



JNB'2017
Journées nationales du béton de Tunisie

VALORISATION DE DÉCHETS D'INCINÉRATEUR : CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES THERMIQUES ET MÉCANIQUES DU BÉTON DE GRANULATS CARBONATÉS

VALORIZATION OF INCINERATOR SOLID WASTE: EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE THERMAL AND MECHANICAL EFFICIENCIES OF CARBONATED AGGREGATES CONCRETE

**Imen RAHMOUNI^(1,2), Geoffrey PROMIS⁽²⁾, Abdelhamid R'MILI⁽¹⁾,
Hassen BEJI⁽²⁾, Oualid LIMAM⁽¹⁾**

⁽¹⁾ Laboratoire de Génie Civil (LGC-ENIT), Université de Tunis El-Manar, ENIT-BP 37,
1002 Tunis le Belvédère, Tunisie. Tél. : +21671875726, Fax : +21671875726

⁽²⁾ Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI), Université de Picardie Jules Verne,
Avenue des Facultés - Le Bailly, 80025 Amiens Cedex, France.

Tél. : +33 (0)322534016, Fax : +33(0)322951751

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

1. 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 sont épuisables et les lieux d'extraction ne cessent de s'éloigner des lieux de consommation. En parallèle, l'essor rapide du tissu urbain,



a provoqué une augmentation impressionnante des quantités de sous-produits industriels et de déchets, qui ont commencé à constituer un problème économique et écologique vers la fin du XX^e siècle. Les quantités énormes immobilisent des volumes de stockage des déchets de plus en plus conséquents et provoquent constamment la pollution de l'environnement [2]. Pour faire face à cette situation, nous avons recours à différents moyens de valorisation des déchets comme les décharges, l'incinération ou le stockage qui à leur tour ont des conséquences négatives sur l'environnement à moyen ou long terme. Par ailleurs, la fumée rejetée par les industries ou par l'incinération de déchets ainsi que les cendres d'incinérateurs contient des métaux lourds et du dioxyde de carbone nuisibles à la santé et à l'environnement. Le CO₂ qui, en tant que 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 forte intéressante pour l'avenir.

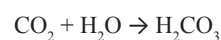
Afin de développer la filière de valorisation des matériaux de construction à base de déchets au sein du secteur du Bâtiment et des Travaux Publics, il est nécessaire de mener une méthodologie de caractérisation des propriétés intrinsèques de ces sous-produits et des produits finaux (les bétons à base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

A la suite 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

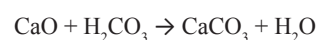
proposons une étude comparative des performances de ces bétons avec celles des bétons de référence, à base de granulats naturels et de granulats légers d'argile expansée.

2. LE PROCESSUS INDUSTRIEL

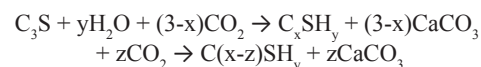
Les éco-granulats sont donc issus d'un procédé de carbonatation accélérée, breveté par l'entreprise Carbon8 System [3], une entité de l'Université de Greenwich (Kent, UK). La carbonatation est une réaction naturelle très lente de combinaison avec le dioxyde de carbone en milieu humide : le dioxyde de 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 hydratés CSH, composés non cristallins.



L'enchevêtrement du gel C_xSH_y apporte la solidité des granulats et participe à leur inertage, assurant ainsi la stabilité chimique des granulats : les CSH se développent à la surface des grains et comblent progressivement les interstices capillaires. 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.

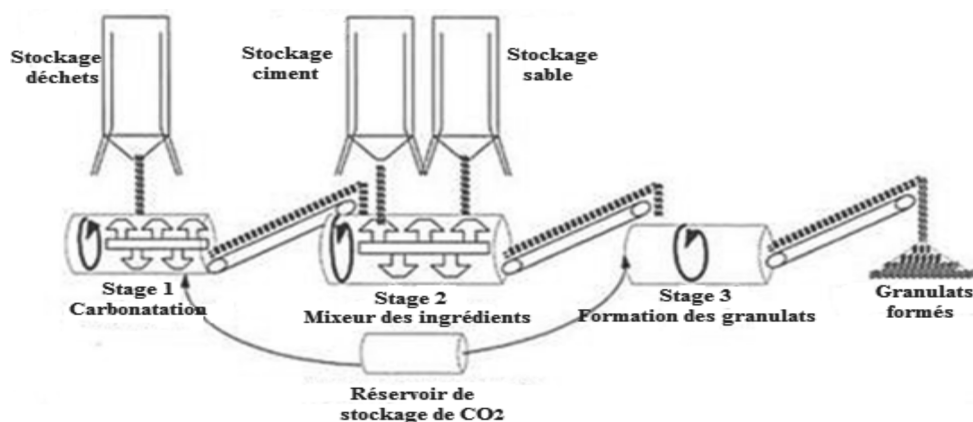


Figure 1. Méthode de carbonatation accélérée [4].



