

Amélioration des propriétés physiques des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères par carbonatation accélérée: conditions et propriétés

I.E. Kanjo¹, J. Hubert¹, J.T. Tchuindjang¹, F. Michel¹, S. Marquis², Ph. Descamps², L. Dupont³, L. Courard¹

¹ Université de Liège, Urban and Environmental Engineering, Liège, Belgium

² Centre Terre et Pierre, Tournai, Belgium

³ IPALLE, Froyennes, Belgium

RESUME

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) sont des sous-produits industriels viennent de l'incinération des déchets, utilisés principalement comme substitut du sable et des granulats naturels dans les sous-fondations routières et les pavés en béton. Normalement, les MIOM subissent un traitement de maturation avant d'être utilisés, en les exposant à l'atmosphère pendant une période minimale de 18 semaines. Cette étude examine un processus de carbonatation accélérée pour la maturation des MIOM, visant à améliorer à la fois leurs propriétés techniques et leur durabilité environnementale. Les résultats démontrent des améliorations significatives en réduisant la durée de traitement sans compromettre les propriétés physiques telles que la masse volumique et l'absorption d'eau, tout en réduisant simultanément les émissions de gaz à effet de serre grâce à la séquestration de CO₂. Ces conclusions établissent que la carbonatation accélérée pourrait être une technique de maturation efficace pour les MIOM, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour sa mise en œuvre pratique dans les stratégies de gestion des déchets et de valorisation des ressources.

Mots-clefs mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, carbonatation accélérée, maturation accélérée, granulats, béton.

Modalité de présentation Présentation orale

I. INTRODUCTION

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM), représentant 80 % des résidus post-combustion, constituent le principal sous-produit de l'incinération des déchets solides

municipaux, avec une production annuelle de 19 millions de tonnes dans l'Union européenne (CEWEP (2017)). L'incinération des déchets est une méthode efficace et rapide permettant de réduire leur volume (Martin (2020)) ; elle se déroule selon les étapes suivantes (Figure 1) :

- Acheminement et stockage des déchets : Les déchets sont transportés au centre de tri par des bennes et stockés pour éviter tout risque de pollution externe.
- Alimentation du four : Les déchets sont transférés de la zone de stockage à la zone de combustion via un grappin.
- Combustion des déchets : Les déchets sont incinérés entre 900 et 1100°C avec apport d'oxygène.
- Récupération de chaleur : La chaleur produite par la combustion permet de générer de l'électricité via de la vapeur d'eau.
- Deux phases de traitements parallèles :
 - Traitement des matières solides : Séparation des matériaux ferreux et des résidus solides (mâchefers).
 - Traitement des fumées : Filtration des poussières, CO₂, HCl, NO_x, etc. Le résidu de ce traitement produit des cendres volantes.

Après incinération, les MIOM subissent une maturation naturelle avant utilisation, impliquant un stockage en tas pendant au moins 18 semaines, parfois jusqu'à 6 mois. Ils sont souvent utilisés comme substituts du sable naturel et des granulats en raison de leur masse volumique et de leur distribution granulométrique similaires (Courard et al (2002), Dhir et al (2018a), Lynn et al (2016)). Durant cette maturation, une carbonatation naturelle et une lixiviation se produisent, formant des carbonates, principalement de la calcite, et réduisant la teneur en métaux lourds. Cette réaction diminue significativement le pH, passant de 12 à environ 10 (Dhir et al (2018b), Arm et al (2011)). La carbonatation accélérée utilise un mécanisme chimique comparable mais plus rapide, optimisant les conditions de maturation (température, humidité relative, teneur en eau) pour accélérer les réactions. Pour accélérer la carbonatation des MIOM, les matériaux peuvent être placés dans une chambre contrôlée enrichie en CO₂, réduisant ainsi la durée de traitement de plusieurs mois à quelques jours (Lin et al (2015a)).

Cette étude examine la carbonatation accélérée comme processus de maturation pour stabiliser les MIOM.

