

Douai, France
03-04 juillet 2014

RÉUTILISATION DES CENDRES ISSUES DE L'INCINÉRATION DES DÉCHETS MÉNAGERS DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES

A. Fabien^A, A. De Boom^B, M. Degrez^B, C. Pierre^C, S. Staquet^A

A BATir, Université Libre de Bruxelles (U.L.B), Bruxelles, Belgique

B 4MAT, Université Libre de Bruxelles (U.L.B), Bruxelles, Belgique

C Centre de Recherche de l'Industrie Cimentière CRIC –OCCN, Bruxelles, Belgique

RÉSUMÉ : Les cendres utilisées sont prélevées dans l'électrofiltre de l'incinérateur de déchets ménagers de Neder-over-Hembeek. Les Cendres Volantes d'Incinération d'Ordures Ménagères (CVIOM) sont considérées comme des déchets dangereux et sont donc stockées en décharge après une phase de stabilisation/solidification, à l'aide d'une matrice cimentaire. Il serait donc plus judicieux de les réutiliser. En raison de leur composition, leur valorisation dans des matériaux cimentaires a été choisie comme moyen de valorisation. Ces cendres volantes d'électrofiltre (CVE) peuvent être utilisées en appliquant un traitement combinant une séparation granulométrique et des lavages en solution. Le traitement est nécessaire pour éviter plusieurs problèmes causés notamment par la composition minéralogique des CVE. Lorsque les CVE brutes sont incorporées dans des matériaux cimentaires sans traitement de nombreux problèmes apparaissent : un retard élevé du temps de prise, de la fissuration et du gonflement dans les matériaux cimentaires. Les retards de prise ont été attribués à la présence dans les cendres de métaux lourds tels que le plomb et le zinc. Le phénomène de fissuration a été attribué à la production de gaz au cours du processus de durcissement. Avec un pH supérieur à 10, l'aluminium métallique est oxydé ce qui produit un dégagement de gaz : le dihydrogène. Ce dégagement de gaz génère des bulles ainsi qu'un gonflement excessif pendant le durcissement. Le traitement des cendres comprend trois étapes : une séparation granulométrique par voie humide, un lavage réactifs et des lavages à l'eau. L'incorporation des CVE, après traitement, dans la pâte de ciment ou de mortier n'a qu'une influence très limitée sur ses propriétés physiques et mécaniques. En fait, un traitement avec de l'hydroxyde de sodium en tant que réactif est très efficace. Pour réduire le coût de ce traitement et minimiser son impact sur l'environnement, plusieurs variantes ont été étudiées, en remplaçant l'hydroxyde de sodium avec de la chaux. Il a été démontré que la combinaison de l'hydroxyde de sodium et de chaux est une alternative efficace à l'hydroxyde de sodium seul. Dans cet article, seuls les résultats du traitement optimisé ont été présentés.

1. INTRODUCTION

Les cendres volantes proviennent essentiellement du traitement thermique d'un combustible, généralement du charbon. Cependant, elles peuvent aussi provenir d'autres traitements thermiques, comme l'incinération des déchets ménagers. Le traitement thermique des déchets ménagers par incinération produit différents types de résidus : les mâchefers (MIOM), les cendres volantes et les résidus d'épuration des fumées (REFIOM). Les MIOM peuvent, sous certaines conditions, être utilisés dans différentes applications essentiellement de remblais (Van Gerven et al., 2005). Les cendres volantes issues de l'électrofiltre correspondent à des particules entraînées par les gaz de combustion provenant du four vers le système de récupération de chaleur et les dispositifs de contrôle de la pollution de l'air (Chandler et al., 1997). Les cendres volantes et les REFIOM sont quant à elles

considérés comme déchets dangereux du fait de leur contenu en chlorures et en métaux lourds qui leur confère une forte lixivibilité. Ces résidus sont généralement mélangés, traités et mis en centre d'enfouissement technique (CET) pour déchets dangereux. Les cendres ne peuvent pas être utilisées telles quel dans les matériaux cimentaires, principalement en raison de la teneur élevée en chlorures. Différentes options de valorisation ont déjà été explorées (Quina et al., 2008). Il ressort de plusieurs études qu'il est nécessaire d'éliminer les chlorures avant toute application, afin de diminuer la solubilité et la lixivibilité des résidus (Kim et al., 2003 ; Jiang et al., 2009 ; Colangelo et al., 2012). La totalité des chlorures ne semble cependant pas être solubles. Il subsiste dans la plupart des cas un faible pourcentage de chlore, probablement présent sous forme de sel de Friedel (Wang et al., 2001 ; Bayuseno et Schmah, 2011 ; Hyks et al., 2009). Plusieurs études ont ainsi évalué le potentiel de lixiviation des cendres volantes incorporées dans les matériaux cimentaires (Cinquepalmi et al., 2008 ; Colangelo et al., 2012). Néanmoins, les cendres volantes et les REFIOI contiennent de nombreux composés potentiellement valorisables, à condition de traiter suffisamment ces résidus

