



HAL
open science

Valorisation de déchets d'incinérateur : Caractérisation expérimentale des performances thermique et mécanique de béton de granulats carbonatés

Imen Rahmouni, Geoffrey Promis, Hassen Beji, Abdelhamid Rmili, Oualid Limam

► **To cite this version:**

Imen Rahmouni, Geoffrey Promis, Hassen Beji, Abdelhamid Rmili, Oualid Limam. Valorisation de déchets d'incinérateur : Caractérisation expérimentale des performances thermique et mécanique de béton de granulats carbonatés. IXèmes Journées d'Etudes Techniques (JET'2016), Association Franco-Maghrébine de Mécanique et des Matériaux, May 2016, Hammamet, Tunisie. <hal-04502261>

HAL Id: hal-04502261

<https://hal.science/hal-04502261v1>

Submitted on 13 Mar 2024

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.



HAL Authorization



Valorisation de déchets d'incinérateur : Caractérisation expérimentale des performances thermique et mécanique de béton de granulats carbonatés

Imen RAHMOUNI ¹

Geoffrey PROMIS ², Hassen BEJI ²

Abdelhamid RMILI ¹, Oualid LIMAM ¹

¹ Laboratoire de Génie Civil (LGC-ENIT), Université de Tunis El-Manar, ENIT – BP 37, 1002 Tunis le Belvédère, Tunisie, Tel : +216 71875726, fax : +216 71875726

² Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université de Picardie Jules Verne, Avenue des Facultés – Le Bailly, 80 025 Amiens Cedex, France Tel: +33 (0)322534016, fax: +33 (0)322951751

Résumé

Cet article présente une étude de formulation et de caractérisation de bétons d'éco-granulats issus d'une nouvelle technologie : la carbonatation accélérée, développée par l'Université de Greenwich (Kent, Royaume).

Ces éco-granulats à bilan carbone négatif, obtenus par combinaison de sous-produits industriels ou de déchets d'incinérateurs avec du dioxyde de carbone (CO₂), ont des caractéristiques particulières leur conférant un intérêt certain dans le domaine du génie civil, et plus particulièrement de la construction.

Au cours de ce travail, les granulats carbonatés ont été analysés en laboratoire à travers une caractérisation morphologique, physique, mécanique et thermique afin de les valoriser dans la confection de béton. Les résultats obtenus ont également été confrontés aux caractéristiques de granulats de référence (granulats naturels et granulats d'argile expansé) afin de les situer sur le marché des granulats.

A l'aune de ces résultats, des bétons à base des granulats carbonatés ont été formulés afin de les valoriser au sein des matériaux de construction. Les bétons à base d'éco-granulats ont ainsi été caractérisés de point de vue physico-mécanique et thermique et comparés à des bétons de référence couramment utilisés dans le domaine de construction.

Les résultats obtenus prouvent l'intérêt à approfondir la caractérisation des granulats carbonatés et à optimiser les compositions de béton en raison de leurs propriétés mécaniques suffisantes et de leurs bonnes performances thermiques. Enfin, des pistes de recherche supplémentaires sont envisagées, tel que, par exemple, l'introduction de fibres naturelles (chanvre, lin, halfa ...) afin d'accroître la résistance thermique.

Mots clés : Valorisation de déchets d'incinérateur ; Granulats à bilan carbone négatif ; Technologie de carbonatation accélérée

La carbonatation présente de nombreux avantages tels que l'agglomération des particules pour la formation de granulats solides (le durcissement de la matrice permet d'obtenir des matériaux finis résistants) et la stabilisation physique (des polluants) et chimique (formation de carbonates métalliques insolubles et diminution du pH). Pour toutes ces raisons, la valorisation des déchets issus de traitements thermiques (riches en CaO) est particulièrement adaptée au procédé de carbonatation.

