

Performances mécaniques et durabilité d'un béton contenant des mâchefers d'incinération carbonatés

Imad Eddine Kanjo¹, Luc Courard¹

¹ *Urban and Environmental Engineering, Université de Liège, Liège, Belgique.*

RESUME

Dans un contexte de transition vers une économie circulaire et de réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction, la valorisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) dans les bétons constitue une piste prometteuse. Cependant, leur utilisation directe reste limitée en raison de leur réactivité chimique résiduelle, de leur hétérogénéité et de leur composition minéralogique complexe, qui peuvent compromettre les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons.

Cette étude examine l'effet d'un traitement par carbonatation accélérée appliqué aux MIOM sur leurs caractéristiques physico-chimiques, ainsi que sur les performances mécaniques et la durabilité des bétons dans lesquels ils sont utilisés en substitution partielle des granulats et sables naturels. La carbonatation vise à stabiliser chimiquement les phases réactives, notamment les hydroxydes et oxydes de calcium, afin de limiter les réactions délétères susceptibles d'apparaître dans le matériau.

Les résultats montrent que la carbonatation accélérée permet d'obtenir des MIOM aux propriétés physiques comparables, voire supérieures, à celles obtenues par maturation. À 10 % de substitution des granulats naturels, les bétons formulés présentent des performances mécaniques et de durabilité similaires à celles du béton conventionnel.

La carbonatation accélérée s'impose comme une méthode de prétraitement efficace, capable de réduire la durée de traitement et les contraintes liées au stockage, tout en piégeant du CO₂ et en limitant l'exploitation des ressources naturelles. Cette approche contribue ainsi à sécuriser leur utilisation dans les matériaux cimentaires et à promouvoir une construction plus durable.

Mots-clefs : béton, granulats, mâchefers, carbonatation, maturation, sable.

I. INTRODUCTION

L'augmentation continue des déchets municipaux, conjuguée à un recours croissant à leur incinération, a conduit à une accumulation significative de mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM). Longtemps considérés comme de simples résidus, les MIOM sont aujourd'hui reconnus comme une ressource secondaire prometteuse pour le secteur de la construction (Dou et al., 2017 ; Kumar & Singh, 2021), en cohérence avec les objectifs de durabilité et de gestion efficiente des ressources (Dhir et al., 2018c). Plusieurs études ont démontré leur potentiel en tant que substituts aux granulats naturels dans diverses applications : béton (Afrianp

et al., 2001), infrastructures routières (Dhir et al., 2018b ; Vaitkus et al., 2018), ou encore ouvrages géotechniques (Becquart & Abriak, 2013). Toutefois, leur hétérogénéité, la présence potentielle de contaminants, ainsi que les incertitudes liées à leur comportement à long terme suscitent encore des réserves (Arm et al., 2011 ; Škultecké et al., 2023). Bien que divers traitements aient été explorés (vieillessement, lavage, stabilisation chimique), la variabilité intrinsèque des MIOM exige des approches spécifiques et une caractérisation approfondie (Dabo, 2008 ; Tegelbeckers et al., 2015). Parmi les différentes méthodes de traitement, la maturation demeure à ce jour la plus couramment utilisée pour traiter les MIOM. Elle consiste à exposer les matériaux à l'atmosphère pendant une période d'environ 18 semaines, pouvant aller jusqu'à 6 mois. Au cours de ce processus, plusieurs transformations physiques, chimiques et minéralogiques se produisent, parmi lesquelles la carbonatation, qui entraîne une diminution du pH ainsi qu'une remobilisation partielle des métaux lourds et des espèces sulfatées présents dans les MIOM (Dhir et al., 2018c). Dans cet article, nous étudions la faisabilité de la carbonatation accélérée en tant que méthode de traitement alternative. Celle-ci présente l'avantage de piéger du CO₂, de stabiliser certains éléments potentiellement dangereux et de réduire significativement la durée de traitement des MIOM (Lin et al., 2015). L'intégration de ce traitement ouvre ainsi des perspectives pour accroître leur fiabilité et faciliter leur valorisation dans les matériaux cimentaires. En outre, une compréhension fine de leur comportement en conditions d'usage est indispensable (Dhir et al., 2018a). La valorisation des MIOM constitue ainsi à la fois un défi technique et une opportunité stratégique dans une perspective d'économie circulaire. Le présent article s'attache à analyser leurs propriétés, à évaluer leurs performances et à étudier leur intégration dans les pratiques constructives contemporaines.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Mâchefers

