

# LE DEVENIR DES MÂCHEFERS D'INCINÉRATION D'ORDURES MÉNAGÈRES

## PARTIE 1 : CARACTÉRISATION DES MÂCHEFERS

Ahcène Amokrane\*, Jean-Marie Blanchard\*, Hervé Billard\*\*,  
Lise Chatelet-Snidaro\*\*\*, Thierry Delineau\*\*\* & Christophe Bourdier\*\*\*

\* Insa-Lyon, Laepsi, \*\* France-Déchets, \*\*\* Cered France-Déchets

Le présent travail a porté sur la caractérisation physico-chimique (analyse élémentaire et comportement à la lixiviation) de quatre mâchefers d'origines différentes. Par ailleurs, il a concerné l'étude de la répartition du potentiel polluant dans différentes fractions granulométriques. Il a été possible de constater que les fractions granulométriques les plus fines montrent le potentiel polluant (potentiel risque) et la charge chimique (potentiel danger) les plus élevés. Toutefois, en tenant compte de la distribution granulométrique d'un mâchefer et donc du pourcentage massique des fractions granulométriques, il ressort que le potentiel polluant comme la charge chimique sont répartis en moyenne à raison de 10, 30, 50 et 70 % respectivement entre les fractions 0-0,08 ; 0-1 ; 0-2 et 0-4 mm. Le tamisage d'un mâchefer à 4 mm (enlèvement de la fraction 0-4 mm) permettrait d'atténuer le potentiel polluant ou la charge chimique d'environ 30 à 60 %. Aussi, ce mode de traitement pourrait constituer une étape complémentaire à la maturation lorsque celle-ci ne permet pas d'obtenir directement des mâchefers de classe V. Dans ce cas, les mâchefers ont toutes les chances de devenir de classe V.

The present work has focused on physico-chemical characterisation (elementary analysis and leaching behaviour) of four bottom ashes originated from different incinerators. In other hand, we have studied the distribution of polluting potential in various grain-size fractions. It has been possible to show that the finest grain-size fractions are the most loaded in pollution (danger potential and risk potential). Nevertheless, by accounting the grain-size distribution and therefore the weight percent of each grain-size fraction, it emerges that the pollution is distributed at the rate of 10, 30, 50 and 70 % between the fractions of 0-0,08 ; 0-1 ; 0-2 and 0-4 mm. The sifting of bottom ashes by removal of the 0-4 mm fraction would allow to reduce the polluting potential by 30-60 %. On other hand, this treatment can constitute a complementary step to the maturation treatment when the former does not allow to obtain bottom ashes of V-class. In these conditions, bottom ashes have all chance to become V-class materials.

### INTRODUCTION

En France, plus de 40 % des ordures ménagères sont éliminées par incinération avec ou sans récupération de chaleur, ce qui correspond à la production annuelle de 2 à 3 millions de tonnes de MIOM (mâchefers d'incinération d'ordures ménagères). Les mâchefers représentent en moyenne 25 à 30 % en poids des ordures incinérées et 10 % de leur volume.

Au regard de la loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 limitant les déchets admissibles en décharge aux seuls résidus ultimes et au vu de la circulaire du 9 mai 1994 encourageant la valorisation des MIOM, il ressort l'importance de bien connaître les mâchefers pour les valoriser ou à défaut les éliminer dans les meilleures conditions.

La valorisation des mâchefers (production annuelle française estimée à 2-3 millions de tonnes) s'avère intéressante, d'autant plus que d'une part les granulats naturels sont chers ou rares dans certaines régions (notamment Ile-de-France et Aquitaine), et que d'autre part le prix du mâchefer est, après maturation, 20 % environ plus bas que le prix des granulats naturels.

La circulaire du 9 mai 1994 répertorie les mâchefers en trois catégories : V, M et S. Si les MIOM de catégorie V (30 à 40 % du tonnage total) sont susceptibles d'être valorisés en techniques routières, les MIOM de catégorie M (40 à 60 % du tonnage total) doivent être traités avant d'être éventuellement valorisés. Quant aux MIOM S (10 à 20 % du tonnage total), ils sont destinés à être déposés en centre de stockage.