A l'aune de ce constat, l'Université de Greenwich a développé un procédé simple et rapide de carbonatation accélérée (ACT) [3] qui permet de faire réagir les minéraux de résidus thermiques avec du CO₂. La précipitation des carbonates (calcaire) engendre une fixation permanente du CO₂ et la formation de granulats inertes. Ce procédé vise à carbonater des déchets d'incinérateur dans une atmosphère enrichie en dioxyde de carbone afin de générer des granulats. Après leur acheminement et leur stockage au centre de production, les déchets sont prétraités par carbonatation puis mélangés à des réactifs (ciment, sable et eau) pour former une pâte liante. Les matériaux sont ensuite carbonatés dans un réacteur tournant formant ainsi des granulats légers à bilan carbone négatif. Le CO₂ se transforme en acide carbonique qui va alors pouvoir initier des réactions avec des composés de type hydroxyde de calcium (portlandite ou chaux éteinte) pour former des carbonates de calcium (figure 1).

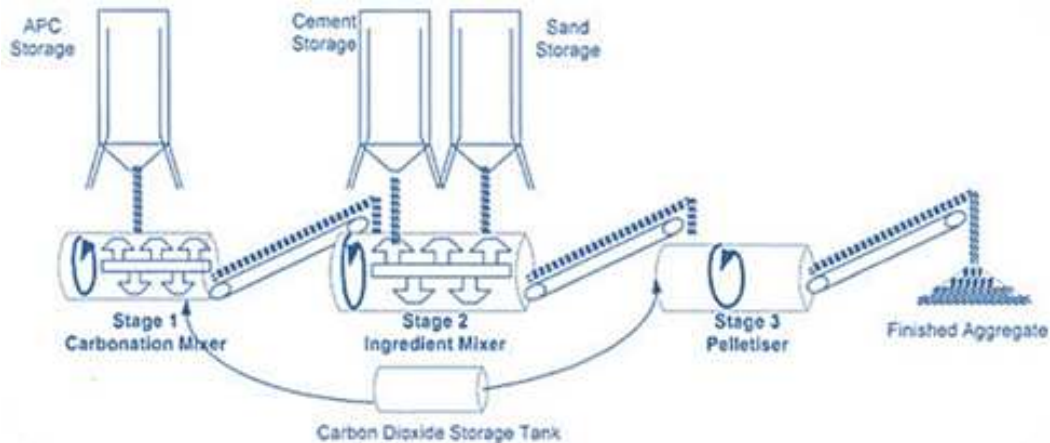


Figure 1. Méthode de carbonatation accélérée.

Un granulat a été produit à partir des résidus d'épuration des fumées d'incinérations des ordures ménagères (REFIOM) [4] et de ciment utilisé comme liant (figure 2a). Le second déchet retenu pour produire des granulats provient des cendres de papier [5]. Ces granulats ont été produits sans ajout de liant mais avec ajout de fines de carrière (voir Figure 2b), riches en oxyde de calcium CaO. Un dernier déchet provient d'un centre de biomasse français (figure 2c).

Dans la suite, les granulats produits seront notés C8 AGG pour les granulats à base de REFIOM, PA pour les granulats à base de cendres de papier et BAK pour les granulats à base de cendres de biomasse. Les granulats C8 AGG et BAK ont été produits à partir de ciment utilisé comme liant.



Figure 2. Granulats de REFIOM notés C8 AGG (a), de cendres de papier notés PA (b), de cendres de biomasse notés BAK (c).

3. Caractérisation des granulats

Les caractéristiques des granulats utilisés dans la composition d'un béton jouent un rôle très important sur les propriétés et les performances du béton. En effet, les propriétés du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants. De ce fait, afin de développer la filière de la valorisation des éco-matériaux à base de déchets, nous avons procédé à des essais de caractérisation de ces granulats.

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à déterminer la distribution dimensionnelle des grains. La granulométrie des éco-granulats utilisés est confrontée aux granulats dits de référence, couramment utilisés, une argile expansée notée AE et un granulat naturel noté GN. L'analyse granulométrique des granulats a été réalisée selon la norme NF EN 933-1 [6]. Cette analyse montre que les granulats issus du procédé de carbonatation accélérée présentent une répartition dimensionnelle très proche des granulats de référence AE et GN. Le pourcentage de fines (inférieur à 2%) et les classes granulaires mesurées

(0/16) s'avèrent adaptés à la fabrication de béton. Cette première approche d'identification granulométrique confirme le potentiel de substitution aux granulats traditionnels dans les bétons et plus particulièrement pour la réalisation de blocs de construction.