Figure 2. Système de fabrication des granulats [4].

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 CO_2 . La précipitation des carbonates (calcaire) engendre une fixation permanente du CO_2 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 CO_2 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.

A la suite de ce procédé trois types de granulats ont été produit : un granulat noté C8 AGG a été produit à partir des résidus d'épuration des fumées d'incinérations des ordures ménagères (REFIOM) [5] et de ciment utilisé comme liant (Figure 3a). Le second déchet retenu pour produire des granulats notés PA provient des cendres de papier [6]. Ces granulats ont été produits sans ajout de liant mais avec ajout de fines de carrière (Figure 3b), riches en oxyde de calcium CaO . Un dernier déchet provient d'un centre de biomasse français, les granulats sont notés BAK (Figure 3c).

3. CARACTÉRISATION DES GRANULATS

3.1. Caractérisation physique

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 (figure 4). Dans un premier temps, un essai de tamisage à sec est réalisé afin de déterminer les courbes granulométriques de chaque matériau. Les tamis utilisés sont : 0.08, 0.1, 0.125, 0.16, 0.2, 0.25, 0.315, 0.63, 1.25, 2, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20. Chaque tamis est pesé à vide, puis plein afin de vérifier que la masse de chaque refus est inférieure à la masse à saturation du tamis. Cette masse est dépendante de l'ouverture du tamis. Par ailleurs, le tamisage doit démontrer une perte maximale de matériau inférieure à 2%, comme suggéré dans la norme NF ISO 2591-1.

La granulométrie des éco-granulats utilisés (Figure 6) est confrontée aux granulats dits de référence, une argile expansée notée AE et un granulat naturel noté GN (Figure 5) [7]. Cette analyse montre que les éco-granulats présentent une répartition dimensionnelle très proche des granulats de référence AE et GN. Cette première approche d'identification granulométrique

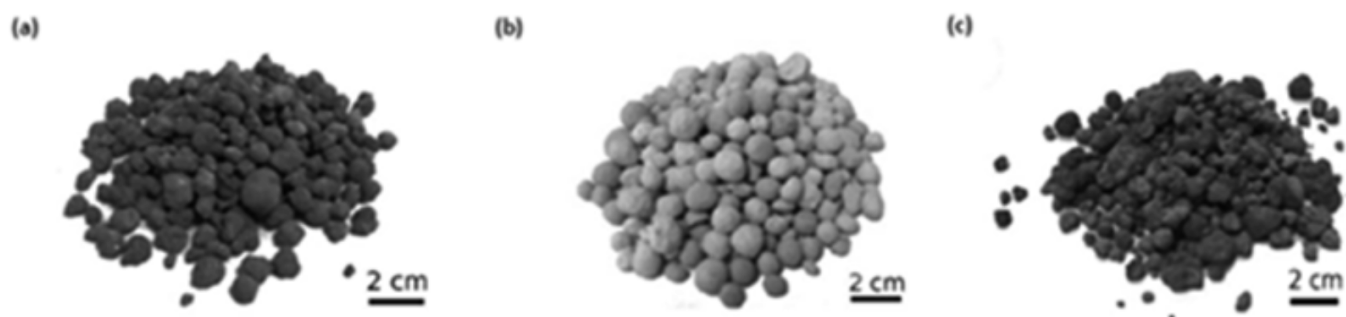


Figure 3. Granulats de REFIOM notés C8 AGG (a), de cendres de papier notés PA (b), de cendres de biomasse notés BAK (c).



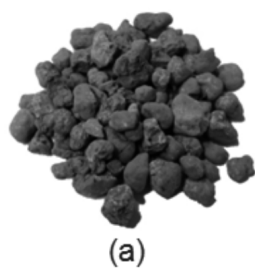


Tableau 1. Masses volumiques, porosité et coefficient d'absorption des granulats.

