

Approches théoriques de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l'aide d'une modélisation des matériaux poreux

Mohammed Zakaria Bessenouci¹, Nacereddine Bibi Triki¹,
Smaine Khelladi¹ et Abderrahmane Abene²

¹ Unité de Recherche des Matériaux et Energies Renouvelables, 'U.R.M.E.R'
Université Abou-Bakr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, Algérie

² Laboratoire d'Aérodynamique, d'Énergétique et d'Environnement, 'LAEE'
Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis,
Le Mont Houy, Valenciennes, France

(reçu le 22 Août 2010 – accepté le 27 Septembre 2011)

Résumé - *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 mécaniques suffisants. 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. 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 actifs, 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. 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, a été adoptée aux bétons de pouzzolane. Dans cette étude, sont exposés des résultats expérimentaux de mesures de la conductivité thermique apparente du béton de pouzzolane à l'aide d'une approche, qui considère que le béton est composé de deux phases solides, une matrice liante (la pâte du ciment hydratée), et l'ensemble des granulats. On applique une deuxième approche théorique, comparative, où le béton est constitué d'une phase solide et d'une phase fluide (l'air).*

Abstract - *The recent development of some materials reduced of construction such as the concretes light, able to play a part as an insulator, while preserving sufficient mechanical performance levels. The quality of the insulation to be envisaged depends on the climate, the exposure of the walls and also of materials employed for construction. The choice of a material used as insulator depends naturally on its availability and its cost. This work is a study of natural pozzolanas as basic components in construction materials. It is intended to highlight the thermal advantage of these materials. It is economically interesting hydraulically to use pozzolana in substitution of part of the clinker like additions active, and in the compositions of light concretes in the form of aggregate mix of pozzolana, which offers mechanical resistances in conformity with the standards in force. A theoretical approach is carried out apparent thermal conductivity of construction materials, in occurrence the concrete containing pozzolana. A thermal modeling, connects with that used usually for porous materials, it was adopted with the pozzolana concretes. In this study experimental results of measurements of the apparent thermal conductivity of the pozzolana concrete are exposed using an approach which considers the concrete is composed of two solid phases; a flexible matrix (paste of cement hydrated), and the whole of the aggregates. One applies a second theoretical approach, comparative, where the concrete consists of a solid phase and a liquid phase (air).*

Mots clés: Béton léger - Béton de pouzzolane – Matériaux poreux – Isolation thermique – Modélisation - Bâtiment.

1. INTRODUCTION

Trois principaux facteurs sont à l'origine de l'intérêt que l'on porte aux matériaux de constructions allégés:

- 1- L'épuisement des matériaux de construction traditionnels;
- 2- Le développement considérable du marché des logements;
- 3- La nécessité d'économiser l'énergie, tout en assurant le confort thermique dans l'habitat.

Une réduction en poids peut assurer une économie considérable en argent et en main d'œuvre capables de jouer un rôle en tant qu'isolant, tout en conservant des niveaux de performances suffisants. [1].

On 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.

D'autre part, dans une première approche, on considère que:

Le matériau est composé de deux phases solides; une matrice liante (la pâte du ciment hydratée), et de l'ensemble des granulats. [2].

Une deuxième approche: le matériau est constitué d'une phase solide (pâte du ciment + granulats) et d'une phase fluide (l'air).

Nous allons transposer quelques modèles de prédiction de la conductivité thermique apparente appliqués aux matériaux poreux aux bétons de pouzzolane. Les conclusions nous permettront de déterminer la sensibilité des modèles par rapport aux conductivités thermiques de la phase solide, la phase fluide, (air) et de la porosité.

2. LES MATERIAUX POUZZOLANINIQUES ET LEUR UTILISATION

2.1 Définition

La pouzzolane se définit comme étant un matériau, silico-alumineux, non liant 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 [3].

Elle se divise en deux grandes catégories, la pouzzolane naturelle (roches sédimentaires, roches volcaniques et roches métamorphiques) et la pouzzolane artificielle présentées sous la forme de sous-produits industriels (laitier de hauts fourneaux, cendres volantes, fumée de silice).

2.2 Différentes utilisations de la pouzzolane

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

2.2.1 Agriculture

Culture en plein champ

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, et qui 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.

2.2.2 Applications routières et travaux publics

Elle est utilisée dans le sablage des routes verglacées, ainsi que pour des matériaux de remblais légers pour des terrains de sport.