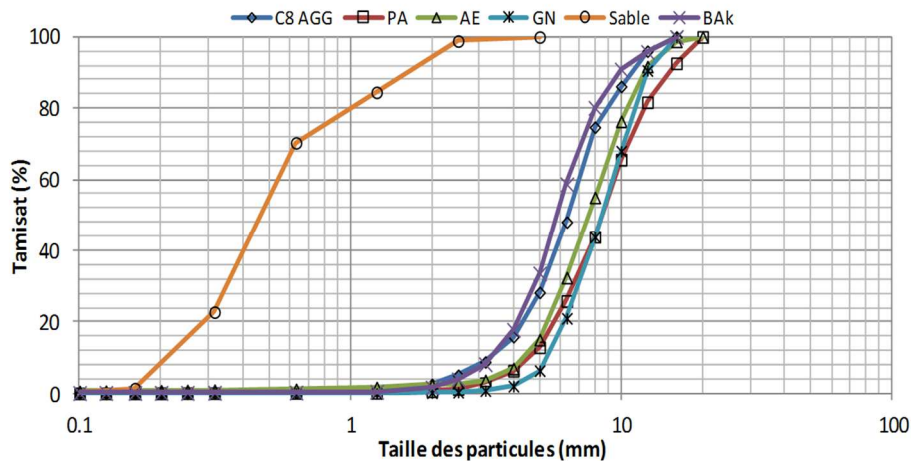


Figure 3. Analyse granulométrique des granulats.

Les masses volumiques apparentes ρ_{app} des granulats ont été mesurées selon la norme NF EN 1097-3 [7] avec un contenant de 1 litre. La méthode du pycnomètre à eau, conformément à la norme NF EN 1097-6 [8], a été utilisée pour obtenir les masses volumiques absolues et réelles des granulats. Nous déterminons les masses volumiques afin de vérifier la régularité minéralogique des matériaux ainsi que le calcul des rendements volumiques des formulations des bétons. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 1. Après 24h, l'absorption d'eau WA24 est de l'ordre de 15% pour les granulats C8 AGG, BAK et AE, et de l'ordre de 29 % pour les granulats PA. Les granulats GN qui ne sont que très faiblement poreux (3,66 % de porosité totale), ont un coefficient d'absorption à 24h de 1 %. Ainsi, globalement les masses volumiques réelles des granulats carbonatés sont encadrées par celles des granulats GN et AE.

Tableau 1. Masses volumiques, porosité et coefficient d'absorption des granulats.

Granulats	Masse volumique apparente ρ_{app} (kg/m ³)	Masse volumique saturée surface sèche ρ_{ssd} (kg/m ³)	Masse volumique réelle sec ρ_{rd} (kg/m ³)	Masse volumique absolue ρ_a (kg/m ³)	Coefficient d'absorption WA24 (%)	Porosité totale (%)
GN	1 360	2 540	2 500	2 590	13.8	3.7
C8 AGG	1 100	2 110	1 820	2 560	16.0	30.2
AE	700	1 380	1 200	1 460	14.5	53.8
PA	880	1 850	970	2 100	28.3	62.6
BAk	1 090	2 240	1 300	2 490	15.1	49.9