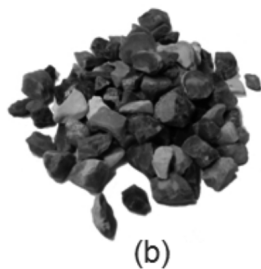
Granulats	GN	C8 AGG	AE	PA	Bak
Masse volumique apparente ρ_{app} (kg/m ³)	1 360	1100	700	880	1090
Masse volumique saturée surface sèche ρ_{ssd} (kg/m ³)	2 540	2110	1380	1850	2240
Masse volumique réelle sec ρ_{rd} (kg/m ³)	2 500	1820	1200	970	1300
Masse volumique absolue ρ_o (kg/m ³)	2 590	2560	1460	2100	2490
Coefficient d'absorption Wa24 (%)	13.8	16	14.5	28.03	15.1
Porosité totale (%)	3.7	30.2	53.8	62.6	49.9



Figure 4. Essai de tamisage.



(a)



(b)

Figure 5. Granulats d'argile expansée notés AE (a), naturels notés GN (b).

confirme leur potentiel de substitution aux granulats traditionnels dans les bétons et pour la réalisation de blocs de construction. Dans un second temps, les masses volumiques apparentes ρ_{app} des granulats ont été mesurées selon la norme NF EN 1097-3 [8] avec un contenant de 1 litre. La méthode du pycnomètre à eau, conformément à la norme NF EN 1097-6 [9], 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 rendement volumique des différentes formulations des bétons. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 1. Globalement les masses volumiques réelles des granulats carbonatés sont encadrées par celles des granulats GN et AE. 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.

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 (figure 8) 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.

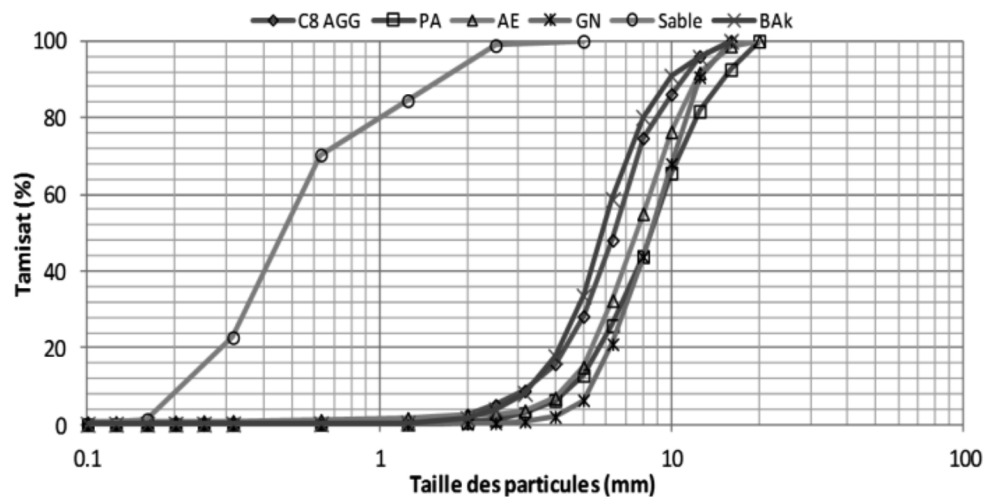


Figure 6. Analyse granulométrique des granulats.



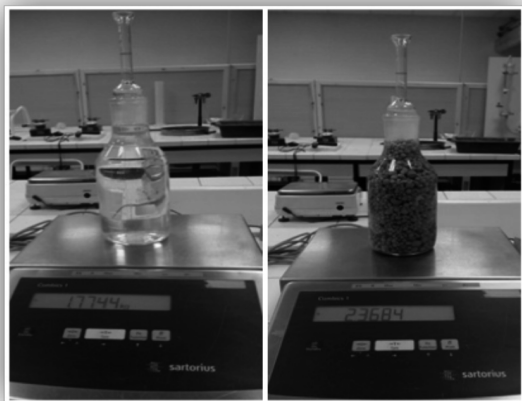


Figure 7. Essai de détermination des masses volumiques.



Figure 8. Essai d'absorption d'eau des granulats.

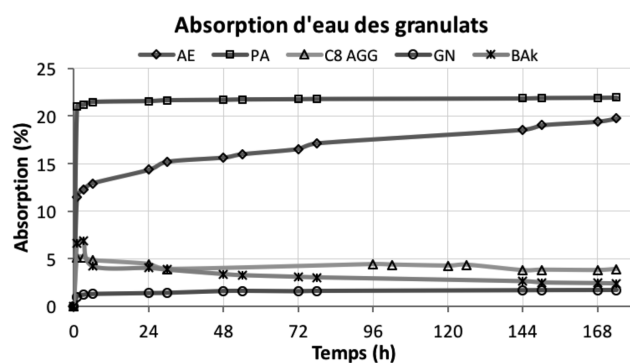


Figure 9. Absorption d'eau des granulats.