2.2.3 Industrie et bâtiment

La pouzzolane est broyée, sous forme de poudre, pour être utilisée comme ajout cimentaire pour la fabrication de ciment, et sous forme de granulats pour la confection de béton léger et les parpaings

3. ACTIVITE POUZZOLANIQUE ET SON EVALUATION

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:

1. Réagir avec la chaux en présence d'eau,
2. Former par cette réaction des produits aux propriétés liantes [4,5]

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, mettent 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.

4. CARACTERISTIQUES THERMO-PHYSIQUES DES MATERIAUX

La faculté qu'a la chaleur de se propager dans un corps ou d'y être stockée est due aux propriétés thermo physiques des matériaux utilisés.

La conductivité thermique

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

La diffusivité thermique

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times C_p} \quad (2)$$

L'effusivité thermique

$$E = \sqrt{\lambda \times \rho \times C_p} \quad (3)$$

La chaleur massique

$$Q = m \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (4)$$

5. LA MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

La technique de mesure utilisée par [2], pour déterminer la conductivité thermique est la méthode dite des ‘boîtes’ [6] (Fig. 1). Elle a été mise au point au Laboratoire d’Etude Thermiques et Solaires de l’Université Claude Bernard, Lyon 1.

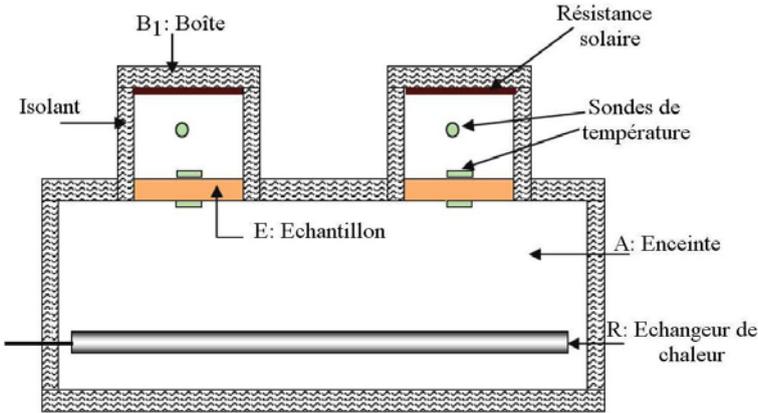


Fig.1: Coupe du dispositif des ‘boîtes’

La méthode des ‘boîtes’ est une méthode de mesure de la conductivité thermique en régime permanent. Elle consiste à garder l’enceinte A à une température plus basse que les boîtes à l’aide de l’échangeur de chaleur.

La résistance chauffante crée un gradient de température à travers l’échantillon.

Les capteurs de température sont des thermo sondes à résistances pour la mesure des températures de surface et d’ambiance.

L’effet joule produit par la résistance chauffante

$$\phi_j = V^2 / R \quad (5)$$

Les déperditions thermiques à travers la boîte

$$\phi_d = C_d \times (T_B - T_{atm}) \quad (6)$$

Le flux de conduction à travers l’échantillon

$$\phi_c = \frac{\lambda_e \times A}{e} \times (T_c - T_f) \quad (7)$$

Nous avons $\phi_j = \phi_d + \phi_c$, les équations {eq. (5), eq. (6) et eq. (7)} conduisent à l’expression de la conductivité thermique sous la forme:

$$\lambda = \frac{e}{A \times (T_c - T_f)} \times (V^2 / R) - C_d \times (T_B - T_{atm}) \quad (8)$$

6. APPROCHES THEORIQUES DES RESULTATS DES MESURES DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Nous proposons d’exposer l’approche de [2], et ensuite dans une deuxième approche, on considère le matériau constitué d’une phase solide et d’une phase gazeuse

(air) afin de déterminer et d'interpréter la conduction thermique apparente des 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 µm).
- La fraction du rayonnement transmise est nulle puisque les températures des parois sont en général voisines de la température ambiante.

6.1 Première approche

Sur la figure 2, les résultats expérimentaux relatifs aux mesures des conductivités thermiques apparentes de deux types de bétons à base de granulats de pouzzolane (bétons pleins et bétons caverneux), sont présentés en fonction de la porosité totale du béton déterminée à l'aide de la relation (9), [2]. Sur cette figure, on observe l'augmentation de la conductivité thermique apparente lorsque la porosité diminue.

$$\varepsilon = \frac{\rho_{app} - \rho_l}{\rho_g - \rho_l} \tag{9}$$

La détermination de ε passe par la mesure de ρ_{app} , ρ_l et ρ_g .