Dans le cadre de cette étude expérimentale, les mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM) utilisés proviennent de l'incinérateur belge de valorisation énergétique des déchets situé à Thumaide. Deux lots distincts ont été prélevés : le premier, désigné BA_C, a été collecté immédiatement après l'incinération, tandis que le second, nommé BA_M, a été récupéré après un stockage à l'air libre d'une durée de 18 semaines. Chaque lot de MIOM a ensuite été lavé puis tamisé à l'eau afin d'obtenir trois fractions granulométriques : 0,063/2 mm, 2/6 mm et 6/20 mm. Le lot BA_C a par la suite subi un traitement de carbonatation accélérée pendant 24 h (Kanjo et al., 2024a), dans les conditions suivantes :

- Température = 30 °C
- Humidité relative = 60%
- Teneur en CO₂ = 12%,
- Teneur en eau initiale = 20%

Ce traitement de carbonatation forcée a permis d'accélérer le processus de maturation tout en capturant 15 ± 3 kg de CO₂ par tonne de MIOM (Kanjo et al., 2024b). Pour chacune des fractions granulométriques des deux lots, la masse volumique et l'absorption d'eau ont ensuite été déterminées (TABLEAU 1).

TABLEAU 1. Masse volumique et absorption d'eau des granulats fins et grossiers de MIOM sous différentes conditions de traitement.

Classe granulométrique	MIOM carbonatés		MIOM maturés	
	Masse volumique (kg/m ³)	Absorption d'eau (%)	Masse volumique (kg/m ³)	Absorption d'eau (%)
BA 0/2	2160	6,7	1770	10,7
BA 2/6	2380	1,5	2060	6,1
BA 6/20	2550	1,6	2348	3,1

Les MIOM carbonatés présentent une masse volumique plus élevée et un coefficient d'absorption d'eau plus faible que les MIOM maturés, mais elles toujours restent dans le même ordre de grandeur que les valeurs rapportées dans la littérature (Dhir et al., 2018b ; Kanjo et al., 2024a). Le traitement par carbonatation accélérée permet ainsi de réduire significativement la durée de traitement des mâchefers sans altérer leurs propriétés physiques.

B. Sables et granulats naturels

Le calcaire concassé, de classes granulaires 2/6 et 6/20, a été employé en tant que granulats grossiers. Les sables naturels utilisés étaient constitués d'un sable escout (0/2) et d'un sable quartz (0/4), comme indiqué au TABLEAU 2.

TABLEAU 2. Masse volumique et absorption d'eau des sables et granulats naturels utilisés.

	Masse volumique (kg/m ³)	Absorption d'eau (%)
Sable escout 0/2	2640	0,2
Sable quartz 0/4	2650	0,3
Concassé calcaire 2/6	2670	0,5
Concassé calcaire 6/20	2670	0,5

C. Formulation des bétons

Cinq formulations de béton ont été développées à partir de la formulation de référence (CBA) en remplaçant partiellement, en volume, le sable ainsi que les granulats fins et grossiers par des mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM). Le TABLEAU 3 présente un récapitulatif des compositions de ces différents bétons. Comme l'indique ce tableau, deux types de MIOM ont été utilisés : les mâchefers carbonatés pour la fabrication des bétons de type CBC10 et CBC25, respectivement et les mâchefers maturés pour la réalisation des bétons CMS10 et CMS25.

Les bétons formulés visent une application en béton prêt à l'emploi avec une classe d'exposition EE3. Pour ce type d'usage, une teneur minimale en ciment de 320 kg/m³ est exigée, ainsi qu'une classe de résistance minimale C30/37. Tous les bétons ont été formulés en utilisant CEM III/A 42.5 N avec un rapport eau sur ciment effectif (E_{eff}/C) de 0,49.

TABLEAU 3. Formulation des bétons développés (pour 1 m³).

Formulation	CBA (kg/m ³)	CBC10 (kg/m ³)	CBC25 (kg/m ³)	CMS10 (kg/m ³)	CMS25 (kg/m ³)
CEM III/A 42.5 N	350	350	350	350	350
Sable escaut 0/2	120	122	105	122	105
Sable quartz 0/4	685	650	509	650	509
Concassé calcaire 2/6	207	142	0	142	0
Concassé calcaire 6/20	828	690	708	690	708
BA_C 0/2	0	0	143	0	0
BA_C 2/6	0	0	126	0	0
BA_C 6/20	0	158	118	0	0
BA_M 0/2	0	0	0	0	117
BA_M 2/6	0	0	0	0	109
BA_M 6/20	0	0	0	156	109
Superplastifiant	2,60	2,80	2,95	2,86	2,77
Eau	179	180	194	183	196

