

Liège, Belgique  
7-8 Novembre 2018

## **INFLUENCE DES GRANULATS LÉGERS SUR LE COMPORTEMENT À HAUTE TEMPÉRATURE DES BÉTONS DE STRUCTURE**

ROUFAEL Georges<sup>A</sup>, ESLAMI Javad<sup>A</sup>, BEAUCOUR Anne-Lise<sup>A</sup>, HOXHA Dashnor<sup>B</sup>, NOUMOWE Albert<sup>A</sup>

A Université de Cergy-Pontoise, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, 5 Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex, France

B Université d'Orléans, Université de Tours, INSA Centre Val de Loire Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé Polytech Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans, France

**Résumé** : Les incendies restent une menace majeure pour les structures de génie civil. Il est donc primordial de comprendre le comportement des matériaux soumis à haute température, afin d'assurer une conception et un dimensionnement plus sûrs des constructions. Ce travail de recherche s'intéresse à la tenue à haute température des bétons répondant à des exigences environnementales (RT 2012), notamment les bétons de granulats légers. Afin de savoir si le comportement à haute température de ces bétons structuraux à propriétés isolantes s'écarte de celui des bétons de granulats ordinaires, quatre formulations sont étudiées dans ce travail, dont deux bétons avec de l'argile expansée, un béton de référence avec du calcaire noir et un mortier. Les trois formulations de béton ont la même matrice cimentaire (ciment, eau, sable silico-calcaire) et la même fraction volumique de gravillons tandis que le mortier a la même formulation que la matrice cimentaire des trois bétons. Il est ainsi possible d'identifier et d'isoler les comportements exclusifs des gravillons légers. L'évolution du coefficient de dilatation thermique des différents bétons est mesurée au cours du chauffage jusqu'à 1050°C puis lors du refroidissement. L'étude de l'évolution des paramètres de transfert de masse avec la température s'effectue par le suivi des pertes de masse et par des mesures de porosité et perméabilité aux différents paliers de température. Ces mesures sont couplées à des observations de l'endommagement physique et des différents chemins de fissuration, menées à plusieurs échelles à l'aide des microscopes optique et électronique. Enfin, les mesures après chauffage et pour différents paliers de température des résistances à la compression et à la traction, de la courbe contrainte-déformation ainsi que le calcul du module d'élasticité et du coefficient de Poisson permettent d'analyser l'influence de la nature des granulats sur la perte des performances mécaniques en fonction de la température.

**Mots-clés** : béton léger, granulats légers, haute température, déformation thermique, propriété mécanique résiduelle, fissuration

---

## 1. INTRODUCTION

Les premiers granulats légers utilisés dans la construction par les romains étaient des granulats naturels issus des roches volcaniques, comme la pierre ponce. Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, d'autres types de granulats légers ont été fabriqués en utilisant des matières premières naturelles comme l'argile, le schiste et l'ardoise. En raison de sa faible masse volumique, le béton léger est utilisé dans la construction de stades, de ponts à grandes portées et même de plates-formes offshore. D'autre part, ce type de béton peut être utilisé pour répondre aux enjeux environnementaux du XXI<sup>ème</sup> siècle en optimisant la consommation énergétique dans le bâtiment grâce à ses propriétés thermiques isolantes. Ce travail de recherche constitue une suite des travaux de (Ke et al. 2014) et (Nguyen et al. 2014) réalisés au Laboratoire de Mécanique et Matériaux de génie civil (L2MGC). Il s'intéresse à la tenue à haute température des bétons de granulats légers notamment en argile expansée afin d'assurer une conception et un dimensionnement plus sûrs des constructions. Les travaux de recherche déjà réalisés sur ce sujet ont concerné la sensibilité de ces types de béton vis-à-vis de l'écaillage (Lindgård and Hammer 2008) ou la résistance mécanique après un feu standard ISO 834 (Bodnárová et al. 2014). Ce travail s'intéresse plutôt à l'évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques, physiques et thermomécaniques en fonction de la température.

## 2. FORMULATION DES MATÉRIAUX ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Afin de savoir si le comportement à haute température de ces bétons structuraux à propriétés isolantes s'écarte de celui des bétons de granulats ordinaires, quatre formulations sont étudiées, dont deux bétons avec de l'argile expansée (AM et AR), un béton de référence avec du calcaire noir (BR) et un mortier. Deux granulats d'argile expansée sont étudiés, ayant des masses volumiques réelles différentes, 824 kg/m<sup>3</sup> pour l'un (AR-550) et 1270 kg/m<sup>3</sup> pour l'autre (AM-650), déterminées suivant la norme EN 1097-6 (Tab.1). Les trois formulations de béton (Tab.2) ont la même matrice cimentaire (E/C=0.45) et la même fraction volumique de gravillons (37%) tandis que le mortier a la même formulation que la matrice cimentaire des trois bétons.