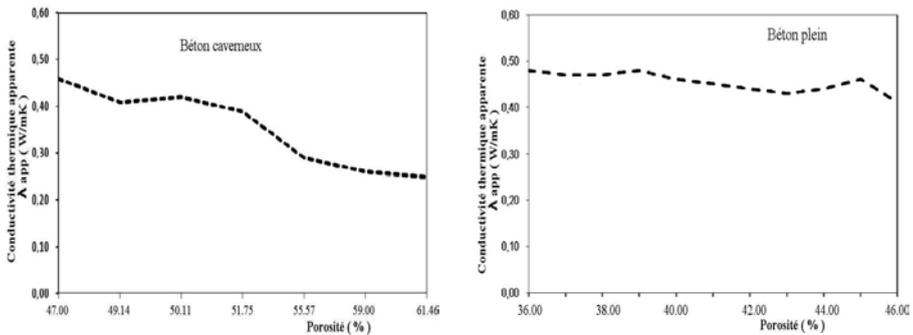


Fig. 2: Evolution de la conductivité thermique apparente mesurée en fonction de la porosité du béton

L'auteur suppose que le milieu est sous la forme d'une juxtaposition de plaques en modèle parallèle, en modèle série et en un modèle mixte série - parallèle inspiré des modèles de Krischer et de Willy Soutwik [7] de la matrice liante et du granulat. (Fig. 3)

La conductivité thermique apparente peut être calculée à partir du modèle série, parallèle et mixte par les relations (10), (11) et (12).

$$\lambda_{série} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{\alpha}{\lambda_l}} \tag{10}$$

$$\lambda_{parallèle} = \alpha \times \lambda_l + \varepsilon \times \lambda_g \tag{11}$$

Les valeurs de la conductivité thermique de la matrice liante λ_l et du granulat λ_g sont déterminées expérimentalement.

$$\lambda_{app} = \frac{\lambda_{série} \times \lambda_{parallèle}}{\theta \times \lambda_{parallèle} + (1 - \theta) \times \lambda_{série}} \tag{12}$$

$$\theta = \frac{\lambda_{série} \times (\lambda_m - \lambda_{parallèle})}{\lambda_m \times (\lambda_{parallèle} - \lambda_{série})} \tag{13}$$

$\lambda_{parallèle}$ et $\lambda_{série}$ représentent respectivement la conductivité thermique des couches disposées en série et celles disposées en parallèle.

Avec θ représentant la fraction volumique de la partie disposée en série,

Les valeurs de la conductivité thermique de la matrice liante λ_l et du granulat λ_g sont déterminées expérimentalement.

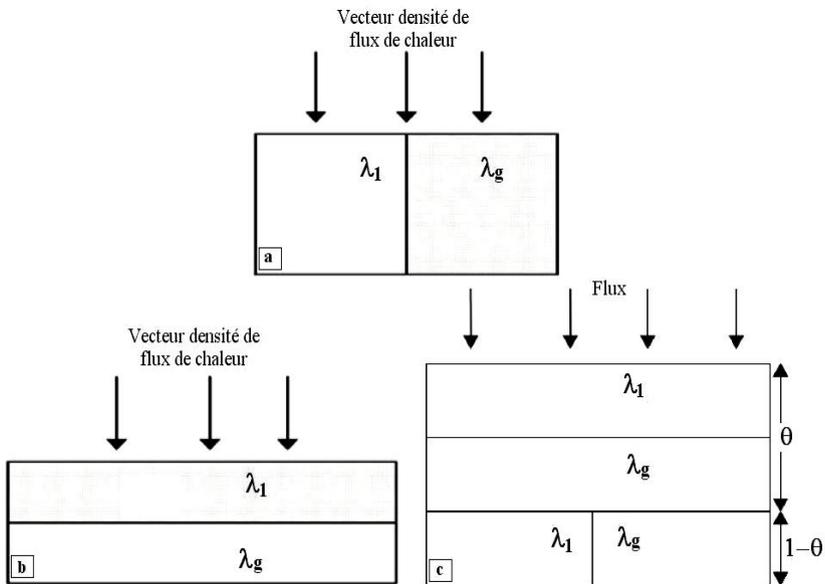


Fig. 3: a- Modèle parallèle; b- Modèle série; c- Modèle mixte

La figure 4 représente les évolutions des conductivités thermiques (série, parallèle, mixte et mesurées) en fonction de la porosité. On constate que les conductivités thermiques mesurées sont comprises entre les valeurs obtenues par les modèles série et parallèle.