Lors de l'incorporation d'un tel résidu dans les matériaux cimentaires, les objectifs sont multiples. Comme l'industrie cimentière est responsable d'environ 5% des émissions mondiales de CO₂ (IPCC, 2007), elle pourrait avoir un intérêt dans le remplacement d'une partie du clinker par un matériau secondaire à faible empreinte carbone. Ce pourrait être le cas des cendres volantes signalées comme étant potentiellement pouzzolaniques (Huang et Chu, 2003 ; Aubert et al., 2006). Enfin, l'intégration des CVE dans les matériaux cimentaires permettrait également de les valoriser au lieu de les stocker en mine de sels. En Europe (28 pays), plus de 89 millions de tonnes de déchets ont été incinérés en 2010 (Eurostat, 2013). Selon l'incinérateur et les processus de contrôle de la pollution de l'air, la quantité de cendres volantes peut varier, mais généralement elles ne représentent que quelques pourcents (EC, 2005). Si un pourcentage de 1,5% est considéré, la quantité de cendres volantes atteint 1,3 million de tonnes par an.

Les CVE et les REFIOI, sont composés d'un faible pourcentage de métaux lourds (Chandler et al., 1997 ; De Boom et Degrez, 2012). Outre les problèmes environnementaux que pourraient poser ces éléments, les métaux lourds entraînent également des retards de prise lors de leur incorporation dans des matériaux cimentaires. Nous avons pu mettre en évidence dans des travaux précédents que certains métaux lourds (principalement Pb et Zn) sont plus concentrés dans la fraction fine des cendres volantes d'incinérateur (De Boom et Degrez, 2009). Une séparation granulométrique permet donc de réduire la concentration en ces métaux lourds de la fraction grossière des cendres volantes. De plus, il a aussi été constaté que des cendres volantes renferment de l'aluminium métallique (Aubert et al., 2004a ; Alaejos and Leiro, 2003 ; Biganzoli et al., 2012). Cet aluminium métallique peut être à l'origine de phénomènes de gonflement observés lors de l'incorporation des CVE dans des matériaux cimentaires. Outre l'aluminium métallique, les cendres volantes comportent également de l'anhydrite qui peut former de l'ettringite, autre source possible de gonflement. Aubert et al. (Aubert et al., 2006) utilisent du carbonate de sodium (Na₂CO₃) afin d'oxyder l'aluminium métallique. Ce réactif permet également la transformation d'anhydrite (CaSO₄) en carbonate de calcium (CaCO₃), inerte pour le ciment, et en sulfate de sodium (Na₂SO₄), soluble. Le traitement au Na₂CO₃ proposé par ces auteurs supprime donc les deux principales causes possibles de gonflement lors de l'utilisation des cendres volantes dans les matériaux cimentaires. L'aluminium métallique peut aussi être oxydé par de l'hydroxyde de sodium (NaOH).

Ces différentes constatations nous ont menés à établir un traitement de cendres volantes d'incinération en vue de leur incorporation des matériaux cimentaires. Ce traitement consiste en la combinaison d'une séparation granulométrique, de lavages à l'eau et d'un lavage réactif. Il a été élaboré sur base des résultats de l'incorporation des cendres volantes traitées dans des matériaux cimentaires. En fonction des observations réalisées sur les matériaux cimentaires, le traitement a été adapté afin d'obtenir finalement un matériau présentant des temps de prise, gonflements et résistances en compression acceptables. Néanmoins l'utilisation de ce réactif coûte cher. En remplaçant partiellement l'hydroxyde de sodium avec de la chaux on a mis en évidence une solution pour diminuer le coût de ce traitement. La présente étude décrit les dernières améliorations apportées au traitement et à leurs conséquences sur les propriétés physico-mécaniques de la pâte et du mortier contenant un taux de substitution du ciment par les CVE de 12,5%.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Composants

Les CVE sont utilisées en remplacement d'une partie du ciment (12,5% en masse). La quantité d'eau est gardée constante, avec un rapport Eau/Liant (ciment + CVE) égal à 0,5.

2.1.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment Portland ordinaire (CEM I 52.5N)

2.1.2 Cendres volantes d'électrofiltre (CVE)

Les cendres volantes proviennent d'un électrofiltre de l'incinérateur de déchets ménagers de la Région bruxelloise ; elles sont notées CVE dans cet article. L'électrofiltre se situe en aval de la chaudière et en amont de toute injection de réactifs ; les cendres volantes ne comportent donc pas de produits de réaction ou de réactifs en excès. Cendres volantes CVE était principalement composées de Cl (20%) et Ca (16%), tandis que beaucoup d'autres éléments ont également été détectés dans le résidu brut (Al (2%), Cd (0,03%), Cr (0,06%), Cu (0,08%), Fe (0,65%), K (7,33%), Mg (0,74%), Mn (0,04%), Na (11,19 %), Ni (0,01%), Pb (0,32%), Sb (0,1%), Si (4%), Sr (0,04%), Ti (0,86%), Zn (1,49%) et Zr (0,01%)). Certains d'entre eux génèrent des problèmes lors de l'incorporation des cendres dans les matériaux cimentaires. Tout d'abord, les chlorures sont nuisibles pour les matériaux cimentaires, car cela peut causer de la corrosion. En outre, la teneur élevée en chlorures implique qu'une grande partie des CVE sont solubles et favorisent également la production de lixiviats de certains métaux lourds. Le métal lourd contenu dans les cendres volantes pourrait également avoir des conséquences sur les propriétés physiques du matériau cimentaire. Une teneur élevée en Zn (1,6%) peut entraîner un retard important du temps de prise et de l'hydratation (allongement de la période dormante) (Stephan et al., 1999). L'oxydation de l'aluminium métallique contenu dans les CVE génère un dégagement de gaz de dihydrogène (voir Eq. 1). Ce dégagement provoque le gonflement, la formation de fissures lors de la phase de durcissement suivie d'une diminution de la résistance.