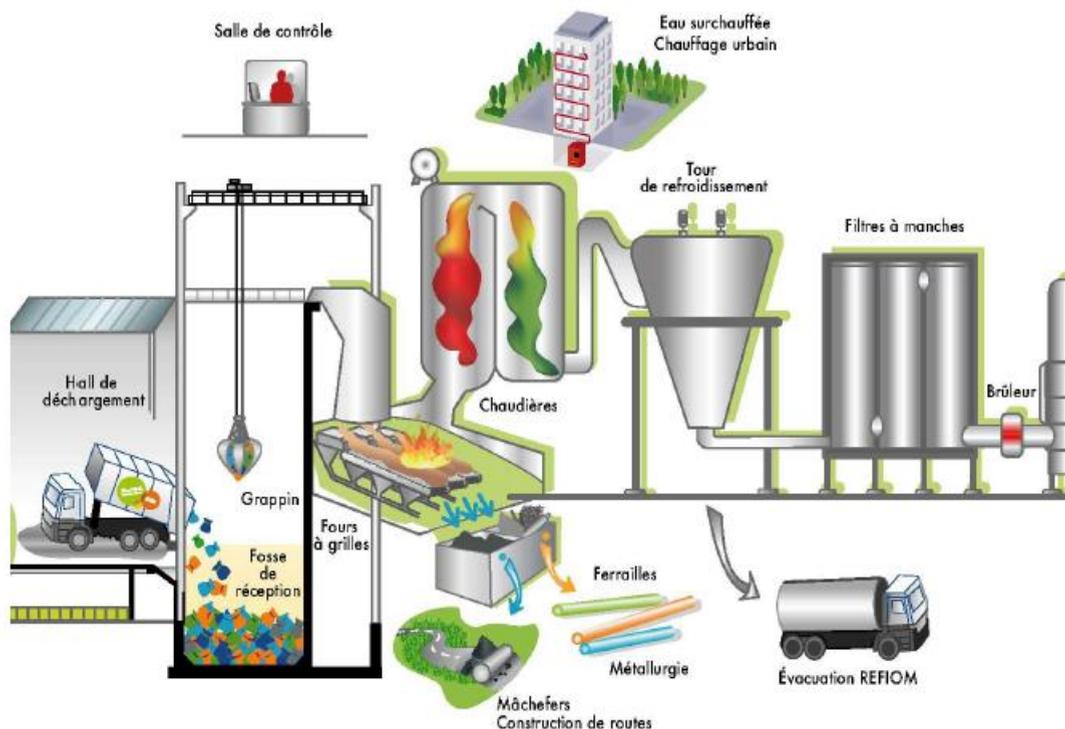


FIGURE 1. Étapes d'incinération des ordures ménagères

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Mâchefers

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) utilisés dans cette étude ont été prélevés au centre d'incinération des déchets de Thumaide (IPALLE, Belgique) directement après le processus d'incinération. Leur fraction granulaire est comprise entre 0 et 20 mm (M0-20) avec une teneur en eau d'environ 20 % (% en masse). Une partie des MIOM a été tamisée à l'eau pour obtenir une fraction granulaire entre 0 et 2 mm (M0-2) avec une teneur en eau d'environ 45 % (% en masse).

B. Carbonatation accélérée

La carbonatation accélérée a été réalisée dans une chambre climatisée maintenant une concentration volumique de CO₂ de 12 % à pression atmosphérique. La température et l'humidité relative à l'intérieur de la chambre ont été maintenues à 30 ± 1 °C et 60 ± 3 %, respectivement. L'expérience a été menée selon deux approches :

- Approche A : les MIOM ont été conditionnés dans une chambre climatique à une température de 30 ± 1 °C et une humidité relative de 60 ± 3 % jusqu'à ce que leur masse devienne constante (4 jours). La teneur en eau des échantillons est passée de 20 % à 2 % pour les deux fractions M0-20_A et M0-2_A avant de commencer la carbonatation accélérée.

- Approche B : la carbonatation a été réalisée directement sans aucun pré-conditionnement (M0-20_B et M0-2_B).

Les échantillons ont été prélevés après avoir été carbonatés pendant 1, 2, 4, 8, 24, 48 et 168 heures. La teneur en CaCO₃, la quantité de CO₂ capté, la valeur du pH et la teneur en eau ont été mesurés.

