



HAL
open science

Détermination rapide des propriétés de transfert thermique de matériaux cimentaires soumis au séchage

Philippe Poullain, Pierre Mounanga, Guy Bastian, Abdelhafid Khelidj

► To cite this version:

Philippe Poullain, Pierre Mounanga, Guy Bastian, Abdelhafid Khelidj. Détermination rapide des propriétés de transfert thermique de matériaux cimentaires soumis au séchage. Congrès Transfert 2006, Feb 2006, Lille, France. hal-01008065

HAL Id: hal-01008065

<https://hal.science/hal-01008065>

Submitted on 8 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détermination rapide des propriétés de transfert thermique de matériaux cimentaires soumis au séchage

Philippe Poullain — Pierre Mounanga — Guy Bastian — Abdelhafid Khelidj

GeM – UMR CNRS 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique
IUT de Saint-Nazaire

58 Rue Michel Ange, 44606 Saint-Nazaire Cedex

philippe.poullain@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. Les pièces en béton fraîchement coulées sont sujettes à une élévation en température due au dégagement de la chaleur d'hydratation du ciment. Cette élévation non homogène est à l'origine de dilatations différentielles induisant une micro fissuration du matériau. La prédiction des champs de température au sein de larges structures en béton nécessite la connaissance du lien entre les propriétés de transfert du matériau, son état hydrique et l'avancement des réactions d'hydratation. Cette étude propose une méthode originale de détermination des propriétés de transfert thermique de matériaux cimentaires en cours de séchage. Cette méthode est basée sur la mesure et le traitement par analyse inverse de profils de température en régime transitoire dans des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ soumises à un chauffage modéré. Ceci permet de remonter aux profils de conductivité thermique et de capacité calorifique volumique dans le matériau.

ABSTRACT. Fresh concrete structures are subject to a temperature increase due to the release of the cement hydration heat. The non homogeneous temperature increase is responsible for the material micro cracking through the development of differential dilations. The determination of the temperature field in concrete structures requires the knowledge of the relation between thermophysical properties of the material, the water content and the hydration ratio. This study presents an original method to determine the thermophysical properties of cementitious materials submitted to drying. This method is based on the measurement and the numerical treatment through forward analysis of transient temperature profiles in $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ samples submitted to heating. This permits to determine the profiles of thermal conductivity and specific heat inside the material.

MOTS-CLÉS : matrices cimentaires, propriétés thermophysiques, séchage, hydratation, analyse inverse.

KEYWORDS: cementitious matrices, thermophysical properties, drying, hydration, forward analysis.

1. Introduction

Les pièces en béton fraîchement coulées sont sujettes à une élévation en température liée aux réactions d'hydratation du ciment, fortement exothermiques, libère une quantité de chaleur suffisamment élevée pour permettre une augmentation de la température du béton au coeur de la structure de l'ordre de quelques degrés à quelques dizaines de degrés. Le champ de température résultant du dégagement de chaleur est fortement influencé par le degré d'hydratation du ciment, lui-même influencé par l'histoire thermique du matériau depuis son coulage.

Des gradients de température apparaissent à l'intérieur de la structure et engendrent des dilatations différentielles du matériau, les parties les plus chaudes (coeur de la structure) subissant une déformation plus importante que les parties froides (en contact avec les parois du coffrage). Ces dilatations différentielles sont à l'origine de (micro) fissures nuisibles à la tenue de l'ouvrage (Acker, 1992). Dans le but de mieux contrôler l'apparition de ces fissures, il est intéressant de développer des outils de simulation numérique permettant de calculer l'évolution temporelle de la température de structures de taille réelle.

Le développement de ces outils repose sur une connaissance préalable des propriétés de transfert du matériau, qui dépendent non seulement du degré d'hydratation du ciment, mais également de la teneur en eau du matériau. Dans le but d'étudier l'évolution en cours de séchage des propriétés de transfert de mortiers, un outil de traitement des données expérimentales a été développé. Il est basé sur une analyse inverse de profils temporels de température et permet de déterminer l'évolution, en fonction du temps, des fonctions décrivant les propriétés thermophysiques (conductivité thermique λ et capacité calorifique volumique ρC_p) du matériau.