Eq. 1

2.1.3 Sable

Le sable utilisé est un sable normalisé.

2.1.4 Cendres volantes thermiques

Les cendres volantes thermiques qui possèdent une réactivité pouzzolanique sont utilisées pour comparer la réactivité pouzzolanique des autres matériaux.

2.2 Traitement

Le traitement, constitué d'une séparation granulométrique et de lavages, a été développé sur les CVE pour obtenir déchets dit non dangereux et qui peut être incorporé dans les matériaux cimentaire (De Boom et al., 2012 ; Lenormand et al., 2012). Le traitement nous a permis de voir que nous avons une forte concentration en zinc dans la fraction fine des cendres.

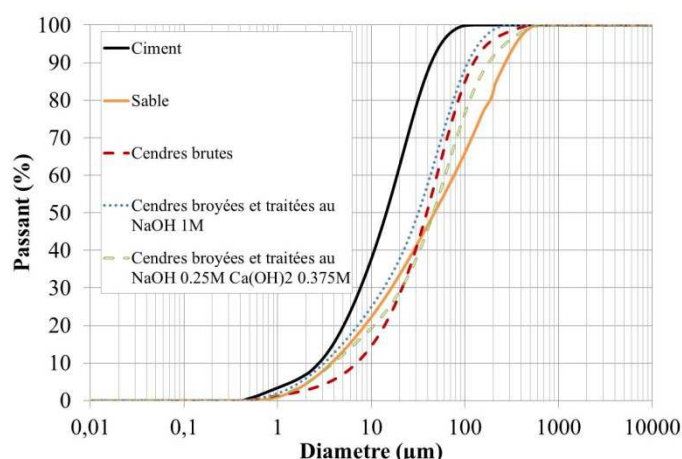


Figure 1. Courbe granulométrique des différents composants.

Pour diminuer la teneur en métaux lourds, une séparation en fonction de la taille a été utilisée (De Boom et al., 2012) et seules les particules comprises entre 25 µm et 870 µm ont été conservées. La Figure 1 montre la courbe granulométrique pour tous les composants : ciment, sable, CVE brutes et

CVE broyées et traitées. Avant l'incorporation dans la pâte ou du mortier, les CVE ont été broyées de façon à se rapprocher de la courbe granulométrique du ciment. Les CVE contiennent une grande quantité de chlorures, les lavages à l'eau semblent donc être une étape obligatoire avant de mélanger les CVE avec les autres composants. Les CVE ont donc été lavées avec de l'eau trois fois afin d'éliminer un maximum de chlorures et d'avoir une concentration en dessous de 1% (EN 206-1). Pour résoudre les problèmes d'émission du dihydrogène, un lavage réactif était nécessaire afin d'oxyder l'aluminium métallique contenu dans les CVE. Deux réactifs différents ont été testés pour le lavage réactif: NaOH 1M et un mélange de NaOH 0,25 M + Ca(OH)₂ 0,375 M.

2.3 Méthodes

Pour montrer que les cendres traitées peuvent être incorporées dans des matériaux cimentaires sans les problèmes cités précédemment, plusieurs tests ont été entrepris.

2.3.1 Émission de dihydrogène

De nombreux auteurs (Alaejos et al., 2003 ; Aubert et al., 2004a ; Aubert et al., 2004b ; Bertolini et al., 2004 ; Müller et al., 2006 ; Péra et al., 1997) ont déjà montrés que les cendres volantes ou les mâchefers contiennent de l'aluminium métallique et produisent du dihydrogène au contact du pH basique (environs 13) des pâtes cimentaires. Pour mesurer la quantité de dihydrogène produite par les CVE, un calcimètre est utilisé. On met à l'intérieur 10 g de cendres que l'on vient faire réagir avec 50 ml d'hydroxyde de sodium. L'oxydation des particules d'aluminium métallique par l'hydroxyde de sodium génère un volume de dihydrogène qui peut être mesuré à l'aide du calcimètre. Le principe de cet essai est expliqué dans (Aubert et al., 2004a). Les résultats sont exprimés en % d'aluminium présent dans les cendres selon l'équation suivante (Eq. 2):

$$m_{Al} = \frac{2}{3} * \frac{V_{H_2}}{V_0} * M_{Al} \quad \text{Eq.2}$$

ou m_{Al} la masse d'aluminium métallique (g), M_{Al} la masse molaire de l'aluminium (g/M), V_0 le volume molaire (ml/M) and V_{H_2} le volume de H₂ produit (ml).