C. Méthode d'analyse

Après la carbonatation accélérée, les échantillons de MIOM ont été broyés à l'aide d'un broyeur à disque jusqu'à obtenir une taille de particules $d < 300 \mu\text{m}$. La teneur en carbonate de calcium des échantillons a été calculée au moyen d'une analyse thermogravimétrique (Netzsch STA Jupiter 449). Une quantité de 30 à 40 mg de matériau broyé a été pesée dans une coupelle d'échantillon chauffée de 40 à 1000 °C sous une atmosphère d'azote avec une vitesse de chauffage de 10 °C/min. La quantité de CO₂ capté (en g/kg de MIOM) a été calculée à partir de la perte de masse enregistrée par la microbalance entre 500 et 800 °C (Chang et al (2015), Santos et al (2013)) pendant la réaction de décarbonatation (1). La teneur en carbonate de calcium est calculée à partir des équations stœchiométrique (2).



$$\text{CaCO}_3 \text{ (\% en masse)} = \text{CO}_2 \text{ (\% en masse)} \times \frac{\text{MW}_{\text{CaO}} \text{ (g/mole)}}{\text{MW}_{\text{CO}_2} \text{ (g/mole)}} \quad (2)$$

où MW_{CaO} (g/mole) est la masse molaire du CaO et MW_{CO_2} (g/mole) est la masse molaire de CO₂.

Le pH a été mesuré sur une solution avec un rapport liquide-solide (L/S) de 1, en utilisant des MIOM concassés ($< 300 \mu\text{m}$) et de l'eau déionisée. Cette solution est ensuite homogénéisée à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 30 minutes.

Les propriétés physiques, y compris la masse volumique, l'absorption d'eau et la résistance à l'usure (Micro-Deval), des MIOM frais, carbonatés et traditionnellement maturés ont été mesurées en utilisant les procédures normalisées décrites dans les normes NBN EN 1097-6 (2022) et NBN EN 1097-1 (2023).

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Teneur en CaCO₃

La Figure 2 illustre l'évolution de la teneur en carbonate de calcium dans les mâchefers (M0-20) et (M0-2) par rapport à la durée de la carbonatation. Pour les M0-20, la teneur en CaCO₃ augmente proportionnellement avec le temps de stockage, atteignant un plateau à 4 heures pour l'approche A et à 8 heures pour l'approche B. Au-delà de ces points, la teneur en CaCO₃ reste constante. Notamment, l'approche B présente une augmentation plus prononcée de la teneur en CaCO₃ par rapport à l'approche A.

Pour les M0-2, la teneur en CaCO₃ augmente avec le temps jusqu'à 8 heures pour l'approche B et reste constante par la suite. Cependant, avec l'approche A, aucun gain de teneur en CaCO₃ n'est observé même après 7 jours de carbonatation.

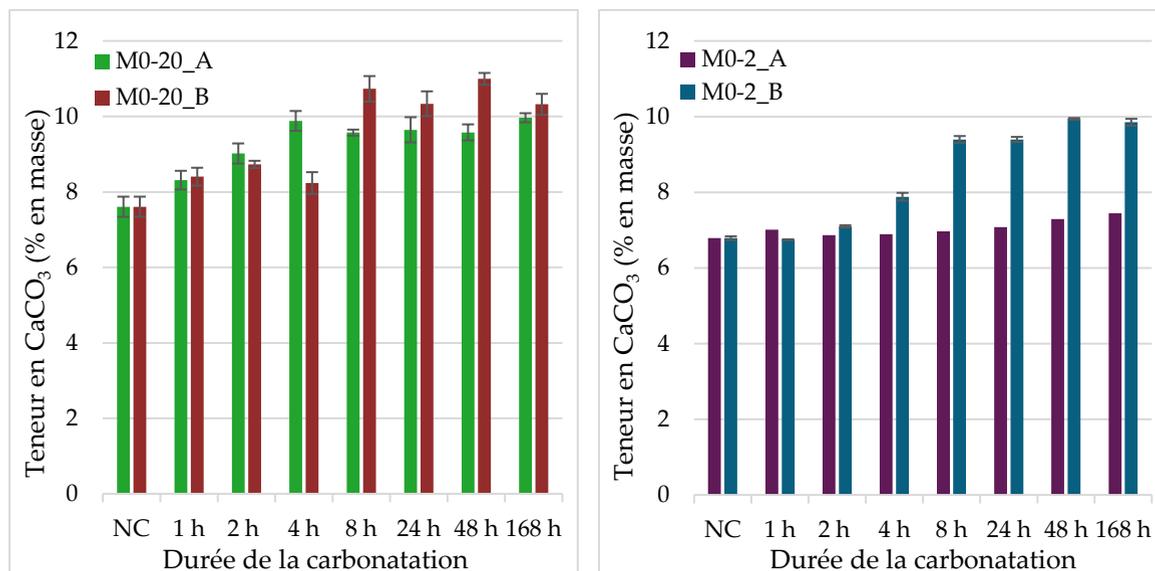


FIGURE 2. Teneur en CaCO₃ des M0-20 (gauche) et M0-2 (droite) après carbonatation pour différents temps de séjour