Tableau 1. Propriétés des granulats

Gravillons	Masse volumique réelle sèche [kg/m <sup>3</sup> ]	Masse volumique saturée surface sèche [kg/m <sup>3</sup> ]	Masse volumique absolue [kg/m <sup>3</sup> ]	Absorption à 48 h [%]	Porosité ouverte* [%]	Porosité totale [%]	Classe granulaire	Nature
Sable SC	2570	-	-	1	0.026	-	0/4	Silico-calcaire
AM4/8-650	1270	1583	1848	24.6	40.2	65.1	4/8	Argile expansée
AR4/10-550	824	1169	1258	28	34.5	77.3	4/10	Argile expansée
Calcaire noir	2710	-	-	0.51	0.014	-	4/10	Calcaire

\*Calculée après immersion de 1 mois

Tableau 2. Formulation pour 1 m<sup>3</sup> de béton

Béton	Ciment [kg]	Eau efficace [kg]	Gravillon saturé surface sèche [kg]	Sable [kg]	Superplastifiant [kg]	Masse volumique frais [kg/m <sup>3</sup> ]	Affaissement [mm]	fc 28 [MPa]
AM	426	192	585	777	-	1980	65	45
AR	426	192	369	777	-	1764	70	30
BR	426	192	1002	777	1	2397	70	45
Mortier	676	304	-	1233	-	2213	-	60

Il est ainsi possible d'identifier et d'isoler les comportements exclusifs des gravillons légers. Les gravillons légers ont été saturés pendant 48h avant la fabrication des bétons afin de contrôler leur absorption d'eau. La matrice cimentaire est constituée du ciment Calcia CEM I 52.5N et d'un sable silico-calcaire de classe

granulaire 0/4 mm. Le ciment a une masse volumique de 3140 Kg/m<sup>3</sup> et contient 97 % de clinker et 3% de constituant secondaire. L'argile expansée AR et le calcaire noir sont d'une classe granulaire 4/10 mm tandis que l'argile expansée AM est de classe 4/8 mm. Les bétons testés ont des résistances à la compression à 28 jours variant entre 30 MPa pour AR et 45 MPa pour AM et BR pour des masses volumiques sèches respectives de 1650, 1850 et 2260 Kg/m<sup>3</sup>. Les éprouvettes ont été stockées dans des sacs en plastique et des chiffons humides pendant 90 jours. Les différents essais mécaniques et physiques ont été réalisés après un chauffage à 1°C/min suivi d'un palier isotherme de 2 heures (150°C, 300°C, 450°C et 600°C), afin d'assurer une répartition homogène de la température à l'intérieur de l'échantillon (Figure 1).

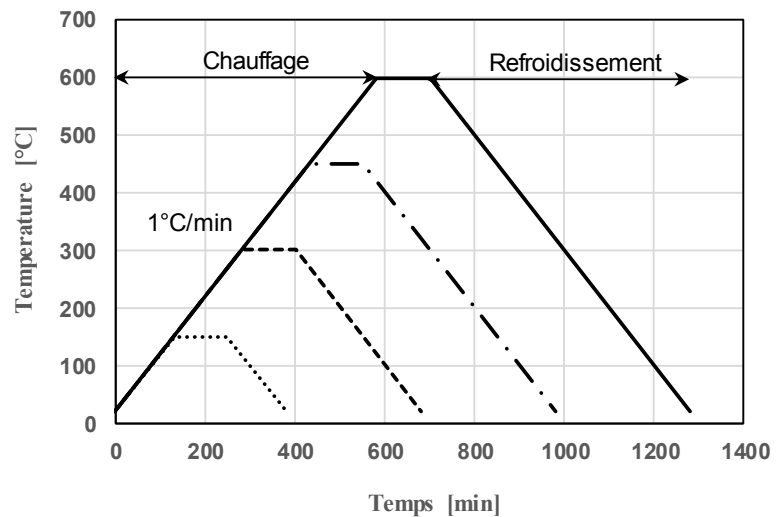


Figure 1. Le four CMT (700°C) et le cycle de chauffage-refroidissement des différents paliers de température

La perte de masse a été déterminée sur une moyenne de 6 éprouvettes 11Φ22 cm selon l'équation suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{(M_1 - M_2) \times 100}{M_1} \quad (1)$$

Où  $M_1$  est la masse avant le chauffage et  $M_2$  la masse après le chauffage.

Les mesures de la masse volumique et de la porosité accessible à l'eau sont réalisées suivant la norme NF P 18-459. L'essai a été réalisé sur quatre échantillons pour chaque type de béton. Pour les caractérisations à température ambiante, les échantillons ont été séchés dans l'étuve à 80°C jusqu'à masse constante. Les échantillons exposés à haute température sont testés aussitôt après les cycles de chauffage/refroidissement.

La perméabilité au gaz (azote) des bétons a été mesurée sur des disques de 15 cm de diamètre et 5 cm d'épaisseur en utilisant un dispositif Cembureau (Kollek 1989). Pour chaque palier de température, 2 échantillons ont été testés. Afin d'obtenir la perméabilité intrinsèque  $K_{int}$ , l'approche de Klinkenberg (Klinkenberg 1941) a été adoptée en appliquant chaque fois 4 à 5 pressions d'injection différentes.

La vitesse des ondes P est mesurée sur des échantillons cylindriques 11Φ22 cm, à l'aide d'un Pundit. (Figure 2). Le module d'Young dynamique est ensuite calculé en utilisant les équations suivantes :

$$V_p = \frac{L}{t} \quad (2)$$

$$E_d = \frac{V_p^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3)$$

Où  $L$  est la longueur du matériau traversé (m) ;  $t$  le temps de propagation des ondes (s) ;  $\nu$  le coefficient de Poisson à la température correspondante ;  $\rho$  la masse volumique du matériau à la température

correspondante ( $\text{Kg/m}^3$ );  $V_p$  la vitesse de propagation des ondes (m/s) et  $E_{\text{dyn}}$  le module d'Young dynamique.



