrow \sqrt{2/\pi u} \exp(u) & K_0(u), K_1(u) &\rightarrow \sqrt{\pi/2u} \exp(-u)
 \end{aligned}$$

Annexe -2-

Détermination de la conductivité thermique apparente des granulats

Pour déterminer la conductivité thermique apparente des granulats, un cadre est conçu sous une forme d'un parallélépipédique de 27 cm de côté et d'épaisseur 48 mm. Le fond est le haut du cadre sont constitués par des plaques minces de cuivre et les bords par du polystyrène d'épaisseur e' . (voir figure A.1 ci-dessous)

C : côté du carré

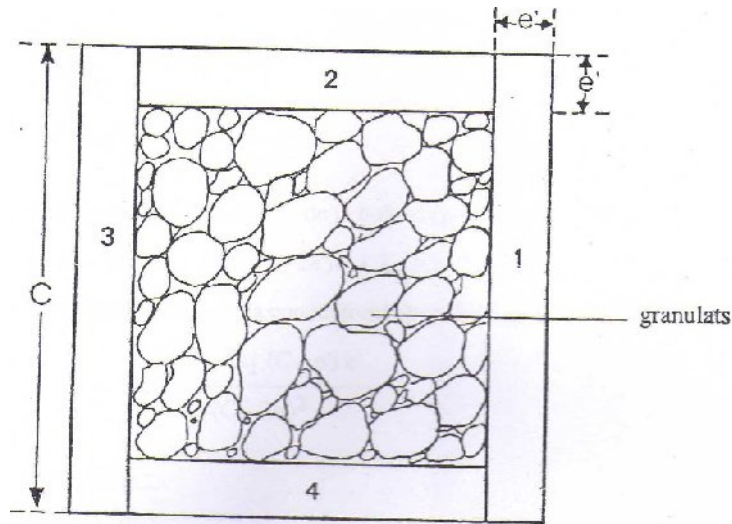


Figure A.1 : Vue de dessus du cadre pour la mesure de la conductivité thermique des granulats

Le granulat est mis en place à l'aide d'une série de vibration et compression manuelles de façon à éviter au maximum l'existence de l'air entre les grains.

La conductivité thermique du cuivre est très élevée devant celle du polystyrène et des grains, ce qui fait que l'on néglige la résistance des plaque de cuivre. La conductivité thermique mesurée λ^* , est alors considérée comme étant celle des quatre éléments du polystyrène montés parallèlement avec les granulats (voir figure A.2)

La résistance thermique équivalente de l'ensemble des granulats et élément de polystyrène, est telle que :

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_g}$$

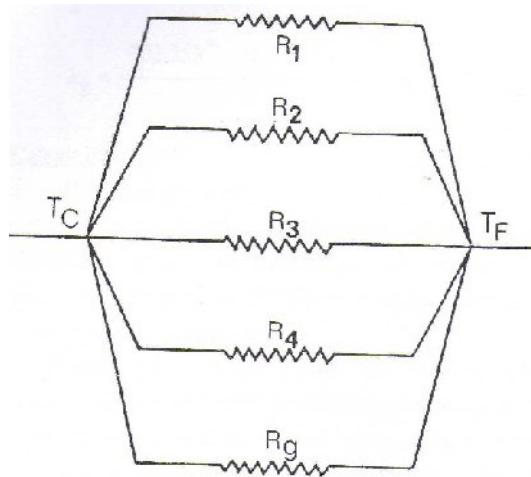


Figure A.1 : Schéma électrique équivalent des éléments de polystyrène et des granulats

R_i ($i=1,4$) : résistance thermique des éléments de polystyrène.

R_g : résistance thermique des granulats.

$$R_1 = R_2 \frac{e}{\lambda_1 c e'}$$

$$R_2 = R_4 \frac{e}{\lambda_1 (c - 2e') e'}$$

$$R_g = \frac{e}{\lambda_g (c - 2e')^2}$$

En désignant par S la surface utile de la boîte d'épaisseur e , on obtient :

$$\lambda^* . S = 2\lambda_1 c e' + 2\lambda_1 (c - 2e') + \lambda_g (c - 2e')$$

On déduit l'expression de la conductivité thermique apparente λ^* des granulats :

$$\lambda_g = \frac{\lambda^* S - 4\lambda_1 (c - e') e'}{(c - 2e')^2}$$

Numériquement :

$$\lambda_1 = 0.045 \text{ w/m.K}$$

$$c = 27.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$e' = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$S \left(\frac{27.5 + 25.5}{2} \right)^2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\lambda_g = \frac{702.25 \lambda^* S - 16.92}{380.25} \text{ en w.m.}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Annexe -3 –

Propriétés physiques de l'air et de l'eau

Propriétés de l'eau à saturation							Propriétés de l'air à 1 atm						
θ	ρ	c_p	λ	$10^4 \cdot \mu$	$10^7 \cdot \alpha$	Pr	θ	ρ	c_p	λ	$10^5 \cdot \mu$	$10^5 \cdot \alpha$	Pr
°C	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹	Pa.s ⁻¹	m ² .s ⁻¹		°C	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹	Pa.s ⁻¹	m ² .s ⁻¹	
0	1002	4218	0,552	17,90	1,31	13,06	0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1001	4182	0,597	10,10	1,43	7,02	20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	995	4178	0,628	6,55	1,51	4,34	40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	985	4184	0,651	4,71	1,55	3,02	60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	974	4196	0,668	3,55	1,64	2,22	80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	960	4216	0,680	2,82	1,68	1,74	100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	945	4250	0,685	2,33	1,71	1,45	120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	928	4283	0,684	1,99	1,72	1,24	140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	910	4342	0,680	1,73	1,73	1,10	160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	889	4417	0,675	1,54	1,72	1,00	180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	867	4505	0,665	1,39	1,71	0,94	200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	842	4610	0,652	1,26	1,68	0,89	220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	816	4756	0,635	1,17	1,64	0,88	240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	786	4949	0,611	1,08	1,58	0,87	260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	753	5208	0,580	1,02	1,48	0,91	280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	714	5728	0,540	0,96	1,32	1,02	300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68