B. Capture de CO₂

L'évolution de la quantité de CO₂ capté a été représentée de manière similaire à l'évolution de la teneur en CaCO₃. La Figure 3 montre que la quantité de CO₂ capté par les M0-20 augmente proportionnellement avec le temps, atteignant sa valeur maximale à 4 heures pour l'approche A et à 8 heures pour l'approche B. Au-delà de ces points, la quantité de CO₂ capté reste constante. Notamment, l'approche B présente une augmentation plus prononcée de la quantité de CO₂ capté, atteignant près de 14 g/kg de MIOM, comparée à l'approche A (seulement 10 g/kg). Un comportement similaire est observé pour les M0-2, où la quantité de CO₂ capté augmente avec le temps jusqu'à 8 heures pour l'approche B ; par après, les résultats restent constants. Cependant, avec l'approche A, la quantité de CO₂ capté était négligeable par rapport à l'approche B même après 7 jours de carbonatation. Les résultats sont similaires à ceux obtenus par Lin et al (2015a), Lin et al (2015b) et Yoa et al (2022).

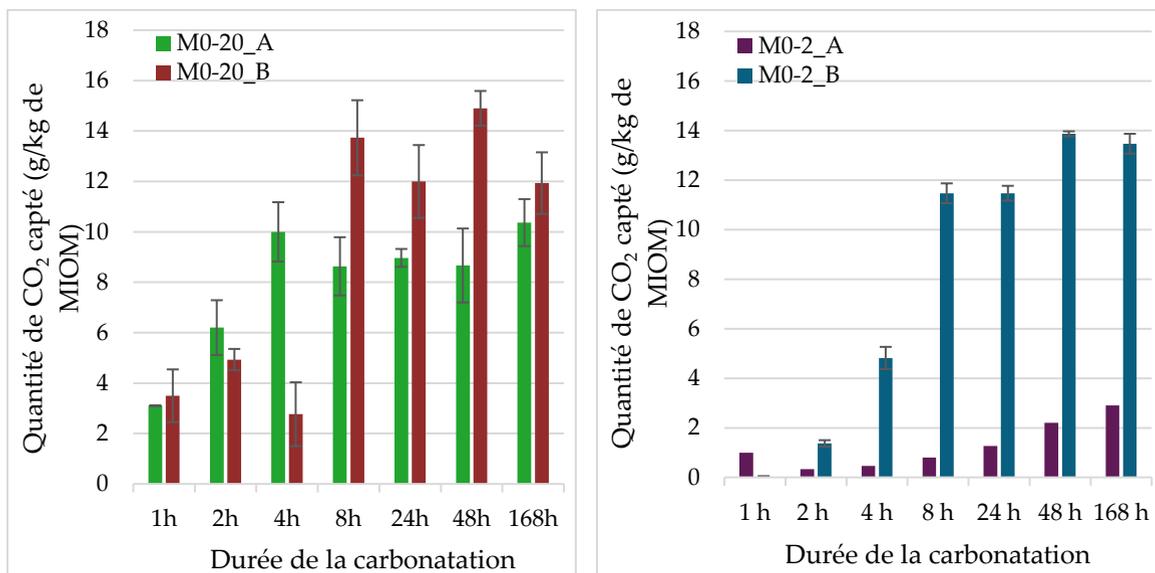


FIGURE 3. Quantité de CO₂ capté pendant la carbonatation accélérée des M0-20 (gauche) et M0-2 (droite)

C. Effet de la teneur en eau

Pour comprendre pourquoi l'approche B était plus efficace que l'approche A, nous avons suivi l'évolution du degré de carbonatation (DoC) et la teneur en eau (WC) en fonction de la durée de carbonatation pour M0-20 et M0-2. La figure 4 montre que l'évolution du degré de carbonatation est plus importante lorsque la teneur en eau est comprise entre 10 et 15% pour M0-20_B et entre 10 et 30% pour M0-2_B. Cette observation est conforme aux résultats précédents de Lin et al (2015b) sur l'effet de la teneur en eau initiale sur l'efficacité du processus de carbonatation accélérée des mâchefer: cela signifie qu'une teneur en eau minimale mais limitée est nécessaire pour le processus de carbonatation.