2.3.2 Test Chapelle

Le test Chapelle est utilisé pour évaluer la réactivité pouzzolanique d'un matériau (Kabange Numbi, 2013). Une solution saturée à la chaux est préparée en mélangeant 4 g de chaux avec 2L d'eau distillée pendant 1 heure, ensuite la solution est filtrée. La concentration en OH⁻ du filtrat est déterminée par titration volumique avec de la phénolphthaléine comme indicateur coloré et une solution d'acide chlorhydrique de concentration 0,1M. 1 g de cendres est mélangé dans 250 mL de la solution saturée en chaux et le tout est mis en ébullition pendant 24 heures. Après refroidissement, cette solution est filtrée et la concentration en OH⁻ est mesurée par titration avec une solution d'acide chlorhydrique de concentration 0,1M. La réaction pouzzolanique est déterminée par la différence de concentration entre la solution saturée en chaux de départ et la solution filtrée contenant des CVE. Si la quantité de chaux (Ca(OH)₂) a diminuée, il y a présence d'une réaction pouzzolanique.

2.3.3 Pesée hydrostatique

La méthode de pesée hydrostatique a été utilisée pour déterminer les variations volumiques des pâtes cimentaires. En effet, on a pu observer un gonflement des pâtes de ciment contenant des CVE lors des premiers essais, comme il a été également mentionné par (Alaejos et al., 2003 ; Aubert et al., 2004b). Différents traitements ont été développés dans la littérature pour permettre l'oxydation de l'aluminium métallique. Péra et al. (Péra et al., 1997) ont utilisé de l'hydroxyde de sodium (NaOH) pour oxyder l'aluminium métallique présent dans les mâchefers. Les mâchefers ont été immergés dans une solution d'hydroxyde de sodium pendant 15 jours. Après lavage et séchage, aucun gonflement dus à la production de gaz de dihydrogène n'a été détecté. Aubert et al. (Aubert et al., 2006 ; Quina et al., 2008) ont effectué un traitement avec du carbonate de sodium (Na₂CO₃) pour dissoudre le sulfate de calcium (CaSO₄) contenue dans cendres volantes. En effet, le carbonate de sodium réagit avec le sulfate de calcium pour former du sulfate de sodium NaSO₄ et de la calcite CaCO₃. Après traitement, l'aluminium métallique a été oxydé et il n'y a pas de gonflement observé de la pâte cimentaire ou du mortier. Dans cette étude, un dispositif expérimental a été utilisé pour quantifier les variations de volume des pâtes cimentaires contenant des CVE afin de valider l'efficacité des différents traitements

qui ont été développés pour contrecarrer tout phénomène de gonflement. Comme il a déjà été mentionné précédemment, au contact du pH basique de la pâte cimentaire, des composés métalliques (en particulier, de l'aluminium) présents dans les cendres volantes peuvent être oxydés et le gaz dihydrogène peut être produit (Alaejos et al., 2003 ; Aubert et al., 2004b). La formation d'ettringite peut également être une autre source de gonflement de la pâte cimentaire, en particulier après 24 h (Aubert et al., 2004b). Les mesures de pesée hydrostatique ont été effectuées suivant le mode opératoire décrit dans (Aubert et al., 2004b). La pâte de ciment a été mise dans une membrane étanche en latex, puis immergée dans l'eau contrôlée en température à 20°C. Les variations de masse de l'échantillon immergé sont relevées toutes les minutes. Selon le principe Archimède, les variations de masse de l'échantillon sont liées à ses variations de volume suivant l'équation 3 (Eq. 3):

$$\Delta V_{\text{membrane}} = - \frac{\Delta M}{\rho_{\text{eau}}} \quad \text{Eq. 3}$$

ou $\Delta V_{\text{membrane}}$ est la variation de volume de la membrane (m³), ΔM est la variation de masse de l'échantillon mesurée (kg) et ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau (kg.m⁻³).

Les tests sont réalisés sur des pâtes cimentaires de 180 g avec une température constante de 20°C. Les variations de volume mesurées correspondent à la somme des variations de volume de la pâte de ciment ajoutée à la quantité de dihydrogène produit par oxydation de l'aluminium métallique.

2.3.4 Temps de prise

Pour déterminer le temps de prise initial et finale des pâtes cimentaires contenant des CVE, un mini pénétromètre est utilisé selon la norme européenne (EN 206). Le principe consiste à enfoncer une aiguille dans la pâte cimentaire et de mesurer la résistance à la pénétration. Le temps initial et final de prise correspond à une valeur de la résistance à la compression: 1,35 MPa correspond au temps de début de prise et 8.65 MPa au temps de fin de prise. Les mesures sont répétées trois fois.

2.3.5 Flux de chaleur

La mesure de la calorimétrie isotherme se fait sur des pâtes cimentaires, en utilisant 5 g de matériau anhydre et 2.5 g d'eau (rapport Eau/Liant = 0,5 avec liant = ciment+ CVE) pour chaque composition. La température est fixée à 20°C et gardée constante durant tout l'essai. Les résultats sont donnés en milliwatt par gramme de liant.

2.3.6 Résistance à la compression

La résistance à la compression est mesurée sur des prismes de dimensions 4 cm x 4 cm x 16 cm selon la norme européenne (EN 196-1). Après malaxage, les échantillons sont stockés dans leur moule à 20°C et 100% d'humidité relative pendant 24h. À la suite de quoi, ils sont démoulés et subissent une cure dans de l'eau à 20°C puis sont testés en compression.

