

Utilisation des mâchefers d'incinérateur d'ordures ménagères dans la fabrication de pavés en béton

(Use of municipal solid waste incineration residues in the precasting of concrete paving)

L. Courard¹, R. Degeimbre¹, A. Darimont¹, A.-L. Laval¹, L. Dupont² et L. Bertrand³

(1) Département Géomac, Unité de Recherches en Matériaux de Construction, Université de Liège, Belgique

(2) Société Intercommunale de Propreté Publique IPALLE, Froyenne, Belgique

(3) Chantier Bertrand, Hermaalle-sous-Huy, Belgique

Paper received: June 11, 2001; Paper accepted: September 7, 2001

RÉSUMÉ

Valoriser les Mâchefers d'Incinération des Ordures Ménagères (M.I.O.M.) constitue un point positif dans le cadre du développement durable : épargne des ressources naturelles, limitation des volumes à stocker, réduction de la consommation d'énergie.

À condition de respecter des règles strictes d'incinération des ordures ménagères et en réalisant à l'aval les traitements nécessaires, les mâchefers constituent un matériau granulaire utilisable dans le domaine de la construction et du génie civil. Si des applications en fondations ou sous-fondations de route ont déjà vu le jour, l'emploi des mâchefers dans la fabrication de pavés en béton (communément appelés «clinkers») constitue un domaine de valorisation nouveau et surtout consommateur de quantités importantes de matériaux.

Les performances mécaniques et physiques liées à leur emploi - résistance au fendage, absorption d'eau, usure - permettent de remplacer une partie du squelette granulaire des pavés en béton et d'obtenir des résistances pratiquement aussi élevées que celles des pavés de référence ; de plus, les risques de lixiviation de produits dangereux sont encore réduits par l'effet d'encapsulation des déchets dans la matrice cimentaire. La méthode de fabrication révèle ici toute son importance pour l'obtention des performances minimales exigées.

ABSTRACT

Valorisation of Municipal Solid Waste Incineration Residues - excluding ashes - is a positive advance in sustainable development: saving natural resources, decrease in wastes volume stored, reduction of energy consumption.

If good conditions of incineration can be ensured and post-combustion treatments are realised, solid residues are in the form of granular materials usable in construction and civil engineering. Uses in road structures are classical; application for the precasting of paving is quite new and interesting due to the quantity of recycled materials.

Mechanical and physical performances of municipal solid waste incineration residues let us to replace a part of the granular skeleton and to obtain similar behaviour as with reference granular composition: splitting resistance, water absorption and resistance to abrasion are optimised. Leaching behaviour is also verified in order to avoid detrimental effect on the environment; it is shown that post-combustion treatments and compacting energy combined with vibration are essential for a good quality product fabrication.

1. INTRODUCTION

La valorisation des déchets et sous-produits industriels est une nécessité impérieuse, dans le cadre du monde limité dans lequel nous vivons. L'utilisation en génie civil des Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (M.I.O.M., mâchefers en abrégé) permet non seulement de limiter la mise en dépôt de déchets mais aussi d'épargner les ressources naturelles. D'autre

part, le monde de la construction a connu un développement important de l'utilisation des pavés en béton pour la réalisation et l'aménagement de places publiques, de brise-vitesse, de giratoires, de pistes cyclables,...

Or, le marché est énorme : rien que pour la Région Wallonne (Belgique), pas moins de 1 593 500 tonnes de déchets ménagers ont été collectés en 1999, ce qui représente 478 kg par habitant [9].

Si la prévention est de loin plus intéressante dans le

Note éditoriale

Dr. Ir. Luc Courard est Membre de la RILEM. Il participe aux Comités Techniques RILEM TC RLS 'Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs or pavements' et 184-IFE 'Industrial floors for withstanding harsh environmental attacks, including repair and maintenance'.

cadre de la politique de gestion des déchets, il est clair que, après le recyclage, le réemploi ou la réutilisation, des déchets « ultimes » restent sur le marché.

La valorisation énergétique est une des techniques de réduction des déchets employées en Wallonie : en 1999, 540 000 tonnes de déchets ont été incinérés, ce qui a donné lieu à la production de 145 000 tonnes de mâchefers (M.I.O.M.).

Actuellement, outre le stockage en centre d'enfouissement technique, les mâchefers sont utilisés en sous-fondations et fondations de route [2, 10]. Après traitement - notamment criblage et déferraillage - les mâchefers peuvent être assimilés à des grains de bonne qualité présentant un certain nombre de caractéristiques géotechniques intéressantes [8]. Ils sont également utilisés dans d'autres pays comme granulats en couche de fondation ou de base liés aux bitumes [1], ce qui présente comme avantage supplémentaire la limitation du risque de lixiviation. Trois facteurs fondamentaux influencent en effet le bon comportement a posteriori des structures réalisées à base de mâchefers [6] :

- les conditions structurelles concernant les transferts d'humidité vers et à travers la structure ;
- la structure du produit compacté (enveloppe étanche) ;
- la solubilité dans l'eau (fonction du pH, des conditions chimiques ambiantes,...).