Figure 2. Dispositif de mesure des vitesses des ondes

Les essais de compression uniaxiale et fendage sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques selon les normes respectives NF EN 12390-3 et NF EN12390-6. Certains échantillons sont équipés avec des jauges de déformation de façon à déterminer les modules élastiques statiques conformément à la norme EN 12390-13. Deux jauges sont collées en position axiale et deux autres en position transversale.

Les mesures de la déformation et de la dilatation thermique ont été effectuées sur des échantillons cylindriques de diamètre 10 mm et de hauteur 50 mm carottés sur des éprouvettes 15 $\Phi$ 30 cm et 11 $\Phi$ 22 cm, en utilisant le dilatomètre DIL 402-PC (Figure 3). Tous les échantillons ont été séchés dans l'étuve à 80°C avant les tests pour s'assurer d'avoir éliminé toute humidité qui pourrait influencer l'essai. Le test a été réalisé pour chaque type de béton sur trois échantillons différents afin de vérifier la répétabilité du test. Après avoir mesuré la longueur initiale et calibré le dispositif, les échantillons ont été chauffés à une vitesse de 4°C/min de 20°C jusqu'à 1050°C puis ont été refroidis naturellement jusqu'à la température ambiante.

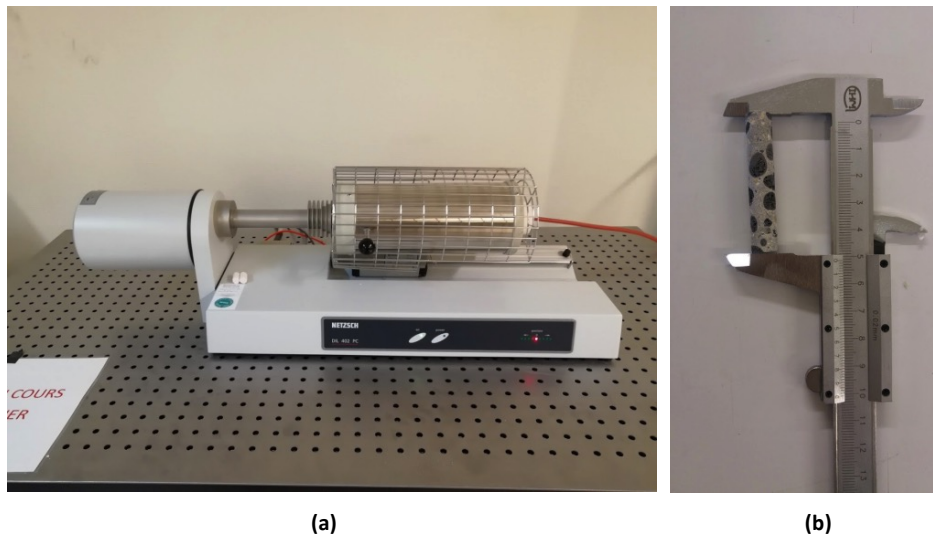


Figure 3. Dispositif DIL 402-PC (a) et exemple d'échantillon utilisé (b)

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1 Déformation thermique au cours du cycle chauffage/refroidissement

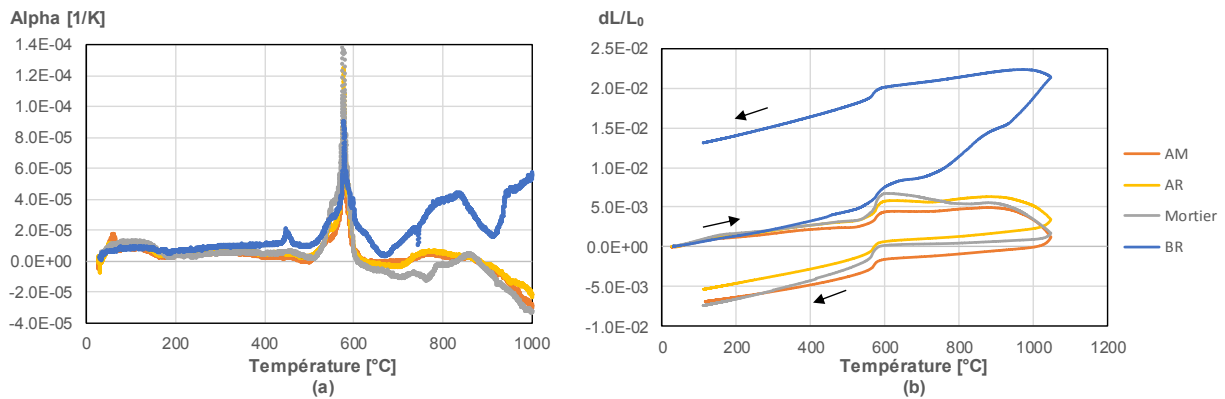


Figure 4. Évolution du coefficient de dilatation thermique (a) et de la déformation (b) en fonction de la température