Un dispositif expérimental a été mis au point permettant d'une part le séchage contrôlé des éprouvettes, et d'autre part leur chauffage dans des conditions totalement isolées. Les profils de température mesurés en des points caractéristiques du matériau sont utilisés comme données d'entrée du programme de traitement. Le but de ce dernier est de déterminer les paramètres des fonctions décrivant les évolutions spatiales de λ et ρC_p . Cette méthode a été testée avec succès sur des matériaux de référence – mortiers aux propriétés homogènes et sable en cours de séchage (Poullain *et al.*, 2005). Elle est appliquée ici à la détermination de la fonction de conductivité thermique d'une pâte de ciment en cours de séchage. Les résultats permettent d'identifier l'avancée au cours du temps de la zone ayant subi un séchage.

2. Matériel et matériaux

2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, représenté sur les figures 1 et 2, est constitué d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de pâte de ciment ou de mortier placée entre des plaques de polyuréthane de 50 mm d'épaisseur. L'isolation thermique est ainsi assurée sur chacune des faces de l'éprouvette. Sur l'une des faces est collé un film chauffant matérialisé par un rectangle de papier Teledeltos ($4 \times 16 \text{ cm}^2$) dont les bornes sont recouvertes de bandes de laque d'argent. Le papier Teledeltos est un papier résistif dont les propriétés ont été présentées dans un précédent article (Mounanga *et al.*, 2004). Il permet d'assurer un chauffage homogène sur toute la surface de l'éprouvette. Son inertie thermique très faible permet d'imposer très rapidement un flux de chaleur constant. La puissance de chauffage fournie par le film chauffant est de l'ordre de 500 W m^{-2} sous une tension d'une centaine de volts.

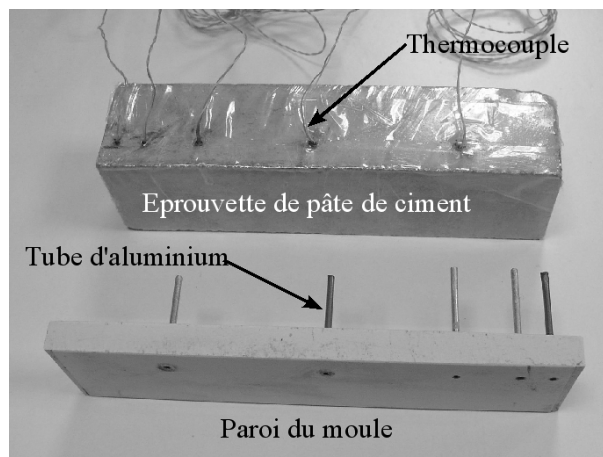


Figure 1. Instrumentation de l'éprouvette de pâte de ciment et du moule

Entre chaque mesure, une des faces est laissée en contact avec une atmosphère régulée en température ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) et en hygrométrie (humidité relative de $50 \pm 5\%$) afin d'assurer le séchage de l'éprouvette (surface de séchage $4 \times 4 \text{ cm}^2$).

Des thermocouples sont noyés dans l'éprouvette. Ils sont placés à l'intérieur de tubes d'aluminium de 2 mm de diamètre et de 40 mm de long situés à 10 mm de la surface du film chauffant. Une centrale d'acquisition AOIP permet l'enregistrement automatique des températures.

2.2. Constitution des éprouvettes

Le ciment utilisé pour la confection des éprouvettes est de type CPA-CEM I 52.5 PM ES. Le malaxage de la pâte de ciment est effectué pendant 3 minutes (1.5 minute à vitesse modérée et 1.5 minute à vitesse rapide).

La pâte de ciment est ensuite coulée dans un moule $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ dont une des parois en PVC est munie des tubes d'aluminium dans lesquels sont insérés les thermocouples. La pâte de ciment pénètre dans les tubes assurant le contact entre les soudures des thermocouples et le matériau. Les éprouvettes sont ensuite placées en chambre humide afin d'éviter leur séchage. Elles sont démoulées au bout de 24 heures, recouvertes de plusieurs couches de film plastique et placées dans le dispositif de mesure des profils de température. La première mesure s'effectue à l'issue de cette opération.