En effet, outre le fait qu'il est nécessaire d'atteindre des valeurs minimales pour que le matériau puisse jouer son rôle mécanique, le problème essentiel est de limiter les risques de lixiviation. Les paramètres de combustion (température du four, durée de passage,...) ainsi que la maturation avant utilisation, permettent de réduire les risques [5]. L'incorporation de mâchefers dans une matrice cimentaire, telle que dans un pavé de rue, permet de limiter encore la probabilité de relargage dans l'environnement : grâce à l'enrobage de la pâte de ciment et à un compactage énergique, la solubilité des M.I.O.M., déjà faible après traitement, est encore diminuée. Les exigences mécaniques limitées, liées aux conditions d'application particulières, permettent l'emploi de sous-produits en remplacement de tout ou partie des granulats [3].

Le projet présente ici une tentative d'utilisation des M.I.O.M. en remplacement d'une fraction du squelette granulaire (granulats + sable), dans des proportions résultant du compromis entre les propriétés mécaniques et physiques minimales exigées et le souci de recycler le plus grand pourcentage de déchets.

2. LES MÂCHEFERS D'INCINÉRATION DES ORDURES MÉNAGÈRES

2.1 Origine des mâchefers

Si on effectue une classification des déchets fondée sur la responsabilité de leur élimination [4], on peut dire que les déchets urbains sont l'ensemble des déchets dont l'élimination est prise en charge par les villes et communes. Ils peuvent se répartir comme suit :

- les déchets liés à l'activité domestique des habitants ;
- les déchets de nettoiement (voies, espaces publics, marchés,...) ;
- parfois également les déchets issus des activités économiques et d'établissements collectifs.

D'un point de vue plus technique, une répartition massique brute des déchets (Fig. 1) montre une forte présence de matériaux organiques, ainsi que de papiers et cartons, qui constituent des éléments fermentescibles mais aussi un taux élevé de matières combustibles, valorisables d'un point de vue énergétique.

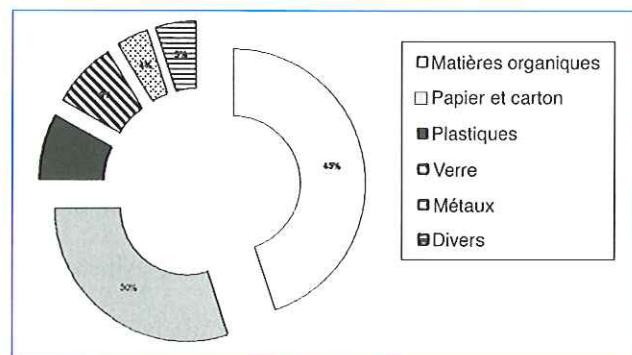


Fig. 1 - Composition moyenne des ordures ménagères [8].

On compte en général $30 \pm 10\%$ d'humidité dans les déchets bruts et un Pouvoir Calorifique Inférieur de 1 850 Kcal/kg. Ces données permettent une vue générale de la composition des déchets car le gisement est variable en fonction du lieu, des habitudes de vie de la population, de la saison ou encore de la mise en place de politiques plus ou moins poussées de collectes séparées (papier, verre, métaux,...).

Les principales techniques de traitement de ces déchets vont du stockage en centre d'enfouissement technique à la pyrolyse en passant par le compostage, la bio-méthanisation et la valorisation énergétique : ces techniques ne sont pas exclusives mais plutôt complémentaires. La valorisation énergétique, qui est la technique qui nous intéresse ici, est le procédé qui permet la plus grande réduction de volume (Fig. 2) tout en récupérant une partie intéressante de l'énergie contenue dans les déchets (production d'électricité dans le cas du Centre de Thumaide).

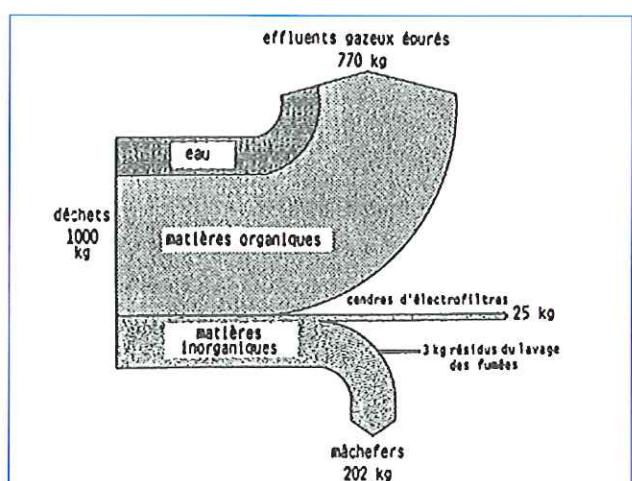


Fig. 2 - Bilan massique d'une usine d'incinération des déchets urbains.