La forte porosité des granulats carbonatés laisse envisager une importante rétention de l'eau d'hydratation du ciment. Afin d'adapter au mieux la formulation du béton, la mesure d'absorption d'eau des granulats a été faite sur trois échantillons de 400g immergés dans l'eau pendant 7 jours afin de mesurer la capacité d'un granulat à absorber l'eau. Cet essai est réalisé afin de prendre en compte l'absorption des granulats dans le calcul du rapport Eau efficace/Ciment dans les bétons et avoir une estimation de l'aptitude du granulat à influencer la rhéologie du béton. Les résultats, présentés en Figure 4, montrent une absorption immédiate pour les granulats PA proche de 22%. Après 7 jours, les granulats AE atteignent environ 20% d'absorption d'eau. En revanche, les granulats GN n'absorbent pas ou très peu d'eau. En ce qui concerne les granulats C8 AGG, ceux-ci ont montré un comportement atypique, avec une absorption rapide de l'ordre de 5 % puis une perte de masse liée à la désintégration des granulats dans l'eau. Les granulats BAK absorbent 5% d'eau à 24h. Les granulats BAK et C8 AGG ont montré une tendance à désorber et à se désintégrer après 24h d'absorption. Ces différents résultats soulignent la nécessité d'adapter la proportion en eau lors de la confection des bétons afin d'optimiser les formulations car les granulats PA et AE sont très absorbants d'eau dès 24h avec des coefficients de 22% et 15% respectivement. Dans le cas des granulats C8 AGG et BAK, l'absorption d'eau, autour de 5 %, ne devrait que peu influencer la formulation des bétons.

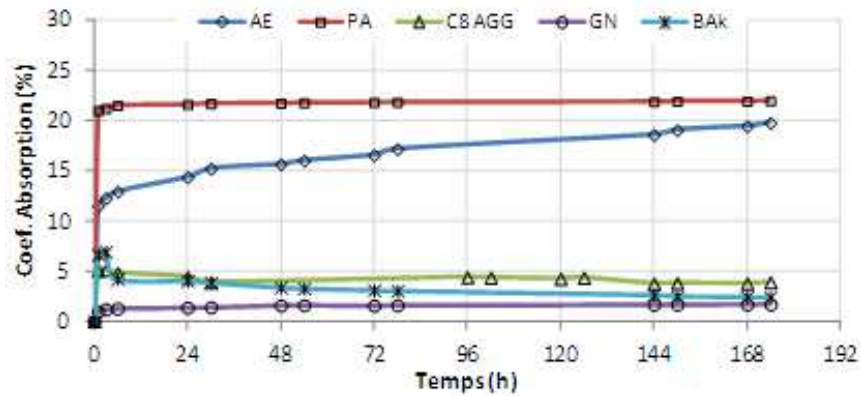


Figure 4. Absorption d'eau des granulats.

Dans le but d'évaluer la résistance mécanique des éco-granulats, des essais d'écrasement en vrac ont été réalisés selon la norme EN 13055-1 [9]. Un échantillon de granulats compacté par vibration est comprimé, à l'aide d'un piston, dans un cylindre de 100 mm d'hauteur et de 175 à 200 cm² de section. La vitesse d'enfoncement du piston est de 1 mm par minute et l'essai est terminé lorsque l'enfoncement du piston atteint 20 mm. La résistance conventionnelle des granulats est définie par le quotient de la force appliquée nécessaire pour obtenir l'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre. Les granulats légers C8 AGG, AE, PA et BAK ont une résistance à l'écrasement en vrac inférieure à celle des granulats GN, comme attendu au regard des masses volumiques réelles et apparentes. Les granulats C8 AGG tendent à montrer une résistance à l'écrasement plus élevée que les granulats PA, BAK et AE. Le granulat PA présente une résistance mécanique acceptable et les granulats C8 AGG et BAK montrent des bonnes performances mécaniques supérieures au granulat léger de référence. Ces résultats traduisent l'intérêt que présentent les granulats carbonatés pour la fabrication de blocs de construction.

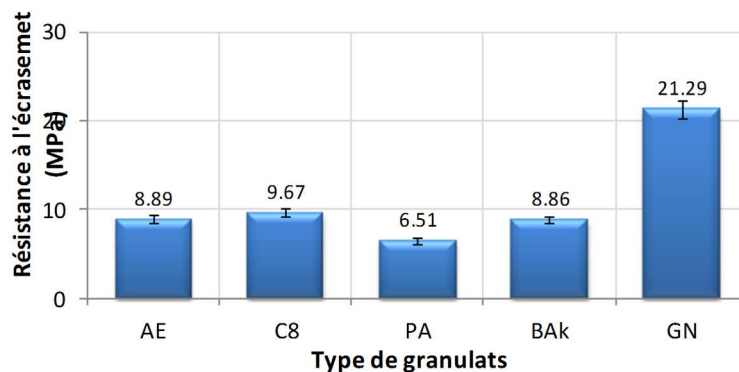


Figure 5. Résistance à l'écrasement des granulats.

