

---

# Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale

L. H. Nguyen, A. L. Beaucour, S. Ortola, A. Noumowé

Université de Cergy-Pontoise, L2MGC, EA 4114, F - 95000 Cergy-Pontoise

[le-hung.nguyen@u-cergy.fr](mailto:le-hung.nguyen@u-cergy.fr)

---

*RÉSUMÉ. L'utilisation de granulats légers permet de réaliser un béton ayant des propriétés mécaniques répondant aux critères structuraux et ayant une capacité d'isolation thermique améliorée par rapport au béton ordinaire. L'étude présentée vise d'une part à relier les paramètres de formulation (nature des granulats légers et volume des sables légers) aux caractéristiques thermiques des bétons de granulats légers afin d'optimiser le couple résistance / pouvoir isolant. D'autre part, nous étudions la variation des propriétés thermiques des bétons de granulats légers en fonction de la température et de l'absorption d'eau sous différents degrés d'hygrométrie.*

*ABSTRACT. Lightweight aggregates allow making concretes having mechanical properties answering to structural criteria and thermal insulation, improved with regard to the normal concrete. This study aims to relate the mixture parameters (nature of aggregate and volume of the fine grain) with the thermal characteristics of lightweight aggregate concrete in order to optimize the couple resistance / insulation. Furthermore, we study the variation of the thermal properties of lightweight aggregate concretes according to the temperature and to the moisture content.*

*MOTS-CLÉS : béton, chaleur massique, conductivité thermique, granulats légers, hot-disk, module d'élasticité, résistance en compression.*

*KEY WORDS: concrete, specific heat, thermal conductivity, lightweight granular, hot-disk, elastic moduli, compression strength.*

---

## 1. Introduction

Les enjeux environnementaux et du développement durable dans le domaine du bâtiment sont de plus en plus pris en compte par les pouvoirs publics et les acteurs industriels. Le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie de notre pays avec plus de 40% de la consommation d'énergie finale. Il est responsable aussi de près d'un quart des émissions de gaz à effet de serre. Le Grenelle de l'Environnement prévoit une réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Pour les constructions neuves, la nouvelle réglementation thermique 2012 impose de nouvelles exigences qui conduisent à imaginer des dispositions constructives lourdes, incorporant des systèmes d'isolation par l'extérieur ou des rupteurs thermiques. Dans ce contexte énergétique et économique, il est intéressant d'envisager des formulations de bétons de structure avec des propriétés améliorées d'isolation thermique. L'utilisation de granulats légers, qui possèdent une bonne qualité d'isolation grâce à leur structure poreuse, peut être une solution pour améliorer la capacité d'isolation des bétons.

En effet, de nombreux travaux de recherche synthétisés dans [ACI, 2003] et [Arnould, 1986] ont montré que les performances mécaniques des bétons de granulats légers pouvaient être suffisantes pour qu'on les utilise comme béton de structure. Plus récemment, Ke [Ke, 2009], [Ke, 2010] et Chen [Chen, 08] ont étudié des formulations de bétons de schiste expansé et d'argile expansée, possédant de plus faibles masses volumiques (1500- 1600 kg/m<sup>3</sup>) et conservant des performances mécaniques compatibles avec une utilisation comme béton de structure. Cavaleri [Cavaleri, 2003] et Gunduz [Gunduz, 2005] ont montré que les bétons de ponce peuvent avoir la même classe de performance mécanique que le béton de granulats ordinaire.

Afin d'optimiser le couple résistance/pouvoir isolant, ce travail expérimental porte à la fois sur l'étude des propriétés mécaniques et du comportement thermique des bétons de granulats légers en fonction de la nature et de la fraction volumique de granulats. Il convient par ailleurs d'analyser le comportement thermique de ces bétons en fonction de différents paramètres comme la température et le degré d'humidité afin d'optimiser leurs propriétés d'isolation thermique.

## 2. Procédure expérimentale

### 2.1. Matériaux

Les sept types de granulats légers testés sont de trois natures différentes : schiste expansé, argile expansée et pierre ponce. Les caractéristiques des granulats sont présentées dans le tableau 1. Ils sont dénommés par leur taille et leur nature : les numéros correspondent à leur classe granulaire d/D et la lettre suivante indique la

nature du granulat (S pour schiste, P pour ponce et A pour argile). Les granulats fins, (sables légers), ont un diamètre maximal de 4 à 5 mm et les gros granulats ont un diamètre maximal compris entre 8 et 10 mm.