C. Méthodes d'essais

Pour évaluer l'effet des MIOM ainsi que de leur méthode de traitement sur les performances physiques et mécaniques des bétons produits, plusieurs caractéristiques ont été analysées :

- La masse volumique du béton frais, selon la norme NBN EN 12350-6 :2019, ainsi que la masse volumique du béton durci après 3, 7 et 28 jours, selon la norme NBN EN 12390-7 :2019. Les mesures sont réalisées, sur des cubes de 150 mm.
- La résistance à la compression après 3, 7 et 28 jours mesurée sur des cubes de 150 mm, selon la norme NBN EN 12390-3 :2019.
- L'absorption d'eau par immersion, selon la norme NBN B15-215 :2018.

Tous les éprouvettes ont été compactées sur une table vibrante, puis conservées dans les moules pendant 24h à température ambiante (20 °C) et à une humidité relative de 60 % en laboratoire. Un jour après le coulage, elles ont été démoulées et placées dans une chambre humide à une température de 20 ± 2 °C et une humidité relative de 95 ± 5 %.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Masse volumique

La masse volumique du béton à l'état frais ainsi qu'après 3, 7 et 28 jours de durcissement a été mesurée selon les normes NBN EN 12350-6 :2019 et NBN EN 12390-7 :2019 (TABLEAU 4). Nous avons observé une diminution de la masse volumique du béton avec l'augmentation du volume

de MIOM incorporé, ce phénomène étant attendu compte tenu de la densité inférieure des MIOM par rapport aux granulats et sables naturels. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par [Gražulytė et al., 2022](#). De plus, les formulations contenant des MIOM carbonatés présentent des valeurs similaires à celles contenant des MIOM maturés.

TABLEAU 4. Masse volumique du béton à l'état frais et après 3, 7 et 28 jours de cure.

Masse volumique	Frais (kg/m ³)	3 jours (kg/m ³)	7 jours (kg/m ³)	28 jours (kg/m ³)
CBA	2367	2338	2343	2344
CBC10	2322	2322	2320	2326
CMS10	2310	2294	2304	2318
CBC25	2250	2240	2231	2241
CMS25	2223	2227	2236	2257

B. Résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée après 3, 7 et 28 jours de durcissement conformément à la norme NBN EN 12390-3 :2019 ([FIGURE 1](#)). À 3 et 7 jours, le béton de référence (CBA) présente des performances supérieures à celles des mélanges contenant des MIOM, bien que les écarts restent modérés. À 28 jours, la résistance du CBA dépasse 50 MPa, tandis que les bétons avec 10 % de substitution (CBC10 et CMS10) atteignent des valeurs proches, ce qui suggère un impact limité de cette proportion de substitution sur les propriétés mécaniques à long terme. En revanche, les formulations à 25 % de MIOM (CBC25 et CMS25) montrent une diminution plus marquée des résistances, traduisant une influence négative d'un taux élevé de substitution sur le développement des performances mécaniques. Ces résultats soulignent l'intérêt de limiter le taux de remplacement pour garantir une résistance conforme aux exigences structurelles. Ils sont cohérents avec les observations de [van der Wegen et al., 2013](#) et [Lynn et al., 2016](#).

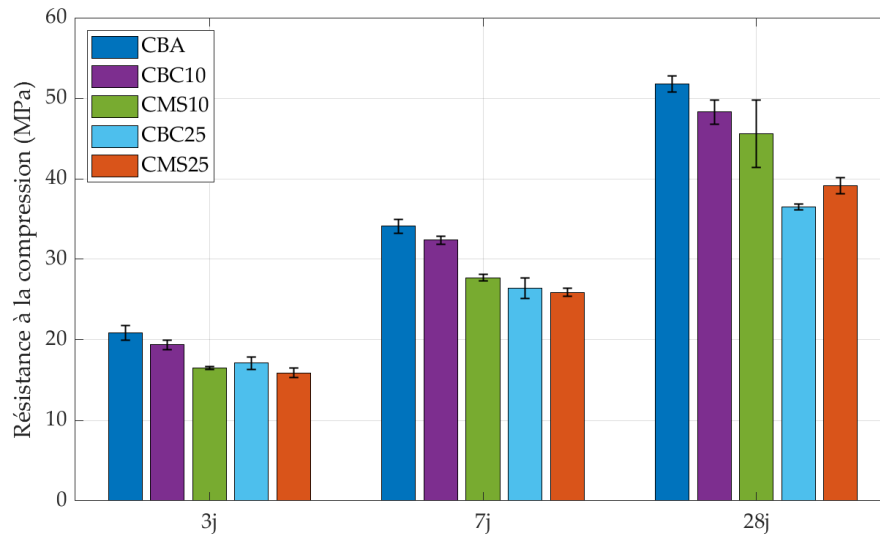


FIGURE 1. Résistance à la compression des différentes formules de béton après 3, 7 et 28 jours.

