



HAL
open science

Valorisation de déchets d'incinérateur dans la confection de bétons de granulats carbonatés

Imen Rahmouni, Geoffrey Promis, Hassen Beji, Abdelhamid R'Mili, Oualid Limam

► To cite this version:

Imen Rahmouni, Geoffrey Promis, Hassen Beji, Abdelhamid R'Mili, Oualid Limam. Valorisation de déchets d'incinérateur dans la confection de bétons de granulats carbonatés. INVACO2016, Dec 2016, Hammamet, Tunisie. <hal-04502159>

HAL Id: hal-04502159

<https://hal.science/hal-04502159v1>

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 dans la confection de bétons de granulats carbonatés

Imen RAHMOUNI^{1,2}, Geoffrey PROMIS², Hassen BEJI², Abdelhamid R'MILI¹, Oualid LIMAM¹

¹ *Laboratoire de Génie Civil (LGC-ENIT), Université de Tunis ElManar, ENIT-BP 37, 1002 Tunis le Belvédère, Tunisie
Tel : +21671875726, fax: +21671875726*

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.*

imen.rahmouni@etud.u-picardie.fr, geoffrey.promis@u-picardie.fr, hassen.beji@u-picardie.fr, Abdelhamid.Rmili@esstt.rnu.tn,
oualid.limam@enit.rnu.tn

Résumé : Cet article présente une étude de formulation et de caractérisation de bétons d'éco-granulats issus d'un procédé de carbonatation accélérée, développée par l'Université de Greenwich (Kent, Royaume Uni). Ce processus est une version accélérée et contrôlée de la carbonatation minérale naturelle mais avec une durée de traitement assez courte.

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 dans les matériaux de construction.

Au cours de ce travail, les granulats carbonatés ont été analysés en laboratoire afin de déterminer leurs propriétés morphologique, physique, mécanique et thermique pour les valoriser dans la confection de béton. Les résultats obtenus ont également été comparés aux caractéristiques de granulats de référence (granulats naturels et granulats d'argile expansée) afin de les situer sur le marché des granulats. Ces granulats ayant des masses volumiques inférieurs à 2 t/m³ sont donc classés parmi les granulats légers, peuvent remplacer les granulats traditionnels dans le béton, ont des propriétés mécaniques moyennes et des conductivités thermiques intéressantes.

A l'aune de ces résultats, des bétons à base des granulats carbonatés ont été confectionnés par deux méthodes de formulations : Dreux-Gorisse et Baron-Olivier; afin de choisir celle qui répond le mieux aux critères des bétons légers. Ces bétons ont ainsi été caractérisés de point de vue physico-mécanique et thermique et confrontés à des bétons de référence couramment utilisés dans le domaine de construction. Ces bétons sont des bétons légers selon la norme européenne NF EN 206-1. Les résultats obtenus prouvent l'intérêt à approfondir la caractérisation des granulats carbonatés et à optimiser les compositions de béton confectionnés en raison de leurs propriétés mécaniques suffisantes et de leurs bonnes performances thermiques.

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

I. INTRODUCTION

Les granulats s'avèrent être des matériaux soigneusement élaborés dont les caractéristiques sont normalisées dans la plupart des pays, comme l'intégralité des produits industriels. Au vu des grandes quantités de granulats consommés, il apparaît très clairement que les granulats sont devenus, aujourd'hui, des matériaux de première nécessité dont l'approvisionnement doit être assuré de façon durable pour les générations futures [1]. Toutefois, ces ressources naturelles ne sont pas inépuisables et les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des lieux de consommation. En parallèle, l'essor rapide du tissu urbain, dans tous les pays du monde, a provoqué une augmentation impressionnante des quantités de sous-produits industriels et de déchets, qui autrefois ne

suscitaient guère d'intérêt ni d'inquiétude. Ces produits ont commencé à constituer un problème économique et écologique vers la fin du 20^{ème} siècle. Les quantités énormes qui sont produites sans cesse immobilisent des volumes de stockage des déchets de plus en plus conséquents et réduisent ainsi les disponibilités de terrains, sans compter la pollution de l'environnement [2]. On a recours à différents moyens de recyclage des déchets comme les décharges, l'incinération ou le stockage pour faire face à cette situation. Mais nous ne réfléchissons pas aux conséquences et aux effets négatifs possibles à moyen ou long terme de ces techniques. Par ailleurs, la fumée rejetée par les industries ou par l'incinération de déchets contient encore des métaux lourds et du dioxyde de carbone lourds de conséquences sur la santé et sur l'environnement. Le CO₂, gaz à effet de serre,

s'accumule dans l'atmosphère et participe au réchauffement climatique.

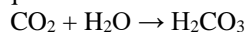
Pour répondre, d'une part, au besoin vital de la construction, et d'autre part, au besoin universel de conserver les ressources et de protéger l'environnement contre la pollution et le dégagement de CO₂, il est indispensable de développer des matériaux de substitution aux granulats naturels en valorisant les déchets et les sous-produits de l'industrie, qui, combinés au CO₂, peuvent être transformés en granulats. Ce double avantage de réduction des émissions de CO₂ et de recyclage des déchets constitue une alternative fort intéressante pour l'avenir.