Les résultats montrent une absorption immédiate pour les granulats PA proche de 22% (Figure 9). 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 désagrégation 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 absorbants d'eau dès 24h avec des coefficients de 22% et 15% respectivement.

3.2. Caractérisation mécanique

Dans le but d'évaluer la résistance mécanique des éco-granulats, des essais d'écrasement en vrac (figure 10) ont été réalisés selon la norme EN 13055-1 [10]. Des granulats sont placés en vrac dans un cylindre de 100 mm de hauteur et de 200 cm² de section (figure 11). L'échantillon est ensuite soumis à un effort de compression à l'aide d'un piston cylindrique. L'essai est réalisé sur une presse électromécanique de capacité nominale de 250 kN de chez Shimadzu. 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



Figure 10. Essai d'écrasement en vrac des granulats.



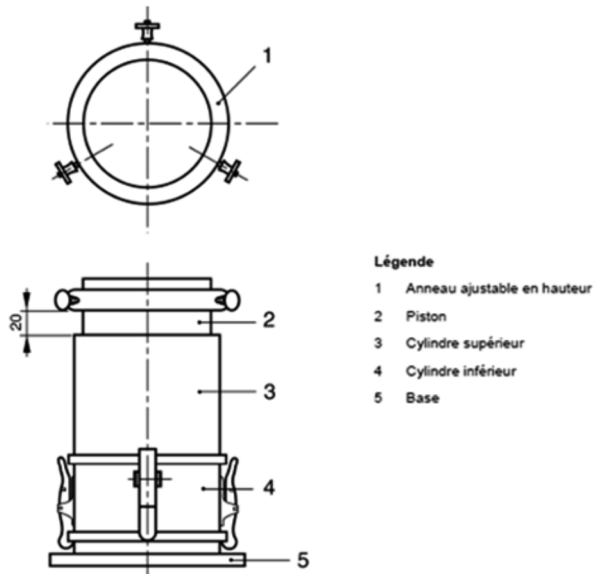


Figure 11. Appareillage d'essai d'écrasement en vrac [10].

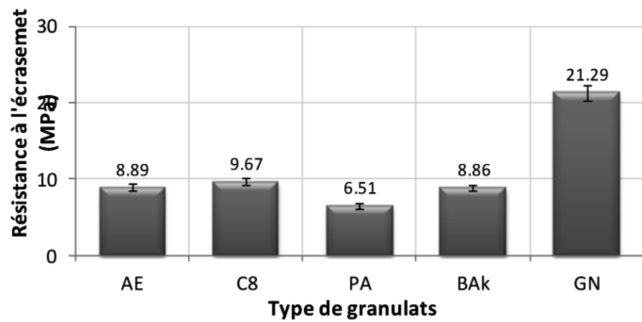


Figure 12. Résistance à l'écrasement des granulats.

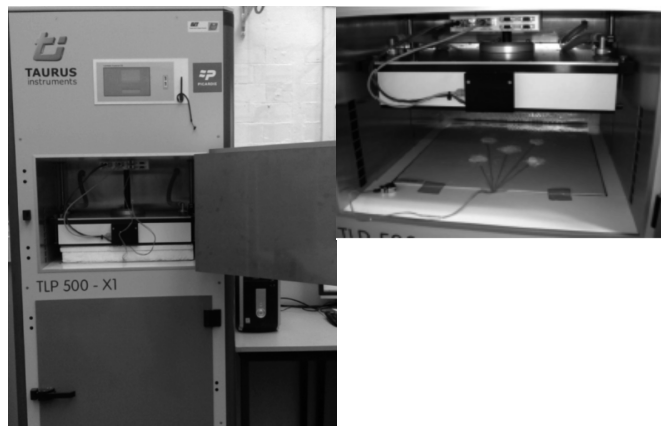


Figure 13. Méthode de la plaque chaude gardée.

pour obtenir l'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre. La résistance à l'écrasement C_a exprimée en N/mm^2 est déterminée à partir de l'équation suivante :

$$C_a = \frac{L + F}{A}$$

Avec :

- L : poids du piston en N
- F : Force de compression en N
- A : Aire du piston en mm^2 .