C. Absorption d'eau

L'absorption d'eau par immersion des différentes formulations de béton a été mesurée selon la norme NBN B-15 215 :2018 (FIGURE 2). Les formulations à 10 % de MIOM (CBC10 et CMS10) présentent un taux d'absorption comparable à celui du béton de référence (CBA). En revanche, les bétons contenant 25 % de MIOM (CBC25 et CMS25) affichent une augmentation de 20 à 25 % par rapport au béton de référence, traduisant une porosité accrue du matériau : la porosité plus élevée des mâchefers, même après carbonatation, accentue cette tendance. Cette tendance suggère que l'augmentation du taux de MIOM dans la matrice cimentaire peut réduire la compacité du béton et, par conséquent, affecter négativement sa durabilité face à la pénétration de l'eau.

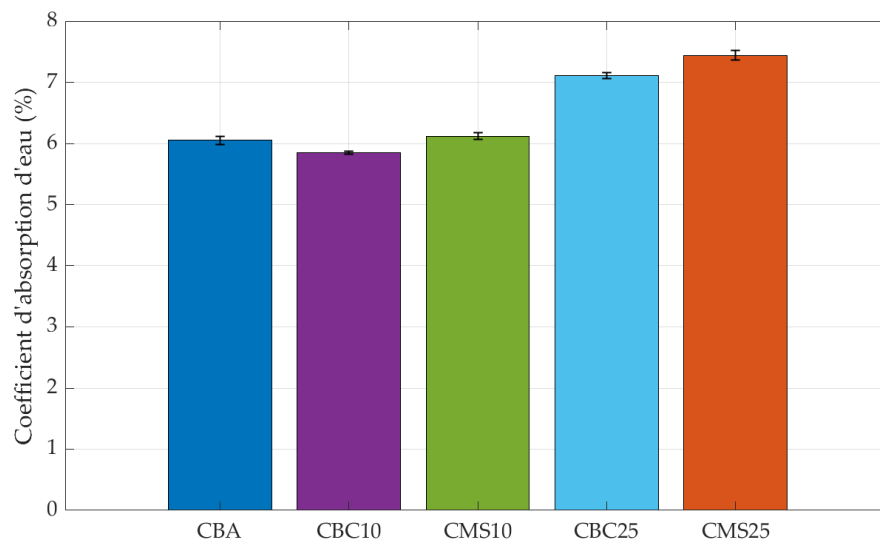


FIGURE 2. Coefficient d'absorption d'eau par immersion des différentes formules de béton.

IV. CONCLUSION

Cette étude a mis en évidence le potentiel des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) traités par carbonatation accélérée en tant que substituts partiels aux granulats et sables naturels dans la formulation de bétons. Les résultats montrent que la carbonatation accélérée permet d'obtenir des MIOM aux propriétés comparables, voire supérieures, à celles des MIOM maturés de manière traditionnelle, tout en réduisant significativement la durée de traitement et en contribuant à atténuer l'effet de serre grâce à la capture du CO₂ dans ces matériaux.

Sur le plan mécanique, les bétons incorporant jusqu'à 10 % de MIOM carbonatés présentent des résistances à la compression à 28 jours similaires à celles du béton de référence. En revanche, un taux de substitution de 25 % induit une baisse plus marquée des performances mécaniques ainsi qu'une augmentation de l'absorption d'eau. Ces résultats suggèrent qu'un taux modéré de substitution permet de concilier valorisation des déchets et respect des exigences de performance, dans une optique de construction durable. Cela contribue également à réduire l'empreinte environnementale du secteur de la construction en favorisant la réutilisation de résidus et en limitant l'extraction de ressources naturelles.

Des perspectives prometteuses s'ouvrent pour :

- Évaluer l'impact des mâchefers sur d'autres indicateurs de durabilité, notamment la lixiviation des bétons, la résistance aux cycles gel/dégel et la carbonatation.
- Approfondir l'étude du comportement à long terme des bétons à base de MIOM en conditions réelles d'exposition.
- Envisager des applications élargies dans des domaines non structurels ou dans la préfabrication, dans une logique d'économie circulaire à grande échelle.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le gouvernement wallon et l'Union Européenne (NextGeneration EU) pour le support apporté à cette recherche dans le cadre du projet PNRR REMIND CARBOC.

