

# Incorporation de la fraction fine de Mâchefers d'Incinération des Déchets Non-Dangereux (MIDND) dans des mortiers aérés

M. Brossat<sup>1</sup>, M. Lupsea-Toader<sup>1</sup>, D. Blanc<sup>1</sup>, E. Prud'Homme<sup>2</sup>, C. de Brauer<sup>1</sup>

*1 Univ Lyon, INSA Lyon, DEEP, EA7429, 69621 Villeurbanne, France*

*2 Univ Lyon, INSA Lyon, MATEIS, UMR CNRS 5510, F69621 Villeurbanne, France*

## ABSTRACT

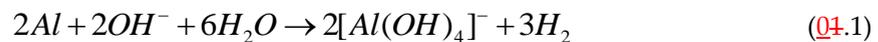
Les Mâchefers d'Incinération des Déchets Non-Dangereux (MIDND), sont produits à hauteur de 3 millions de tonnes chaque année en France. Leurs granulométrie, compositions élémentaires et propriétés pouzzolaniques font des MIDND de potentiels substituts aux matières premières utilisées dans la mise en œuvre de mortiers et bétons. Cet article présente les résultats de l'utilisation de la fraction < 2 mm des MIDND comme agent porogène dans des mortiers aérés. Une première étape d'identification des paramètres favorisant l'aération des mortiers a été réalisée sur pâte pure. Les formulations les plus prometteuses ont, par la suite, été mises en œuvre sur mortier. Les essais de densité, résistance à la compression et conductivité thermique réalisés sur mortiers avec MIDND ont démontré la possibilité d'une telle substitution. En effet des formulations utilisant un rapport Eau/Liant de 0,55 et une quantité de 50 % de mâchefers ont présenté des résultats comparables à ceux du témoin aéré. Des essais de lixiviation suivant la norme EN 12457-2 ont également démontré que ces substitutions n'ont pas d'impact environnemental. En effet, les concentrations en polluants dans les éluats des mortiers avec mâchefers sont comparables à celles du témoin aéré.

**Keywords** Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND), Matériau cimentaire, Mortier aéré, Porogène, Valorisation.

## I. INTRODUCTION

Chaque année en France, plus de 14 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés sont incinérés, produisant 3 millions de tonnes de Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND) (AMORCE, 2018). Ils se présentent sous la forme de granulats de taille hétérogène pouvant mesurer jusqu'à 40 mm, mais sont constitués à 40 % en masse par des particules de taille inférieure à 2 mm (Šyc et al., 2018). Jusqu'à présent valorisés en sous-couche routière pour la grande majorité, leur granulométrie, leurs propriétés pouzzolaniques et leur compositions minérales font des MIDND de bons candidats pour la substitution de matières premières dans des produits cimentaires (Saikia et al., 2015). Ainsi, de nombreuses études se sont intéressées à l'utilisation des MIDND comme substituts au sable (Saikia et al., 2015; Antoun et al., 2018), aux agrégats (Pera et al., 1997; Müller and Rübner, 2006) ou au ciment (Cheng, 2012; Li et

al., 2012) dans des bétons et autres matériaux cimentaires. Ces substitutions ont des avantages environnementaux et économiques. Elles permettent de limiter les coûts de matières premières tout en diminuant la consommation de ressources naturelles (AMORCE, 2018). D'un point de vue environnemental, l'incorporation des MIDND dans des matériaux cimentaires permet également de stabiliser les polluants qu'ils contiennent et, de fait, de réduire leur relargage (Silva et al., 2019). D'un point de vue mécanique cependant, l'ensemble des travaux constatent un gonflement de la matrice qui provoquent une diminution des résistances mécaniques (Müller and Rübner, 2006; Antoun et al., 2018). (Pera et al., 1997)) sont les premiers à décrire ce gonflement. Il est attribué au dégagement d'hydrogène mais aussi à la formation d'hydroxydes d'aluminium (Müller and Rübner, 2006) générés par l'oxydation de l'aluminium métallique contenu dans les MIDND en milieu fortement basique selon la réaction (1.1).



