

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

VALORISATION D'UN MÂCHEFER D'INCINÉRATION DE DÉCHETS NON DANGEREUX EN SUBSTITUTION DU SABLE DANS DES MORTIERS DE CIMENTS PORTLAND ET SULFO-ALUMINEUX

Marc Antoun^{A, B}, Georges Aouad^A, Frédéric Becquart^{B, C}, Marianne Saba^A, Najib Gerges^A

^A Faculty of Engineering, University Of Balamand, UOB, Al Koura, Lebanon

^B IMT Lille Douai, LGCgE – GCE, F-59508 Douai, France

^C Université de Lille, F-59000 Lille, France

Résumé : La gestion des ordures ménagères est un enjeu majeur avec des volumes de production de déchets toujours plus importants. L'incinération est une technique efficace pour réduire le volume des déchets solides mais soulève la problématique de gestion et de valorisation pérenne des résidus de combustion, notamment les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND). Jusqu'à aujourd'hui, l'essentiel des travaux concernant la valorisation des MIDND dans le contexte « matériaux cimentaires » repose sur l'utilisation du ciment Portland, avec en sus de nombreuses études soulevant certaines pathologies (gonflement principalement). Dans un contexte de recherche d'une meilleure compatibilité ciment/MIDND relativement à l'application cimentaire, ce papier présente une première approche expérimentale comparative à travers l'utilisation du ciment Portland (OPC) et ciment sulfo-alumineux (CSA) en vue d'envisager une meilleure possibilité de valorisation des MIDND dans des matériaux mortiers/bétons. Le MIDND utilisé dans la présente étude a subi un traitement par enlèvement des métaux ferreux et non ferreux afin d'optimiser la qualité minérale du sable de mâchefer résultant. Une substitution volumique de sable normalisé avec du MIDND a été réalisée selon différents pourcentages (0%, 25% et 75%). Les résistances à la compression et les porosités des mortiers OPC et CSA ont été mesurées respectivement à 1, 7, 28 et 90 jours. Une étude environnementale par essai de lixiviation a été réalisée sur des mortiers après 28 jours de maturation pour tous les taux de substitution. Les résultats montrent que les résistances à la compression des mortiers CSA sont supérieures aux mortiers OPC après substitution. La résistance à la compression avec 25% de substitution à 90 jours baisse de 40% pour les mortiers OPC alors que la baisse n'est que de 11% pour les mortiers CSA. Les analyses des essais de lixiviation montrent que les mortiers avec les deux ciments OPC et CSA immobilisent les éléments suivants : As, Cd, Cu, Mo, Ni, Sb, Se et Zn. De plus, les mortiers CSA stabilisent mieux l'élément Pb. A ce stade d'expérimentation et dans le cadre d'une valorisation en matériau cimentaire, le ciment sulfo-alumineux semble se positionner favorablement en alternative au ciment Portland.

Mots-clés : mâchefer d'incinération de déchets non dangereux (MIDND), matériau cimentaire, ciment Portland, ciment sulfo-alumineux, résistance à la compression, porosité, lixiviation

1. INTRODUCTION

Dans un contexte accru de développement durable, la gestion et le devenir des ordures ménagères par la valorisation sont devenus des enjeux majeurs de la société, avec en sus toute la problématique d'acceptabilité dans les mentalités pour les matériaux alternatifs formulés partiellement ou en totalité avec un ou plusieurs constituants de nature « déchet ».

La solution de gestion/réduction par l'incinération est une technique qui réduit environ 90% du volume des déchets (Pecqueur, Crignon, and Quénée 2001)(Ciarn J. Lynn et al.)(Jurič et al. 2006)(An et al. 2014). Les incinérateurs modernes transforment les ordures ménagères en 3 composants majeurs: énergie, cendres volantes (REFIOM) et mâchefers (MIDND) (An et al. 2014). Les résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères (REFIOM) sont les cendres volantes captées par les filtres ; elles sont mises en décharge après stabilisation par NaHCO_3 (Forteza et al. 2004)(Astrup 2008). Sachant que les MIDND peuvent contenir des éléments toxiques (Jing et al. 2007)(Ciarán J. Lynn, Ghataora, and Dhir 2016)(Alam et al. 2017), ces derniers doivent subir des traitements préalables avant d'envisager d'être valorisés (Forteza et al. 2004)(Karagiannidis, Kontogianni, and Logothetis 2013). Les MIDND passent par des procédés d'élaboration et techniques de traitements spécifiques avec notamment le refroidissement à l'eau en sortie de four, la maturation à l'air libre pendant plusieurs mois, l'élaboration granulométrique et l'enlèvement de métaux ferreux/non ferreux. Une stabilisation au ciment ou encore un traitement hydrothermal (Jing et al. 2007)(Jing et al. 2010)(Jing et al. 2013)(An et al. 2014)(S. Arickx, T. Van Gerven 2006)(Rafael M. Santos, Gilles Mertens, Muhammad Salman, Özlem Cizer 2013) peuvent être également appliqués