GL	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )			Porosité intergranulaire	Absorption d'eau
	$\rho_v$	$\rho_{ssd}$	$\rho_{rd}$	$1 - \rho_v / \rho_{rd}$ (%)	WA <sub>24</sub> (%)
4/10 S	515	989	901	43	10,0
0/4 S	1025	1899	1605	36	10,4
5/8 P	684	1392	1178	42	21,1
0/5 P	799	1622	1342	40	20,8
4/10 A	585	1239	980	40	24,8
4/8 A	737	1499	1245	41	19,2
0/4 A	830	1684	1413	41	17,9

**Tableau 1** : Caractéristiques des granulats légers étudiés

La masse volumique des granulats légers est souvent le critère primordial pour évaluer la qualité des granulats et leur influence sur les propriétés des bétons de granulats légers. Les masses volumiques en vrac ( $\rho_v$ ), réelles sèches ( $\rho_d$ ) et saturées surface sèche ( $\rho_{ssd}$ ) des granulats légers sont déterminées en respectant les procédures décrites dans les normes EN 1097-3 et EN 1097-6. Les gros granulats sont les plus légers avec des masses volumiques en vrac entre 515 et 737 kg/m<sup>3</sup> en comparaison avec celles des granulats fins (entre 799 et 1025 kg/m<sup>3</sup>). Les granulats 4/10 S et 4/10 A, de taille et de masse volumique similaires, permettront d'étudier l'influence d'autres paramètres physiques comme la nature des granulats, la porosité, la structure poreuse des grains... La porosité intergranulaire des granulats légers varie autour de 0,4. Celle plus élevée du granulat 4/10 S est due à la forme plus allongée des grains. Les granulats 0/4 S, constitués de grains concassés et possédant des éléments fins, présentent la plus faible porosité intergranulaire. L'absorption d'eau à 24 h des granulats est mesurée conformément à la norme EN 1097-6. Les granulats de schiste expansé, ayant une structure poreuse entourée par une coque dense et peu perméable, connaissent une absorption plus faible que les autres granulats. Les granulats d'argile, possédant eux aussi une coque mais deux fois moins épaisse [Ke, 2009], et les ponces, pierres naturelles sans structure de coque, ont une absorption d'eau élevée, entre 18 et 25%. La connaissance de la valeur d'absorption d'eau des granulats permet d'ajuster la quantité d'eau de gâchage dans la composition du béton.

## 2.2. Confection des bétons

Les granulats légers sont utilisés en remplacement des graviers et du sable naturels. Trois types de mélange pour chaque nature de gros granulat (argile, schiste et ponce) ont été préparés afin d'étudier l'impact de la substitution du sable alluvionnaire par le sable léger. Les bétons sont dénommés de façon suivante : les lettres correspondent à la composition de la matrice cimentaire et à la nature des granulats légers ; le chiffre indique le taux de remplacement volumique du sable alluvionnaire par du sable léger (0, 25, 50 et 100%). La composition des bétons de granulats légers est présentée dans le tableau 2.

Béton	Liant	Gros granulats				Granulats fins				Eau	SP
		4/10S	5/8P	4/10A	4/8A	0/4S	0/5P	0/4A	0/2R		
HPS-0	483	445	0	0	0	0	0	0	571	159	13,6
HPS-50	483	445	0	0	0	220	0	0	285	159	11,6
HPS-100	483	445	0	0	0	440	0	0	0	159	11,1
HPP-0	483	0	626	0	0	0	0	0	571	159	10,1
HPP-25	483	0	626	0	0	0	91	0	428	159	9,7
HPP-50	483	0	626	0	0	0	182	0	285	159	9,7
HPA1-0	483	0	0	558	0	0	0	0	571	159	13,4
HPA1-50	483	0	0	558	0	0	0	195	285	159	14,5
HPA1-100	483	0	0	558	0	0	0	390	0	159	12,6
HPA2-0	483	0	0	0	673	0	0	0	571	159	9,6
HPA2-50	483	0	0	0	673	0	0	195	285	159	9,2
HPA2-100	483	0	0	0	673	0	0	390	0	159	8,7