REFERENCES

Afrianp, L., Quenec'h, J.L., Levacher, D., 2001. The reuse of municipal solid waste incineration aggregates in manufacturing usual concrete, in: *Geoenvironmental Engineering: Geoenvironmental Impact Management*. Thomas Telford Publishing, pp. 3–8. <https://doi.org/10.1680/gegim.30336.0001>

Arm, M., Suer, P., Arvidsson, H., Lindqvist, J.-E., 2011. Technical and environmental long-term properties of industrial residues – Summary of field and laboratory investigations. *Waste Management* 31, 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.004>

Becquart, F., Abriak, N.E., 2013. Experimental investigation of the Rowe's dilatancy law on an atypical granular medium from a municipal solid waste incineration bottom ash. *AIP Conference Proceedings* 1542, 471–474. <https://doi.org/10.1063/1.4811970>

Dabo, D., 2008. Impact environnemental des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) valorisés en technique routière: caractérisation, expérimentations multi-échelles et modélisation hydro-géochimique (phdthesis). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Dhir, R.K., Brito, J. de, Lynn, C.J., Silva, R.V., 2018a. 4 - Municipal Incinerated Bottom Ash Characteristics, in: Dhir, R.K., Brito, J. de, Lynn, C.J., Silva, R.V. (Eds.), Sustainable Construction Materials. Woodhead Publishing, pp. 91–138. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100997-0.00004-X>

Dhir, R.K., Brito, J. de, Lynn, C.J., Silva, R.V., 2018b. 6 - Geotechnics and Road Pavements, in: Dhir, R.K., Brito, J. de, Lynn, C.J., Silva, R.V. (Eds.), Sustainable Construction Materials. Woodhead Publishing, pp. 197–237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100997-0.00006-3>

Dhir, R.K., Brito, J.D., Lynn, C.J., Silva, R.V., 2018c. Municipal Solid Waste Composition, Incineration, Processing and Management of Bottom Ashes, in: Sustainable Construction Materials. Elsevier, pp. 31–90. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100997-0.00003-8>

Dou, X., Ren, F., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W.P., Chang, V.W.-C., 2017. Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application. Renewable and Sustainable Energy Reviews 79, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.044>

Gražulytė, J., Vaitkus, A., Šernas, O., Žalimienė, L., 2022. The impact of MSWI bottom ash as aggregate on concrete mechanical performance. International Journal of Pavement Engineering 23, 2903–2911. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1873333>

Kanjo, I.E., Hubert, J., Tchuindjang, J.T., Marquis, S., Descamps, P., Dupont, L., Courard, L., 2024a. Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration bottom ash for alternative aggregate production. Proceedings of the 10th International Conference on CONcrete under SEvere Conditions - Environment and loadings CONSEC2024), pp. 145–150. <https://hdl.handle.net/2268/324160>

Kanjo, I.E., Courard, L., Hubert, J., 2024b. Efficiency of processes for the carbonation of municipal solid wastes bottom ash. 1st International Conference on Research and Application of Carbonation Technology for Wastes and Concrete (ReACT2024), Hong-Kong, 11-13 Dec 2024. <https://hdl.handle.net/2268/326602>

Kumar, S., Singh, D., 2021. Municipal solid waste incineration bottom ash: a competent raw material with new possibilities. Innov. Infrastruct. Solut. 6, 201. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00567-0>

Lin, W.Y., Heng, K.S., Sun, X., Wang, J.-Y., 2015. Accelerated carbonation of different size fractions of MSW IBA and the effect on leaching. Waste Management 41, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.003>

Lynn, C.J., Dhir Obe, R.K., Ghataora, G.S., 2016. Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete. Construction and Building Materials 127, 504–517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.132>

Škuldeckė, J., Vaitkus, A., Šernas, O., 2023. Performance of MSWI bottom ash under freezing and thawing. <https://doi.org/10.3846/enviro.2023.881>

Tegelbeckers, P., Aubert, A., Jouvenet, A.J., Moulin, I., Tran, L.T., Elhamzaoui, S., 2015. Qualité et devenir des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux. Etat des lieux et perspectives.

Vaitkus, A., Grazulyte, J., Vorobjovas, V., Šernas, O., Kleiziene, R., 2018. Potential of MSWI bottom ash to be used as aggregate in road building materials. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 13, 77–86. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2018.401>

van der Wegen, G., Hofstra, U., Speerstra, J., 2013. Upgraded MSWI Bottom Ash as Aggregate in Concrete. Waste Biomass Valor 4, 737–743. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9255-6>