Code de

Afin de limiter le gonflement induit par cette réaction d'oxydation, (Tang et al., 2014; Saikia et al., 2015)) ont expérimenté des pré-traitements thermiques et chimiques des mâchefers. Bien qu'efficaces, ces traitements se sont avérés coûteux, et de ce fait, peu transposables à l'échelle industrielle.

A l'inverse, dans le but de mettre à profit le gonflement induit par l'oxydation de l'aluminium métallique et des autres métaux réducteurs, (Qiao et al., 2008; Song et al., 2015)) se sont intéressés à l'incorporation de mâchefers dans des bétons aérés comme substitut à la poudre d'aluminium (généralement utilisée comme agent porogène pour la production de béton aéré). Ces études ont porté sur l'incorporation, après broyage, de la totalité des mâchefers (0 – 40 mm) ou de la fraction grossière (14 – 40 mm).

Aucune étude ne s'est toutefois focalisée sur l'incorporation de la seule fraction fine des MIDND. Le présent article vise à évaluer le potentiel porogène de la fraction < 2 mm, comme substitut d'une part du ciment dans la formulation de bétons aérés. L'objectif est de produire des matériaux possédant des propriétés mécaniques et thermiques ainsi qu'une densité comparables à celles des mortiers aérés traditionnels. Les impacts du rapport eau/ciment, de la sous fraction granulométrique utilisée, de son broyage éventuel et de la proportion incorporée sur les propriétés des mortiers sont étudiés. Par ailleurs, la fraction fine étant reconnue comme la plus riche en polluants métalliques (Chimenos et al., 1999), des tests de lixiviation sur matériaux broyés sont mis en œuvre afin de vérifier que les polluants métalliques incorporés avec la fraction fine des MIDND sont efficacement stabilisés dans la matrice cimentaire.

## II. Matériel et techniques

### A. Matières premières

Les mâchefers étudiés proviennent de l'incinérateur Zevo Malešice à Prague, en République Tchèque qui produit chaque année 70 000 t de MIDND. La fraction fine (< 2 mm), a été obtenue par un tamisage des mâchefers bruts (0 – 40 mm) réalisé à l'Institute of Chemical Process Fundamentals (ICPF) de Prague [à partir de MIDND collectés au cours de 7 campagnes différentes](#). Par la suite, afin de limiter leur évolution, les échantillons ont été séchés et

homogénéisés à réception, puis stockés en chambre froide (+4°C) jusqu'à utilisation. Le ciment utilisé est un ciment Portland 52,5 N et le sable est conforme à la norme européenne CEN 196-1. De la poudre d'aluminium (< 0,325 mm et de pureté > 99,5 %) a été utilisée comme porogène pour les formulations sans MIDND.

### B. Démarche et protocoles expérimentaux

Dans un premier temps, des essais sur pâte pure, constituée d'eau, de ciment et éventuellement de mâchefers ont été conduits afin de déterminer l'influence de différents paramètres sur les propriétés mécaniques et la densité. Ces paramètres sont définis dans le [Tableau 1](#) ~~Tableau 1~~.

Les formulations les plus prometteuses ont ensuite été transposées sur mortier préparés à partir d'eau, de ciment, de sable et de mâchefers. Leurs propriétés ont été comparées à celles de deux mortiers témoins sans mâchefers, formulés selon la norme ("EN 196-1," 2016) et qualifiés de témoin normalisé et de témoin aéré. Le témoin aéré est obtenu en incorporant 0,5% de poudre d'aluminium comme agent porogène.

Leurs densités, résistances mécaniques et résistances thermiques ont été mesurées. Les résultats ainsi obtenus ont été utilisés comme référence pour l'évaluation des performances des formulations avec mâchefers. Les formulations avec mâchefers ont été réalisées et analysées suivant les mêmes protocoles.