Dans le cas du béton caverneux, c'est le modèle série qui semble se rapprocher le plus des résultats expérimentaux, par contre le modèle mixte présente une certaine concordance pour les valeurs de porosité variant de 31.0 % et 47.0 %.

Dans le cas du béton plein, les valeurs du modèle mixte sont en parfaite conformité avec les valeurs mesurées de la conductivité thermique apparente.

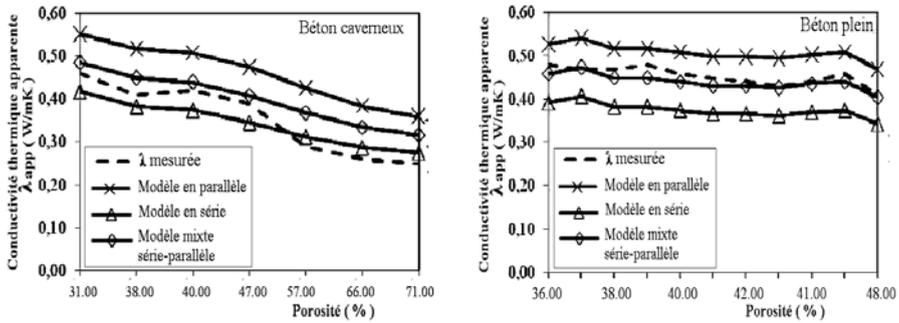


Fig. 4: Evolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles série, parallèle et le modèle mixte série-parallèle en fonction de la porosité des bétons

6.2 Deuxième approche

6.2.1 Conductivités thermiques apparentes des bétons selon les modèles série, parallèle et mixte

Dans cette approche, on considère que le béton de pouzzolane est constitué d'une phase solide (pâte du ciment + granulat) et d'une phase fluide (air). Donc, on introduit la notion de la conductivité thermique de la phase fluide (air) λ_f , et 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 de mesures de la conductivité thermique comme la méthode de boîtes décrite auparavant.

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

Nous avons calculé les conductivités thermiques apparentes à l'aide des modèles série, parallèle et mixte utilisés dans la première approche, représentés par les relations (14), (15) et (16).

$$\lambda_{\text{série}} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{\alpha}{\lambda_s}} \quad (14)$$

$$\lambda_{\text{parallèle}} = \alpha \times \lambda_s + \varepsilon \times \lambda_f \quad (15)$$

$$\lambda_{\text{app}} = \frac{\lambda_{\text{série}} \times \lambda_{\text{parallèle}}}{\theta \times \lambda_{\text{série}} + (1 - \theta) \times \lambda_{\text{parallèle}}} \quad (16)$$

Avec θ , qui représente la fraction volumique de la partie disposée en parallèle,

$$\theta = \frac{\lambda_{\text{parallèle}} \times (\lambda_m - \lambda_{\text{série}})}{\lambda_m \times (\lambda_{\text{parallèle}} - \lambda_{\text{série}})} \quad (17)$$

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 [8]

$$\varepsilon = 1 - \rho_{app} / \rho_{ag} \tag{18}$$

Les évolutions des conductivités thermiques en fonction de la porosité calculée par la formule (18) sont représentées sur les figures 5 à 7 pour quelques valeurs types de la conductivité solide introduite.

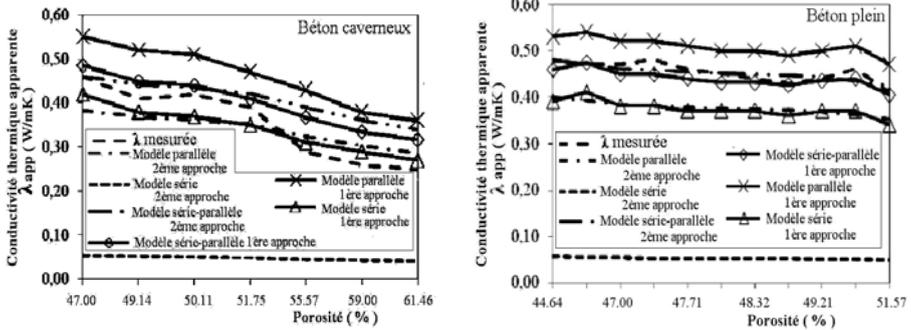


Fig. 5: Evolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pour les deux approches ($\lambda_s = 0.7 \text{ W/m.K}$)

Dans la figure 5 pour $\lambda_s = 0.7 \text{ W/m.K}$, les valeurs de la conductivité thermique des deux modèles parallèle et série sont plus faibles que les valeurs mesurées.