**Tableau 2.** Composition des bétons de granulats légers (kg/m<sup>3</sup>)

La fraction volumique des gros granulats par rapport au volume de béton est choisie constante et égale à 45% en se basant sur les travaux de Ke [Ke, 2009 et 2010]. Le sable de rivière (0/2R) utilisé est un sable de classe 0/2mm et d'une masse volumique 2462 kg/m<sup>3</sup>. Pour mettre en évidence l'influence des granulats légers sur le comportement du béton léger, les bétons ont été fabriqués avec un volume de pâte cimentaire constant et un même rapport eau/liant (E/L) de 0,33. Le liant est composé de 90 % de ciment CEM I 52.5 et de 10% de fumée de silice. Pour se prémunir contre l'absorption d'eau par les granulats légers pendant le gâchage et la prise, ceux-ci sont immergés pendant 48 heures puis égouttés jusqu'à obtenir une teneur en eau de surface constante avant introduction dans le malaxeur. L'eau de gâchage est ensuite réduite de la quantité d'eau apportée par les granulats, c'est-à-dire de leur

teneur en eau de surface, l'eau absorbée par les granulats n'étant pas disponible pour l'hydratation. L'incorporation de superplastifiant (SP) dans l'eau de gâchage permet de conserver une maniabilité identique entre toutes les formulations. L'affaissement des bétons frais est contrôlé entre 10 et 16 cm (classe S3) conformément à la norme EN 12350-2.

### **2.3. Mesure des propriétés mécaniques et thermiques**

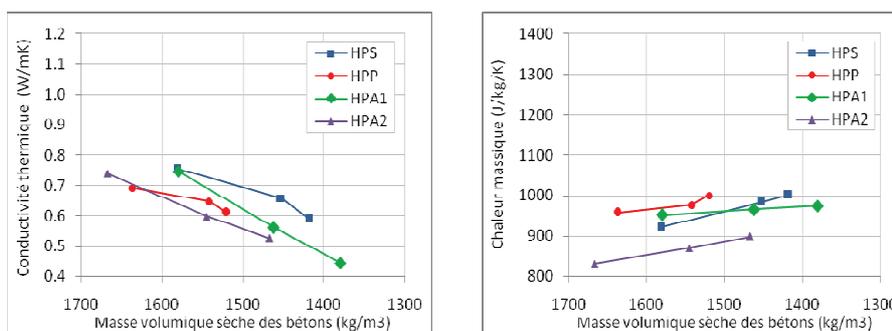
Des essais mécaniques de compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm après conservation dans l'eau pendant 28 jours avec une presse hydraulique INSTRON de 3000 kN. Les éprouvettes sont surfacées avant l'essai avec un matériau à base de soufre et de silice. La résistance à la rupture et le module d'élasticité sont mesurés sur trois éprouvettes différentes pour chaque formulation. Pour mesurer en continu les déformations axiales, nous avons utilisé un bâti d'extensométrie constitué de deux couronnes métalliques et distantes de  $H/2$  ( $H = 32\text{cm}$  : hauteur de l'éprouvette). Ces couronnes sont disposées sur l'éprouvette à l'aide de vis pointeaux. Entre les deux couronnes, trois capteurs de déplacement repartis à  $120^\circ$  permettent, via une chaîne d'acquisition, de mesurer le raccourcissement de l'éprouvette. La déformation est ainsi mesurée dans la partie centrale de l'éprouvette afin d'éviter le frottement au contact avec les plateaux de la presse.