Transversalement à la problématique globale de gestion et de valorisation des déchets, l'utilisation de matériaux granulaires alternatifs recyclés est en plein essor et est devenue incontournable en raison de la nécessité de préservation des ressources granulaires naturelles non renouvelables (Abbà et al. 2014). Dans le domaine de la construction, le mâchefer constitue un granulat alternatif d'intérêt car il est produit en grande quantité (environ 3 millions de tonnes annuellement produites en France) et a une composition minérale propice à une utilisation dans les matériaux de constructions. En France, les MIDND ne sont pas encore reconnus comme matériau granulaire à part entière du fait de leur nature (« déchet » avec la problématique d'acceptabilité dans les mentalités) et d'un contexte normatif encore trop peu favorable aux granulats recyclés.

Il convient néanmoins de préciser que la réutilisation des MIDND est devenue une pratique courante aux Pays-Bas, Danemark, en Belgique pour la construction des routes et la préfabrication (bordures, pavés, blocs bétons, etc.) (Del Valle-Zermeño et al. 2014)(Becquart et al. 2009)(Flyhammar and Bendz 2006)(Luo et al. 2017). Les pays européens ont largement utilisé les mâchefers dans la construction de remblais ou des sous-couches routières en substitution du gravier (Forteza et al. 2004)(Hill, Dawson, and Mundy 2001)(Beltrán et al. 2014)(Pecqueur, Crignon, and Quénée 2001)(Hjelmar, Holm, and Crillesen 2007).

Tenant compte de leur caractère hétérogène du fait même de leur origine, une utilisation rationnelle et bénéfique des MIDND dans les matériaux cimentaires est directement liée à leur qualité de préparation et à leurs propriétés physico-chimiques et environnementales résultantes. Les recherches expérimentales concernant la réutilisation des mâchefers dans le béton ont révélé plusieurs pathologies. En effet, l'association des mâchefers d'incinération avec une pâte cimentaire peut engendrer sous certaines conditions des réactions chimiques à l'intérieur de la matrice et induire des phénomènes de gonflements sur les ouvrages en béton. Les réactions typiques susceptibles de se produire sont la réaction alcali-silice, la réaction de l'aluminium métal pour former les hydroxydes d'aluminium et les aluminates hydratés, la formation de l'ettringite secondaire ou encore l'hydratation de la chaux et des oxydes de magnésium. Il découle de cet état des lieux plusieurs points stratégiques en développement à considérer des points de vue techniques et scientifiques pour converger à moyen terme vers une meilleure valorisation des mâchefers en interaction cimentaire. Plus précisément, l'optimisation de la qualité minérale des fractions de mâchefers, la recherche d'une meilleure compatibilité ciment/mâchefer ainsi que la cruciale question de la valorisation de la fraction fine (< 2 mm) des mâchefers dans des applications compatibles sont des cibles stratégiques.

Dans ce contexte global, cette étude s'inscrit dans le cadre de la recherche d'une meilleure compatibilité ciment/mâchefer et présente en première approche l'utilisation d'un ciment sulfo-alumineux comme alternative au ciment Portland pour le recyclage de la fraction 0-2 mm du mâchefer dans les

mortiers cimentaires. Par analyse comparative, les effets de l'utilisation de ces deux types de ciment sur la résistance à la compression et l'impact environnemental des mortiers sont étudiés considérant plusieurs taux de substitution volumiques.