Les valeurs de la Figure.4 représentent la moyenne sur 3 échantillons pour chaque béton. Il n'y a pas eu de variation importante d'un test à un autre. Malgré le peu de différence entre le diamètre de l'échantillon et la taille maximale du granulat, on peut ainsi considérer que le résultat mesuré est représentatif du matériau. De 20°C à 570°C, la déformation augmente presque linéairement avec la température pour l'ensemble des bétons jusqu'à une valeur de 0,4% pour les bétons légers et le mortier et de 0.5% pour BR (Figure 4b). D'autre part, le coefficient de dilatation thermique est plus ou moins stable jusqu'à cette température. Il varie entre 5 E-06 et 1 E-05 1/K pour AM, AR et le Mortier, et entre 1 E-05 et 1.5 E-05 pour BR. A 570°C, on constate une augmentation importante de la déformation, qui est due au changement de la phase  $\alpha$  du quartz en phase  $\beta$  (Carpenter et al. 1998) qui se traduit par un pic du coefficient de dilatation thermique qui atteint 1.4 E-04 1/K (Figure 4a). Après 600°C, la déformation se stabilise à 0,5% puis commence à diminuer pour les bétons légers et le mortier, tandis qu'elle continue à augmenter pour le BR pour atteindre 2% à 1000°C. Cela peut être expliqué par la décarbonatation des gravillons de calcaire, à l'origine de fissure générant une déformation irréversible. En général, une plus forte dilatation du béton de calcaire par rapport au béton léger est constatée. Ce dernier subit une dilatation similaire à celle du mortier laissant supposer une compatibilité de déformation thermique entre le mortier et les granulats légers.

#### 3.2 Étude des propriétés physiques résiduelles et de la fissuration

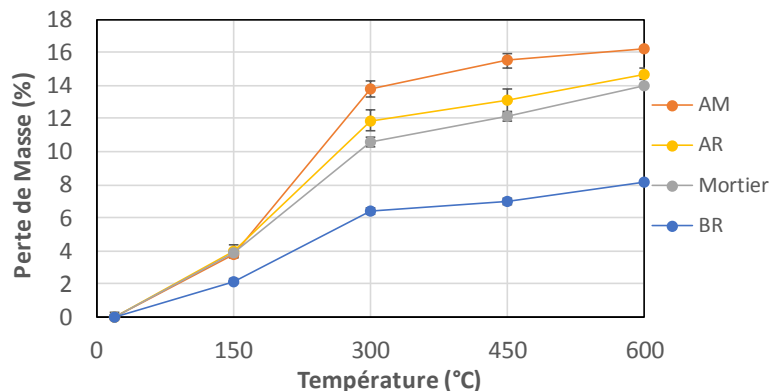
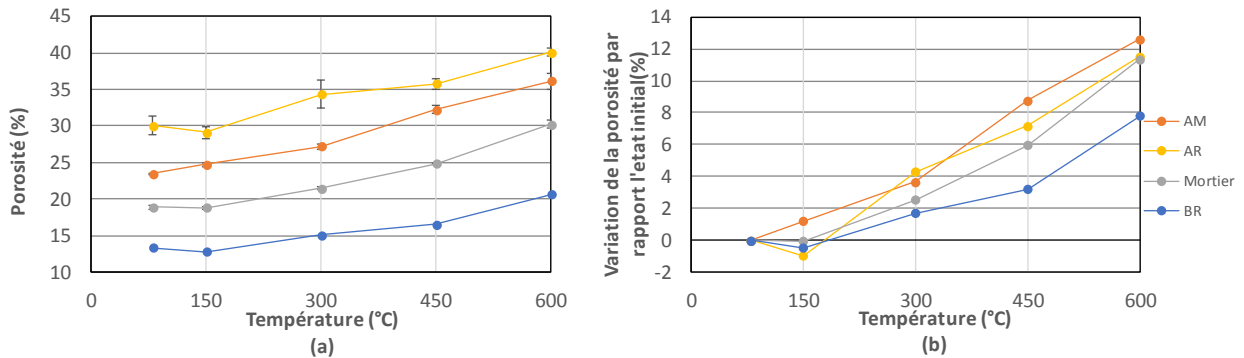
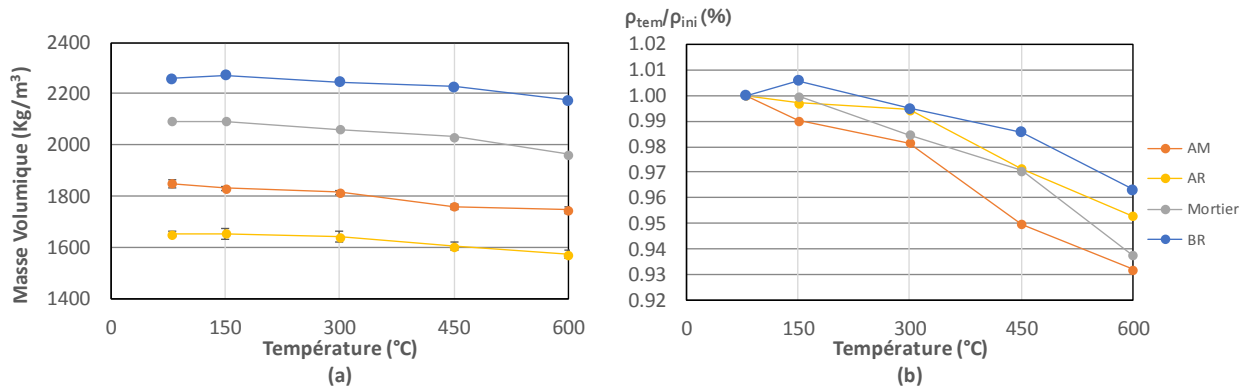