#### B-1. Formulations des pâtes pures

Quatre paramètres ont été identifiés comme pouvant influencer les propriétés des matériaux formulés. Ces paramètres sont le rapport Eau/Liant, la sous-fraction granulométrique de MIDND utilisée, la quantité de mâchefers incorporés, et enfin le broyage, ou non, des MIDND. Les paramètres ainsi que leurs niveaux associés sont référencés dans le [Tableau 1](#) ~~Tableau 1~~.

**Tableau 1 Paramètres testés et niveaux associés lors de la campagne sur pâte pure**

Paramètres	Unités	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Rapport Eau/Liant <sup>1</sup>	-	0,40	0,55	0,70	0,85
Frac. granulométrique <sup>2</sup>	mm	0-2	0,063-0,106	0,106-0,250	0,5 – 2
Rapport massique MIDND / ciment	% masse ciment	20	50	100	150
Broyage	-	Oui	Non		

<sup>1</sup> liant= ciment + MIDND. <sup>2</sup> Fraction granulométrique obtenue par tamisage de la fraction fine des MIDND

A partir des différentes valeurs de ces 4 paramètres, 128 combinaisons sont envisageables. Un plan d'expérience, basé sur la méthode Taguchi et réalisé à l'aide du logiciel Minitab, a été utilisé afin de sélectionner les 16 formulations les plus représentatives et de les évaluer selon leur résistance à la compression et leur densité. Une attention particulière a été portée à la consistance à l'état frais des pâtes obtenues.

Les échantillons ont été réalisés par mélange de leurs composants à l'aide d'une spatule. La densité a été calculée à partir des mesures du volume et de la masse de chaque éprouvette. La

résistance à la compression, a été réalisée à l'aide d'une machine d'essai mécanique polyvalente 3R Syntax outillée pour la compression.

### B-2. Formulations des mortiers

L'analyse des résultats des essais sur pâte pure a permis d'identifier quatre formulations suffisamment prometteuses pour être transposées en mortiers. Les formulations de ces mortiers sont décrites dans le [Erreur! Source du renvoi introuvable.](#) **Tableau 2**. Les mortiers ont été préparés à l'aide d'un mélangeur planétaire et ont été coulés dans des moules en polystyrène de trois éprouvettes de dimension 4 x 4 x 16 cm. La caractérisation des éprouvettes a été réalisée après 28 jours de cure à l'abri de l'air.

**Tableau 2 Formulations réalisées sur mortiers**

Paramètres Formulation	0,40-S20%	0,55-S20%	0,55-S50%	0,55-M50%
Eau / Liant	0,40	0,55	0,55	0,55
Fraction granulométrique (mm)	0,063 - 0,106	0,063 - 0,106	0,063 - 0,106	0,106 - 0,250
Rapport massique MIDND / ciment (%m ciment)	20	20	50	50

### C. Techniques expérimentales de caractérisation des mortiers

Les résultats présentés en partie IV, sont issus de deux campagnes distinctes sur des formulations identiques. Les valeurs retenues pour cette partie correspondent à la moyenne obtenue par chaque formulation à l'issue des deux campagnes. Les protocoles expérimentaux sont les mêmes pour les deux campagnes.

La densité à 28 jours a été évaluée sur trois éprouvettes par campagne à l'aide du volume théorique des éprouvettes et de leur masse. Les résistances à la flexion et à la compression ont été testées selon les recommandations de la norme ("EN 196-1," 2016) à l'aide d'une machine polyvalente 3R Syntax respectivement outillée en flexion 3 points, et en compression avec une force maximale de 300 kN et une vitesse de déplacement de 1mm.s<sup>-1</sup>. La résistance à la compression de chaque formulation a été évaluée à la suite des essais de flexion sur six demies-épreuves par campagne. Les essais de flexion ne seront pas présentés dans le présent article. La conductivité thermique  $\alpha$ , quant à elle a été mesurée sur une éprouvette par campagne, à l'aide d'un Hot Disk TPS 1500. Le diamètre de la sonde en kapton est de 9,9 mm. Les mesures ont été effectuées pendant 80 s avec une puissance de 200 mW. L'étude des performances environnementales est basée sur un test de lixiviation sur mortiers broyés conforme à la norme (AFNOR, 2002). Les éluats ont été analysés par ICP-OES/MS et Chromatographie Ionique.