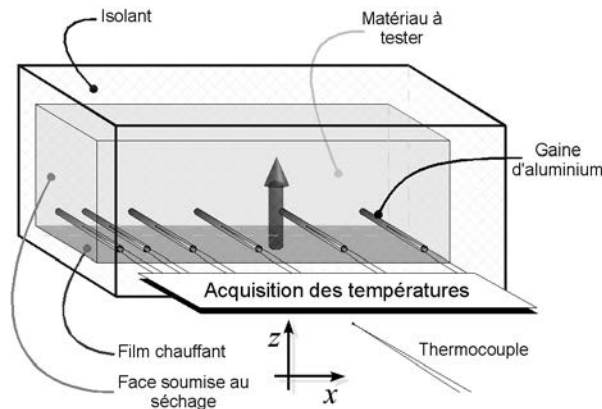


Figure 2. Représentation schématique du dispositif expérimental

3. Développement théorique de la méthode

3.1. Equation de la chaleur

Dans le cas de matériaux non déformables, l'équation de la chaleur peut être obtenue en effectuant un bilan de chaleur simple sur un volume infinitésimal.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad [1]$$

ρC_p : capacité calorifique volumique [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$]

λ : conductivité thermique [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

t : temps [s]

T : température [K].

Dans le cas de matériaux poreux humides, λ est en réalité la conductivité apparente qui tient compte, non seulement des transferts de chaleur par conduction, mais également du transport de chaleur par les mécanismes internes d'évaporation-condensation. Ces mécanismes sont liés à la diffusion de la vapeur dans les pores sous l'action de gradients de température (Moyne *et al.*, 1988).

L'évolution temporelle de la température dans un matériau résulte donc de la compétition entre ses propriétés de stockage et de transfert de la chaleur. Plus la capacité calorifique volumique du matériau est élevée, moindre est l'élévation en température. Plus la conductivité thermique est importante, plus les gradients de température dans la structure sont faibles.

3.2. Discrétisation de l'équation de la chaleur

Le principe de la méthode de traitement est de remonter, via une analyse inverse des profils de température expérimentaux, aux fonctions décrivant les variations spatiales des propriétés thermophysiques du matériau. La nature du problème ne permettant pas d'établir une solution analytique, un programme de calcul des champs de température doit être mis en place. L'équation de la chaleur, adjointe aux conditions aux limites et aux propriétés du matériau permettent de calculer le champ de température. La résolution numérique a nécessité la discrétisation de l'équation de la chaleur à l'aide de la méthode des différences finies et d'une méthode ADI (Alternating Direction Implicit – Özışık, 1993). Les conditions aux limites en flux de chaleur ont été traitées à l'aide de la méthode des noeuds fictifs. Un système d'équations sous la forme de deux jeux de deux matrices tridiagonales est obtenu, que l'on peut utiliser pour calculer le champ de température en chaque point du matériau.

$$\begin{cases} A_x T^{2n} = B_z T^{2n-1} + C_z \\ A_z T^{2n+1} = B_x T^{2n} + C_x \end{cases} \quad [2]$$

A_x et B_z : matrices tridiagonales ; schéma explicite en z et implicite en x

A_z et B_x : matrices tridiagonales ; schéma explicite en x et implicite en z

C_x et C_z : vecteurs exprimant les conditions aux limites en flux de chaleur

T^n : vecteur des températures à l'instant n .

La formulation des équations permet de tenir compte de la non-linéarité du problème, liée aux variations spatiales des propriétés thermophysiques. Ces

variations sont décrites par l'intermédiaire de fonctions dont on peut facilement faire varier la forme sans avoir à reformuler les équations de discrétisation. Tout type de variations peut donc être simulé à l'aide du programme. La fonction décrivant la conductivité thermique du matériau doit cependant être au moins une fois dérivable.

3.3. Principe de l'analyse inverse

Des valeurs initiales sont données aux paramètres des fonctions décrivant les variations spatiales de λ et ρC_p . Les profils de température sont calculés numériquement en différents points de l'éprouvette en des coordonnées correspondant à celles des thermocouples du dispositif expérimental. Ces profils de température sont ensuite comparés aux profils de température expérimentaux et une fonction test est construite. La forme de la fonction test dépend des écarts de température observés. Elle représente ici l'écart quadratique entre les données expérimentales et numériques (équation 3).

$$\varepsilon_i(\lambda_i; (\rho C_p)_i) = \sum_{t=0}^{t=t_{\max}} \sum_{n=1}^N (T_{n,t}^{\text{exp}} - T_{n,t}^{\text{num}}(\lambda_i; (\rho C_p)_i))^2 \quad [3]$$

λ_i : vecteur des paramètres de description de $\lambda(x)$

$(\rho C_p)_i$: vecteur des paramètres de description de $\rho C_p(x)$

$T_{n,t}^{\text{exp}}$: température expérimentale au point n à l'instant t

$T_{n,t}^{\text{num}}$: température calculée numériquement au point n à l'instant t .