2. MATÉRIAUX MACHEFERS : PRÉSENTATION ET CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE

Les mâchefers étudiés proviennent de la plate-forme de recyclage RMN-PréFerNord localisée à Fretin en région Hauts-De-France en France près de Lille. Près de 150 000 à 180 000 tonnes de mâchefers sont traités sur cette plate-forme, ce qui en fait l'une des plus importantes en France et la plus importante située au nord de Paris considérant les tonnages. Le MIDND étudié a subi une période de maturation de 4 mois à l'air libre et est valorisable selon l'arrêté du 11 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des MIDND (A.M. Ministre de l'écologie du développement durable des transports et du logement, 2011). La fraction 0/20 mm élaborée par la ligne de traitement de la plate-forme a été ensuite concassée et broyée finement en laboratoire-ligne pilote (hors de la plate-forme dans des installations dédiées) pour obtenir une fraction sableuse de mâchefer de fraction 0/4 mm. Cette fraction sableuse a subi dès lors un traitement par enlèvement des métaux ferreux et non ferreux après passage sur une ligne de traitement évoluée intégrant notamment l'utilisation d'un courant de Foucault dernière génération afin d'épurer au mieux les sables de mâchefers résultants concourant à meilleure qualité des fractions minérales. Les fractions 0/2 mm et 2/4 mm de la fraction sableuse 0/4 mm ont été traitées séparément. Cette méthodologie d'élaboration de sables de mâchefers 0/4 mm améliorés à partir de mâchefers de calibre grossier est décrite dans le récent travail de recherche doctoral de MINANE (Minane 2017).

2.1. Caractérisation physique

Les grains de mâchefers sont d'aspect scoriacé et de forme concassée (anguleuse). Afin de garantir des lots d'échantillons représentatifs, un quartage a été fait à l'aide d'un diviseur-échantillonneur. Les analyses granulométriques du mâchefer et du sable normalisé ont été conduites par voie sèche sur le refus à 0.063 mm et conformément à la norme (EN 196-1). La courbe granulométrique du mâchefer (figure 1) s'inscrit globalement dans le fuseau de spécification du sable normalisé. Le taux de fines de mâchefers est de l'ordre de 2.2 %.

La densité réelle et l'absorption des granulats de MIDND ont été obtenues selon la norme en vigueur (EN 1097-6) (NBN EN ISO 1097 6 2013). Les mâchefers et sable normalisé ont respectivement une densité réelle de 1.95 t/m^3 et de 2.6 t/m^3 . Les mâchefers présentent donc une porosité intragranulaire plus importante que le sable naturel et caractérisée par un coefficient d'absorption d'eau mesurée expérimentalement et de l'ordre de 8%.

2.2. Caractérisation chimique

Les éléments majeurs ont été obtenus par fluorescence X tandis que les éléments traces ont été analysés par spectrométrie d'émission atomique couplée par plasma inductif (ICP-AES Varian 720-ES) après digestion acide par micro-ondes.

Le tableau 1 montre la composition chimique des mâchefers étudiés. Les éléments majeurs présents dans le MIDND sont : Si, Al, Na, Fe et Ca. Ce tableau présente également les concentrations des éléments trace ; les plus abondants sont: Ba, Cu, Zn et Pb.