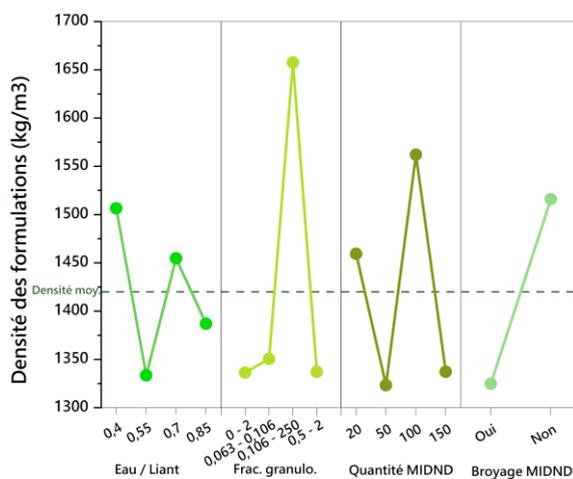
## III. Résultats de l'étude sur pâtes pures

Dans le cadre du plan d'expérience et afin d'identifier les combinaisons les plus prometteuses, les différentes formulations seront comparées entre elles. L'objectif étant de sélectionner les matériaux alliant la meilleure résistance possible à la plus grande légèreté.

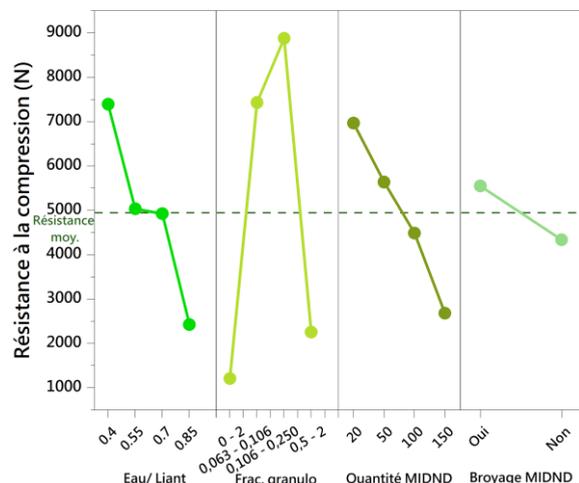
Il est toutefois important de noter que la densité et la résistance sont directement liées. Ainsi, une diminution de la densité provoque, dans la plupart des cas une diminution de la résistance ((Hoff, 1972). La [Figure 1](#) et la [Figure 2](#) mettent en évidence les effets principaux des paramètres et de leurs différents niveaux sur la densité et la résistance à la compression des pâtes pures.

#### A. Choix du rapport Eau/ Liant

Il est difficile de définir une tendance précise de l'impact de la quantité d'eau sur la densité ([Figure 1](#) et [Figure 2](#)). Alors qu'une tendance linéaire était attendue, ce sont les ratio 0,55 et 0,85 qui conduisent aux densités les plus intéressantes avec respectivement 1334 et 1387 kg.m<sup>-3</sup>. Ces valeurs sont en effet bien inférieures aux 1507 et 1455 kg.m<sup>-3</sup> des ratio 0,40 et 0,70. Le ratio 0,55 est également celui permettant d'obtenir la consistance la plus proche des formulations de références, préparées, elles, avec un rapport de 0,5.



**Figure 1 : Résultats du plan d'expérience sur la densité des pâtes pures. Impact de la quantité d'eau, de mâchefers, fraction granulométrique et broyage. Densité moy. expérimentale.**



**Figure 2 : Résultat du plan d'expérience sur la résistance des pâtes pures. Impact de la quantité d'eau, de mâchefers, fraction granulométrique et broyage. Résistance moy. expérimentale.**

L'impact sur la résistance du rapport Eau/Liant est beaucoup plus clair. La [Figure 2](#) montre que l'augmentation de la quantité d'eau limite le développement de la résistance à la compression. De fait, le ratio 0,55 sera privilégié pour les formulations optimisées. Des essais à 0,40 seront également envisagés afin de maximiser le développement des résistances.