Afin de connaître, de manière la plus approfondie possible, la qualité des mâchefers de France, nous avons au préalable collecté auprès des gérants de 43 usines d'incinération et par l'intermédiaire d'articles scientifiques un nombre non négligeable d'analyses physico-chimiques.

L'exploitation de ces analyses (imbrûlés, COT, fraction soluble, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Pb, Cd, Cr, Hg et As) a permis de faire ressortir que les mâchefers de France se répartissent, au sens de la circulaire du 9 mai 1994 et pour 43 usines de forte capacité (> 3 t/h), en 40 % de mâchefers V (Valorisables), 50 % de mâchefers M (Maturables) et 10 % de mâchefers S

(Stockables). Le déclassement des mâchefers en catégorie M ou S est principalement lié à des taux élevés en imbrûlés et à de grandes teneurs lixivées en plomb, COT et fraction soluble.

Nous avons voulu dans un premier temps (partie 1) approfondir davantage la caractérisation des mâchefers en nous intéressant à la répartition des imbrûlés et du potentiel polluant (comportement à la lixiviation via le test Afnor X31-210) dans différentes fractions granulométriques.

Grâce à l'établissement de bilans de matière, il a été possible de simuler l'effet du tamisage (enlèvement de la fraction fine) sur la qualité des mâchefers.

Dans le cadre de développement de procédés de traitement des mâchefers, nous avons simulé à l'échelle du laboratoire (partie 2) l'influence de divers modes de traitement (maturation, tamisage, déferrailage et lavage à l'eau) sur la qualité environnementale des mâchefers (comportement à la lixiviation X31-210). Il serait ainsi possible de définir le meilleur mode de traitement ou la meilleure chaîne de traitement qui conduirait à un mâchefer de qualité environnementale plus satisfaisante que le mâchefer brut.

*A priori*, la maturation est censée améliorer la qualité environnementale des mâchefers en raison des réactions physico-chimiques pouvant avoir lieu au cours du temps (oxydation lente et ménagée des imbrûlés, oxydation du fer, carbonatation...). Le lavage à l'eau pourrait permettre d'éliminer la fraction soluble, qui renferme majoritairement les chlorures et les sulfates. L'opération de tamisage vise essentiellement à éliminer la fraction fine, qui est potentiellement polluante (plus de 50 % du potentiel polluant se trouvent concentrés dans la fraction granulométrique inférieure à 2 mm). L'étude du déferrailage est intéressante, puisque ce traitement conduirait à une modification de la porosité des mâchefers (influence sur le transfert d'oxygène et l'effet thermique).

### MÂCHEFERS ÉTUDIÉS

Nous avons réalisé l'étude sur 3 MIOM provenant de province dénommés A, B et C, et un MIOM noté D, issu d'Ile-de-France. Tous les mâchefers proviennent d'usines d'incinération de capacité supérieure à 6 t/h. Le MIOM A d'origine Rhône-Alpine est réputé généralement de catégorie V en sortie d'usine. Le MIOM B, également d'origine Rhône-Alpine, provient d'une usine où les déchets sont triés en amont de l'incinération. Quant au MIOM C d'origine Alsacienne, il est généralement en sortie d'usine de catégorie M ou S, comme c'est le cas du MIOM D.

### Prélèvements des mâchefers

Afin d'obtenir des échantillons frais n'ayant pas séjourné à l'usine d'incinération, le prélèvement des mâchefers a été réalisé en fin de chaîne de traitement (extinction à l'eau, déferrailage, criblage), c'est-à-dire au niveau de la jetée du transporteur à bandes.

La procédure d'échantillonnage adoptée a consisté en la

collecte d'une quantité de mâchefers correspondant à une semaine de fonctionnement de l'usine. Nous avons donc prélevé 7 échantillons journaliers dont chacun est le mélange de 4 prises élémentaires dont deux effectuées le matin et deux autres l'après-midi.

L'échantillon final (échantillon hebdomadaire) d'environ 300 kg a été reconstitué au laboratoire par le mélange des différents prélèvements journaliers.