Figure 5. Évolution de la perte de masse en fonction de la température

Les courbes de perte de masse montrent une même tendance pour tous les bétons (Figure 5). Une perte de masse importante jusqu'à 300°C suivie d'une augmentation légère jusqu'à 600°C. Jusqu'à 300°C, cette perte de masse est liée au départ de l'eau libre et à la déshydratation des CSH et de l'ettringite. Comme les gravillons légers ont été saturés pendant 48 heures avant la fabrication du béton, la quantité d'eau totale est plus élevée et par conséquent, la perte de masse dans les bétons légers est plus importante, 14.5% et 16 % respectivement pour AR et AM à 600°C. Le mortier subit une perte de 14% plus élevée que la perte de 8% du béton de référence. La différence entre le mortier et le béton de référence s'explique par la plus grande fraction volumique de pâte cimentaire dans le mortier.



**Figure 6.** Évolution de la porosité, valeurs absolues (a) et valeurs différentielles (b) en fonction de la température



**Figure 7.** Évolution de la masse volumique sèche (a) et la masse volumique sèche relative (b) en fonction de la température

Les courbes d'évolution de la porosité en fonction de la température sont présentées sur la Figure 6. Il n'y a pas de variation significative jusqu'à 150°C. A 300°C, une augmentation de 2 % à 4 % est constatée. Par la suite, la porosité continue à augmenter pour atteindre à 600°C les valeurs respectives de 8 %, 11,5%, 11,5% 12,5% pour BR, AR, le Mortier et AM. L'augmentation de la porosité dans les bétons légers est supérieure d'environ 4 % à celle du béton de référence. Ceci serait lié à la création des fissures dans les gravillons (Figure 10), donnant accès à de nouveaux pores. L'augmentation supplémentaire de 4 % de la porosité du mortier par rapport à celle du BR correspond au taux élevé de silice et de Quartz qui se dilate créant des fissures radiales dans la matrice. En ce qui concerne la masse volumique, les bétons perdent à 600°C de 3.6% à 7 % de leur masse volumique initiale sèche, AM étant le plus affecté suivi respectivement par le mortier, AR et BR. Les résultats des mesures de perméabilité représentés sur la Figure 8a, montrent que le béton de référence et le mortier sont moins perméables que les bétons légers à 150°C. A 300°C, les perméabilités du béton de référence et du mortier sont multipliées par 10 et rejoignent celles des bétons légers qui elles ne subissent qu'une très légère augmentation. A 600°C,

l'augmentation de la perméabilité pour le béton de référence et le mortier ( $10^{-12} \text{ m}^2$ ) est plus importante que pour les bétons légers ( $10^{-15} \text{ m}^2 < K_{\text{int}} < 10^{-14} \text{ m}^2$ ). Selon les travaux de (Carré et al. 2016) la perméabilité du béton ordinaire augmente jusqu'à  $10^{-13} \text{ m}^2$  à  $600^\circ\text{C}$ , ce qui est plus élevé que  $10^{-14} \text{ m}^2$  mesuré pour les bétons légers.

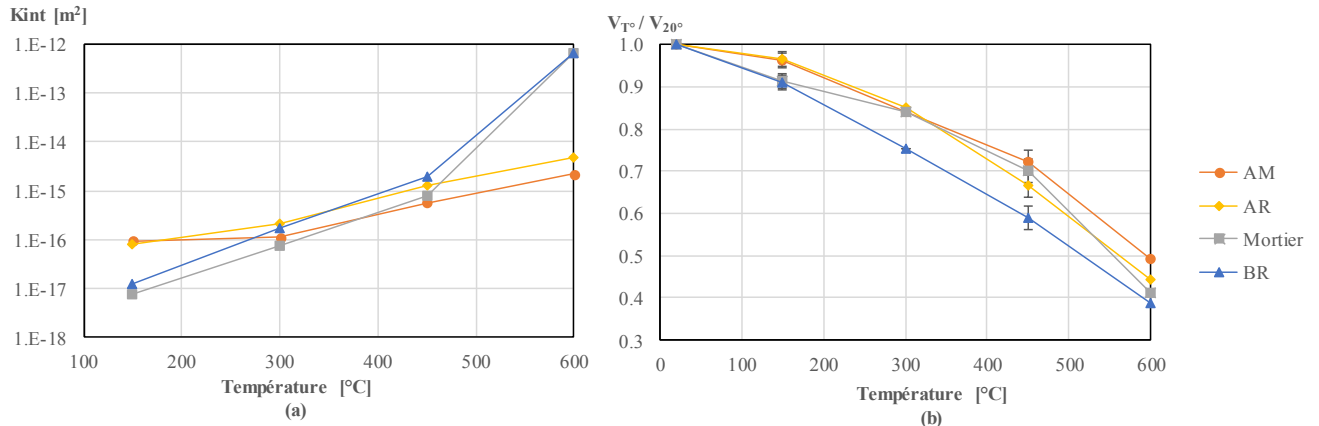


Figure 8. Évolution de la perméabilité(a) et la vitesse des ondes(b) des bétons en fonction de la température

L'évolution relative des vitesses d'ondes est similaire à celle de la perméabilité, avec une dégradation plus précoce et plus importante du béton de référence avec la température (Figure 8b). Le mortier se comporte comme les bétons légers jusqu'à  $450^\circ\text{C}$ . Après cette température, le mortier subit une chute de vitesse d'ondes importante couplée à une augmentation de porosité (Figure 6b). A  $600^\circ\text{C}$ , la vitesse d'ondes de BR diminue de 60% et seulement de 50% et 45% mesurés pour les 2 bétons légers.