On note aussi, dans le béton caverneux, le modèle parallèle se rapproche de la conductivité mesurée pour les valeurs de porosité allant entre 55 % à 61 %. Dans la première approche, les deux bornes sont assez proches, par contre dans la deuxième, l'écart entre les bornes est très important.

Les valeurs du modèle mixte sont au-dessus des valeurs limite représentées par le modèle parallèle et le modèle série, cela est vrai pour les deux types de bétons (Fig. 5). On constate aussi que les valeurs du modèle mixte se rapprochent des valeurs de la conductivité thermique apparente mesurée pour le béton plein.

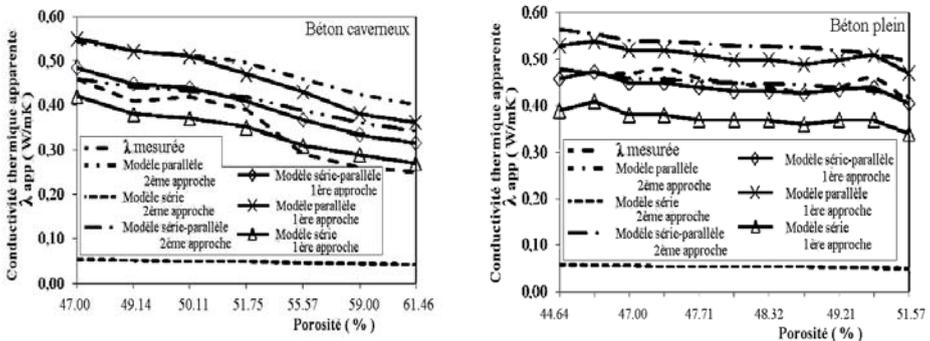


Fig. 6: Evolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pour les deux approches ($\lambda_s = 1 \text{ W/m.K}$)

Dans la figure 6, on observe que les valeurs des conductivités thermiques apparentes mesurées se trouvent entre les deux bornes des deux modèles, série et parallèle. On remarque que les valeurs du modèle parallèle sont très proches des valeurs du modèle parallèle de la première approche.

L'évolution des valeurs du modèle mixte sont toujours entre les bornes maximum et minimum. En général, le modèle mixte série-parallèle aboutit à une bonne concordance avec les valeurs mesurées dans le cas du béton plein et ce pour toutes 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.

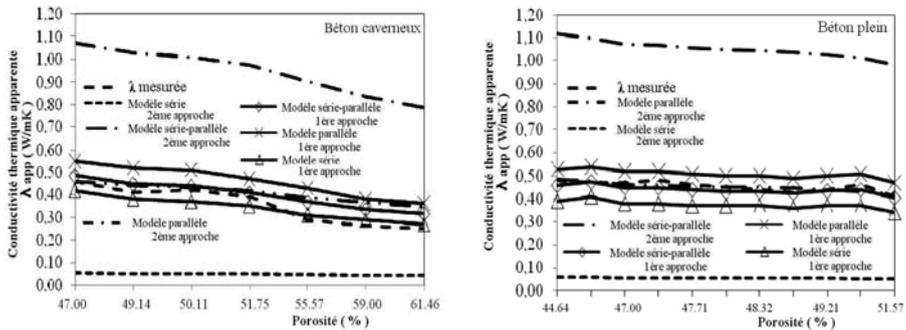


Fig. 7: Evolution de la conductivité thermique apparente mesurée et calculée par les modèles en fonction de la porosité des bétons pour les deux approches ($\lambda_s=2$ W/m.K)

Pour des valeurs de λ_s , dépassant le seuil de 1 W/mK, on constate que les valeurs mesurées restent toujours entre les deux modèles représentant la borne supérieure et inférieure 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 totale. (Fig. 7)

D'après l'observation des différentes courbes des trois modèles (série, parallèle et mixte parallèle-série) des deux approches, il semble que la figure 5, présente des résultats par lesquelles on 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 de la deuxième approche et le modèle série de la deuxième approche.