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 bonne résistance à l'écrasement plus élevée que les granulats PA, BAk et AE. Ces résultats traduisent l'intérêt que présentent les granulats carbonatés pour la fabrication de blocs de construction.

3.3. Caractérisation thermique

Les granulats carbonatés sont plus légers et poreux que les granulats ordinaires ce qui nous incite à penser une amélioration de la performance thermique des bétons [19]. A ces fins, l'évaluation de la conductivité thermique constitue une première approche de la performance thermique de ces matériaux [11]. Pour mesurer la conductivité thermique des granulats, la méthode de la plaque chaude gardée en régime permanent [12] est utilisée sur des échantillons $25 \times 25 \times 6$ cm. L'échantillon de granulats à étudier est placé entre deux plaques échangeuses, reliées à un bain thermostaté. Le contact thermique est assuré par l'application d'un champ de compression de 400 N. Cette compression permet de limiter la résistance thermique potentiellement induite par présence de lames d'air à l'interface entre l'échantillon et les plaques échangeuses. Un isolant est placé tout autour de l'échantillon afin d'éviter les pertes latérales du flux de chaleur. Dans un premier temps, les deux plaques échangeuses sont réglées à une température constante homogène jusqu'à la stabilité du flux de chaleur. Puis, la plaque supérieure va générer une sollicitation en température ; l'unidirectionnalité du flux de chaleur est assurée par l'anneau de garde. L'exploitation de la densité du flux de chaleur en régime établi permet de déterminer la conductivité thermique de l'échantillon.

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\Delta T S}{e}$$

$$\lambda = \frac{\phi e}{S \Delta T} = \frac{\phi e}{S(T_c - T_f)}$$

Avec :

- ϕ : Flux traversant l'échantillon (W)
- e : épaisseur de l'échantillon (m)
- T_c et T_f sont respectivement les températures de la plaque chaude et la plaque froide (K)
- S : surface d'échange (m^2)

Des thermocouples et fluxmètres sont installés sur les faces supérieure et inférieure de l'éprouvette pour mesurer les champs de température et densité de flux ; le contact thermique est assuré par pate thermique.

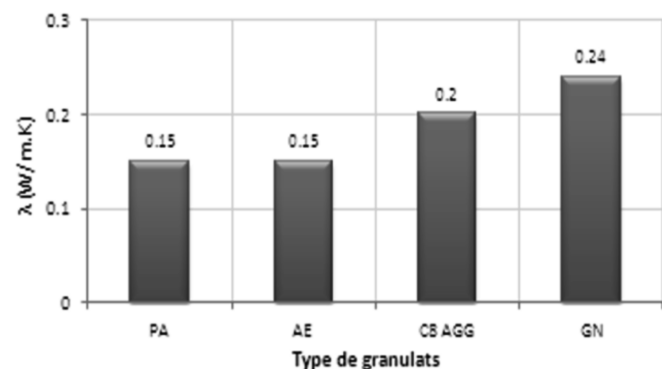


Figure 14. Conductivité thermique à 10°C des granulats secs.



Les résultats présentés en figure 14 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 [11].

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 d'eau 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 [13] (figure 15). Cette quantité d'eau peut être très importante car elle est dépendante de la porosité des granulats. 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 des bétons, 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 [14] car elle peut être relarguée par le granulat. 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 usages de type CEMII/B M (L-S) 32,5 R CE NF fabriqué par le groupe HOLCIM France. Le sable de cette étude est un sable siliceux roulé de classe granulaire 0/5 mm ayant un module de finesse de 2,23 et sa masse volumique réelle est de 2500 kg/m³. La composition des bétons de l'étude est présentée au tableau 2 suivant :

Les propriétés à l'état frais des bétons sont présentées sur le tableau 3, la consistance de tous les bétons est de classe plastique. Les bétons de granulats PA et BAK ont une masse volumique inférieure à 2000 kg/m³, les classant ainsi comme bétons légers.