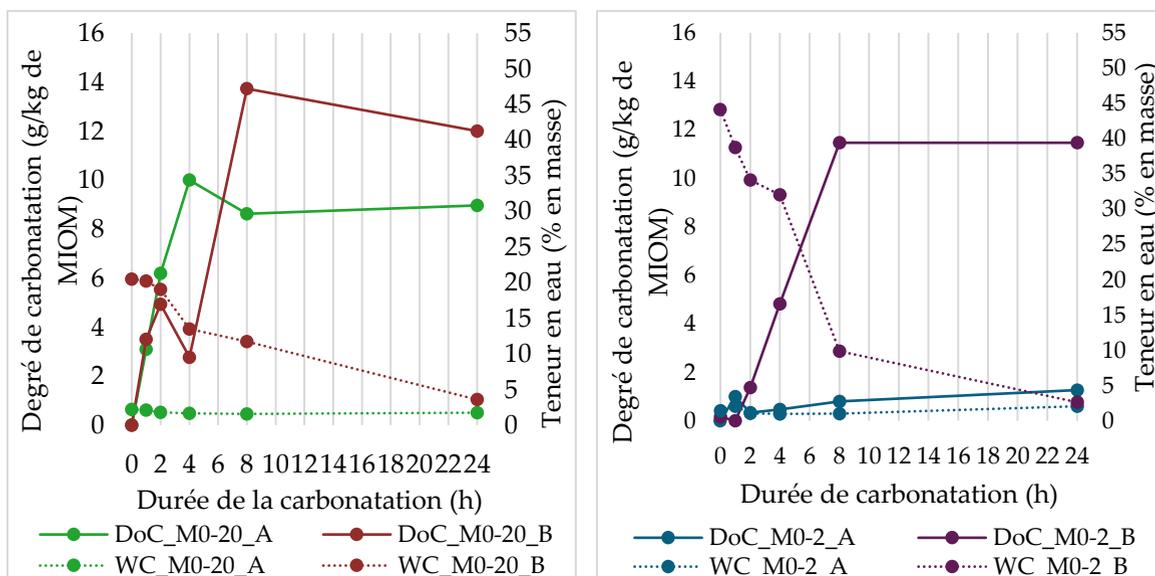


FIGURE 4. Evolution du degré de carbonatation et de la teneur en eau des M0-20 (gauche) et M0-2 (droite) pendant la carbonatation

D. Evolution du pH

Des résultats équivalents ont été obtenus concernant l'évolution du pH, comme le montre la figure 5. Le pH des MIOM a diminué de manière plus significative avec la carbonatation utilisant l'approche B par rapport à l'approche A, pour M0-20 et M0-2. Dans les deux cas, l'utilisation de l'approche B a permis de faire descendre avec succès le pH des MIOM de 12 à 10, similaire à la valeur de pH des MIOM maturés traditionnellement (Dhir et al (2018b), Arm et al (2011)), ce qui est en accord avec les études précédentes de Lin et al (2015a).