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

6.2.2 Conductivités thermiques apparentes des bétons selon le modèle de Hashin et Shtrikman

Comme les modèles série et parallèle représentant les deux valeurs extrêmes de la conductivité thermique avec une borne supérieure et une borne inférieure, ce modèle se base sur la même hypothèse, sauf que ces bornes sont plus restrictives.

Les relations (19) et (20) donnent respectivement les bornes inférieure et supérieure de la conductivité thermique apparente. [9].

$$\frac{\lambda_{app\ min}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_s}{\lambda_f} + \frac{\varepsilon}{\frac{1}{1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_f}} + \frac{\alpha}{3 \frac{\lambda_s}{\lambda_f}}} \tag{19}$$

$$\frac{\lambda_{app\ max}}{\lambda_f} = 1 + \frac{\alpha}{\frac{1}{\frac{\lambda_s}{\lambda_f} - 1} + \frac{\varepsilon}{3 \lambda_f}} \tag{20}$$

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 , ($\lambda_s = 0.9 \text{ W/mK}$; $\lambda_s = 1 \text{ W/mK}$ et $\lambda_s = 1.2 \text{ W/mK}$).

Sur la figure 8, (partie béton plein) et la figure 10, la courbe du modèle mixte série-parallèle et celle des valeurs mesurées, sont soit au-dessus ou en-dessous du modèle de Hashin et Shtrikman.

A l'exception du béton caverneux, la figure 8, 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 %.

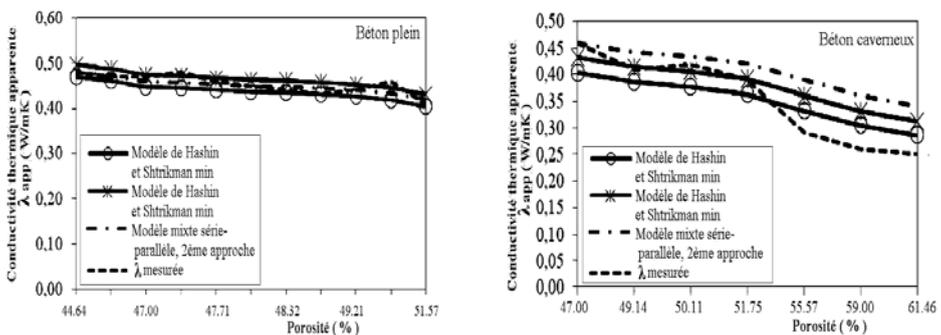


Fig. 8: Evolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec le modèle mixte et la conductivité mesurée en fonction de la porosité des bétons ($\lambda_s = 0.9 \text{ W/m.K}$)

Nous pouvons observer sur la figure 9, 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 comprises 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 %.

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

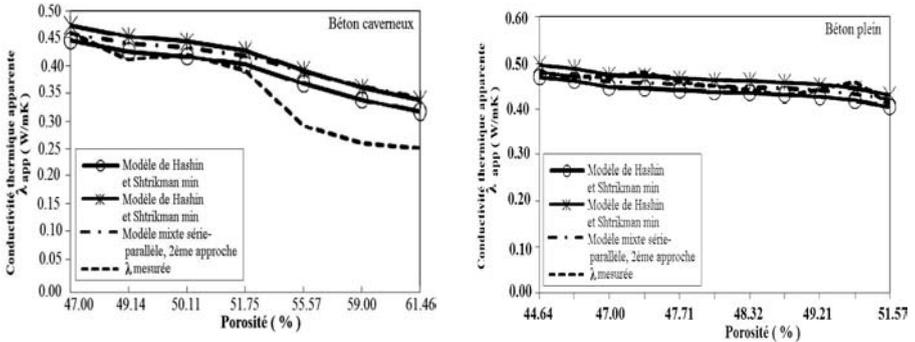


Fig. 9: Evolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,- parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons ($\lambda_s=1 \text{ W/m.K}$)