Pour mesurer la conductivité thermique des granulats, nous avons utilisé la méthode de la plaque chaude gardée en régime permanent [10] sur des échantillons 25x25x6 cm. L'échantillon de matériau à étudier est placé entre deux plaques, chaude et froide, et entouré d'un isolant pour éviter les pertes latérales du flux de chaleur. Des thermocouples sont installés sur les faces de l'éprouvette pour mesurer les différences de température. On descend la plaque supérieure, chaude, jusqu'à être en contact avec le matériau et on lance l'acquisition. Les résultats présentés en Figure 6 montrent de bonnes performances thermiques pour le granulat PA avec une conductivité thermique de 0,15W/m.K, similaire à celle du granulat léger de référence AE. Le granulat C8 AGG présente de meilleures propriétés thermiques que le granulat GN mais moins performant que les granulats PA et AE.

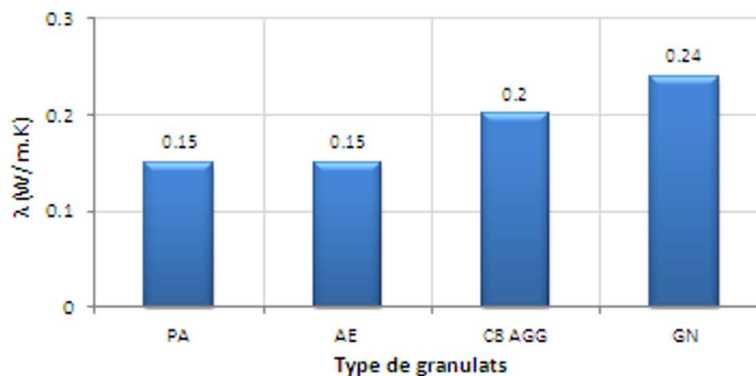


Figure 6. Conductivité thermique à 10°C des granulats secs.

4. Formulation des bétons

Les constituants d'un béton léger sont les mêmes que ceux d'un béton traditionnel. Cependant, dans le cas des bétons légers, l'absorption des granulats légers doit faire l'objet d'une attention particulière. À l'étape du malaxage, lorsqu'une certaine quantité d'eau est ajoutée, la quantité disponible pour hydrater le ciment et permettre sa réaction dépend de la quantité d'eau absorbée par les granulats légers [11]. Cette quantité d'eau peut être très importante. Cette particularité confère à chaque béton léger un caractère unique. En pratique, la littérature semble s'accorder sur le point suivant : dans le cas où les granulats légers sont humidifiés avant d'être utilisés pour la fabrication de béton, des distinctions doivent être effectuées dans la description des quantités d'eau en jeu. En effet, deux quantités d'eau sont à prendre en compte : d'une part, l'eau absorbée ou eau interne qui n'est pas considérée dans l'eau de gâchage, d'autre part l'eau adsorbée à la surface des granulats légers ou eau superficielle qui elle fait partie de l'eau de gâchage [12].

Les différentes méthodes servant à déterminer la composition des bétons traditionnels peuvent être utilisées dans le cas des bétons légers sous réserve de quelques corrections expérimentales pour ajuster certaines caractéristiques (consistance, compacité, densité ou résistance) aux valeurs souhaitées.

Le ciment utilisé pour nos formulations est un ciment multi-usagers de type CEMII / B M (L-S) 32,5 R CE NF fabriqué dans les usines du groupe HOLCIM France. Il est composé de :65 % à 79 % de clinker ,21 % à 35 % de laitier granule de haut fourneau (S) et calcaire (L ou LL) et de 0 à 5 % de constituants secondaires. Le sable de cette étude est un sable siliceux roulé de classe granulaire 0/5 mm ayant une teneur en fines de 2%. Sa masse volumique réelle est de 2 500 kg/m³. Son module de finesse est égale à 2.23.