#### B. Choix de la sous-fraction granulométrique des MIDND

La sous-fraction granulométrique des MIDND est le paramètre ayant la plus grande influence sur la densité et la résistance à la compression.

Concernant la densité, la sous-fraction 0,106 – 0,250 mm se démarque nettement des trois autres avec une densité moyenne de 1658 kg.m<sup>-3</sup> contre 1341 kg.m<sup>-3</sup> pour les autres coupes granulométriques.

Du fait de leur demande en eau importante, l'incorporation des fractions les plus fines (0,063 - 0,106 mm et 0,106 – 0,250 mm) induit un épaissement de la pâte à l'état frais. A l'inverse, l'ajout des fractions contenant les particules les plus grossières (0 – 2 mm et 0,5 – 2 mm) a peu d'influence sur la consistance. Une ségrégation des grains les plus gros est toutefois observée.

La résistance à la compression est, elle, favorisée par l'incorporation des sous-fractions les plus fines. La résistance moyenne maximale est obtenue par ajout de la sous-fraction 0,106 – 0,250 mm, et culmine à 8878 N.

Seule la sous-fraction 0,063 – 0,106 mm (notée par la suite par « S ») fait consensus, elle sera donc utilisée pour les formulations sur mortiers. Cette fraction ne représente toutefois que 12% de la fraction fine des mâchefers. Afin d'augmenter la valorisation des mâchefers, des essais sur mortiers seront donc également réalisés en incorporant la sous-fraction 0,106 – 0,250 mm (notée par la suite par « M ») qui correspond à 14 % de la fraction < 2 mm.

#### C. Choix du taux de substitution de MIDND

Une fois encore, il est difficile de dégager une tendance claire de l'impact de la quantité de MIDND incorporées sur la densité. Alors qu'une tendance linéaire était attendue, une densité minimale (proche de 1330 kg.m<sup>-3</sup>) est observée pour des quantités de mâchefers correspondants à 50 et 150% de la masse de ciment. En revanche, l'impact de la quantité de MIDND sur la consistance et la résistance à la compression est beaucoup plus net. Avec l'augmentation de la proportion de MIDND, la fluidité du mélange et les résistances mécaniques sont diminuées.

#### D. Influence du Broyage des MIDND

Le broyage semble bénéfique à la fois au développement des résistances et à la diminution de la densité. D'un point de vue pratique, cependant, il est coûteux et chronophage de procéder au broyage des fractions fines, de plus il ne permet pas de réduction notable de la taille des particules.

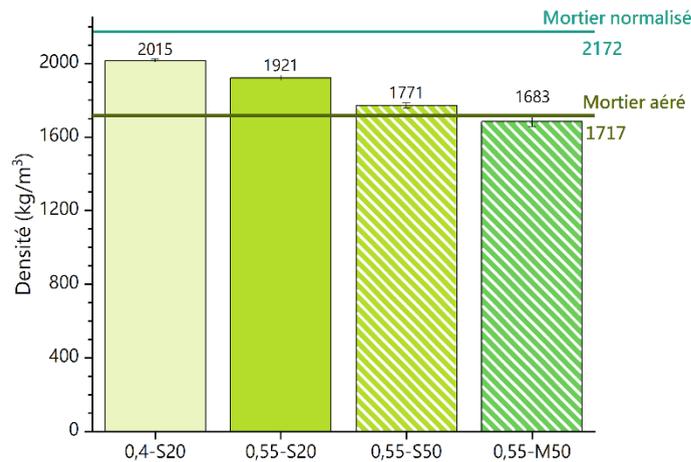
Finalement, peu de paramètres sont conjointement bénéfiques à la densité et la résistance à la compression. Les formulations mises en œuvre sur mortier, sont donc le fruit de compromis et de réflexion quant à l'impact des différents paramètres sur chaque propriété. Deux quantités d'eau, de mâchefers et sous-fractions granulométriques ont été identifiées comme prometteuses et mises en œuvre sur mortier au travers de 4 formulations.