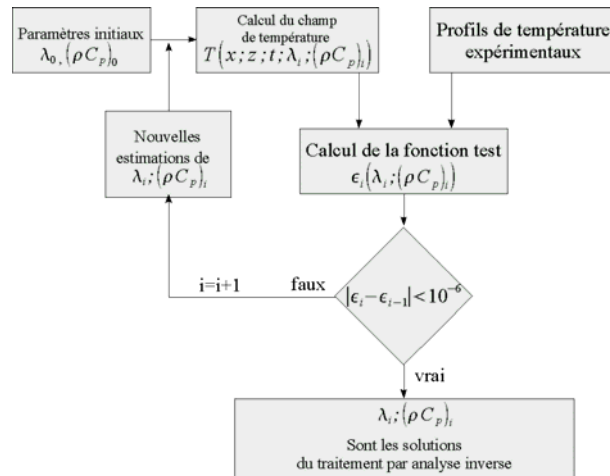


Figure 3. Principe de la méthode inverse

De faibles variations sont ensuite imposées aux valeurs initiales des paramètres et la fonction test est réévaluée, après recalcul des profils de température. Cette opération permet de connaître la forme locale de la fonction test en fonction des paramètres et de déterminer la direction dans laquelle les paramètres optimaux doivent être cherchés. Par itérations successives, on parvient à des valeurs de paramètres pour lesquels la fonction test prend une valeur minimale. Le calcul est arrêté lorsque l'écart entre deux valeurs successives de la fonction test devient inférieur à 10^{-6} . L'organigramme du programme de traitement par analyse inverse est donné sur la figure 3.

La difficulté de cette méthode repose sur le fait que la fonction test peut présenter plusieurs minima. La qualité ou la validité de la solution dépend donc des valeurs initiales données aux paramètres des fonctions de $\lambda(x)$ et $\rho C_p(x)$. Dans ce travail, les paramètres initiaux permettent d'obtenir des valeurs de λ et ρC_p proches des valeurs mesurées pour un matériau homogène de composition identique.

Une validation de la méthode est présentée dans (Poullain *et al.*, 2006). Cette validation est effectuée sur des matériaux cimentaires aux propriétés homogènes ainsi que sur du sable en cours de séchage. Ces résultats sont comparés à des résultats de la littérature et montrent une bonne corrélation entre les résultats obtenus à l'aide de différentes méthodes (Delacre, 2000 ; Mounanga *et al.*, 2004).

4. Résultats

4.1. Profils de température : comparaison entre résultats expérimentaux et numériques

Les profils de température mesurés et servant de données expérimentales de référence pour le calcul des fonctions décrivant les propriétés thermophysiques sont représentés sur la figure 4.

Pour le jour 1, les profils de température sont confondus, traduisant l'uniformité au sein de l'éprouvette des propriétés thermophysiques. Dès le deuxième jour, les profils ne se superposent plus. Le séchage de l'éprouvette a en effet déjà débuté et des gradients de teneur en eau se développent. L'évolution de la température est plus significative pour les points situés près de la surface de séchage ($x=5$ mm et $x=15$ mm). Le profil est quasiment constant pour le point situé à l'extrémité opposée de l'éprouvette ($x=125$ mm).

La comparaison des profils pour les jours 5 et 7 montre que les propriétés ont très peu évolué. L'évaporation de l'eau a donc eu un effet mineur sur l'évolution de la conductivité thermique et de la capacité calorifique.