Dans le cadre de notre travail, pour la formulation des mélanges nous avons opté pour l'utilisation de la méthode de Dreux-Gorisse qui présente une quantité de ciment moins importante que celle donnée par la méthode de Baron-Olivier sachant que le ciment est plus cher que les granulats (aspect économique) et une quantité de granulats plus importante que celle donnée par Baron-Olivier ce qui donne des propriétés thermiques pour le béton léger plus intéressantes.

Tableau 2. Formulation des bétons étudiés.

Béton	Ciment		Granulat		Sable		Eau efficace		Total (kg/m ³)
	%	(kg/m ³)	%	(kg/m ³)	%	(kg/m ³)	%	(kg/m ³)	
Béton C8 AGG	16	350	45	992	28	629	11	247	2 219
Béton PA	17	350	43	869	31	629	9	175	2 024
Béton BAK	15	350	44	1 069	25	611	16	378	2 408
Béton AE	18	350	35	658	32	611	14	273	1 892
Béton GN	15	350	48	1 121	30	704	7	175	2 350

Les bétons à l'état frais sont soumis à l'essai d'affaissement mesuré par le cône d'Abrams et la mesure de la masse volumique. La consistance désirée pour ces bétons est une ouvrabilité plastique et tenant compte des caractéristiques intrinsèques des granulats légers. Les bétons présentent donc une ouvrabilité satisfaisante. Un ajustement a été apporté sur le dosage en eau dans le but d'assurer un écoulement du béton qui correspond à la consistance initiale désirée.

Les masses volumiques des bétons confectionnés sont présentées sur le tableau 3. Les bétons de granulats PA et BAK ont une masse volumique plus faible que celle des bétons de granulats C8 AGG. Ces trois bétons ont une masse volumique inférieure à 2 000 kg/m³, les classant ainsi comme bétons légers. Les bétons de granulats naturels GN ont une masse volumique supérieure à 2 000 kg/m³ ce qui les classent dans la gamme des bétons lourds.

Tableau 3. Propriétés des bétons à l'état frais.

Béton	Affaissement (mm)	Classe	Observation	Masse volumique du béton (kg/m ³)
PA	65	S2	Plastique	1885
AE	60	S2	Plastique	1560
GN	90	S2	Plastique	2260
C8 AGG	110	S3	Très plastique	2040
BAk	80	S2	Plastique	2000

5. Caractérisation des bétons

Après avoir caractérisé les éco-granulats et formulé des bétons à base de ceux-ci, nous procédons à la caractérisation de ces bétons afin de déterminer leurs propriétés. Les propriétés mécaniques des bétons ont été étudiés à l'aide d'essais de compression sur des éprouvettes cylindriques 11x22cm selon la norme NF EN 12390-3 [13] et par des essais de flexion trois points sur des éprouvettes de 7x7x28 cm selon la norme NF EN 12390-5 [13]. Les résultats des essais de flexion et de compression à 28 jours des bétons confectionnés sont présentés dans la Figure 7. Les bétons à base d'éco-granulats ont des résistances à la flexion et à la compression inférieures à celles des bétons de granulats AE et GN. La comparaison des deux

méthodes de confection Dreux-Gorisse et Baron -Olivier avec le granulat PA met en évidence une résistance à la compression plus importante des bétons de granulats PA réalisés selon la méthode de Dreux-Gorisse. Les bétons légers ont une résistance moyenne en compression à 28 jours de l'ordre de 18 MPa. Seul le béton élaboré à partir de cendres de biomasse BAK a une résistance mécanique inférieure, mais supérieure à 11 MPa. De manière générale, tous les bétons respectent la norme NF EN 206-01 [14] et les bétons à base de C8 AGG et PA vérifient la résistance minimale recommandée par l'ACI qui est 17 MPa à 28 jours [15]. Les bétons à base d'éco-granulats montrent donc des propriétés mécaniques intéressantes.