Les résidus du traitement par incinération sont de trois ordres : les gaz de combustion, traités par techniques spéciales ; les cendres volantes, issues du système de dépoussiérage des fumées et contenant des teneurs élevées en métaux lourds. Elles seront inertées et stockées en centre d'enfouissement. Enfin, les mâchefers (M.I.O.M.) qui, après la combustion des déchets entre 900 et 1 100°C, sont extraits du foyer puis refroidis à l'eau dans une fosse de réception avant d'être repris et dirigés vers un centre de traitement. Contenant 20 à 30% en masse d'eau, les mâchefers ont l'aspect de solides noirs ou gris plus ou moins divisés et hétérogènes où peuvent encore apparaître des emballages métalliques, des morceaux de verre,... Après traitement (criblage à 20 mm et déferraillage), le produit plus homogène est stocké en parc de maturation pour un minimum de 15 semaines. Cette maturation a pour conséquences :

- l'oxydation de la fraction organique des matières imbrûlées qui subsisteraient après passage au four ;
- l'oxydation du fer, non capté au déferraillage, en oxyde ferrique ;
- la carbonatation de la chaux sous l'action du CO₂ de l'air ;
- l'hydroxydation de l'aluminium.

2.2 Propriétés

Comme indiqué précédemment, les mâchefers, en fonction du gisement des ordures ménagères, peuvent présenter des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques fort variables ; les M.I.O.M.⁽¹⁾ que nous avons utilisés ont subi des traitements comportant le passage au pré-cribleur (fraction > 100 mm), au stockage tampon, au trommel cribleur (fraction 0/20 mm) et au déferraillage. Les mâchefers 0/20 sont alors stockés en hall de maturation ouvert pendant 10 ou 20 semaines.

Les principales caractéristiques du produit sont données en annexe ; le produit final ressemble à un sable grossier (Photo 1), utilisable aux termes des cahiers des charges du Ministère de l'Equipment et des Transports (Région Wallonne, Belgique), comme *sol pour remblai et sous-fondation, ou intervenant dans la fabrication de béton maigre* [10].

3. LES PAVÉS EN BÉTON DE CIMENT

En 1923, dans son livre sur les « Pierres Artificielles », l'ingénieur chimiste Fritsch [7] recommandait déjà, entre autres matériaux, l'utilisation des mâchefers pour la réalisation de « pièces en aggloméré de béton de ciment ». Le problème n'est donc pas récent même si, à l'époque, la gestion des déchets était loin d'être au centre des préoccupations et, d'autre part, les mâchefers du début du siècle n'étaient que les lointains cousins de ceux que nous connaissons aujourd'hui.

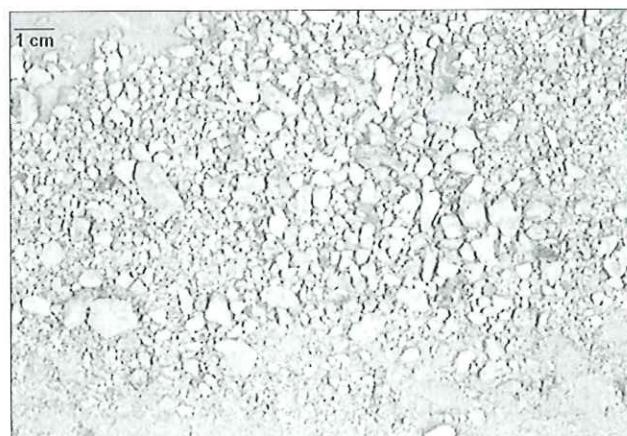


Photo 1 – Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (Thumaide, Belgique).

Les récents développements qu'ont connu les pavés en béton ont conduit à la révision des normes de fabrication et d'utilisation, définies en termes de performances : la norme belge [NBN B 21-311 (1982)] et le projet de norme européenne [prEN 1338 (Comité Technique CEN TC 178)] sont fort semblables et contiennent :

- le domaine d'application ;
- les définitions des différentes dimensions et des pièces complémentaires ;
- les spécifications relatives aux matériaux ;
- les prescriptions relatives aux caractéristiques géométriques et physiques.

Dans la mesure où les caractéristiques géométriques des pavés ne seront pas ou peu affectées, puisque la dimension maximale des mâchefers n'excède pas 20 mm, nous nous sommes centrés sur les propriétés mécaniques et physiques, dont principalement :

- la résistance au fendage [NBN B 21-311] ;
- l'absorption d'eau par immersion [NBN B 15-215] ;
- la résistance à l'usure [NBN B 15-223].