Les propriétés thermiques sont mesurées sur des éprouvettes prismatiques 14x7x4 cm après 90 jours. Trois séries d'échantillons correspondant aux différents états hydriques sont préparées : pour l'état saturé, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'à l'essai ; pour l'état humide, les éprouvettes sont conservées dans l'eau pendant 90 jours puis séchées à  $50^\circ\text{C}$  et conservées dans une enceinte climatique à  $20^\circ\text{C}$  et à 50% d'humidité relative ; pour l'état sec, les éprouvettes sont conservées dans l'eau pendant 90 jours avant séchage dans l'étuve à  $50^\circ\text{C}$ . Pour s'assurer d'une teneur en eau constante, les éprouvettes sont conservées en enceinte climatique ou étuve jusqu'à ce que leur masse ne varie pas de plus de 0,2% après 7 jours. Les essais thermiques sont réalisés à l'aide d'une sonde Hot-Disk, à la fois émettrice de chaleur et sonde de température. Le système est basé sur la technologie de la Source Plane Transitoire (TPS) dans laquelle la variation de température ( $\Delta T$ ) est une fonction de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique du matériau. Elles sont calculées par un processus itératif permettant d'obtenir une évolution linéaire de  $\Delta T$  [Gustafsson, 1991]. La chaleur massique est déduite à partir de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique. Les mesures sont d'une part effectuées à température ambiante et à différents états d'humidité : sec, saturé et après conservation en enceinte climatique à 50% d'hygrométrie. D'autre part, elles sont effectuées sur l'échantillon sec pour déterminer les propriétés thermiques à différentes températures entre  $5^\circ\text{C}$  et  $50^\circ\text{C}$ . L'écart type de tous les mesures est moins de 5%.

### 3. Analyse des résultats expérimentaux

#### 3.1. Propriétés thermiques en fonction de la composition

La figure 1 illustre l'évolution de la conductivité thermique (a) et de la chaleur massique (b) mesurées sur échantillon sec en fonction du taux de substitution du sable de rivière par le sable léger. Grâce à la porosité apportée par les sables légers, la conductivité thermique du béton diminue avec l'augmentation de la fraction volumique de sable léger. Pour la fraction volumique maximale de sable léger (50% pour la ponce et 100% pour le schiste), la diminution de la conductivité thermique varie entre 11,7 et 41,3% selon la nature des sables légers. La plus faible valeur de conductivité 0.44 W/mK est obtenue pour le béton d'argile 4/10A avec 100% de sable léger.

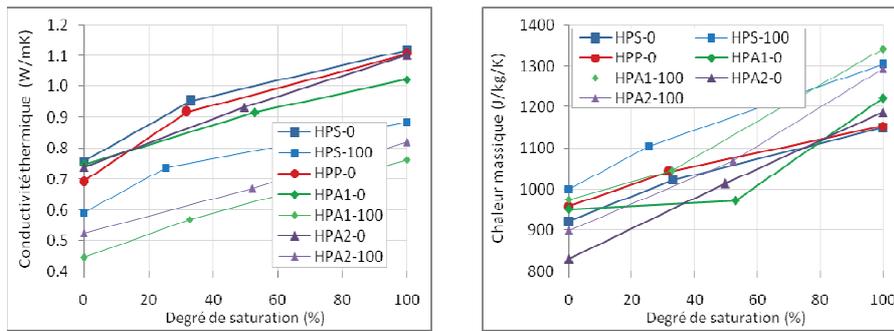


**Figure 1.** Conductivité thermique (a) et chaleur massique (b) en fonction de la masse volumique sèche des bétons légers.

En revanche, lorsque la fraction de sable léger s'accroît, la chaleur massique des bétons de granulats légers augmente. En effet, la conduction dans un matériau poreux est résulte de celle du solide et de celle des pores interconnectés, sachant que la conductivité du squelette est plus grande que celle de l'air [Kaviany, 1995]. L'accroissement du volume de sable léger entraîne une augmentation du volume des pores dans le granulat, donc dans le béton. En conséquence, dans un matériau plus poreux, la surface de conduction du solide diminue et celle de l'air augmente. Or le flux thermique est proportionnel à la surface de conduction. Il faut ainsi plus d'énergie (chaleur massique plus élevée) pour augmenter la température d'un béton plus poreux.