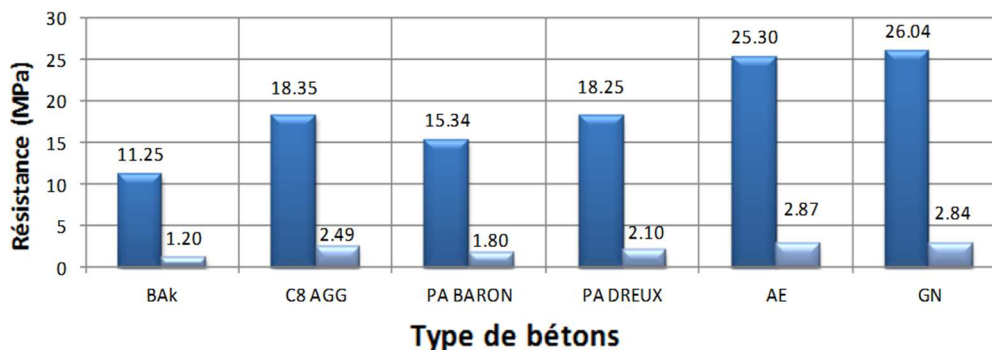


Figure 7. Résistance mécanique des bétons.

Pour déterminer les performances thermiques d'un bâtiment, il est nécessaire de connaître la conductivité thermique et la chaleur spécifique des matériaux le constituant. La méthode de la plaque chaude gardée en régime permanent [10] a été utilisée pour mesurer la conductivité thermique sur des éprouvettes de bétons de 25x25x6 cm. Le béton à base de granulats BAK a un bon pouvoir isolant, avec une conductivité thermique bien inférieure à celle des bétons classiques GN et proches à celle du béton à base d'argile expansée AE (tableau 4). En effet, le béton BAK présente une conductivité thermique de 0.73 W/m.K, comparable à celle des bétons AE. La méthode fluxmétrique [10] a été utilisée pour mesurer la chaleur spécifique massique. L'échantillon de matériau est placé entre deux plaques, chaude et froide reliées à des bains thermostatés. L'échantillon est entouré d'un isolant pour éviter les pertes latérales du flux de chaleur. Les autres caractéristiques thermiques en régime dynamique (diffusivité et effusivité thermiques) ont été calculées à partir de la conductivité et de la chaleur spécifique massique mesurées. Les résultats des différentes caractéristiques thermiques à 20°C sont résumés dans le tableau 4. Le béton à base de granulats carbonatés ont une chaleur massique de l'ordre de 700 à 800 J/kg.K, au même ordre de grandeur que le béton à base d'argile expansée. Les diffusivités thermiques des bétons à base de granulats carbonatés ont une valeur de $0.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ inférieure à celle d'un béton ordinaire GN ce qui indique une prédisposition plus élevée de ce béton à retarder le transfert de chaleur.

Tableau 4. Propriétés thermiques des bétons à 20°C.

Granulat employé	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur massique C_p (J/kg.K)	effusivité thermique ε (J/m ² k s ^{1/2})	diffusivité thermique a (10 ⁻⁶ m ² /s)
C8 AGG	0.85	756	1 134	0.59
BAk	0.73	647	1 018	0.68
PA	0.75	828	1 133	0.53
AE	0.72	739	910	0.63
GN	1.23	815	1 449	0.72

D'un point de vu global, les performances thermiques des bétons de granulats carbonatés sont très proches de celles du béton léger de granulats d'argile expansée. Cette première étude thermique semble indiquer une bonne inertie thermique des éco-bétons, comparativement à un béton traditionnel. Les propriétés mécaniques sont suffisantes pour la réalisation de blocs de construction et la valorisation des cendres d'incinérateur dans la composition de béton semble être une piste fort encourageante permettant d'allier performance thermique et résistance mécanique.

6. Conclusion

Ce travail a permis d'évaluer les principales caractéristiques de granulats à bilan carbone négatif, obtenus à partir d'une technologie de carbonatation accélérée développée par l'Université de Greenwich (Kent, Royaume Uni) et Carbon8 System.

Dans un premier temps, les propriétés des granulats carbonatés sont évaluées afin de confirmer la possibilité de valoriser ces éco-matériaux dans la fabrication de béton. Ces granulats présentent une masse volumique relativement faible, les classant dans la catégorie des granulats légers. Cet allègement de masse est engendré par la forte porosité des ces granulats, laissant supposer une importante capacité d'emprisonnement de l'eau destinée à l'hydratation du ciment. Par ailleurs, la distribution

granulométrique est semblable à un gravillon naturel et la résistance mécanique est suffisante pour la confection de béton. Enfin, la mesure de la conductivité thermique des granulats est intéressante et conduirait à une amélioration des performances thermiques des bétons.