2.3.7 Tests environnementaux

Le caractère de lixiviation des échantillons est déterminé par la norme CEN/TS 14997. 25 g de matériau sec est mélangé avec de l'eau. De l'acide nitrique ou de l'hydroxyde de sodium sont ajoutés pour maintenir le pH avec des valeurs allant de 4 à 11 par tranche de 1 unité de pH. Le rapport final liquide sur solide est de 10 L/kg. La solution est filtrée à travers un filtre de 0.6 µm.

3. RÉSULTATS

3.1 À l'échelle des cendres (CVE)

3.1.1 Émission de dihydrogène

Le test de dégagement de dihydrogène a été réalisé sur les CVE brutes et les CVE prises à la fin des deux traitements étudiés. La teneur en aluminium métallique exprimée en pourcentage dans les cendres brutes est de 0,9% (voir Tableau 1). Avec les CVE traitées, ce pourcentage est considérablement réduit. Le pourcentage de teneur en aluminium métallique des cendres lavées avec le traitement optimisé (mélange entre la chaux et d'hydroxyde de sodium) est égal à celui obtenue

avec les cendres lavées avec traitement à l'hydroxyde de sodium. Les deux traitements permettent une diminution importante de la quantité d'aluminium métallique qui est l'une des causes principale du phénomène de gonflement lors de la phase de durcissement des pâtes cimentaires.

Tableau 1. Quantité d'aluminium métallique (%) déterminée par calcimètre – fraction de 25 à 850 μm .

	Aluminium métallique (%)	Aluminium Total (%)
Cendres brutes	0.90	2
NaOH 1M	0.08	4.47
NaOH 0.25M $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.375 M	0.08	4.29

3.1.2 Test Chapelle

Pour le test Chapelle, une solution de chaux saturée est nécessaire afin tester les différentes cendres (traitées ou non). Après le titrage, on a observé que la concentration en OH^- dans la solution saturée en chaux est de 0,9 g/L. Pour comparer la possible réactivité pouzzolanique des CVE brutes et des CVE traitées, nous avons besoin d'utiliser des matériaux réactifs et non réactifs pouzzolaniquement. Nous prendrons les cendres volantes thermiques (CVT) comme matériau réactif et le sable comme matériau non réactif. Les CVT, les CVE brutes et les CVE traitées (les deux traitements) sont testées. Toutes les solutions sont filtrées puis titrées. Pour les CVT, à la suite du dosage volumétrique, une diminution de la concentration en OH^- de la solution a été observée, la concentration est de 0,6 g/L, ce qui signifie les cendres ont absorbées le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, nous avons donc réaction pouzzolanique. Pour les CVE, chaque test a révélé que la concentration en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ était supérieure à celle de la solution initiale. Pour les CVE traitées avec les deux traitements et CVE brutes, des concentrations comprises entre 1 et 1,5 g/L ont été observées. Ces concentrations sont plus élevées que celle de la solution saturée en chaux. Aucune réaction pouzzolanique n'a été observée avec les CVE.

3.2 À l'échelle de la pâte cimentaire

3.2.1 Pesée hydrostatique

Dans la présente étude, l'analyse EDX a confirmé la présence d'aluminium métallique dans les cendres volantes d'électrofiltre. La production de dihydrogène par oxydation de l'aluminium métallique peut donc être considérée comme une cause de gonflement.

Les mesures de pesée hydrostatique ont été effectuées afin de déterminer la variation relative du volume d'une pâte de ciment de référence et de la pâte de ciment contenant des CVE traitées avec de l'hydroxyde de sodium et avec une combinaison d'hydroxyde de sodium et de chaux. De précédents résultats ont montré la variation de volume de plus de 140% avec des CVE non traitées (De Boom et al., 2012). La Figure 2 montre la valeur moyenne ainsi que l'écart-type ($\pm \sigma$: lignes pointillées) des variations de volume de la pâte cimentaire de référence ainsi que les pâtes cimentaires contenant des CVE traitées avec de l'hydroxyde de sodium et avec la combinaison d'hydroxyde de sodium et de chaux. Trois échantillons ont été testés pour chaque formulation.

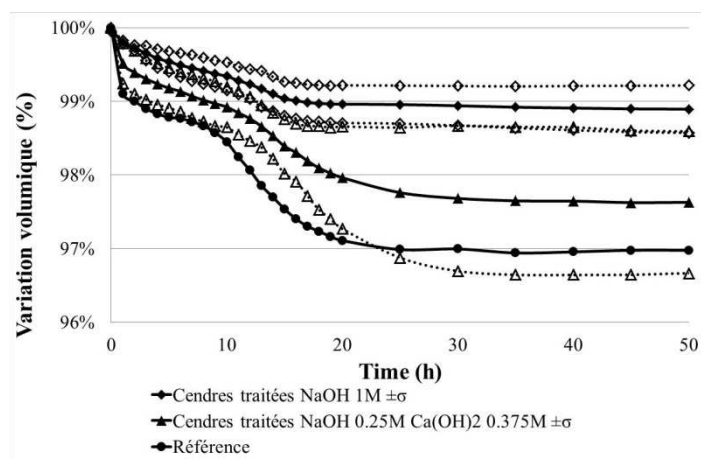


Figure 2. Variation de volume mesurée – pour la pate cimentaire de référence et celles contenant des cendres traitées avec les deux traitements.