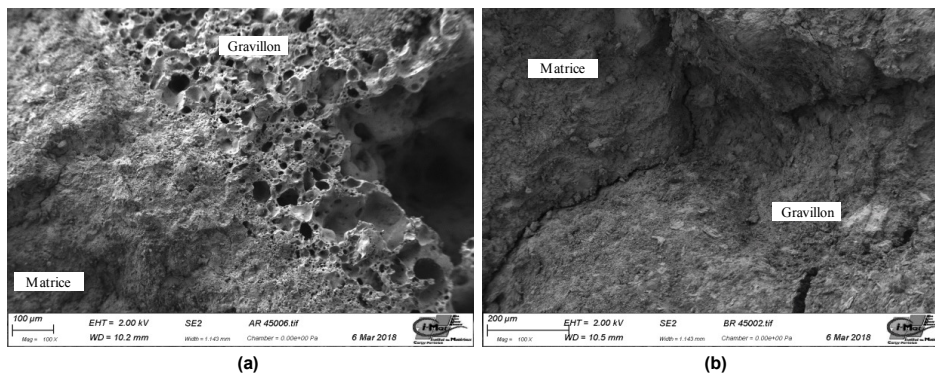


Figure 9. Interface pâte-granulat de AR (a) et BR (b) chauffé à  $450^\circ\text{C}$  et observée au MEB

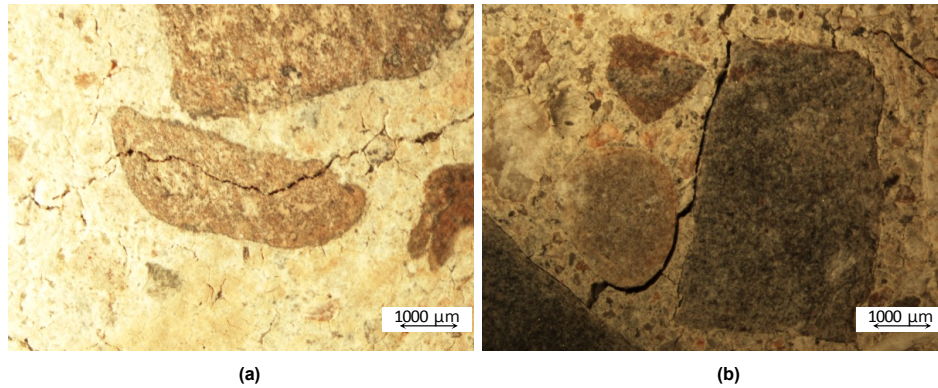


Figure 10. Fissures dans les bétons AM (a) et BR (b) chauffés à 600°C

Afin de comprendre l'origine de l'augmentation de perméabilité, les mesures précédentes ont été couplées à des observations au microscope optique et au microscope électronique à balayage. Il a été constaté que l'interface pâte-granulat est plus dégradée à 450°C pour le béton de référence que pour les bétons légers (Figure 9). De plus, l'observation à l'œil nu et au microscope optique des bétons chauffés à 600°C (Figure 10) montre que la majorité des fissures dans les bétons légers sont transgranulaires tandis que les fissures dans le béton de référence passent dans la zone interfaciale entre la pâte et le granulat. Ceci peut être expliqué par une liaison pâte-granulat plus résistante avec les granulats légers poreux qu'avec les granulats calcaires (Ke et al. 2014) et une meilleure compatibilité de déformation thermique entre la pâte et le granulat (Figure 4b). Malgré une augmentation plus importante de la porosité pour AM et AR, on ne constate pas la même tendance pour la perméabilité et donc les nouveaux pores accessibles sont plutôt des pores intra-granulaires qui ne participent pas aux processus de transfert.