## IV. Résultats des essais sur mortiers

### A. Résultats des essais de densité

La ~~Figure 3~~ **Figure 3** montre que les formulations avec MIDND ont toutes des densités inférieures à celle des mortiers normalisés (2172 kg.m<sup>-3</sup>) mais supérieures ou égale à celle des mortiers aérés (1717 kg.m<sup>-3</sup>).

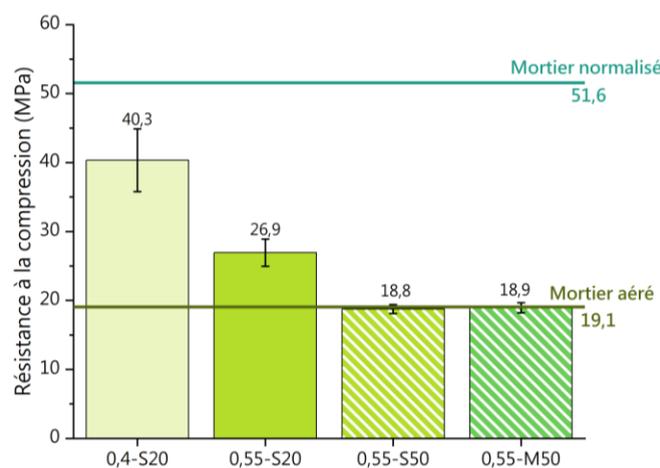
Seule la formulation 0,55-M50, préparée à partir de la sous-fraction M (0,106 – 0,250 mm) des MIDND, conduit à une densité similaire à celle des mortiers aérés. Ce résultat est d'autant plus remarquable que c'est cette même fraction qui avait été jugée la moins optimale lors des essais sur pâte pure. Néanmoins, la densité de la formulation 0,55-S50 se rapproche elle aussi de la référence aérée. De fait, ce sont principalement les paramètres rapport Eau/Liant et quantité de mâchefers qui semblent influencer la densité.



**Figure 3 Comparaison de la densité des mortiers avec mâchefers**

Il est raisonnable de penser qu'en augmentant la quantité de mâchefers incorporés, on augmente la quantité d'aluminium métallique et autres métaux réducteurs pouvant réagir dans la formulation. Ainsi, le volume de pores augmente par augmentation de la quantité de porogène présent. L'augmentation de la quantité d'eau, en augmentant la fluidité de la pâte, facilite quant à elle le développement des pores dans la matrice.

#### B. Résultats des essais de résistance à la compression



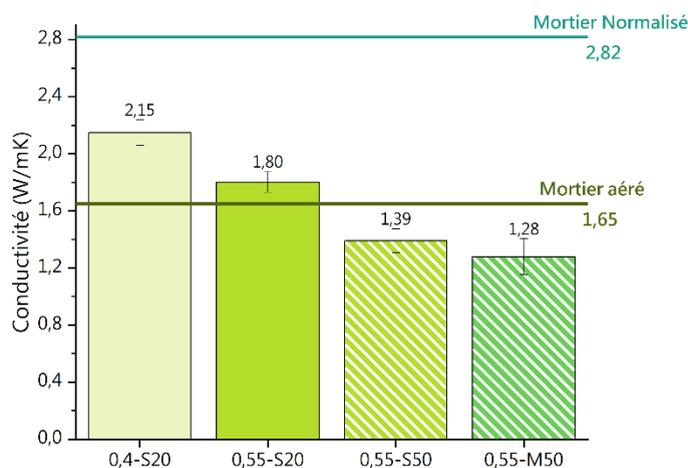
**Figure 4 Résistance à la compression des mortiers avec MIDND**

Les résultats de résistance à la compression des mortiers formulés avec des MIDND sont présentés [Figure 4](#). Comme dans le cas de la densité, toutes les formulations contenant des MIDND démontrent une résistance à la compression plus faible que celle des mortiers normalisés (environ 51,6 MPa). Les formulations faisant intervenir 20% de MIDND, présentent des résistances intermédiaires tandis que les formulations avec 50% de MIDND développent des résistances comparables à celles des mortiers aérés (19,05 MPa).