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)	2146	2024	2205	1794	2350

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

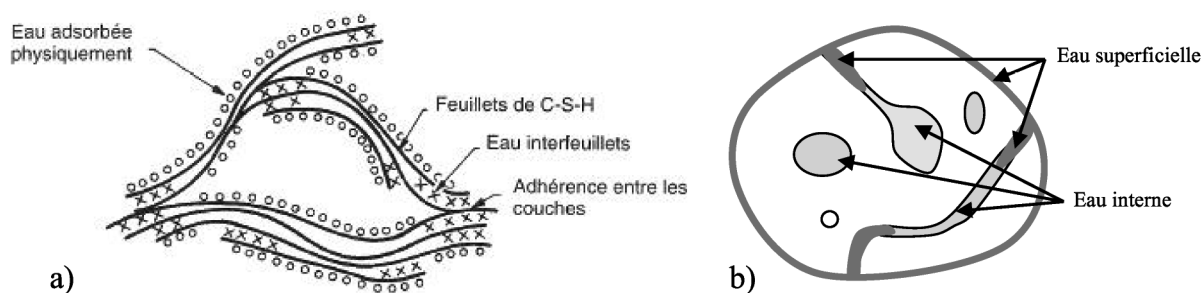


Figure 15. a) l'eau dans la pâte de ciment hydraté [15], b) eau absorbée par un granulat



Figure 16. Confection des bétons.



Figure 17. Essai de compression uniaxiale.

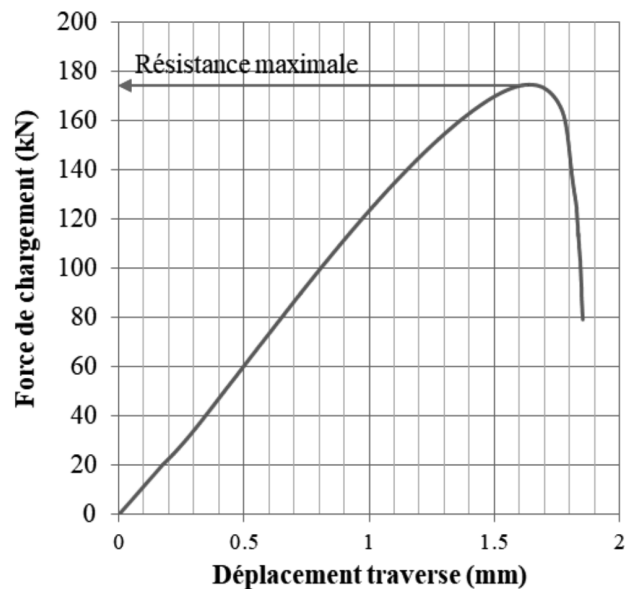


Figure 18. Courbe représentant l'évolution de la force en fonction du déplacement de la traverse pour une sollicitation en compression uniaxiale d'un béton à base de granulats C8 AGG.

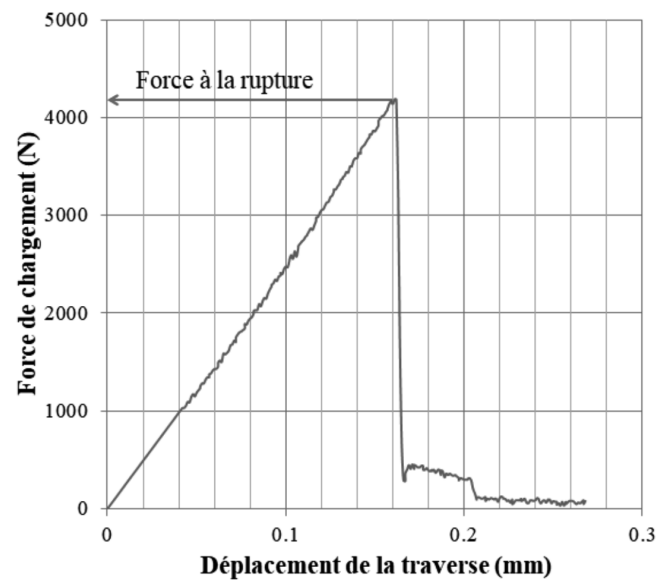


Figure 19. Courbe force-déplacement en flexion d'un béton à base de granulats C8 AGG.

5. CARACTÉRISATION DES BÉTONS

5.1. Caractérisation mécanique

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 mécaniques et thermiques. 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 [16] et par des essais de flexion trois points sur des éprouvettes de 7x7x28 cm selon la norme NF EN 12390-5 [16]. Les essais ont été réalisés sur une presse électromécanique de capacité nominale 250 kN de chez Shimadzu à l'exception du béton ordinaire où une presse hydraulique de capacité nominale de 2600 kN de chez Trebel est utilisée. Les



essais sont pilotés en déplacement afin d'exploiter le comportement post-pic.