Le volume de pâte cimentaire de référence montre une diminution au cours des 18 premières heures en raison de la contraction chimique. Après 18 heures, la variation relative de volume semble stabilisée. Pour les deux autres pâtes cimentaires contenant des CVE traitées, la valeur moyenne de la variation de volume est plus faible que celle de la pâte cimentaire de référence, et ce à cause de la rétraction chimique due à la substitution d'une partie du ciment (12,5%) par les CVE. Le lavage réactif des CVE traitées avec de l'hydroxyde de sodium et de la chaux ou seulement avec de l'hydroxyde de sodium a permis d'éliminer le gonflement dû à la production de dihydrogène. En tenant compte de l'écart type de chaque série d'essai (représentée par les lignes en pointillés sur la figure 2), les différences observées entre les trois courbes moyennes sont relativement faibles (entre 97 et 99%).

3.2.2 Temps de prise

Le temps de début et de fin de prise sont donnés dans Tableau 2. La pâte cimentaire de référence a le plus faible temps de prise. Dans le cas des deux traitements réactifs, les valeurs du temps de début de prise sont très proche l'un de l'autre, tandis que pour les temps de fin de prise, il y a seulement 1 heure de différence. Pour les CVE brutes, le temps de prise final était relativement long le traitement est donc efficace pour réduire le retard de prise.

Table 2. Temps de prise - fraction de 25 à 850 μm .

(h:min)	Cendre brutes	Référence	Cendres traitées NaOH 1M	Cendres traitées NaOH 0.25M Ca(OH) ₂ 0.375M
Temps de début de prise	8 :37	5 :48	8 :09	7 :38
Écart-type	0 :55	0 :01	0 :51	0 :13
Temps de fin de prise	19 :52	8 :17	11 :52	10 :51
Écart-type	0 :12	0 :11	0 :38	0 :16

3.2.3 Flux de chaleur

La figure 3 montre le flux de chaleur normalisée des pâtes cimentaires étudiées : une référence et deux pâtes contenant 12,5% de CVE traitées avec les traitements réactifs en substitution partielle du ciment. Le décalage dans le temps entre les pics des courbes confirme les résultats précédemment obtenus pour les temps de prise avec le mini pénétromètre.

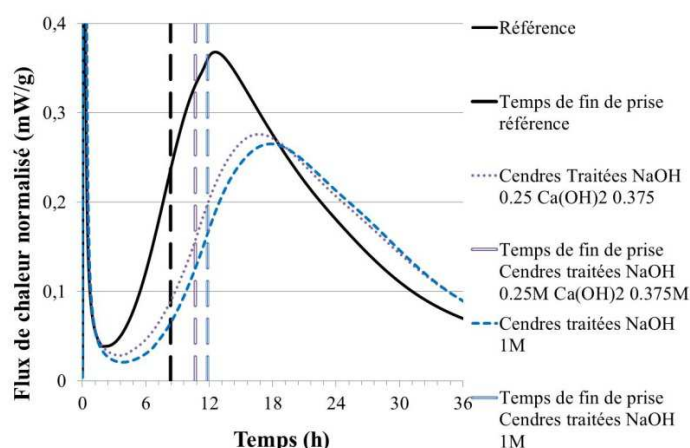


Figure 3. Mesure du flux de chaleur normalisé – pour la pâte cimentaire de référence et les pâtes contenant des CVE traitées.

3.3 À l'échelle du mortier

3.3.1 Résistance à la compression

Les résultats des essais de résistance en compression sur les mortiers sont présentés dans le tableau 3. Pour les mortiers composés avec des CVE, une diminution de la résistance à la compression est observée est ce à chaque échéance ce qui est compatible avec la fait qu'une partie du ciment a été partiellement substituée (12,5%). Aucune différence n'est observée entre les deux traitements.

Tableau3. Résistance à la compression pour un mortier de référence et deux mortiers avec des CVE traitées (MPa) – fraction de 25 à 850 μm

Temps (d)	Référence	NaOH 1M	NaOH 0.25M Ca(OH) ₂ 0.375M
2	37,6	32,9	31,8
7	57,2	52,1	50,2
28	68,2	62,6	60,2
56	71,2	67	63
90	74,4	70,1	64