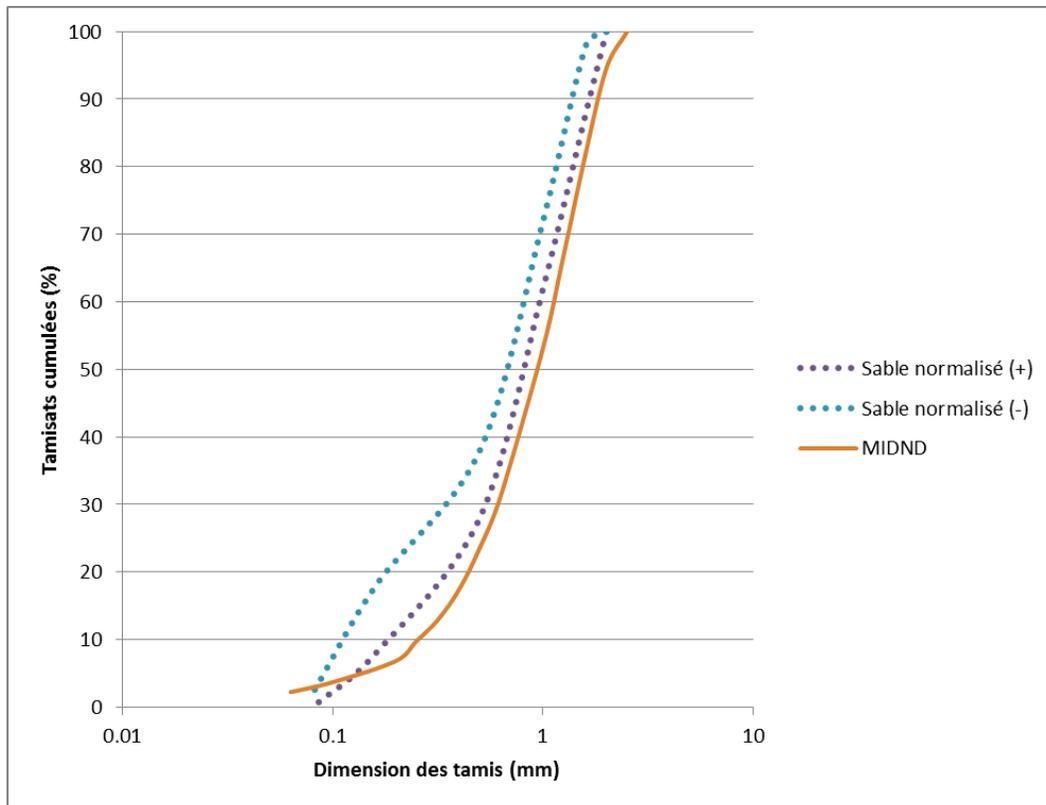


Figure 1. Granulométrie du MIDND et fuseau de spécification du sable normalisé

<i>Eléments</i>	<i>O</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>
<i>Concentration (%)</i>	47.9	4.07	1.72	4.28	21.19	0.70	0.94	0.68	1.18	13.21	0.39	2.75	0.16

<i>Eléments</i>	<i>As</i>	<i>Ba</i>	<i>Cd</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Pb</i>	<i>Sb</i>	<i>Se</i>	<i>Zn</i>
<i>Concentration (mg/kg)</i>	17	3065	2.8	374	1177	5.7	42	689	8.1	<2.8	2510

Tableau 1. Composition chimique du MIDND

3. PREPARATION DES MORTIERS ET METHODES DE CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

3.1. Confection des mortiers et données massiques de formulation

Deux types de ciment ont été utilisés pour la confection des mortiers : un ciment Portland CEM I 52.5N de Lafarge-Holcim (noté OPC) et un ciment sulfo-alumineux Alpenat de Vicat (noté CSA). La formulation OPC1 représente le mortier de référence qui ne contient pas de MIDND tandis que les formulations OPC2 et OPC3 sont les mortiers où le sable normalisé a été remplacé par du mâchefer respectivement avec des taux de substitution volumique de 25% et 75%. La même dénomination de

formulation s'applique pour CSA ; les taux substitutions volumiques sont également identiques aux formulations OPC.

Les mortiers ont été préparés sans adjuvantation selon la norme européenne EN 196-1 (EN196-1 2005) en utilisant un malaxeur à mortier et les divers constituants : ciment, eau déminéralisée, sable normalisé et mâchefer sec. Les mortiers ont été mis en place dans des moules polystyrène de dimensions 4x4x16 cm sur table vibrante. Le rapport eau/ciment (E/C) efficace utilisé a été fixé à 0.5. La substitution du sable normalisé par le MIDND a été faite en gardant un volume de pâte constant.

Le tableau 2 présente les compositions massiques des constituants des divers mortiers. Durant leur préparation, du fait d'un volume de pâte maintenu constant, de facto, les proportions massiques de MIDND incorporés croissent avec l'augmentation du taux de substitution. Il en va de même pour le rapport eau/ciment total.

Les mortiers ont mûris sous cure humide (100% d'humidité) et à une température ambiante de 21°C pendant respectivement 1, 7, 28 et 90 jours. Une presse électromécanique de 150 KN a été utilisée pour la réalisation des tests de résistances à la compression des mortiers sous ces différentes échéances de cure. La porosité totale a été mesurée par porosimétrie mercure (MIP).

Formulation	OPC1	OPC2	OPC3	CSA1	CSA2	CSA3
Substitution volumique (%)	0	25	75	0	25	75
Ciment (g)	450	450	450	450	450	450
Sable normalisé (g)	1350	1012.5	337.5	1350	1012.5	337.5
MIDND (g)	0	253.13	759.38	0	253.13	759.38
Eau (g)	225	245.25	285.75	225	245.25	285.75

Tableau 2. Données massiques de formulation des mortiers

3.2. Mode opératoire pour la caractérisation environnementale

Pour évaluer l'impact environnemental des mortiers formulés, des tests de lixiviation selon la norme européenne EN 12457-3 (EN 12457-3 2002) ont été réalisés sur des échantillons broyés après une période de maturation de 28 jours. Les essais de lixiviation ont été réalisés avec un rapport liquide/solide égal à 10. Après avoir ajouté de l'eau distillée, les échantillons ont été automatiquement homogénéisés avec un agitateur à température ambiante (20°C) pendant 24 h. Après filtration à l'aide d'un filtre de 0,45 µm, les concentrations en métaux lourds ont été déterminées en utilisant la spectrométrie d'émission atomique couplée par plasma inductif (ICP-AES) et comparées aux valeurs seuils admissibles de la réglementation (décision 2003/33/EC) (The Council of the European Union).