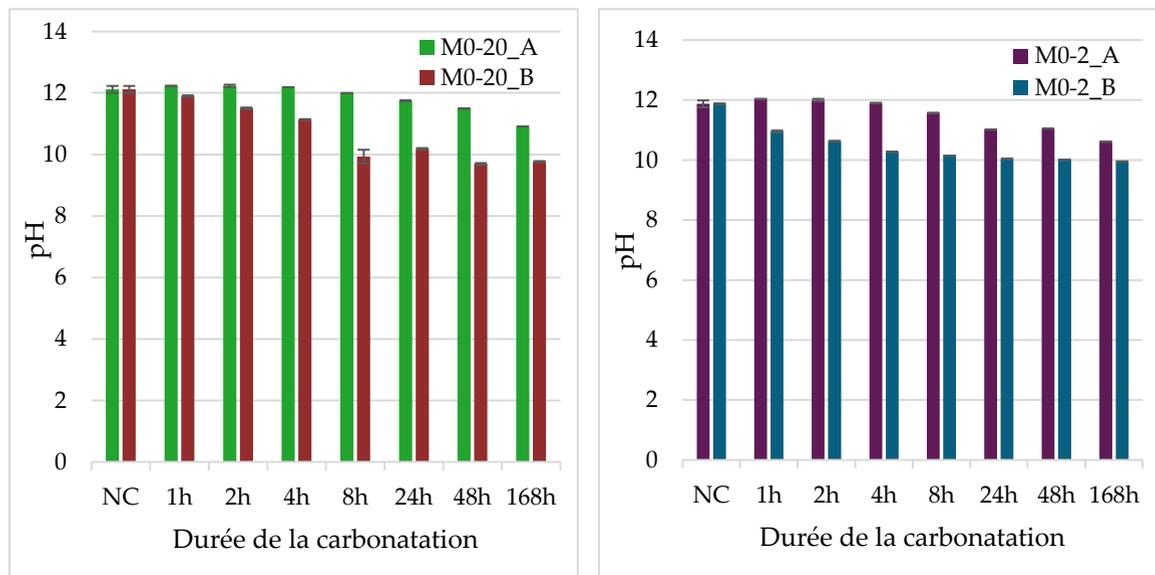


FIGURE 5. Evolution du pH des M0-20 (gauche) et M0-2 (droite) pendant la carbonatation

E. Propriétés physiques

Les tableaux 1 et 2 présentent les propriétés physiques des MIOM frais, maturés traditionnellement et maturés par carbonatation accélérée dans une chambre à environnement contrôlé utilisant l'approche B pendant une durée de 24 heures. Les résultats montrent une amélioration de la masse volumique des fins agrégats de MIOM carbonatés par rapport aux MIOM frais et maturés : cela est dû à la transformation de la plupart du CaO en calcite, bien que cela n'ait pas entraîné de diminution de la capacité d'absorption d'eau. Pour les gros agrégats, ni la carbonatation ni la maturation n'ont significativement affecté la masse volumique ou la capacité d'absorption d'eau. Cela s'explique principalement par le fait que la majeure partie du contenu carbonatable est présent dans la fraction fine des agrégats de MIOM (Lin et al (2015a)). Cela s'est reflété dans le test de résistance à l'usure effectué sur la fraction grossière des agrégats, où l'on peut constater que ni le processus de carbonatation ni le processus de maturation n'ont eu d'effet significatif sur les résultats.

Étant donné que la majorité des résultats mentionnés dans les tableaux 1 et 2 se situent dans la même plage que ceux obtenus dans la littérature par Dhir et al (2018a), Becquart & Abriak (2013) et Descamps et al (2011) sur les propriétés des MIOM maturés traditionnellement, on peut dire qu'aucun des traitements, ni la carbonatation accélérée ni la maturation traditionnelle, n'a d'effet significatif sur les propriétés physiques des MIOM.

TABLEAU 1. Masse volumique et capacité d'absorption d'eau des agrégats fins et grossiers de MIOM sous différentes conditions de traitement (Dhir et al (2018a)).

| | | Frais | Carbonatés | Maturés | Littérature |
|-----------------------|--------------------------------------|-------|------------|---------|-------------|
| Fins agrégats de MIOM | Masse volumique (kg/m ³) | 1840 | 2145 | 2239 | 2150-2850 |
| | Absorption d'eau (% en masse) | 6.9 | 7.3 | 8.24 | 2.2-17.3 |
| Gros agrégats de MIOM | Masse volumique (kg/m ³) | 2280 | 2360 | 2239 | 1860-2680 |
| | Absorption d'eau (% en masse) | 2 | 2.4 | 4 | 7.2-15 |

TABLEAU 2. Résistance à l'usure des MIOM sous différentes conditions de traitement (Becquart & Abriak (2013); Descamps et al (2011)).

| | Frais | Carbonatés | Maturés | Littérature |
|-----------------------------------|-------|------------|---------|-------------|
| Résistance à l'usure (% en masse) | 21 | 24 | 21 | 18-31 |