3.1 Composition

La composition des pavés a été choisie en adaptant une recette existante, par référence à une courbe granulométrique ; celle-ci résulte de la composition massique des divers sables et granulats utilisés pour la fabrication (50% sable de Rhin et 50% concassés 2/14 avec 300 kg de ciment CEM III A 42,5 - E/C = 0,35). Il en résulte que les mâchefers ne remplacent pas tel ou tel matériau mais entrent dans la composition globale du squelette granulaire (Fig. 3).

Nous avons, de plus, dans le but de limiter le risque éventuel de perte de performances mécaniques du pavé, introduit un certain pourcentage de wollastonite dans la composition. Il s'agit d'un produit minéral naturel, formé de longues aiguilles blanches, de type CaSiO₃ [8].

Les principales variables sur lesquelles nous avons agi sont (Tableau 1) :

- le pourcentage de mâchefers : 12,8 - 20 - 30 - 35% ;
- la teneur en wollastonite : 5 - 10 - 12,5% ;
- l'âge de maturation : 10 - 20 semaines.

(1) Il s'agit d'un lot de 200 kg prélevés dans les mâchefers produits sur le site de l'incinérateur de Thumaide, Province de Hainaut, Belgique, au printemps 2000.

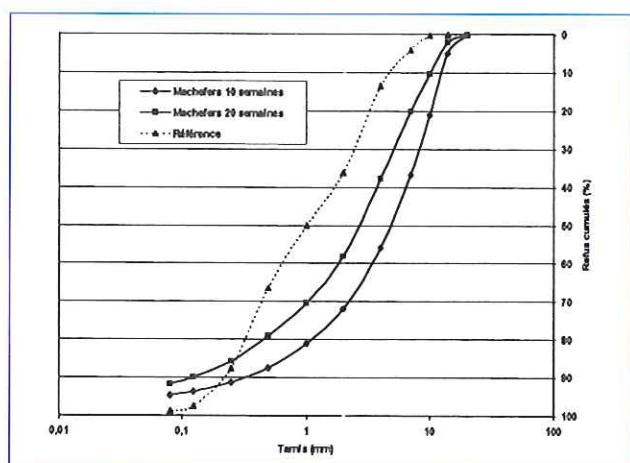


Fig. 3 – Courbe granulométrique de référence.

Tableau 1 – Composition des pavés pour différents pourcentages de mâchefers et degrés de maturation			
12,8 % de mâchefers			
10 semaines	%	20 semaines	%
Sable	44,2	Sable	44,2
Concassé 0/2	17	Concassé 0/2	17
Concassé 2/4	10	Concassé 2/4	10
Concassé 2/14	16	Concassé 2/14	16
10 semaines	12,8	20 semaines	12,8
20 % de mâchefers			
10 semaines	%	20 semaines	%
Sable	35	Sable	35
Concassé 0/2	22	Concassé 0/2	17
Concassé 2/4	10	Concassé 2/4	10
Concassé 2/14	13	Concassé 2/14	15
10 semaines	20	20 semaines	20
30 % de mâchefers			
10 semaines	%	20 semaines	%
Sable	25	Sable	29
Concassé 0/2	22	Concassé 0/2	17
Concassé 2/4	10	Concassé 2/4	10
Concassé 2/14	13	Concassé 2/14	14
10 semaines	30	20 semaines	30
35 % de mâchefers			
10 semaines	%	20 semaines	%
Sable	24	Sable	25
Concassé 0/2	18	Concassé 0/2	17
Concassé 2/4	10	Concassé 2/4	10
Concassé 2/14	13	Concassé 2/14	13
10 semaines	35	20 semaines	35

3.2 Fabrication

Les 24 compositions ont été mises en œuvre au laboratoire, par référence à la fabrication des mortiers RILEM et en adoptant la procédure⁽²⁾ suivante pour la mise en œuvre :

Tableau 2 – Résultats de l'essai de traction par fendage (28 jours)

Formulation*	Résistance moyenne au fendage (N/mm ²)	Masse volumique (g/cm ³)	Porosité (%)
Référence	1,55	2,161	25,38
10/12,8/5	1,85	2,737	20,42
10/12,8/10	1,33	2,707	25,46
10/12,8/12,5	1,25	2,055	23,19
20/12,8/5	1,29	2,789	25,09
20/12,8/10	1,27	2,044	24,17
20/12,8/12,5	1,30	1,972	25,19
10/20/5	1,56	2,011	20,73
10/20/10	1,13	1,985	23,76
10/20/12,5	0,99	2,021	21,42
20/20/5	1,27	2,040	21,82
20/20/10	1,20	2,047	25,46
20/20/12,5	1,30	2,022	25,08
10/30/5	1,86	2,063	21,59
10/30/10	2,13	2,073	19,73
10/30/12,5	2,26	2,056	19,37
20/30/5	1,61	1,985	24,07
20/30/10	1,24	2,021	26,45
20/30/12,5	1,65	1,944	23,83
10/35/5	2,67	2,710	17,79
10/35/10	2,41	2,108	18,89
10/35/12,5	2,23	2,074	18,72
20/35/5	1,98	1,997	22,53
20/35/10	1,52	2,020	24,78
20/35/12,5	1,59	2,414	23,98
Bertrand**	6,07	2,288	12,25

* formulation X/Y/Z : X = âge de maturation des mâchefers - Y = teneur en mâchefers - Z = teneur en wollastonite.