Les bonnes performances mécaniques des formulations 0,40-S20 et 0,55-S20 sont à mettre en relation avec leur densité, largement supérieure à celles des mortiers aérés.

### C. Résultats des essais de conductivité thermique

La [Figure 5](#) synthétise les résultats des mesures de conductivité thermique. Toutes les formulations présentent une conductivité plus faible, et par conséquent une meilleure résistance thermique, que les mortiers normalisés étudiés ( $\lambda = 2,82 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ). Les formulations utilisant 20% de MIDND ont une conductivité supérieure à celle des mortiers aérés ( $\lambda = 1,65 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ). À l'inverse les formulations avec 50% de MIDND démontrent une meilleure résistance thermique que les références aérées.



**Figure 5** Conductivité thermique des mortiers avec MIDND

Ces propriétés thermiques doivent être interprétées en regard de la porosité des formulations étudiées. En effet, l'air présent dans les porosités du matériau joue le rôle d'isolant, mais c'est la tortuosité, l'abondance et la répartition des pores qui définissent principalement la capacité d'isolation du matériau. Or, des essais préliminaires par tomographie aux rayons X tendent à montrer que les porosités des mortiers avec mâchefers sont plus petites mais plus nombreuses et mieux réparties dans l'ensemble de la matrice que les porosités des mortiers aérés. Ainsi, à densité équivalente, les formulations avec MIDND sont plus isolantes que les formulations traditionnelles.

### D. Etude environnementale

Les essais de lixiviation ont permis de mettre en évidence la bonne stabilisation des polluants des MIDND au sein de la matrice du mortier. En effet, les concentrations en polluants des éluâts des formulations avec mâchefers sont inférieures ou comparables à celles mesurées pour les mortiers aérés. De fait, l'incorporation de mâchefers ne semblent avoir que peu d'impact sur les propriétés environnementales des mortiers aérés. Les concentrations mesurées sont toutefois plus faibles pour les mortiers normalisés.

Les concentrations en éléments polluants relevées dans les éluâts de mortiers de mâchefers ont également été comparées avec celles des sous-fractions de mâchefers associées. Afin d'obtenir des résultats comparables, le pourcentage de mâchefers incorporés a été pris en compte et utilisé pour pondérer les résultats des mortiers avec MIDND. Tous les éléments jugés problématiques (éléments dont la concentration dépassaient les seuils définis par (*Arrêté du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux*, n.d.) lors de la lixiviation des mâchefers bruts présentent des taux d'abattement très importants. Par exemple, les concentrations en [Etainétain](#) et en [Antimoineantimoine](#) des éluâts des mortiers avec MIDND sont réduites de plus de 90% par rapport aux lixiviats des MIDND bruts et ce, quelle que soit la formulation avec MIDND étudiée. Bien que le [Cuivre, l'Arsenicuivre, l'arsenic](#) ou le [Mercuremercure](#) ne dépassent pas les seuils dans les éluâts de mâchefers, ils suivent la même tendance. Leurs concentrations sont abattues de plus de 75 %. A l'inverse d'autres éléments comme le [Baryumbaryum](#) et le [Molybdènemolybdène](#) voient leur concentration multipliée par 500. Les teneurs de ces éléments étant comparables à celles des mortiers normalisés et aérés, le ciment a été jugé responsable de ces augmentations.

## V. Conclusion

De par sa granulométrie, ses propriétés pouzzolaniques et la présence de métaux réducteurs, la fraction fine des MIDND est un substitut potentiel au porogène et aux sables utilisés pour la production de mortiers aérés. La première phase de ce travail a permis de mettre en évidence l'impact de plusieurs paramètres (tels que la quantité d'eau et de mâchefers, le broyage et la sous-fraction granulométrique des MIDND) sur la densité, l'ouvrabilité et la résistance des formulations. Ainsi, une formulation comme la 0,55-M50, utilisant des MIDND en quantité modérée, associée à une quantité d'eau elle aussi modérée semble être la clé pour obtenir les propriétés recherchées.