IV. CONCLUSION

Cette étude tente d'explorer la capacité de capture du CO₂ dans les MIOM en utilisant la carbonatation accélérée et son effet sur le processus de maturation et les propriétés physiques des MIOM. Les MIOM frais ont été carbonatés en utilisant différentes approches pour évaluer leur effet sur le processus de carbonatation et la variation du pH. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats expérimentaux :

- Pour les deux fractions étudiées, la carbonatation humide (approche B) s'est avérée plus efficace en termes de capture du CO₂ et de stabilisation du pH, et plus pratique puisqu'aucun pré-conditionnement n'était nécessaire.
- Concernant le type de traitement utilisé (carbonatation accélérée ou maturation traditionnelle), il n'y a eu aucune amélioration significative des propriétés physiques des MIOM.

Bien que cette étude ait couvert l'effet de la carbonatation accélérée sur les propriétés physiques des MIOM, des études supplémentaires sont nécessaires pour examiner l'effet de la carbonatation accélérée sur les propriétés chimiques et la lixiviation des MIOM, qui sont les principaux obstacles limitant leur utilisation comme matériaux secondaires.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude à la Wallonie (Belgique) et à l'Union Européenne (NextGeneration EU) pour avoir financé cette recherche dans le cadre du projet PNRR REMIND CARBOC.

REFERENCES

- CEWEP (2017) "Bottom Ash Factsheet". [FINAL-Bottom-Ash-factsheet.pdf \(cewep.eu\)](#)
- Martin, L., (2020). "Travail de Fin d'Etudes: Comportement des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères dans les bétons".
- Courard, L., Degeimbre, R., Darimont, A., Laval, A.-L., Dupont, L., Bertrand, L. (2002). "Utilisation des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères dans la fabrication des pavés en béton", *Mater. Struct*, 35: 365-372.
- Dhir, R.K., Brito, J. de, Lynn, C.J., Silva, R.V., (2018a). "Municipal Incinerated Bottom Ash Characteristics", *Sustainable Construction Materials*: 91–138. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100997-0.00004-X>
- Lynn, C., Dhir, R., Ghataora, G., (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>
- Dhir, R.K., Brito, J.D., Lynn, C.J., Silva, R.V., (2018b). "Municipal Solid Waste Composition, Incineration, Processing and Management of Bottom Ashes", *Sustainable Construction Materials*: 31–90. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100997-0.00003-8>
- Arm, M., Suer, P., Arvidsson, H., Lindqvist, J.-E., (2011). "Technical and environmental long-term properties of industrial residues", *Waste Management*, 31(1): 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.004>
- Lin, W.Y., Heng, K.S., Sun, X., Wang, J.-Y., (2015a). "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>
- Chang, E.-E., Pan, S.-Y., Yang, L., Chen, Y.-H., Kim, H., Chiang, P.-C., (2015). "Accelerated carbonation using municipal solid waste incinerator bottom ash and cold-rolling wastewater: Performance evaluation and reaction kinetics", *Waste Management*, 43: 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.001>
- Santos, R.M., Mertens, G., Salman, M., Cizer, Ö., Van Gerven, T., (2013). "Comparative study of ageing, heat treatment and accelerated carbonation for stabilization of municipal solid waste incineration bottom ash in view of reducing regulated heavy metal/metalloid leaching", *Journal of Environmental Management*, 128: 807–821. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.033>.
- NBN EN 1097-6 (2022). "Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption"
- NBN EN 1097-1 (2023). "Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval)"

Lin, W.Y., Heng, K.S., Sun, X., Wang, J.-Y., (2015b). "Influence of moisture content and temperature on degree of carbonation and the effect on Cu and Cr leaching from incineration bottom ash", *Waste Management*, 43: 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.029>

Yao, Z., Prabhakar, A.K., Cadiam Mohan, B., Wang, C.-H., (2022). "An innovative accelerated carbonation process for treatment of incineration bottom ash and biogas upgrading", *Waste Management*, 144: 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.033>

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", *POWDERS AND GRAINS 2013: Proceedings of the 7th International Conference on Micromechanics of Granular Media, Sydney, Australia*, 471–474. <https://doi.org/10.1063/1.4811970>

Descamps, P., Janssens, B., Dupont, L., Lefevre, L. (2011). "Memorandum technique pour l'utilisation des mâchefers de l'unité de valorisation par incinération de Thumaide".