** Bertrand : pavés réalisés au Chantier Bertrand, sur une chaîne de fabrication traditionnelle.

- remplissage du moule et de la rehausse ;
- passage à la table vibrante VEBE pendant 30 secondes ;
- application d'une pression de 500 kg ;
- finition de la face supérieure.

Les pavés sont entreposés après démoulage pendant 28 jours sous eau et soumis ensuite aux essais de performance.

3.3 Essais de performance

La résistance au fendage est une propriété fondamentale pour l'utilisation de pavés dans les revêtements de chaussées, pistes cyclables et autres ralentisseurs de trafic. Le Tableau 2 définit la moyenne pour 4 essais de résistances obtenues sur les diverses compositions.

Diverses constatations peuvent être faites (Fig. 4) : – c'est la formulation contenant 35% de mâchefers (10 semaines de maturation) et 5% de wollastonite qui semble donner la meilleure résistance au fendage (2,67 MPa) ;

(2) On verra plus loin (§ 4.) que cette procédure est moins énergique que la procédure industrielle et que cela induit une perte des performances.

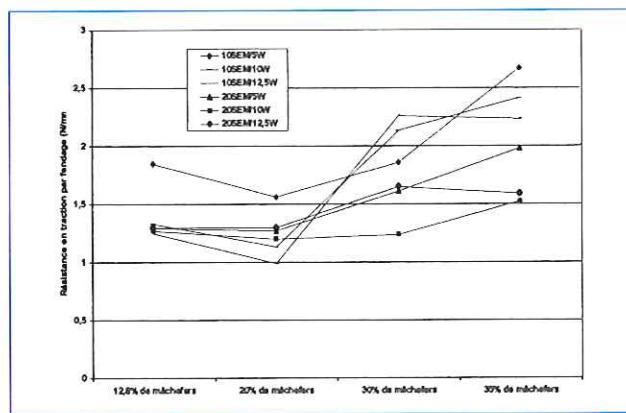


Fig. 4 – Évolution de la résistance en compression.

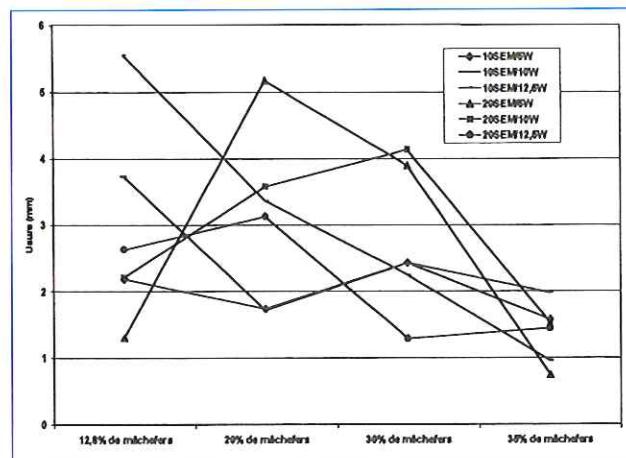


Fig. 5 – Résultats de l'essai d'usure.

- les résultats sont statistiquement plus élevés pour les mélanges contenant des mâchefers ayant subi 10 semaines de maturation ;
- les résistances sont plus influencées par la teneur en mâchefers et le degré de maturation que par la teneur en wollastonite qui ne joue ici qu'un rôle marginal (analyse multivariée, [8]).

On notera que le mélange de référence (sable, concassés, ciment) donne des valeurs plus faibles que les exigences contractuelles et normatives imposées pour ce genre d'élément de construction : cela est dû principalement à la technique de fabrication qui, comme on le verra plus loin, ne permet pas en laboratoire de reproduire les phases de vibration et de compaction des pavés. La preuve en est la mesure d'absorption d'eau qui, sur le pavé de référence, atteint une valeur de 13,8%. Les valeurs obtenues pour les différents mélanges avoisinent ou sont légèrement inférieures à cette valeur qui reste élevée : pour trois des quatre « familles » de concentration de mâchefers (12,8 - 20 et 35 %), l'absorption d'eau la plus faible correspond aux formulations utilisant seulement 5% de wollastonite (en remplacement d'une partie du ciment), ce qui est logique étant donné la forme de ce matériau qui empêche d'obtenir une bonne compacité, et pour les mâchefers âgés de 10 semaines. Le taux d'absorption est chaque fois inférieur à celui de la composition dite de référence.