3.4 Tests environnementaux

L'essai de lixiviation CEN/TS 14997 informe sur le comportement face à la lixiviation d'un solide pour différents pH. Les CVE sont incorporées dans des matériaux cimentaires avec un pH élevé et un environnement alcalin. A cette valeur de pH, certains contaminants ont été détectés dans les solutions de lixiviation de CVE brutes, plus particulièrement As, Cr, Mo et Pb. Avec le traitement à l'hydroxyde de sodium on ne détecte plus de Pb pour le pH = 10. Lorsque les CVE sont traitées avec la combinaison de l'hydroxyde de sodium et de la chaux, on ne détecte plus de As, Cr et Pb. La quantité de lixiviats du Mo a également diminué avec ce traitement, pour atteindre 0,3 mg/kg. Les réactifs alcalins participent la précipitation de composés d'hydroxyde au cours du traitement, ayant pour résultat de créer une substance solide moins nocive qui peut être utilisée dans les matériaux cimentaires. La Figure 4 présente la concentration de Pb et de Zn pour un pH de 3 à 10. Pour un faible pH, les traitements alcalins n'ont pas amélioré les résultats de lixiviation. Mais pour les pH moyens et élevés, les traitements alcalins ont permis de diminuer la quantité des différents éléments lixiviée. Le traitement combinant l'hydroxyde de sodium et de la chaux donne de meilleurs résultats que ceux obtenus avec le traitement à l'hydroxyde de sodium. Les concentrations d'éléments sont réduites à la suite du traitement optimisé, en particulier en ce qui concerne Cr et Zn. Bien qu'on aurait pu s'attendre à une augmentation de la production de lixiviats de Cr en raison de son oxydation à pH élevé (Kumpiene et al., 2008). Le test de lixiviation CEN/TS 14997 a mis en évidence que le comportement à la lixiviation est amélioré suite au traitement des CVE en comparaison à celui des CVE brutes (Quina et al., 2008).

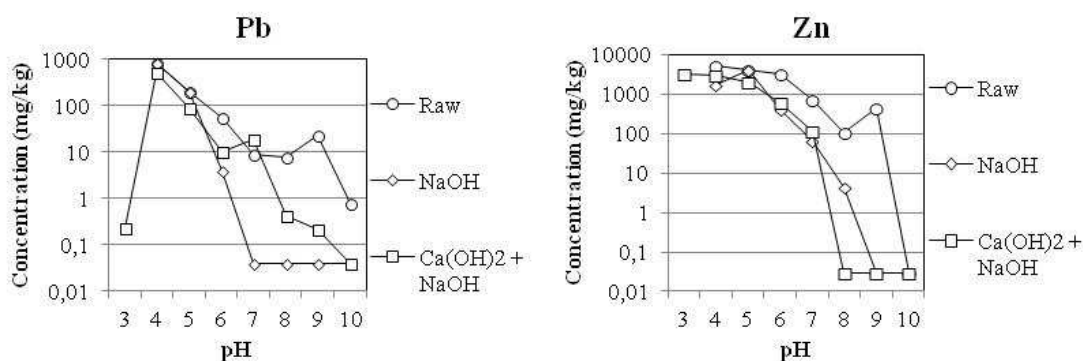


Figure 4. CEN/TS 14997 Test de lixiviation – concentrations en Pb et Zn(mg/kg) dans les lixiviats provenant des CVE brutes et traitées.

4. CONCLUSIONS

Avant de procéder à l'incorporation des cendres volantes provenant de l'électrofiltre de l'incinérateur de Bruxelles dans des matériaux cimentaires, plusieurs étapes de traitement sont nécessaires. Sinon, on voit l'apparition des phénomènes de gonflement ainsi que du retard de prise. Une séparation basée sur la taille est nécessaire afin de réduire le retard de prise de la pâte cimentaire qui a été observé avec le CVE brutes et pour éliminer les métaux lourds concentrés dans les particules fines. Ces résultats ont été mis en évidence par des analyses chimiques lors de travaux antérieurs (De Boom et al., 2012). La séparation granulométrique a permis d'obtenir une importante diminution de la quantité de métaux lourds, et donc de diminuer le retard de prise. Un traitement efficace avec de l'hydroxyde de sodium a été développé pour contrer le gonflement important de la pâte cimentaire lors de l'oxydation de l'aluminium métallique contenu dans CVE. Pour réduire considérablement le coût de ce traitement et également minimiser son impact sur l'environnement, plusieurs variantes ont été étudiées, en remplaçant une partie de l'hydroxyde de sodium avec de la chaux. Il a été démontré que la combinaison de l'hydroxyde de sodium et de la chaux est une alternative efficace comme réactif. L'incorporation des CVE traitées dans la pâte de ciment ou le mortier n'a qu'une influence très limitée sur les propriétés physiques et mécaniques testées dans cette étude. Le test Chapelle a mis en évidence l'activité non-pouzzolanique des cendres. Dans le cadre de futures formulations de béton, nous utilisons donc la cendre en substitution d'une partie du sable. En plus des propriétés physiques et mécaniques, nous effectuons également des tests de lixiviation et de durabilité.

5. ACKNOWLEDGEMENT

Les auteurs tiennent à remercier l'Institut bruxellois pour la recherche et l'innovation (Innoviris) pour leur soutien financier. Des remerciements sont adressés à Gabriel De Lantivy et Nicolas Lambrette étudiants de l'ULB ainsi que Thibault Lenormand qui a effectué sa thèse sur le sujet.