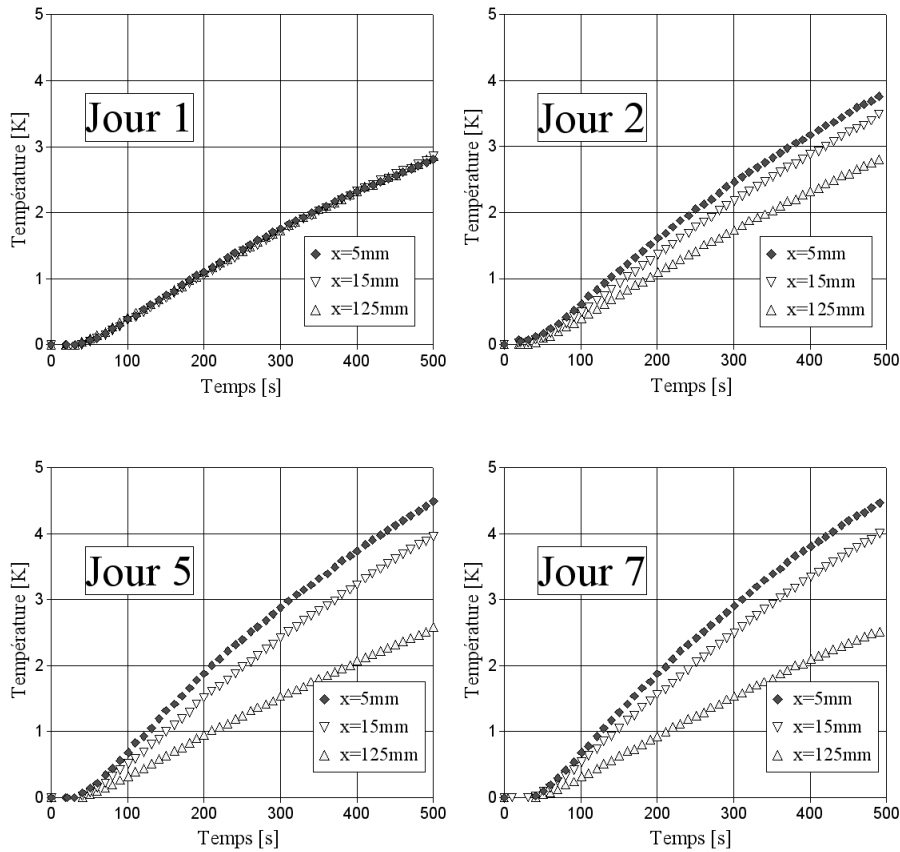


Figure 4. Profils de température mesurés sur une éprouvette de pâte de ciment en cours de séchage

La figure 5 présente une comparaison des profils de température expérimentaux et numériques pour le jour 7. Les profils numériques sont obtenus à l'issue de la recherche des paramètres par minimisation de la fonction test. Ils correspondent donc aux profils que l'on peut calculer à partir de la fonction de conductivité thermique de la figure 6 (jour 7).

4.2. Profil de conductivité thermique

Les profils de conductivité thermique déduits de l'application de la méthode inverse aux profils temporels de température mesurés sur l'éprouvette de pâte de ciment (figure 4) sont présentés sur la figure 6. La conductivité thermique, initialement uniforme dans la totalité de l'éprouvette, décroît au cours du temps. Cette décroissance est plus importante pour les points proches de la surface soumise

au séchage. Cette évolution traduit le lien entre la conductivité thermique du matériau et sa teneur en eau. Les zones proches de la surface de séchage subissent un séchage par évaporation plus important que les zones situées au coeur de l'éprouvette.

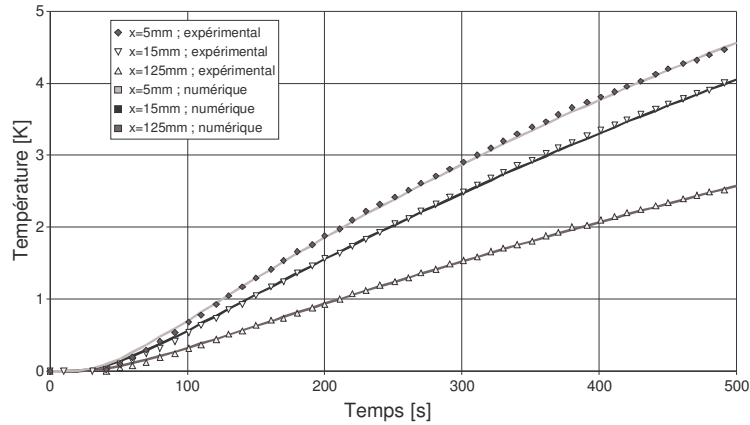


Figure 5. Comparaison des profils expérimentaux et numériques à l'issue de la minimisation des paramètres