Quant à l'essai d'usure (dit de Amsler), qui consiste à

mesurer l'usure d'une éprouvette animée d'un mouvement de rotation et soumise au frottement d'une meule sablée [8], il semble qu'il soit plus défavorable aux mâchefers que les deux premiers essais (Fig. 5). Le parcours de « 1 500 mètres » qu'ont à subir les éprouvettes ne permet pas toutefois un classement net des compositions ni la conclusion des tendances nettes : l'analyse statistique multicritères montre néanmoins un effet plus marqué de la teneur en mâchefers.

3.4 Essai de lixiviation

Un test de lixiviation a été effectué sur un échantillon de béton provenant du pavé pour lequel la meilleure résistance en traction par fendage a été obtenue. Il s'agit de la formulation 10/35/5 présentant la concentration la plus élevée en mâchefers qui, de surcroît, n'ont mûri que durant 10 semaines. Par conséquent, cette formulation est également celle qui, parmi toutes les compositions qui ont été réalisées, présente le plus de risques de relargage des polluants.

Le test qui a été réalisé est le test DIN 38414 - S4, pour lequel la granulométrie de l'échantillon a dû être réduite à quelques millimètres.

La liste des éléments (métaux, azotés, sels) pour lesquels l'analyse est obligatoire, a été publiée dans un article du Moniteur belge le 18 juin 1999. Cet article précise également les seuils limites de pollution ainsi que les méthodes analytiques pour les déterminer.

Les mâchefers, qui ont été utilisés lors de cette expérimentation, font partie d'un lot qui a reçu son certificat d'utilisation en travaux de sous-fondation : ils répondent donc aux exigences de l'arrêté gouvernemental en matière de rejets polluants.

Pour plus de sécurité, il a toutefois été décidé de procéder à un test de lixiviation relatif aux éléments qui avoisinent fréquemment la limite (à savoir l'antimoine, le cadmium, le cuivre, le plomb, le molybdène, le zinc, les chlorures et les sulfates). Le mode opératoire consiste en une prise d'essai de 200 grammes intimement mélangée à 2 litres d'eau durant 24 heures, après lesquelles la solution est filtrée et analysée.

Le Tableau 3 reprend les différents taux de libération des polluants de la formulation 10/35/5 ainsi que les seuils limites imposés par l'arrêté du Gouvernement wallon établissant une liste de matières assimilables à des produits [9].

Les résultats de cet essai sont relativement encourageants : les concentrations en métaux sont faibles et, à l'exception du zinc, toujours inférieures aux maxima tolérés par l'arrêté du Gouvernement wallon.

Ces résultats prometteurs ont amené le lancement d'une fabrication semi-industrielle de pavés, sur base d'une composition qui s'est dégagée comme la plus intéressante du point de vue des performances mécaniques ainsi que des impositions économiques, liées à l'adaptation de l'outil de fabrication : la wollastonite n'apportant que peu d'avantages techniques, elle a été supprimée de la composition retenue.

Tableau 3 – Résultats de l'essai de lixiviation

Paramètres	Mélange 10/35/5	Seuil limite	Unités
pH	11,6	7 - 12	
Conductivité	2410	6000	µs/cm
NH ₄ ⁺	4,3	50	mg/l
NO ₂ ²⁻	< 0,1	3	mg/l
Cyanures totaux	< 0,5	0,46	mg/l
Fluorures	2,4	5	mg/l
Sulfates	99	1000	mg/l
Chlorures	354	500	mg/l
As	< 0,1	0,1	mg/l
Cr	0,1	0,1	mg/l
Ni	0,1	0,2	mg/l
Cu	0,9	2	mg/l
Pb	< 0,1	0,2	mg/l
Zn	1,2	0,9	mg/l
Cd	< 0,1	0,1	mg/l
Hg	< 0,1	0,02	mg/l
Ti	< 0,1	2	mg/l
Sb	< 0,1	0,2	mg/l
Mo	0,1	0,15	mg/l

Tableau 4 – Valeurs expérimentales obtenues sur pavés fabriqués industriellement (10% mâchefers)

Résistance au fendage (N/mm ²)		
Éprouvettes	1a - 1b	4,65 - 4,68
Éprouvettes	2a - 2b	4,34 - 4,24
Éprouvettes	3a - 3b	4,20 - 4,52
Éprouvettes	4a - 4b	3,22 - 3,54
Éprouvettes	5a - 5b	3,71 - 3,44
Moyenne		4,05
Écart-type		0,53
Masse volumique (g/cm ³)		2,12 - 2,21
Absorption d'eau (%)		6,61 - 6,29
Usure (mm)		0,98 - 1,36

4. APPLICATION INDUSTRIELLE

Trois compositions reprenant 10, 20 et 30% de mâchefers, avec un âge de maturité de 10 semaines, ont été mises en œuvre dans une installation industrielle pour la fabrication $\pm 12 \text{ m}^2$ de pavés 22 x 11 x 7 cm. Les principales caractéristiques obtenues sont données dans le Tableau 4.