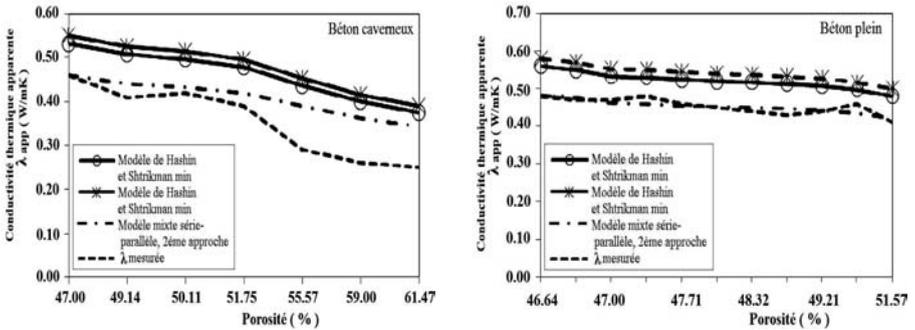


Fig. 10: Evolution de la conductivité thermique apparente calculée par le modèle de Hashin et Shtrikman avec les modèles série,- parallèle et mixte en fonction de la porosité des bétons ($\lambda_s=1.2 \text{ W/m.K}$)

7. CONCLUSION

L'étude de la conductivité thermique apparente d'un béton de pouzzolane 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 [2].

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

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 les 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.

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, couplé aux modèles séries et parallèles, 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.

En observant l'évolution des valeurs des modèles mixtes de la première et de la deuxième approche, sur les figures 4 à 10, la conductivité thermique apparente reste du même ordre de grandeur, quelque soit la valeur de la conductivité de la matrice solide.

A partir des résultats obtenus au cours de cette étude de modélisation, nous dégageons les points suivants:

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.

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 était de prédire la valeur de la conductivité thermique d'un matériau poreux, et 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.

NOMENCLATURE

ε : Porosité	ϕ_0 : Flux de chaleur, W
ϕ_j : Flux de chaleur produit par effet joule de la résistance, W	ϕ_d : Flux de déperdition thermique à travers la boîte, W
ϕ_C : Flux de conduction à travers l'échantillon, W	λ : Conductivité thermique, W/m.K
λ_m : Conductivité thermique mesurée, W/m.K	$\lambda_{\text{parallèle}}$: Conductivité thermique du modèle parallèle, W/m.K
$\lambda_{\text{série}}$: Conductivité thermique du modèle série, W/m.K	λ_f : Conductivité thermique de la phase fluide, W/m.K
λ_s : Conductivité thermique de la matrice solide, W/m.K	λ_l : Conductivité thermique de la matrice liante, W/m.K
λ_g : Conductivité thermique du grain, W/m.K	T_C, T_F : Température des faces chaude et froide de l'échantillon, °C
T_{atm} : Température atmosphérique, °C	ρ_{app} : Masse volumique apparente, kg/m ³
ρ_l : Masse volumique apparente du liant, kg/m ³	ρ_{ag} : Masse volumique absolue des grains, kg/m ³
θ : Part de disposition en série, modèle de Krischer	

REFERENCES

- [1] 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, N°261, pp. 453 – 460, 2003.
- [2] B. Ranaivo Rabejaja, 'Etude des Caractéristiques Thermique et Mécaniques de Béton de Pouzzolane', Thèse de Doctorat, Université Paris 7, 1986.
- [3] C. Vernet et G. Cadoret, Compte- Rendus du Colloque, 'Voies Nouvelles du Béton', 'Suivi en Continu de l'Evolution Chimique et Mécanique des Bétons à Hautes Performances pendant les Premiers Jours', Cachan, France, p. 17, 1991.
- [4] P. Barret, D. Menetrier and B. Cottin, 'Study of Silicate-Lime Solution Reaction', Cement and Concrete Research, Vol. 7, N°1, pp. 61 -67, 1977.
- [5] F. Massazza, 'Chemistry of Pozzolan Additions and Mixed Cements', Cemento, Vol. 1, N°73, pp. 3 – 38, 1976.
- [6] Y. Jannot, Séminaire PER AUF 'Métrologie Thermique', Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), Nancy, Laboratoire d'Energie Appliquée (LEA), Dakar, 12-18 Novembre 2008.
- [7] O. Krischer and K. Kroll, 'Technique de Séchage', Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques, Traduction du springer-verlag, Berlin 1963.

- [8] J.P. Laurent, '*La Conductivité Thermique 'à Sec' des Bétons Cellulaires Autoclavés: un Modèle Conceptuel*', Materials and Structures, Vol. 24, N°141, pp. 221 – 226, 1991.
- [9] Z. Hashin and S. Shtrikman, '*A Variational Approach to the Theory of the Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials*', Journal of Applied Energy, Vol. 33, N°10, pp. 3125 – 3131, 1962.