### 3.3 Propriétés mécaniques résiduelles

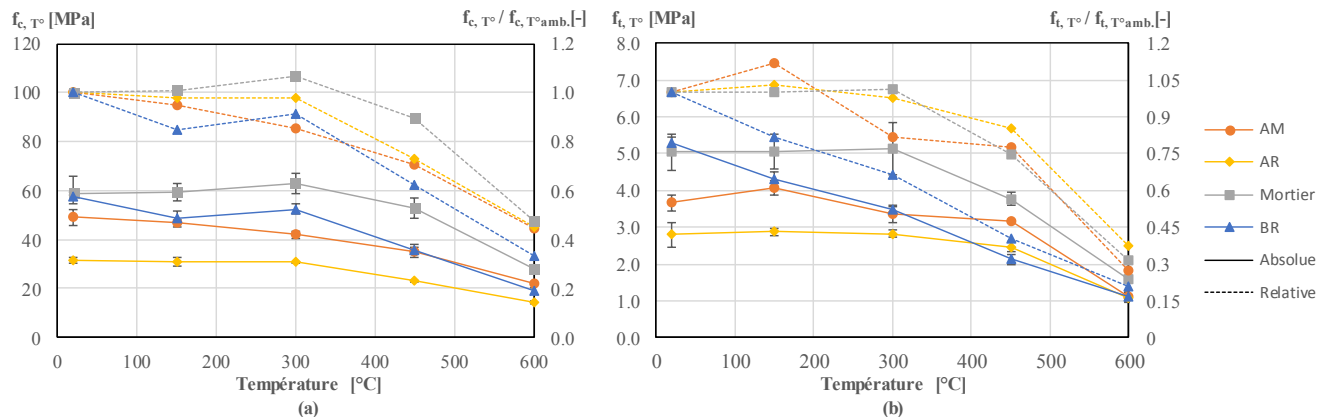


Figure 11. Évolution des résistances résiduelles absolues et relatives en compression (a) et en traction par fendage (b) des bétons en fonction de la température

Jusqu'à 300°C, on note une faible perte de résistance en compression résiduelle pour l'ensemble des bétons (Figure 11a) avec un comportement typique du béton de référence où il perd à 150°C puis regagne une partie de sa résistance à 300°C (Dias, Khoury, and Sullivan 1990; Fares et al. 2010). Au-delà, la résistance diminue rapidement pour tous les bétons mais d'une manière plus modérée pour les bétons légers que pour le béton de référence. Les bétons AM et AR perdent 50 % de leur résistance en compression, soit 20% moins que le béton de référence.



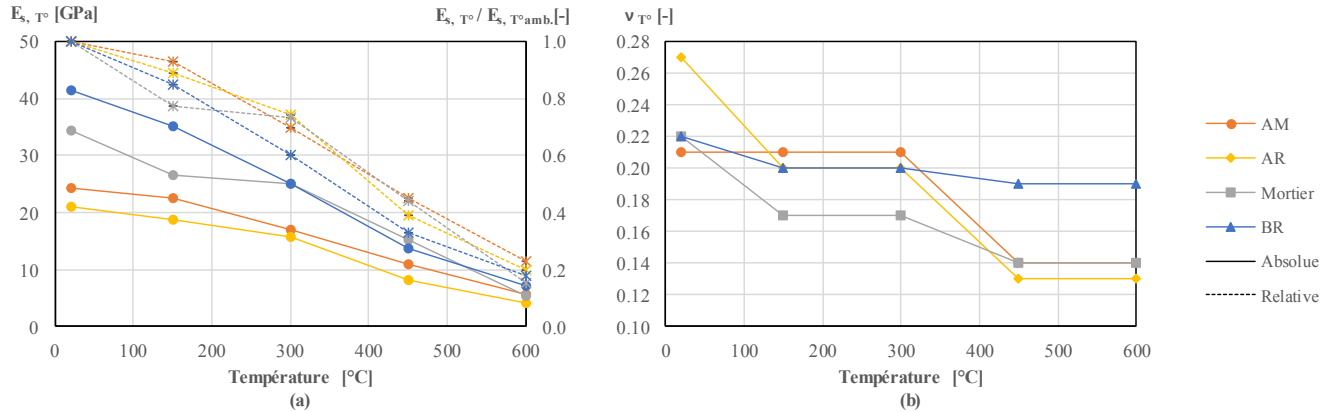


Figure 12. Evolution du module d'Young statique résiduel (a) et du coefficient de Poisson résiduel (b) des bétons en fonction de la température

La différence de comportement entre les bétons légers et le béton de granulats calcaires est encore plus notable avec l'évolution de la résistance à la traction (Figure 11b). Contrairement au béton de référence dont la résistance en traction diminue quasi linéairement avec la température, les bétons légers et le mortier ne montrent à 450°C qu'une faible perte de résistance d'environ 20%, tandis que BR a perdu plus de 60% de sa résistance initiale. Cela peut s'expliquer par la bonne résistance de l'interface pâte-granulat léger (Figures 9 & 10) lors de la sollicitation thermique liée à une auréole de transition moins poreuse et une plus faible dilatation thermique des granulats légers par rapport aux granulats calcaires (Figure 4). Le module d'Young statique diminue plus linéairement avec la température que les résistances à la rupture. La perte de module statique est moins importante pour les bétons de granulats légers et le mortier que pour le béton de référence, notamment entre 150 et 450°C. Des tendances et des pertes similaires de résistances mécaniques ont été constatées par (Toric et al. 2016). D'autre part, le coefficient de Poisson subit une chute importante après 300°C pour les bétons légers tandis que celui du béton de référence subit une diminution légère sans être trop affectée par la température. Cette chute du coefficient de Poisson est due à l'écrasement des gravillons légers créant des déformations axiales importantes qui se traduit par une diminution de ce coefficient.