6. REFERENCES

- Alaejos P., Leiro A., (2003), Utilization of municipal solid waste incinerator fly ashes to produce cellular mortars, Fifth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials (WASCON 2003), San Sebastián
- Aubert J.E., Husson B., Vaquier A., (2004a), Metallic aluminium in MSWI fly ash: quantification and influence on the properties of cement-based products, *Waste Management*, 24 : 589–596
- Aubert J.E., Husson B., Vaquier A., (2004b) Use of municipal solid waste incineration fly ash in concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 : 957–963
- Aubert J.E., Husson B., Sarramone N., (2006), Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 1: Processing and characterization of MSWI fly ash, *Journal of Hazardous Materials*, 136 : 624-631
- Aubert J.E., Husson B., Sarramone N., (2007), Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Part 2: Mechanical strength of mortars and environmental impact, *Journal of Hazardous Materials*, 146 : 12–19
- Bertolini L., Carsana M., Cassago D., Curzio A.Q., Collepardi M., (2004), MSWI ashes as mineral additions in concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 : 1899–1906
- Biganzoli Laura, Leopoldo Gorla, Simone Nessi, Mario Grosso (2012), Volatilisation and oxidation of aluminium scraps fed into incineration furnaces, *Waste Management*, 32 : 2266-2272
- Chandler A.J., Eighmy T.T., Hartlén J., Hjelm O., Kosson D.S., Sawel S.E., Van Der Sloot H.A., Vehlow J., (1997), MSWI residues, IAWG (International Ash Working Group), Elsevier, 976 p.
- Cinquepalmi M.A., Mangiarlardi T., Panei L., Paolini A.E., Piga L., (2008), Reuse of cement-solidified municipal incinerator fly ash in cement mortars : Physico-chemical and leaching characteristics, *Journal of Hazardous Materials*, 151 : 585-593
- Colangelo F., Cioffi R., Montagnaro F., Santoro L., (2012), Soluble salt removal from MSWI fly ash and its stabilization for safer disposal and recovery as road basement material, *Waste Management*, 32 (6) : 1179-1185
- De Boom A., Lenormand T., Carette J., Obein M., Staquet S., Pierre C., Degrez M., (2012), Valorization of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ashes: Solving Problems, *Proceedings of WASCON 2012*, Gothenburg
- De Boom A., Degrez M. (2012), Belgian MSWI fly ashes and APC residues: A characterisation study, *Waste Management* 32(6): 1163-70
- De Boom A., Degrez M. (2009), Washing of different size-fractions from municipal solid incinerator fly ashes, *Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*, October 2009. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy

- EC 2005, European Commission Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Prospective Technologies Studies – Sustainability in Industry, Energy and Transport, European IPP Bureau, Integrated Pollution Prevention and Control – Reference document on the Best Available Techniques for Waste Incineration – dated July 2005. 638 p
- Eurostat 2005, (2013), Waste statistics,
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/data/database>.
- Huang W., Chu S., (2003), A study on the cementlike properties of municipal waste incineration ashes, *Cement and Concrete Research*, 33(11) : 1795-1799
- Hyks J., Astrup T., Christensen T. H. (2009), Long-term leaching from MSWI air-pollution-control residues: Leaching characterization and modeling, *Journal of Hazardous Materials*, 162: 80-91
- IPCC, (2007), IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 : Working Group III : Mitigation of Climate Change, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch7s7-4-5.html
- Jiang, Y., Xi, B., Li, X., Zhang, L., Wei, Z. (2009), Effect of water-extraction on characteristics of melting and solidification of fly ash from municipal solid waste incinerator, *Journal of Hazardous Materials*, 161: 871–877
- Kabange Numbi B., (2013), Etude de la réactivité des scories de la métallurgie du cuivre en vue de leur utilisation comme ajout au ciment, Thèse de doctorat, ULB, Bruxelles
- Kim, S.-Y., Matsuto, T., Tanaka, N. (2003), Evaluation of pre-treatment methods for landfill disposal of residues from municipal solid waste incineration, *Waste Management and Research*, 21: 416-423
- Kumpiene J., Lagerkvist A., Maurice C., (2008), Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – A review, *Waste Management*, 28(1) : 215-225
- Lenormand T. De Boom A., Degrez M., Pierre C. Staquet S. (2012), Validation d'un traitement de Résidus d'Épuration de Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères dans le but de les utiliser en tant qu'addition minérale dans des matériaux cimentaires, NOMAD, Novembre 2012, Toulouse.
- Müller U., Rübner K., (1997), The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component, *Cement and Concrete Research*, 36 : 1434–1443
- Péra J., Coutaz L., Ambroise J., Chababbet M., (1997), Use of incinerator bottom ash in concrete, *Cement and Concrete Research*, 27 : 1–5
- Quina, M.J., Bordado, J.C., Quinta-Ferreira, R.M. (2008), Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview, *Waste Management*, 28: 2097-2121
- Stephan D., Mallmann R., Knöfel D., Härdtl R., (1999), High intakes of Cr, Ni and Zn in clinker - Part II. Influence on the hydration properties, *Cement and Concrete Research*, 29 : 1959–1967
- Van Gerven, T., Geysen, D., Stoffels, L., Jaspers, M., Wauters, G., Vandecasteele, C. (2005), Management of incineration residues in Flanders (Belgium) and in neighbouring countries. A comparison, *Waste Management* 25: 75-87
- Wang, K.-S., Chiang, K.-Y., Lin, K.-L., Sun, C.-J. (2001), Effects of a water-extraction process on heavy metal behavior in municipal solid waste incinerator fly ash, *Hydrometallurgy* 62: 73-81.