### Méthodes

Des échantillons de 6 kg environ, séchés préalablement à l'air libre (jusqu'à l'obtention d'une humidité résiduelle d'environ 3 %), ont permis après pelletages alternés de préparer les fractions granulométriques 0-0,08 ; 0,08-1 ; 1-2 ; 2-4 et  $\phi > 4$  mm (4-6 et  $\phi > 6$  mm dans le cas du MIOM D).

Pour chacune de ces fractions et pour le mâchefer lui-même (reconstitué à partir des différentes fractions au *pro rata* de leur pourcentage massique), nous avons préparé par pelletage alterné 100 g d'échantillon, qui ont été soumis selon la norme X31-210 à trois lixiviations.

Il a été suivi sur l'ensemble des lixiviats X31-210 (Lix1, Lix2 et Lix3) le pH, la conductivité ainsi que le potentiel polluant (COT, fraction soluble, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Pb, Cd, Cr, Hg et As).

La fraction soluble a été estimée selon la norme X31-210. Le COT a été mesuré selon la norme NF T 90.102. Les chlorures et sulfates ont été analysés par chromatographie ionique. Le plomb, le cadmium et le chrome ont été dosés par absorption atomique. Le mercure et l'arsenic ont été analysés par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy).

En plus du suivi des lixiviats X31-210, nous avons déterminé sur solide (les différentes fractions granulométriques et les mâchefers eux-mêmes) le taux d'imbrûlés et les teneurs en chaux libre, calcium, plomb, cadmium et chrome. Le taux d'imbrûlés (perte au feu à 550 °C pendant 4 heures) a été estimé sur des échantillons séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 h. L'analyse sur solide du calcium, plomb, cadmium et chrome a été réalisée par absorption atomique après mise en solution des échantillons en milieu acide HF/HNO<sub>3</sub> (norme NF X31-151). La teneur en chaux libre (chaux carbonatée) a été déterminée par titrage complexométrique du calcium à l'EDTA, après mise en solution par extraction préférentielle à l'éthylène glycol à 110 °C pendant 1 heure.

## RÉSULTATS

### Comportement à la lixiviation

#### pH

Les pH des lixiviats sont basiques (pH de 9,5 à 12,2) pour tous les échantillons (figure 1). Les pH les plus élevés sont obtenus à partir du MIOM C et notamment du MIOM D, qui sont les plus chargés en chaux totale comme en chaux libre. Les pH obtenus à partir de la fraction 0-0,08 mm sont les plus faibles comparés à ceux des autres fractions granulométriques, alors que cette fraction renferme beaucoup de