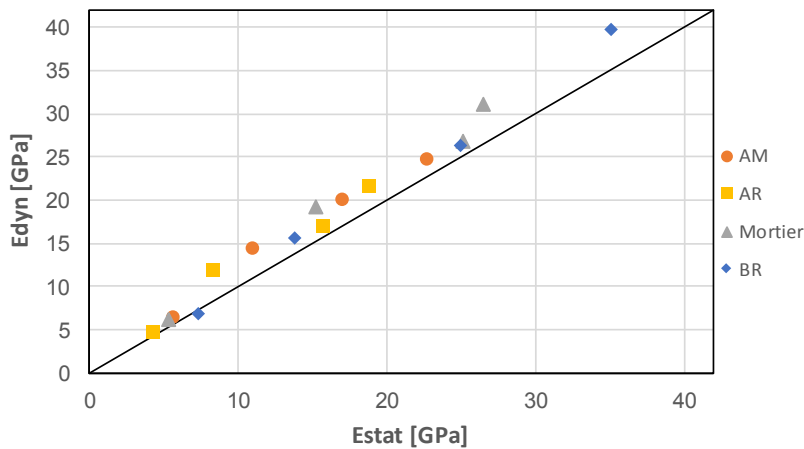


Figure 13. Comparaison entre module d'Young dynamique et statique pour différents paliers de température

La comparaison du module dynamique avec le module statique pour les différents paliers de température montre que les modules sont très proches voire identiques pour le palier à 600°C. Le module dynamique est un peu plus élevé que le module statique de 1 à 2 GPa pour les autres paliers. Globalement, la méthode des vitesses des ondes traduit avec une précision satisfaisante l'évolution du module d'Young en fonction de la température.

#### 4. CONCLUSION

A une vitesse de chauffage lente, 1°C/min, les effets hydriques et les gradients thermiques ont été réduits dans les éprouvettes de bétons et mortier chauffées. Dans ces conditions, les bétons légers étudiés ont montré une perte de résistance, de module d'Young et de perméabilité plus modérée que le béton de granulats calcaires de référence. D'autre part, les observations au MEB et au microscope optique ont montré une répartition et un chemin de fissuration différents selon la nature des granulats : intergranulaire pour les bétons de granulats calcaires et transgranulaire pour les bétons d'argile expansée. Les bétons de granulats légers ont présenté à partir de 400°C une plus faible dilatation thermique que le béton de référence. La dilatation du mortier constitutif de la matrice des bétons était similaire à celle des bétons de granulats légers ce qui témoigne d'une bonne compatibilité de déformation entre le mortier et les granulats légers.

#### 4. REMERCIEMENT

Les auteurs remercient la société ARGEX NV pour son support matériel.

#### 5. RÉFÉRENCES

- Bodnárová, Lenka, Rudolf Hela, Michala Hubertová, and Iveta Nováková. 2014. "Behaviour of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete Exposed to High Temperatures" 8 (12): 1151–54.
- Carpenter, Michael A., Ekhard K.H. Salje, Ann Graeme-Barber, Martin T. Dove, and Kevin S. Knight. 1998. "Calibration of Excess Thermodynamic Properties and Elastic Constant Variations Associated with the  $\alpha \leftrightarrow \beta$  Phase Transition in Quartz." *American Mineralogist* 83 (1): 2–22. <https://doi.org/10.2138/AM-1998-0101>.
- Carré, Hélène, Céline Perlot, Atef Daoud, Md Jihad Miah, and Bassem Aidi. 2016. "Durability of Ordinary Concrete after Heating at High Temperature." *Key Engineering Materials* 711 (September): 428–35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.711.428>.
- Dias, W. P. S., Gabriel.A. Khoury, and Patrick.J.E Sullivan. 1990. "Shrinkage of Hardened Cement Paste at Temperatures up to 670 C (1238 F)." *ACI Materials Journal* 87 (87): 204–9. <https://doi.org/10.14359/1981>.
- Fares, Hanaa, Sébastien Remond, Albert Noumowe, and Annelise Cousture. 2010. "High Temperature Behaviour of Self-Consolidating Concrete. Microstructure and Physicochemical Properties." *Cement and Concrete Research* 40 (3): 488–96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.006>.
- Ke, Y., S. Ortola, A.L. Beaucour, and H. Dumontet. 2014. "Micro-Stress Analysis and Identification of Lightweight Aggregate's Failure Strength by Micromechanical Modeling." *Mechanics of Materials* 68 (January): 176–92. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2013.09.005>.
- Klinkenberg, L J. 1941. "The Permeability Of Porous Media To Liquids And Gases." *Drilling and Production Practice*. New York, New York: American Petroleum Institute.
- Kollek, J. J. 1989. "The Determination of the Permeability of Concrete to Oxygen by the Cembureau Method—a Recommendation." *Materials and Structures* 22 (3): 225–30. <https://doi.org/10.1007/BF02472192>.
- Lindgård, Jan, and Tor Arne Hammer. 2008. "Fire Resistance of Structural Lightweight Aggregate Concrete a Literature Survey with Focus on Spalling." In *In: Fourth International Conference on Advances in Concrete Technology. Proceedings. ACI – American Concrete Institute*.
- Nguyen, L.H., A.-L. Beaucour, S. Ortola, and A. Noumowé. 2014. "Influence of the Volume Fraction and the Nature of Fine Lightweight Aggregates on the Thermal and Mechanical Properties of Structural Concrete." *Construction and Building Materials* 51 (January): 121–32. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.019>.
- Torić, Neno, Ivica Boko, Sandra Juradin, and Goran Baloević. 2016. "Mechanical Properties of Lightweight Concrete after Fire Exposure." *Structural Concrete* 17 (6): 1071–81. <https://doi.org/10.1002/suco.201500145>.