Les résultats obtenus sont sous la forme d'une courbe représentant l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement de la traverse. La résistance en compression s'exprimant en MPa se calcule à partir de l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Avec :

- F : Charge maximale (N)
- A_c : l'aire de la section de l'éprouvette soumise à l'essai de compression (mm²)

Par ailleurs, l'interprétation des résultats permet également de déterminer le module d'élasticité tangentiel initial de l'échantillon, en prenant en considération la complaisance de la machine d'essai afin d'estimer le raccourcissement ΔL de l'éprouvette (norme NF EN ISO 604) :

$$\Delta L = v - C_M \times F$$

Avec :

- v : le déplacement de la traverse (mm)
- C_M : la complaisance de la machine d'essai (mm/N)

Les complaisances des presses utilisées sont de 7.0 10⁻⁶ mm/N et 5.2 10⁻⁶ mm/N pour les matériels de chez Shimadzu et Trebel, respectivement.

La résistance à la flexion trois points est donnée par l'équation suivante :

$$f_{cf} = \frac{3 F L}{2 d_1 \cdot d_2^2}$$

Avec :

- F : charge maximale (N)
- L : écartement entre les rouleaux d'appui (mm)
- d₁ et d₂ : dimensions latérales de l'éprouvette (mm)

Les résultats des essais de flexion et de compression à 28 jours des bétons confectionnés sont présentés dans la Figure 20.

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. De manière générale, tous les bétons respectent la norme NF EN 206-01 [17] 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 [18]. Les bétons à base d'éco-granulats montrent donc des propriétés mécaniques intéressantes.

Le module d'élasticité tangentiel initial du béton ordinaire est de 36.7 GPa, conformément à la littérature. Les bétons de granulats carbonatés présentent des modules d'élasticité tangentiel initial plus faibles, de 20 à 33 GPa pour l'intégralité des bétons et des formulations. Le béton de granulat de papier montre les résultats les plus faibles (voir tableau 4 suivant).

Tableau 4. Modules d'élasticité tangentiels des bétons étudiés.

Type de Béton	Module d'élasticité tangentiel initial (GPa)
GN	36.7
BAk	26.0
C8 AGG	28.8
PA DREUX	20.0
PA BARON	26.2
AE	33.1

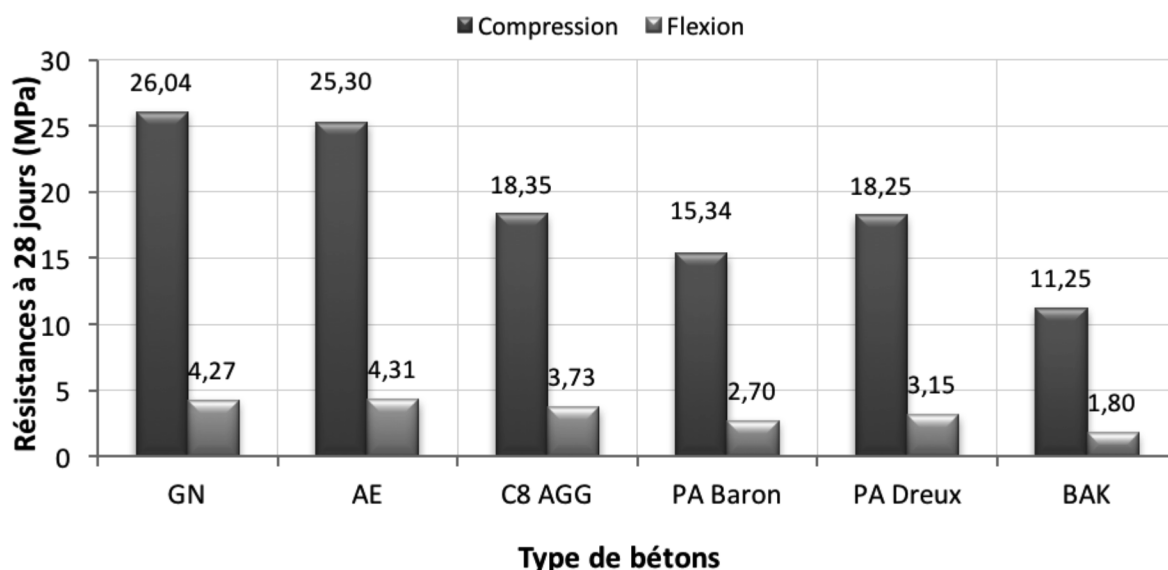


Figure 20. Résistance mécanique des bétons.