Dans un second temps, la mise en œuvre sur mortiers des formulations jugées les plus prometteuses a permis de confirmer les résultats sur pâte pure et d'étudier la bonne stabilisation de la plupart des polluants présents dans les MIDND.

Par la suite, des études approfondies sur la porosité et la microstructure des mortiers pourraient être mises en œuvre afin d'éclairer les résultats présentés ici. Les résultats de ces travaux pourront être utilisés afin de développer des bétons aérés performants, tout en mettant à profit la fraction fine des MIDND.

## VI. Remerciements

Les premiers remerciements vont à l'équipe d'accompagnement technique et analytique du laboratoire DEEP : Hervé Perrier-Camby, Richard Poncet, Nathalie Dumont et David Lebouil. Le projet a été financé par l'ADEME et le programme ERA-MIN Horizon 2020.

## REFERENCES

- AFNOR, 2002. Caractérisation des déchets - Lixiviation - Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues - Partie 2 : essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (No. NF EN 12457-2). AFNOR.
- AMORCE, 2018. DT\_92 Etats des lieux du recyclage des mâchefers en France.
- Antoun, M., Aouad, G., Becquart, F., Saba, M., Gerges, N., 2018. Valorisation d'un mâcher d'incinération de déchets non dangereux en substitution du sable dans des mortiers de ciment portland et sulfo-alumineux. Presented at the Conférence Internationale Francophone NoMaD 2018, Liège Université, p. 11.
- Arrêté du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux, n.d.
- Cheng, A., 2012. Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars. *Materials & Design* (1980-2015) 36, 859–864. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.003>
- Chimenos, J.M., Segarra, M., Fernández, M.A., Espiell, F., 1999. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials* 64, 211–222. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(98\)00246-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(98)00246-5)
- EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances, 2016.
- Hoff, G.C., 1972. Porosity-strength considerations for cellular concrete. *Cement and Concrete Research* 2, 91–100. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(72\)90026-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(72)90026-9)
- Li, X.-G., Lv, Y., Ma, B.-G., Chen, Q.-B., Yin, X.-B., Jian, S.-W., 2012. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. *Journal of Cleaner Production* 32, 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.038>
- Müller, U., Rübner, K., 2006. The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component. *Cement and Concrete Research* 36, 1434–1443. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.023>
- Pera, J., Coutaz, L., Ambroise, J., Chababbet, M., 1997. Use of incinerator bottom ash in concrete. *Cement and Concrete Research* 27, 1–5. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00193-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00193-7)
- Qiao, X.C., Ng, B.R., Tyrer, M., Poon, C.S., Cheeseman, C.R., 2008. Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash. *Construction and Building Materials* 22, 473–480. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.013>
- Saikia, N., Mertens, G., Van Balen, K., Elsen, J., Van Gerven, T., Vandecasteele, C., 2015. Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilisation in cement mortar. *Construction and Building Materials* 96, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.185>
- Silva, R.V., de Brito, J., Lynn, C.J., Dhir, R.K., 2019. Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011>
- Song, Y., Li, B., Yang, E.-H., Liu, Y., Ding, T., 2015. Feasibility study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as aerating agent for the production of autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Composites* 56, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.006>
- Šyc, M., Krausová, A., Kameníková, P., Šomplák, R., Pavlas, M., Zach, B., Pohořelý, M., Svoboda, K., Punčochář, M., 2018. Material analysis of Bottom ash from waste-to-energy plants. *Waste Management* 73, 360–366. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.045>
- Tang, P., Florea, M.V.A., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H., 2014. The Application of Treated Bottom Ash in Mortar as Cement Replacement. Presented at the Proceedings of the EurAsia Waste Management

| Symposium 2014, 28-30 April 2014, Istanbul, Turkey Yıldız Technical University (YTU) and  
ISTAC Inc., pp. 1077–1082.