### 3.2. Evolution des propriétés thermiques en fonction du degré de saturation

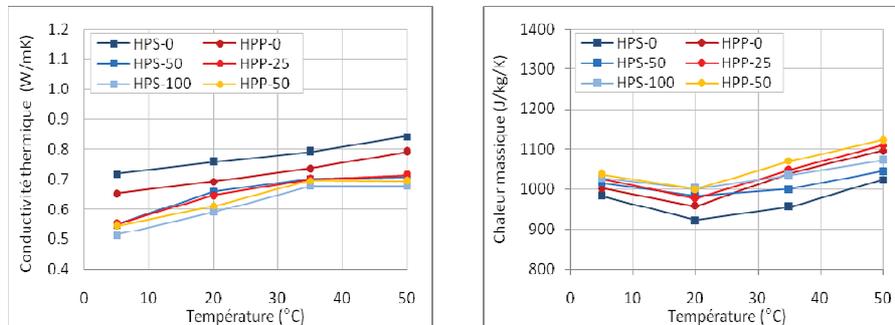
L'influence du degré de saturation du béton sur ses propriétés thermiques est présentée dans la figure 2. La valeur intermédiaire est obtenue en conservant l'échantillon sous HR=50% et T=20°C jusqu'à l'équilibre hydrique. Le gain massique d'eau suite à la condensation de la vapeur d'eau dans le béton dans l'enceinte climatique (HR=50%) varie respectivement entre 3,8 et 6,5% ce qui correspond à un degré de saturation de 25 à 53% selon les bétons. Sachant que la conductivité thermique et la chaleur spécifique de l'eau sont supérieures à celles de l'air, la conductivité thermique et la chaleur massique des bétons de granulats légers s'accroissent logiquement avec l'augmentation du degré de saturation. La variation des propriétés thermiques en fonction du degré de saturation est plutôt linéaire : la conductivité thermique et la chaleur massique augmentent respectivement de 37 à 70% et de 20 à 44%, selon les compositions.



**Figure 2.** Conductivité thermique (a) et chaleur massique (b) en fonction du degré de saturation des bétons légers.

### 3.3. Evolution des propriétés thermiques entre 5 et 50°C

Nous présentons dans la figure 3 l'évolution des propriétés thermiques des bétons de granulats légers en fonction de la température. Cette relation sera expliquée dans le paragraphe ci-dessous. Lorsque la température s'élève de 5 à 50°C, la conductivité thermique augmente de 17 à 31% selon les types de béton. L'augmentation de la conductivité thermique est 1,5 fois plus importante pour les bétons contenant du sable léger ; elle atteint une valeur maximum autour de 35-50°C. Pour toutes les formulations de béton, la chaleur massique diminue jusqu'à une valeur minimale lorsque la température varie de 5 à 20°C, puis elle remonte avec l'accroissement de la température jusqu'à 50°C. La chaleur massique présente une augmentation de 7 à 14% suivant les différents bétons.

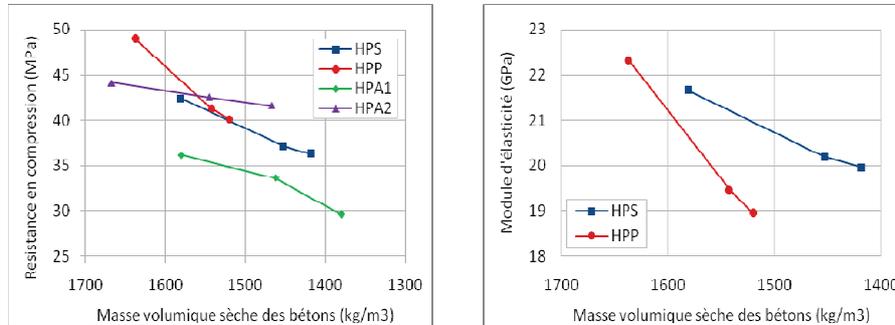


**Figure 3.** Evolution de la conductivité thermique (a) et de la chaleur massique (b) du béton de granulat léger avec la température

La variation de la conductivité thermique peut être expliquée par la quantité d'eau incluse dans le béton [Maréchal, 1970]. En fait, dans le béton séché en étuve, il reste encore de l'eau piégée dans les pores fermés et de l'eau hydratée liée aux particules du squelette. La partie croissante de la courbe correspond à l'augmentation de la conductivité thermique de l'eau piégée qui accroît ainsi la conductivité thermique du matériau. Le maximum correspond à la diminution du nombre de liaisons conductrices par décomposition des hydrates et la désorption de l'eau hydratée dans le béton. Ochs [Ochs, 2008] avance une autre explication pour ce phénomène : la conductivité thermique du matériau poreux est liée à celle du solide et de l'air contenu dans les pores. La conductivité thermique des pores est gouvernée par la conduction de l'air et par le rayonnement. La conductivité thermique engendrée par le rayonnement varie en fonction de la puissance cubique de la température  $T^3$ , cependant, entre 5 et 50°C, cette conductivité thermique augmente linéairement avec la température.