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

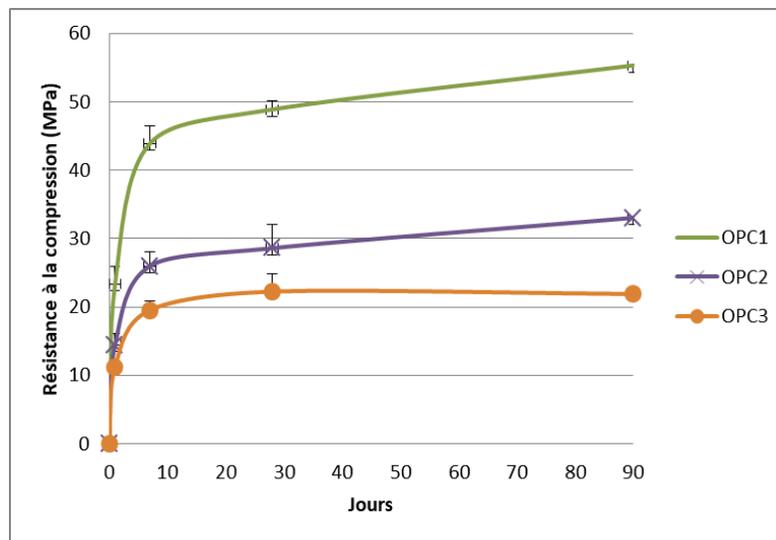
4.1 Évaluation de la résistance à la compression des mortiers

Les figures 2-a et 2-b montrent respectivement les résistances à la compression à 1, 7, 28 et 90 jours pour les mortiers OPC et CSA pour des taux de substitution de 0%, 25% et 75%. Les résultats montrent que la résistance à la compression des mortiers OPC souffre d'une chute importante pour la moindre substitution de 25% pour OPC2 qui a une résistance à la compression de 28.59MPa, relativement au témoin OPC1 qui a une résistance à la compression de 48.87. Cet effet s'accroît pour le mortier OPC3 à 90 jours qui atteint une résistance à la compression de 21.90 MPa. Pour les mortiers CSA, la chute de résistance mécanique avec l'augmentation de mâchefers incorporés est nettement plus atténuée relativement au témoin. D'autre part, même si la résistance à la compression du mortier OPC1

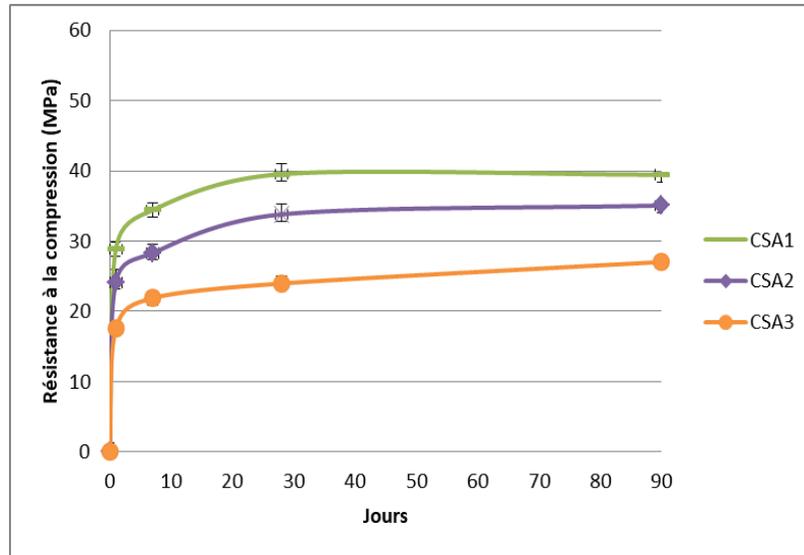
(48.87 MPa et 55.31 MPa) est supérieure à celle de CSA1 à 28 et 90 jours (39.54 MPa et 39.45 MPa), les résistances à la compression des mortiers CSA2 (33.82 MPa et 35.08MPa) et CSA3 (23.98MPa et 27.05 MPa) sont systématiquement supérieures à celles des mortiers OPC2 (28.59 MPa et 33.03 MPa) et OPC3 (22.24 MPa et 21.90 MPa) après substitution.