A l'aune des résultats de cette première étape, différentes méthodes de formulation de béton ont été étudiées et, en raison de la forte absorption en eau et des performances thermiques des granulats, la méthode de Dreux-Gorisse a été retenue, prouvant ainsi la possibilité de remplacer tout ou partie des granulats nobles lors de la confection de béton. Les échantillons réalisés ont été soumis à une méthodologie de caractérisation mécanique et thermique. Les résultats obtenus prouvent que ces bétons de granulats carbonatés sont légers, résistants à la compression et présentent une inertie thermique non négligeable avec notamment, une conductivité thermique réduite de 40% comparée au béton courant.

Cette étude montre l'intérêt de développer le processus de carbonatation accélérée afin de i) valoriser les déchets d'incinérateur et limiter leurs transferts vers les centres d'enfouissement, ii) recycler le dioxyde de carbone par emprisonnement permanent dans des granulats et iii) préserver les ressources naturelles en limitant l'utilisation de granulats naturels. Cependant, ce travail demande à être poursuivi et approfondi dans le but d'optimiser la formulation des bétons (quantité d'eau efficace, quantité de matrice nécessaire, dosage en ciment ...). Les performances des bétons doivent être adaptées au marché ciblé (résistance mécanique vs performance thermique par exemple) et, à ce titre, nous souhaitons développer une méthodologie de formulation basée sur les caractéristiques fondamentales des granulats carbonatés. Au-delà de la proportion de chaque constituant, nous envisageons également l'introduction de déchets issus du végétal (lin, chanvre, halfa, ...) pour augmenter les performances hygro-thermiques.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le programme INTERREG IV A France (Manche) – Royaume Uni pour leur support financier. Ces remerciements s'adressent également à la Région Picardie (France) pour son soutien au projet SAPICO₂. Nous remercions également l'Université de Greenwich (Kent, Royaume Uni) et Carbon8 System pour leur partenariat et la fabrication des granulats carbonatés étudiés dans ce travail de recherche.

Références

- [1] "Indicateurs de développement durable en Champagne-Ardenne : La production des granulats," *Insee dossier n°34*, p. 21/22, Octobre 2011.
- [2] M. Behera, S. Bhattacharyya, A. Minocha, R. Deoliya and S. Maiti, *Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review.*, Constr Build Mater, 2014.
- [3] C. Hills and P. Carey, *Production of secondary aggregates*, US20090104349 A1, 2009..
- [4] P. Gunning, C. Hills and P. Carey, *Production of lightweight aggregate from industrial waste and carbon dioxide. Waste Manag 2009;29:2722–8. doi:10.1016/j.wasman.2009.05.021.*
- [5] A. Antemir, C. Hills, P. Carey and P. Gunning, *Secondary aggregate from waste treated with carbon dioxide. Proc ICE - Constr Mater 2011;164:231–9. doi:10.1680/coma.1000011.*
- [6] *AFNOR NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats*, 1997.
- [7] *AFNOR NF 1097-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire*, 2004.
- [8] *AFNOR NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.*, 2014.
- [9] *AFNOR NF EN 13055-1 : Granulats légers pour béton et mortier*, 2002.
- [10] *AFNOR, NF EN 12664: Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique-Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique*, 2001.
- [11] V. M. ARNOULD M., *Granulats et bétons légers*, Presse de l'ENPC, 1986.
- [12] T. Holm and J. Ries, *High-performance structural lightweight concrete*, American concrete institute, 2004, p. 202.
- [13] *AFNOR NF EN 12390: Essais pour béton durci*, 2000.
- [14] *AFNOR NF EN 206-1 : Béton - Spécification, performance, production et conformité*, 2004.
- [15] *Guide for structural lightweight-aggregate concrete reported by ACI committee 213*, American concrete institute, 2003.