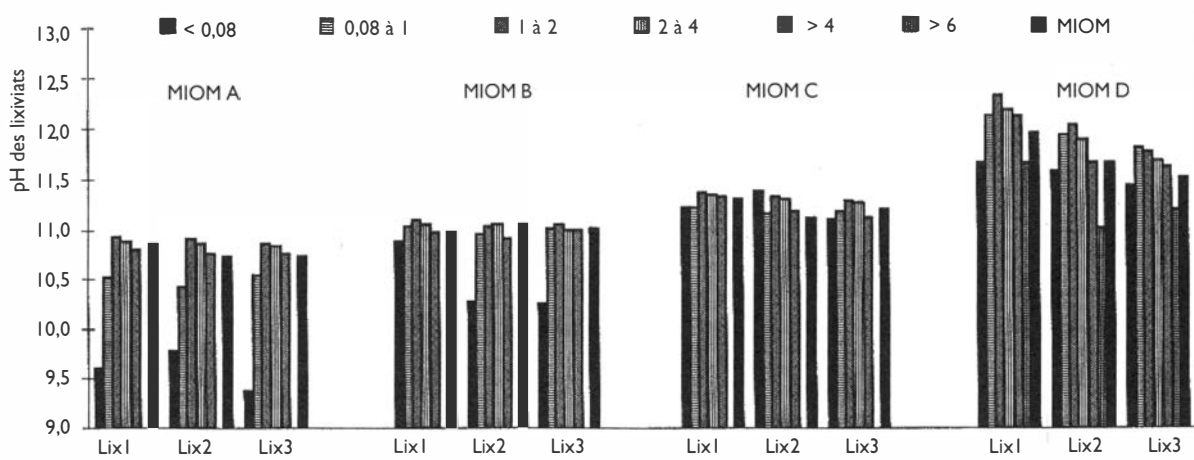


Figure 1 : pH des lixiats (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

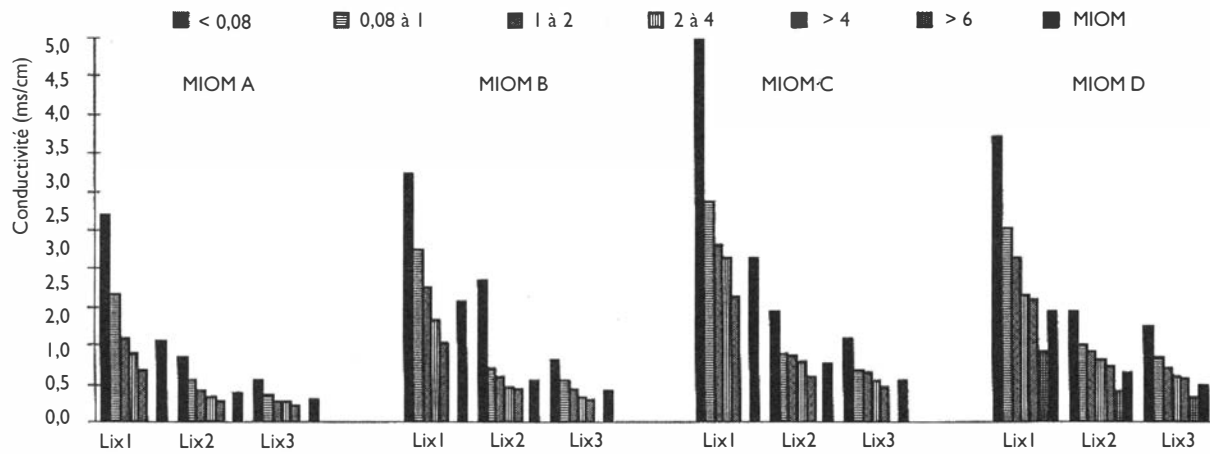


Figure 2 : Conductivité des lixiats (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

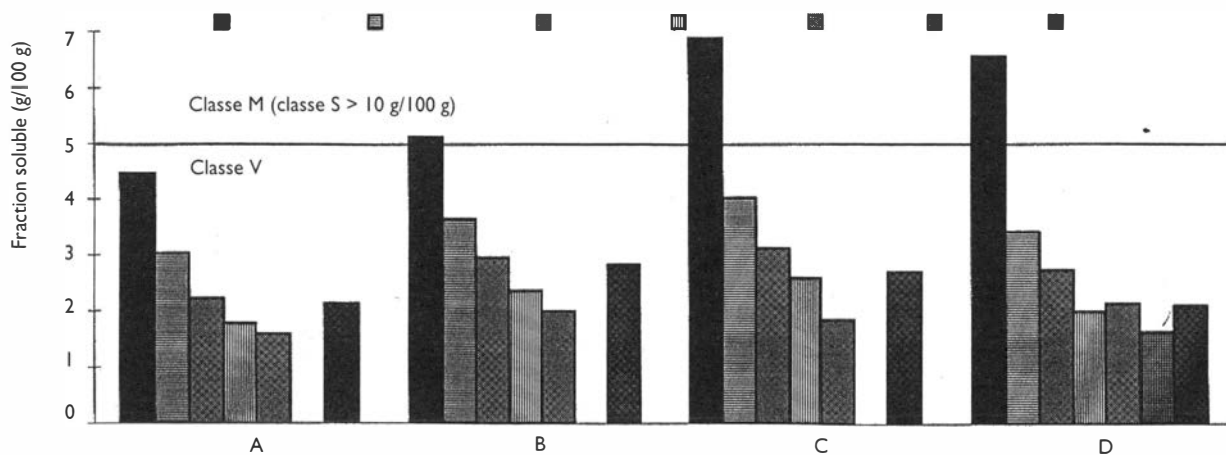


Figure 3 : Fraction soluble (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