#### 3.4. Propriétés mécaniques en fonction de la composition

En substituant le sable alluvionnaire par des sables légers, la porosité du béton augmente et sa masse volumique sèche (échantillon séché en étuve) diminue de 7,7 à 14,5% selon la nature des sables légers. Avec 100% de substitution du sable, les valeurs de masse volumique sèche diminuent jusqu'à 1380-1467 kg/m<sup>3</sup> selon les granulats. Cela conduit à une perte de résistance en compression de 5,7 à 18,2% selon les bétons (figure 4a) et à une perte du module d'élasticité entre 6,9 et 19,6% (figure 4b). A l'exception du béton d'argile HPA1-100, les résistances en compression des autres formulations restent supérieures à 30 MPa. Nous constatons également que pour une même masse volumique, le volume et la nature des granulats influencent les propriétés mécaniques des bétons.



**Figure 4.** Evolution de la résistance en compression (a) et du module d'élasticité (b) en fonction de la masse volumique sèche des bétons légers.

#### 4. Conclusion

Jusqu'à présent, la plupart des bétons de granulats légers de structure étaient constitués de graviers légers et de sable naturel de densité normale. Cette étude montre que l'utilisation du sable léger permet d'améliorer le pouvoir isolant de ces bétons tout en conservant des performances mécaniques compatibles avec une utilisation dans des éléments de structure.

L'utilisation d'une matrice de hautes performances permet de conserver des résistances comprises entre 30 et 40 MPa pour des masses volumiques sèches de béton comprises entre 1350 kg/m<sup>3</sup> et 1500 kg/m<sup>3</sup>. Le module d'élasticité des bétons de granulats légers reste autour de 20 GPa, ce qui reste suffisant pour un béton de structure.

Les conductivités thermiques des bétons de granulats légers sont beaucoup plus faibles que celles des bétons de granulats ordinaires ; les mesures sur du béton sec montrent qu'elles chutent à une valeur comprise entre 0,44 et 0,6 W/mK. Cependant, elles augmentent avec la température et le degré de saturation, réduisant alors le pouvoir isolant du béton léger. La chaleur massique du béton de granulats légers s'accroît avec l'augmentation du taux de substitution du sable, de la teneur en eau et de la température (entre 20 et 50°C). Ceci conduit aussi à une plus grande capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur, donc à une meilleure performance thermique.

## 5. Bibliographie

- ACI 213R-03, *Guide for structural lightweight-aggregate concrete*, Reported by American Concrete Institute Committee 213, 2003.
- Arnould M., Virlogeux M., *Granulats et bétons légers*, Paris, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1986.
- Cavaleri L., Miraglia N., Papia M., « Pumice concrete for structural wall panels », *Engineering structure*, vol. 25, 2003, p. 115-125.
- Chen B., Liu J., « Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability », *Construction and Building Materials*, vol. 22, 2008, p. 655-659.
- Gustafsson S.E., « Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials », *Review of Science Instruments*, vol. 62, 1991, p. 797-804.
- Gunduz L., Ugur I., « The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, 2005, p. 1859-1864.
- Kaviany M., *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, 2th edition, New York, Springer, 1995.
- Ke Y., Beaucour A. L., Ortola S., Dumontet H., « Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregate concrete on the mechanical properties of concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, p. 2821-2828.
- Ke Y., Ortola S., Beaucour A. L., Dumontet H., « Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modeling including the interfacial transition zone (ITZ) », *Cement and Concrete Research*, vol. 40, 2010, p. 1590-1600.
- Maréchal J.C., Contribution à l'étude des propriétés thermiques et mécaniques du béton en fonction de la température, Annale n° 274 , octobre 1970, Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.
- Ochs F., Heidemann W., Müller-stenhagen H., « Effective of thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, 2008, p. 539-552.