4.2 Évaluation de la porosité des mortiers

Les différentes porosités des mortiers OPC et CSA à 90 jours sont représentées sur la figure 3 pour des taux de substitutions de 0%, 25% et 75%. Les valeurs initiales de porosité des mortiers témoins OPC1 et CSA1 sont respectivement de 12.7% et 13.6% ; cette différence contribue déjà pour une part au fait que la valeur de la résistance à la compression pour l'OPC1 (55.3 MPa) est supérieure à celle du CSA1 (39.5 MPa). Après 25% de substitution, la porosité du mortier OPC2 (20.1%) dépasse celle du mortier CSA2 (16%) ; le mortier OPC2 a une résistance mécanique en compression inférieure (33 MPa) à celle de CSA2 (35.1 MPa). De plus, les valeurs de porosités sont notablement supérieures pour OPC3 (29.48%) par rapport à CSA3 (22.65%) et cela se traduit pour la résistance à la compression pour OPC3 (21.90 MPa) qui est inférieure à celle de CSA3 (27.05 MPa).



(a)



(b)

Figure 2. Résistances à la compression à 1,7,28 et 90 jours pour des taux de substitutions de 0%, 25%, et 75% pour les mortiers OPC (a) et CSA (b)

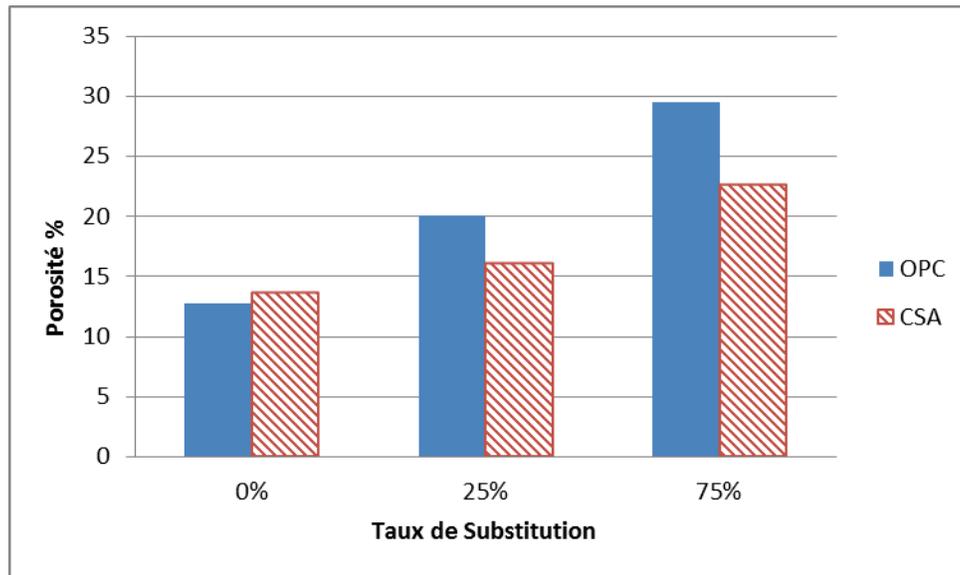


Figure 3. Porosité des mortiers OPC et CSA à 90 jours en fonction du taux de substitution

4.3 Évaluation de l'impact environnemental

Les caractérisations environnementales des mortiers des deux types de ciment ont été opérées à travers des essais de lixiviation ; les résultats expérimentaux sont présentés respectivement dans les tableaux 3(a) et 3(b) pour les mortiers OPC et CSA. Les concentrations des éléments As, Cd, Cu, Mo, Ni, Sb, Se et Zn sont en deçà des valeurs seuils pour les déchets inertes. Cependant, As, Cd, Mo, Ni, Sb et Se sont présents en petites quantités dans la composition du mâchefer (tableau 1); ceci explique les faibles concentrations observées dans l'essai de lixiviation. Quant aux valeurs de concentrations initiales

élevées dans le mâchefer du Cu et Zn (1177 mg/kg et 2510 mg/kg respectivement), ces valeurs sont bien stabilisées à la fois pour l'OPC ainsi que pour le CSA même après 75% de substitution puisque les concentrations obtenues avec lixiviation sont plus faibles que la limite des déchets inertes.