Afin de développer la filière de valorisation des matériaux de construction à base de déchets au sien du secteur du Bâtiment et des Travaux Publics, il est nécessaire de mener une méthodologie de caractérisation des propriétés intrinsèques de ces sous-produits (les granulats carbonatés) et des produits finaux (les bétons à base de granulats carbonatés). A ces fins, l'étude des caractéristiques morphologiques, physiques, mécaniques et thermiques de ces matériaux est présentée ici. Les nouveaux matériaux de construction doivent présenter des performances suffisantes pour répondre aux contraintes technologiques de la construction tout en limitant l'impact de nos besoins sur l'environnement.

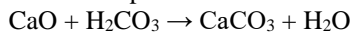
A l'aune de ce constat, nous présenterons dans une première partie le processus industriel de fabrication des éco-granulats, puis, dans une deuxième partie, l'analyse des caractéristiques des granulats carbonatés, suivie de l'évaluation expérimentale des propriétés mécaniques et thermiques de bétons à base d'éco-granulats. Afin de situer ces nouveaux matériaux durables dans le paysage des matériaux de construction traditionnels, nous proposons une étude comparative des performances de ces bétons confrontées aux performances de bétons de référence, à base de granulats naturels et de granulats légers d'argile expansée.

II. LE PROCESSUS INDUSTRIEL

Les granulats ici produits sont issus d'un procédé de carbonatation accélérée, breveté par Carbon8 System [3], une entité de l'Université de Greenwich (Kent, Royaume Uni). La licence d'exploitation est actuellement détenue par l'entreprise Carbon8 Aggregate. La carbonatation est une réaction naturelle très lente de combinaison avec le dioxyde de carbone en milieu humide : le dioxyde de carbone se transforme en acide carbonique :

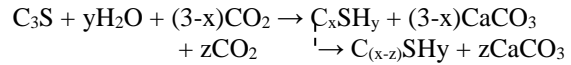


Par la suite, l'acide carbonique réagit avec la chaux de manière à former de la pierre calcaire :



Dans le cas de la carbonatation de matrice de type cimentaire, les silicates de calcium C₃S et C₂S vont interagir avec le dioxyde de carbone et l'eau en raison de leur caractère hydraulique. La réaction va produire

des carbonates de calcium CaCO₃ qui cristallisent en calcite, polymorphe stable en conditions normales et des silicates de calcium hydraté CSH, composés non cristallins.



L'enchevêtrement du gel C_xSH_y apporte la solidité des granulats et participe à l'inertage des granulats, assurant ainsi la stabilité chimique des granulats : les CSH se développent à la surface des grains et comblent progressivement les interstices capillaires. La couche d'hydrate qui enrobe les grains devient suffisamment épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système.

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).

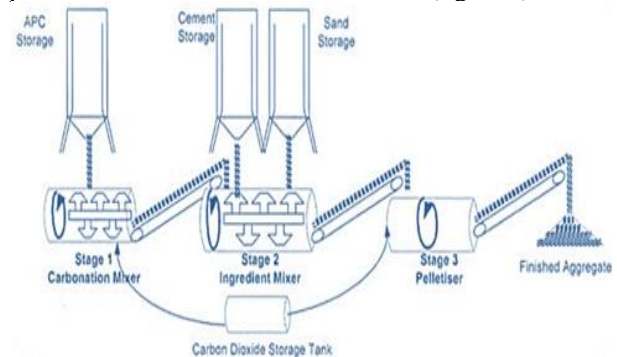


Fig. 1: Méthode de carbonatation accélérée

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 (fig. 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 (Fig.2b), riches en oxyde de calcium CaO. Un dernier déchet provient d'un centre de biomasse français (fig. 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.

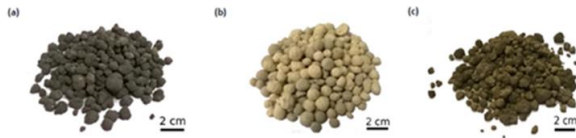


Fig. 2: Granulats de REFIOM notés C8 AGG (a), de cendres de papier notés PA (b), de cendres de biomasse notés BAK (c)

III. CARACTERISATION 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 granulats 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 et les classes granulaires mesurées 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.