Les résultats obtenus montrent que :

– même si les résultats restent légèrement inférieurs au témoin, on observe toutefois une nette augmentation des performances mécaniques des mélanges à base de mâchefers par rapport aux premiers essais réalisés en laboratoire (résistance au fendage et à l'usure), ainsi qu'une diminution de l'absorption d'eau. Si on observe les résultats individuels de la résistance au fendage (Tableau 4), on constate que la dispersion des résultats est normale sur ce genre d'essais (5 à 9%), voire même légèrement inférieure à celle obtenue sur des échantillons témoins (sans mâchefers, 9 à 14%). L'hétérogénéité du produit ne semble donc pas constituer un handicap dans la fabrication et les performances du produit fini. Toutefois, un contrôle qualité exigeant, ainsi que des traitements post-incinération efficaces et intenses, sont indispensables afin de limiter les risques liés à la présence de résidus métalliques ou silicatés (verre, porcelaine) en quantité et en dimensions trop importantes ;

– l'absorption d'eau a été considérablement réduite grâce à l'effet combiné du compactage et de la vibration, nettement plus efficace sur la ligne de fabrication qu'en laboratoire. Les valeurs plus élevées que celles mesurées sur pavés de référence proviennent de la forme plus irrégulière des grains de mâchefers, liée au phénomène de combustion lui-même mais aussi au mode de refroidissement et au concassage-criblage qui suivent. Nous sommes donc en présence d'un produit concassé très irrégulier qui, s'il présente le même squelette granulaire que la composition de référence, ne permet pas un empilement aussi compact ;

– l'usure a également été réduite, dans le même sens que les deux autres propriétés : un produit plus compact présente une meilleure résistance mécanique, une diminution de la porosité ouverte et un meilleur enchaînage des grains en surface. La différence observée par rapport à la composition de référence est la présence en surface du pavé de morceaux de verre ou de céramique qui vont en général présenter une excellente résistance à l'usure, le revers de la médaille étant que ces éléments peuvent parfois se détacher « d'un coup » de la surface.

5. CONCLUSIONS

La valorisation des mâchefers (M.I.O.M.) pour la fabrication des pavés en béton est potentiellement réalisable. Plusieurs informations importantes peuvent être tirées du programme expérimental mis en œuvre :

- la technique de compactage et de vibration constitue un paramètre fondamental dans l'élaboration du produit ;
- la durée de maturité des mâchefers avant utilisation ne semble pas constituer un paramètre fondamental dans l'élaboration du produit final. Dix semaines devraient suffire ;
- les opérations de traitement post-combustion sont indispensables à l'obtention d'un produit de qualité : déferailage, criblage et, si possible, enlèvement de tous les éléments non ferreux vont dans le sens de l'élaboration d'un mâchefer présentant des propriétés constantes et durables ;
- la wollastonite ne joue dans ce cas qu'un rôle tout à fait marginal ;
- le mode de valorisation qui consiste à réaliser le remplacement d'une partie du squelette granulaire en respectant la courbe granulométrique de la composition de

référence semble prometteur ;

- le caractère irrégulier et anguleux des mâchefers est probablement à la base d'une porosité ouverte plus importante et d'un comportement à l'usure plus irrégulier ;
- les mâchefers demandent en général de travailler avec des quantités d'eau plus importantes, étant donné leur faible teneur naturelle en eau (1,5%), par rapport aux sables (5 à 7%) et aux graviers (2,5 à 4%) habituellement utilisés ;
- les performances mécaniques et physiques obtenues permettent d'envisager une utilisation à plus grande échelle, de façon économique et sécuritaire pour l'environnement.