Pour l'élément Ba, les concentrations pour l'OPC sont plus élevées que les valeurs seuils des déchets inertes mais sont inférieures avec le CSA. De plus, les concentrations de l'élément Cr sont inférieures aux valeurs seuils des déchets inertes pour l'OPC mais sont supérieures pour le CSA, restant toutefois inférieures aux valeurs seuils des déchets non dangereux. Ceci peut être expliqué par le fait que le ciment Portland a une composition riche en Ba puisque les concentrations du mortier témoin dépassent la valeur seuil des déchets inertes ; il en va de même pour le Cr concernant le CSA.

Elément	MIDND	Concentration (mg/kg)						Valeurs seuils		
		OPC1	OPC2	OPC3	CSA1	CSA2	CSA3	Déchets Dangereux	Déchets Non-Dangereux	Déchets Inertes
As	17	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	25	2	0.5
Ba	3065	36	44	47	0.5	0.8	1.1	300	100	20
Cd	2.8	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	5	1	0.4
Cr	374	0.1	0.1	0.3	3.3	3.1	3.3	70	10	0.5
Cu	1177	<0.01	<0.01	0.1	<0.01	<0.01	0.2	100	50	2
Mo	5.7	<0.05	<0.05	0.06	0.2	0.2	0.4	30	10	0.5
Ni	42	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	40	10	0.4
Pb	689	<0.05	<0.05	0.5	<0.05	<0.05	<0.05	50	10	0.5
Sb	8.1	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12	5	0.7	0.06
Se	<2.8	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	<0.07	7	0.5	0.1
Zn	2510	<0.03	0.06	0.02	0.1	<0.03	<0.03	200	50	4

Tableau 3. Valeurs des seuils admissibles par l'EU pour les sites de décharges (décision 2003/33/EC), et les concentrations de lixiviations des mortiers selon la norme EN 12457-2 pour OPC et CSA

5. CONCLUSION

Ce papier présente un premier travail de recherche focalisé sur l'évaluation de l'apport d'un ciment CSA en interaction mâchefer avec pour référence le cas standard d'un ciment OPC. Dans une première approche, cette évaluation a été réalisée du point de vue physico-mécanique (porosité/résistance mécanique) et environnementale (lixiviation).

Les analyses des résultats physico-mécaniques sur mortiers mettent en avant une meilleure réponse obtenue avec le ciment CSA, caractérisée par une chute de performances mécaniques moindre qu'avec l'OPC et une plus faible porosité des mortiers CSA. Du point de vue environnemental, les mortiers sont classés en déchets non dangereux (l'élément Ba fait passer le mortier OPC d'inerte à non dangereux ; pour le mortier CSA, l'élément Cr agit dans le même sens).

La poursuite de ce travail de recherche s'inscrit dans une analyse plus approfondie de la porosité des mortiers et dans l'étude de durabilité de tels mortiers, d'autant plus intéressant que les taux de substitutions volumiques sont importants (> 50%).

RÉFÉRENCES

A.M. Ministre de l'écologie du développement durable des transports et du logement. Arrêté ministériel

du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux, 18 novembre 2011. Version consolid, 8 pages. "No Title."

Abbà, Alessandro, Maria Cristina Collivignarelli, Sabrina Sorlini, and Matteo Bruggi. 2014. "On the Reliability of Reusing Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration as Aggregate in Concrete." *Composites Part B: Engineering* 58: 502–9.

Alam, Qadeer, M. V.A. Florea, K. Schollbach, and H. J.H. Brouwers. 2017. "A Two-Stage Treatment for Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash to Remove Agglomerated Fine Particles and Leachable Contaminants." *Waste Management* 67: 181–92.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.029>.

An, Jinwoo et al. 2014. *Evaluating the Use of Waste-to-Energy Bottom Ash as Road Construction Materials. Report No. BDK78-977-20*.

Astrup, Thomas F. 2008. "Management of APC Residues from W-t-E Plants - An Overview of Management Options and Treatment Methods." (October): 116.

Becquart, Frederic, Fabrice Bernard, Nor Edine Abriak, and Rachid Zentar. 2009. "Monotonic Aspects of the Mechanical Behaviour of Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration and Its Potential Use for Road Construction." *Waste Management* 29(4): 1320–29.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.019>.

Beltrán, Manuel G. et al. 2014. "Mechanical and Durability Properties of Concretes Manufactured with Biomass Bottom Ash and Recycled Coarse Aggregates." *Construction and Building Materials* 72: 231–38.