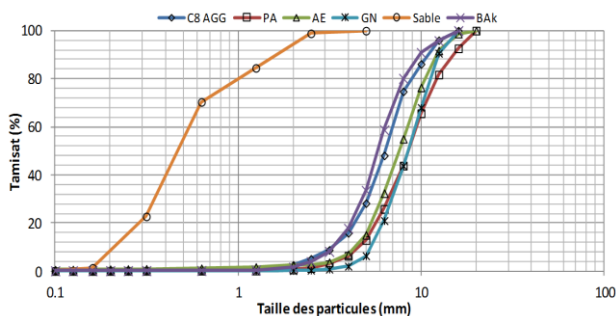


Fig. 3: Analyse granulométrique des granulats

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. 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	GN	C8 AGG	AE	PA	BAK
Masse volumique apparente $\rho_{app}(\text{kg/m}^3)$	1 360	1100	700	880	1090
Masse volumique saturée surface sèche $\rho_{ssd}(\text{kg/m}^3)$	2 540	2110	1380	1850	2240
Masse volumique réelle sec $\rho_{rd}(\text{kg/m}^3)$	2 500	1820	1200	970	1300
Masse volumique absolue $\rho_a(\text{kg/m}^3)$	2 590	2560	1460	2100	2490
Coefficient d'absorption Wa24 (%)	13.8	16	14.5	2803	15.1
Porosité totale (%)	3.7	30.2	53.8	62.6	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 granulats 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 granulats 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 ce qui concerne les granulats C8 AGG et BAK, 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. Ils 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 absorbeurs 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 ne devrait que peu influencer la formulation des bétons.

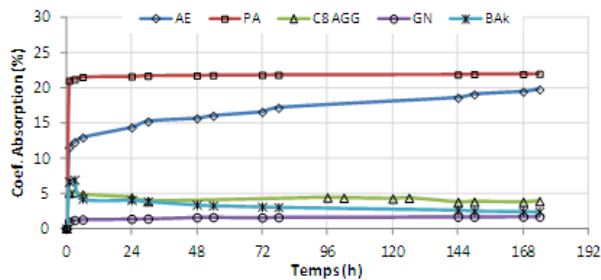


Fig. 4: Absorption d'eau des granulats

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 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.

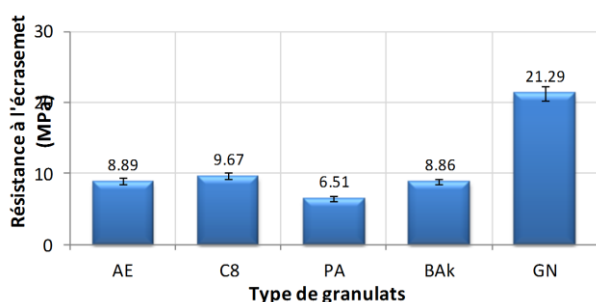


Fig. 5: Résistance à l'écrasement des granulats

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.

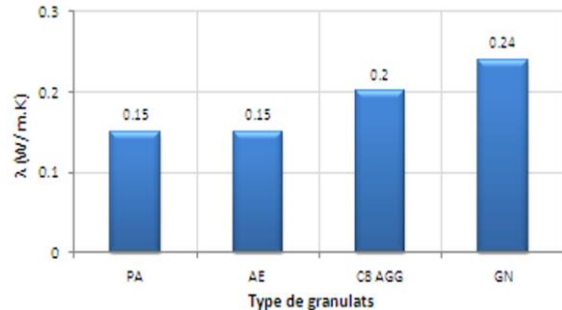


Fig. 6: Conductivité thermique à 10°C des granulats secs.

IV. FORMULATION DES BETONS

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 donné 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	C8 AGG	PA	BAK	AE	GN
Ciment	350	350	350	350	350
Granulat	992	869	1069	658	1121
Sable	629	629	611	611	704
Eau efficace	247	175	378	273	175
Total (kg/m ³)	2219	2024	2408	1892	2350

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. 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.

Tableau 3: Propriétés des bétons à l'état frais

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

V. CARACTERISATION DES BETONS

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 étudiées 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.

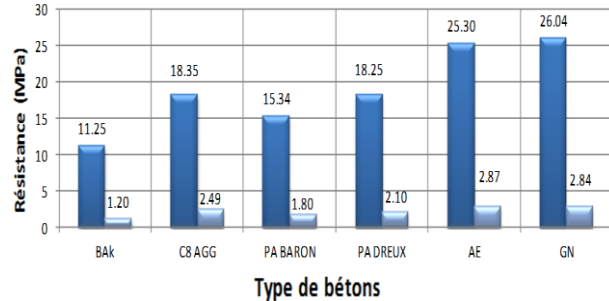


Fig. 7: Résistance mécaniques des bétons

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. 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. 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 0.6×10^{-6} m²/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 1: Propriétés thermiques des bétons à 20°C

Granulat employé	C8 AGG	BAK	PA	AE	GN
conductivité thermique λ (W/m.K)	0.85	0.73	0.75	0.72	1.23
chaleur massique C_p (J/kg.K)	756	647	828	739	815
effusivité thermique ε (J/m ² k)	1134	1018	1133	910	1449

diffusivité thermique a (10 ⁻⁶ m ² /s)	0.59	0.68	0.53	0.63	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.

VI. 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 process 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 hygrothermiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le programme INTERREG IV A France (Manche) – Royaume Uni pour leur support financier. Ces remerciements s'adresse 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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [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 comittee 213*, American concrete institute, 2003.