Tableau 5. 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 E (J/m ² k s ^{1/2})	1134	1018	1133	910	1449
Diffusivité thermique α (10 ⁻⁶ m ² /s)	0.59	0.68	0.53	0.63	0.72

5.2. Caractérisation thermique

Pour déterminer les performances thermiques d'une paroi, 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 [12] a été utilisée pour mesurer la conductivité thermique.

Le béton à base de granulats BAk a un bon pouvoir isolant, avec une conductivité de 0.73 W/m.K proche à celle du béton à base d'argile expansée AE (tableau 5). La méthode fluxmétrique [12] a été utilisée pour mesurer la chaleur spécifique massique. Les bétons à base de granulats carbonatés ont une chaleur massique de l'ordre de 700 à 800 J/kg.K, du 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 de ce béton à retarder le transfert de chaleur. Cette première étude thermique semble indiquer une bonne inertie thermique des éco-bétons, comparativement à un béton traditionnel.

Cette première approche permet de conclure que les performances thermiques des bétons de granulats carbonatés sont très proches de celles du béton léger de granulats d'argile expansée. Cette 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 l'entreprise 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.

À 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

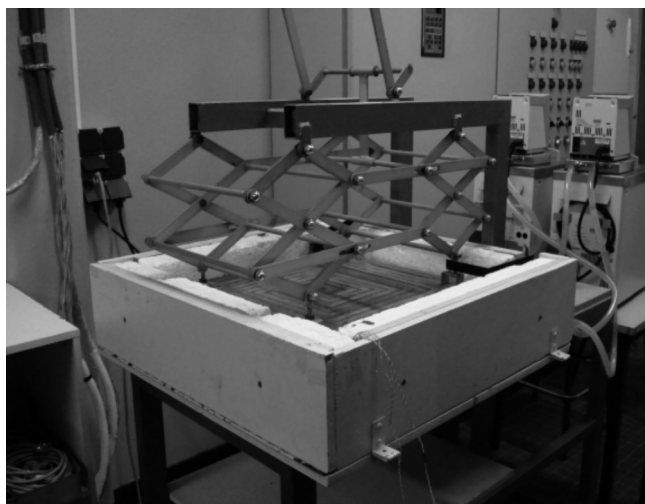


Figure 21. Méthode fluxmétrique.

ce titre, nous souhaitons développer une méthodologie de formulation basée sur les caractéristiques fondamentales des granulats carbonatés.

REMERCIEMENTS

Le projet SAPICO2 a été sélectionné dans le cadre du programme européen de coopération transfrontalière INTERREG IV A France (Manche) - Angleterre, cofinancé par le FEDER.

RÉFÉRENCES 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*, Construction and Building Materials, 2014.
- [3] C. Hills and P. Carey, *Production of secondary aggregates*, US20090104349 A1, 2009.
- [4] <https://www.u-picardie.fr/lti/theme-mee/mee-projets/sapico/sapico2-main-actions-envisaged/sapico2%20trial-production> (en ligne)
- [5] P. Gunning, C. Hills and P. Carey, *Production of lightweight aggregate from industrial waste and carbon dioxide*. *Waste Management* 2009; 29:2722–8.
- [6] A. Antemir, C. Hills, P. Carey and P. Gunning, *Secondary aggregate from waste treated with carbon dioxide*. *Proc ICE-Construction Materials* 2011; 164:231–9.
- [7] *AFNOR NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats*, 1997.
- [8] *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 inter granulaire*, 2004.
- [9] *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.
- [10] *AFNOR NF EN 13055-1 : Granulats légers pour béton et mortier*, 2002.
- [11] A. Bourdot, G. Promis, AD. Tran Le, O. Douzane, A. Benazzouk, F. Rosquoët and T. Langlet, *Hygrothermal properties of blocks based on eco-aggregates: Experimental and numerical study*, Construction and building materials, 2013, 279:289-125
- [12] *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.
- [13] V. M. Arnould M., *Granulats et bétons légers*, Presse de l'ENPC, 1986.
- [14] T. Holm and J. Ries, *High-performance structural lightweight concrete*, American concrete institute, 2004, p. 202.
- [15] <http://doc.lerm.fr/leau-pate-ciment-hydrate/> (en ligne)
- [16] *AFNOR NF EN 12390: Essais pour béton durci*, 2000.
- [17] *AFNOR NF EN 206-1 : Béton - Spécification, performance, production et conformité*, 2004.
- [18] *Guide for structural lightweight-aggregate concrete reported by ACI committee 213*, American concrete institute, 2003.,