La mise au point finale du produit n'est pas terminée : il convient encore d'adapter exactement la composition de façon à atteindre les valeurs minimales imposées et à s'assurer de la constance des propriétés des mâchefers dans le temps, non seulement au niveau du gisement en limitant les risques de variabilité du produit, mais aussi sur les pavés en béton en vérifiant leur durabilité. Un site expérimental est d'ailleurs en voie de réalisation et devrait permettre d'évaluer les risques éventuels de dégradation dans le temps des pavés en béton dus à la présence de mâchefers.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le personnel technique du Laboratoire des Matériaux de Construction ainsi que du chantier Bertrand, pour l'aide qu'ils ont apportée à la réalisation des échantillons et éprouvettes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gress, D. L. *et al.*, 'Municipal Solid Waste combustion ash as an aggregate substitute in asphaltic concrete', in 'Waste Materials in Construction', Proceedings of an International Conference, Maastricht, 1991 (Ed. Elsevier, 1991) 161-175.
- [2] Rashid, R. A. *et al.*, 'Municipal Solid Waste as aggregate in concrete and masonry', *Journal of Materials in Civil Engineering* 4 (4) (1992) 353-368.
- [3] Triano, J. R. *et al.*, 'Durability of municipal solid waste concrete', *Journal of Materials in Civil Engineering* 4 (4) (1992) 369-384.
- [4] Perrier-Rosset, A., 'Essai de classement et de définition des déchets', Formation E.N.P.C. sur la Valorisation des déchets et sous-produits dans les travaux de génie civil, Paris (1992).
- [5] Blignières (de), F. X., 'Approches d'un choix de traitement adapté aux contraintes techniques et économiques de base', *Revue T.S.M. - L'Eau* (mai 1988) 315-318.
- [6] Courard, L., 'Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil', Notes de cours (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998), 195 p.
- [7] Fritsch, J., 'Les pierres industrielles' (Librairie Générale Scientifique et Industrielle Desforges, Paris, 1923).
- [8] Laval, A.-L., 'Stabilisation et inertage des mâchefers d'incinération des ordures ménagères au moyen d'un produit minéral naturel : la wollastonite', Travail de fin d'études (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2000).
- [9] Arrêté du Gouvernement wallon établissant une liste de matières assimilables à des produits, Moniteur belge du 18/06/1999, p. 23035 (14 pages).
- [10] Cahier Général des Charges - type RW 99, Ministère wallon de l'équipement et des transports. Ministère de la Région wallonne. Direction générale des Pouvoirs locaux (1999).
- [11] Smith, R., 'Identifying Political, Legislative, Economic and Quality Barriers - Setting the Scene', 1st ETNRecy.net/RILEM Workshop, Paris, 11-12 Sept. (2000), 10 p.
- [12] Vautrin, A., 'Les mâchefers d'incinération des ordures ménagères', Réunion sur la Valorisation des déchets et sous-produits en génie civil (Paris, déc. 1992).
- [13] Collins, R. J., 'Use of waste and recycled materials as aggregates: standards and specifications', H.M.S.O., Dept of Environment (London, 1995), 60 p

ANNEXE CARACTÉRISTIQUES DES MÂCHEFERS D'INCINÉRATION D'ORDURES MÉNAGÈRES (M.I.O.M.) DE THUMAIDE⁽¹⁾

(1) Fiche technique n°SG07, Mâchefers issus de l'incinérateur de Thumaide - Caractéristiques et conseils d'utilisation, Version 30.04.98 (CRR/VDB-MT) - Voir page suivante.

Composition chimique moyenne			Caractéristiques géotechniques et physico-chimiques	
Silice	SiO_2	50 %	Valeur de bleu de méthylène (NBN B 11-210)	Min. - Max. 0,17 - 0,17
Aluminium	Al_2O_3	10 %	Limite de liquidité (sur la fraction < 0,420 m)	non mesurable
Oxyde de fer	Fe_2O_3	5 %	Limite de plasticité (sur la fraction < 0,420 mm)	non mesurable
Chaux	CaO	10 %	Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,5279 - 2,5697
Oxyde de sodium	Na_2O	5 %	Teneur conventionnelle en matières calcareuses (%)	12,6 - 15,6
Magnésie	MgO	3 %	Teneur conventionnelle en matières organiques (%)	1,39 - 2,68
Potasse	K_2O	1 %	Masse volumique apparente en vrac (kg/m^3)	1079 - 1125
Carbonate	CO_3^{--}	5 %	pH	9,7 - 10,5
Sulfate	SO_4^{--}	1 %	Perte au feu (%)	3,53 - 7,04
Chlorure	Cl^-	0,1 %	Perméabilité ($k_{10^\circ\text{C}, 40\%}$) (m/s)	$2,44 \cdot 10^{-3} - 3,50 \cdot 10^{-3}$
Métaux lourds		1 %	Résistance à la compression statique (%)	32 - 32
			Coefficient Los Angeles (%)	40,7 - 42,4
			Coefficient micro-Deval (%)	17,7 - 23,8
			Coefficient de fragmentabilité	1,99 - 2,06

Granulométrie par tamisage humide (moyenne de deux échantillons)			
		Moyenne	Min. - Max.
Fraction V	entre 20 et 2 mm	71,1 %	70,4 - 71,8
Fraction IV	entre 2 et 0,200 mm	16,0 %	16,7 - 15,2
Fraction III	entre 0,200 et 0,060 mm	4,4 %	4,2 - 4,5
Fraction II	entre 0,060 et 0,002 mm	8,6 %	8,7 - 8,5
Fraction IIa	entre 0,020 et 0,002 mm	6,5 %	7,0 - 6,0