EN 12457-3. 2002. European Committee of Standardization, CEN/TC 292 *Two Stage Batch Test at a Liquid to Solid Ratio of 2 l/Kg and 8 l/Kg for Materials with High Solid Content and with Particle Size below 4 Mm (without or with Size Reduction)*.

EN196-1. 2005. "Methods of Testing Cement - Part 1: Determination of Strength." *European Standard*: 1–33.

Flyhammar, P., and D. Bendz. 2006. "Leaching of Different Elements from Subbase Layers of Alternative Aggregates in Pavement Constructions." *Journal of Hazardous Materials* 137(1): 603–11.

Forteza, R., M. Far, C. Segu??, and V. Cerd?? 2004. "Characterization of Bottom Ash in Municipal Solid Waste Incinerators for Its Use in Road Base." *Waste Management* 24(9): 899–909.

Hill, Annette R., Andrew R. Dawson, and Michael Mundy. 2001. "Utilisation of Aggregate Materials in Road Construction and Bulk Fill." *Resources, Conservation and Recycling* 32(3–4): 305–20.

Hjelmar, Ole, Jesper Holm, and Kim Crillesen. 2007. "Utilisation of MSWI Bottom Ash as Sub-Base in Road Construction: First Results from a Large-Scale Test Site." *Journal of Hazardous Materials* 139(3): 471–80.

Jing, Zhenzi et al. 2007. "Municipal Incineration Bottom Ash Treatment Using Hydrothermal Solidification." *Waste Management* 27(2): 287–93.

———. 2013. "Hydrothermal Solidification Behavior of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash without Any Additives." *Waste Management* 33(5): 1182–89.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.038>.

Jing, Zhenzi, Xianqiang Ran, Fangming Jin, and Emile H. Ishida. 2010. "Hydrothermal Solidification of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash with Slag Addition." *Waste Management* 30(8–9): 1521–27.

Jurič, B., L. Hanžič, R. Ilić, and N. Samec. 2006. "Utilization of Municipal Solid Waste Bottom Ash and

Recycled Aggregate in Concrete." *Waste Management* 26(12): 1436–42.

Karagiannidis, A., St Kontogianni, and D. Logothetis. 2013. "Classification and Categorization of Treatment Methods for Ash Generated by Municipal Solid Waste Incineration: A Case for the 2 Greater Metropolitan Regions of Greece." *Waste Management* 33(2): 363–72.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.023>.

Luo, Huan Lin, Shih Huang Chen, Deng Fong Lin, and Xin Rong Cai. 2017. "Use of Incinerator Bottom Ash in Open-Graded Asphalt Concrete." *Construction and Building Materials* 149: 497–506.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.164>.

Lynn, Ciarán J., Ravindra K. Dhir OBE, and Gurmel S. Ghataora. 2016. "Municipal Incinerated Bottom Ash Characteristics and Potential for Use as Aggregate in Concrete." *Construction and Building Materials* 127: 504–17.

Lynn, Ciarán J., Gurmel S. Ghataora, and Ravindra K. Dhir. 2016. "Municipal Incinerated Bottom Ash (MIBA) Characteristics and Potential for Use in Road Pavements." *International Journal of Pavement Research and Technology*. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1996681416301729>.

Minane, Jacques Rémy. 2017. "Contribution à l'élaboration de Sables de mâChefers Améliorés En Vue d'une Valorisation Dans La Formulation de Matériaux Cimentaires." IMT-Lille-Douai.

NBN EN ISO 1097 6. 2013. *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption*.

Pecqueur, G., C. Crignon, and B. Quénéée. 2001. "Behaviour of Cement-Treated MSWI Bottom Ash." *Waste Management Series* 1(C): 541–47.

Rafael M. Santos, Gilles Mertens, Muhammad Salman, Özlem Cizer, and Tom Van Gerven. 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: 807–21.

S. Arickx, T. Van Gerven, and C. Vandecasteele. 2006. "Accelerated Carbonation for Treatment of MSWI Bottom Ash." *Journal of Hazardous Materials* 137(1): 235–43.

The Council of the European Union. 2003. "COUNCIL DECISION of 19 December 2002 Establishing Criteria and Procedures for the Acceptance of Waste at Landfills." *Official Journal of the European Communities* L 11: 027–049.

Del Valle-Zermeño, R. et al. 2014. "Pilot-Scale Road Subbase Made with Granular Material Formulated with MSWI Bottom Ash and Stabilized APC Fly Ash: Environmental Impact Assessment." *Journal of Hazardous Materials* 266: 132–40.