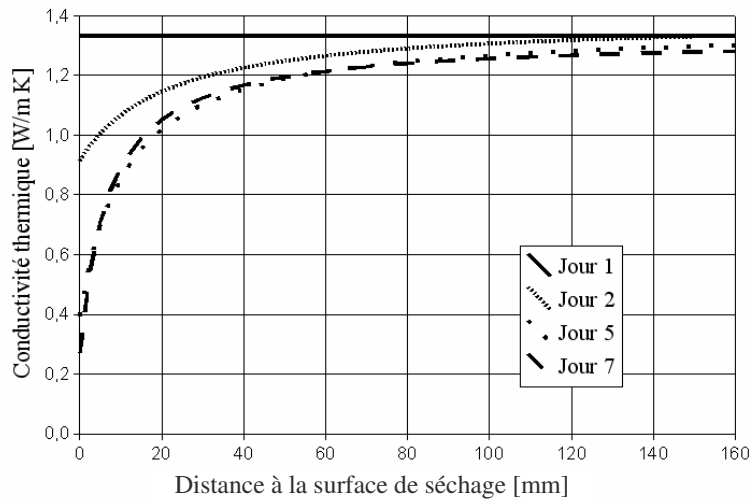


Figure 6. Evolution du profil de conductivité thermique au cours du temps

5. Conclusions

Une méthode de traitement numérique de données expérimentales a été développée afin de déterminer les profils de conductivité thermique et de capacité

calorifique volumique dans des matériaux poreux soumis au séchage. Cette méthode, déjà testée et validée par comparaison avec des données issues de la littérature ou avec des propriétés mesurées sur des matériaux de référence, a été appliquée à l'étude du séchage d'une éprouvette de pâte de ciment.

L'intérêt de l'analyse inverse réside dans le fait que, contrairement à des méthodes classiques, le résultat obtenu est une fonction décrivant les propriétés d'un matériau et non une valeur mesurée en un point unique. A partir de la réponse thermique localisée de trois thermocouples, il est possible d'obtenir une information en chaque point du matériau. Cependant, l'analyse inverse nécessite de disposer d'un modèle théorique décrivant le phénomène étudié et le résultat est donc tributaire de la validité du modèle.

Dans la suite du travail, la méthode sera utilisée pour étudier les variations des propriétés de transfert thermique de matériaux granulaires du Génie Civil aux compositions variées, en particulier en cours de séchage.

Par ailleurs, nous développons actuellement d'autres méthodes d'analyse inverse afin de traiter numériquement des données expérimentales concernant les transferts de masse dans les matériaux, et d'étudier la dépendance en température des propriétés de transfert thermique de matériaux cimentaires.

6. Bibliographie

- Acker P., « Retraits et fissurations du béton ». Documents scientifiques et techniques, Association Française Pour la Construction (AFPC), 1992.
- Delacre E., Caractérisation thermique de matériaux poreux humides par analyse inverse dans le domaine fréquentiel, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2000.
- Mounanga P., Bastian G., Bron G., Coué R., "Rapid determination of the thermophysical properties of various materials. Method of the hot plane" *The European Physical Journal – Applied Physics*, vol. 26, 2004, p. 65-72.
- Moyne, Ch., Azizi, S., Degiovanni, A., "Thermal conductivity of wet porous media: Theoretical analysis and experimental measurements" Sixth International Drying Symposium IDS'88, Versailles (France), 1988, p. 85-92.
- Özışık N., Heat Conduction, Wiley-Interscience Publication, 2nde édition, 1993.
- Poullain Ph., Mounanga P., Bastian G., Khelidj A., « Propriétés de transfert thermique de pâtes de ciment durcissantes et de mortiers durcis - prise en compte du séchage », XXIIIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Risque & Environnement, Grenoble, 26-27 mai 2005.
- Poullain Ph., Mounanga P., Bastian G., Coué R., "Determination of the thermophysical properties of evolutive porous media: application to Civil Engineering materials", à paraître dans *European Physical Journal - Applied Physics* en 2006.