## Mâchefers d'incinération

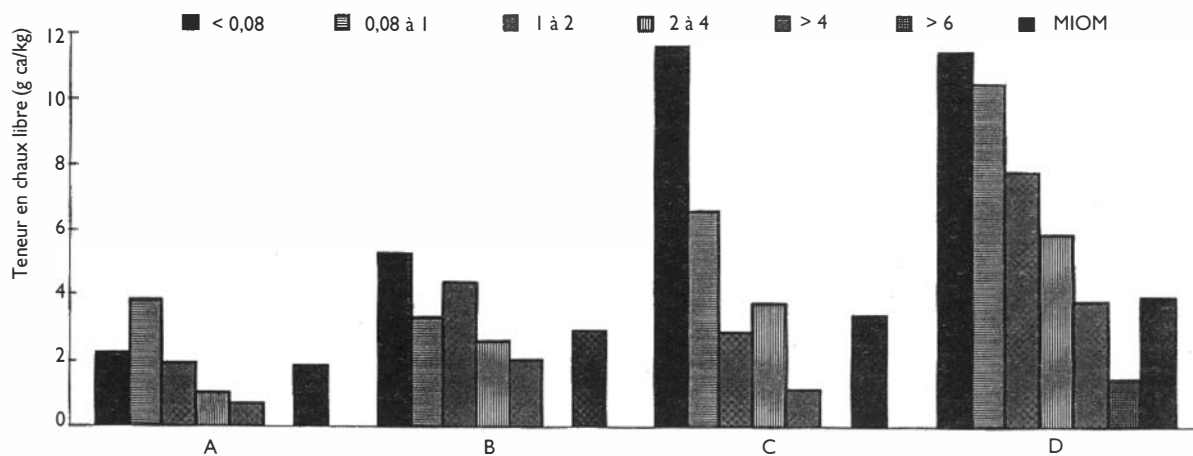


Figure 4 : Teneur en chaux libre (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

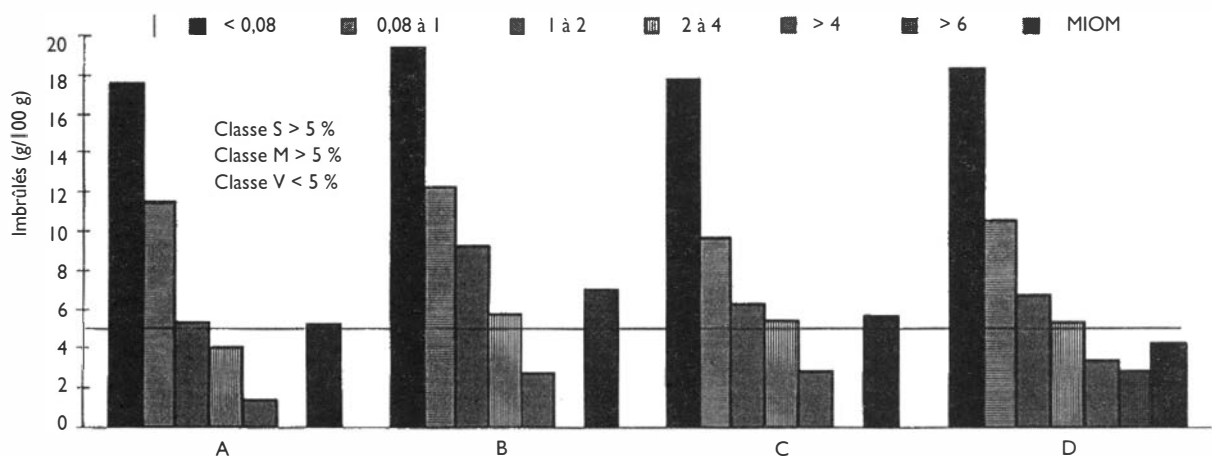


Figure 5 : Taux d'imbrûlés (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

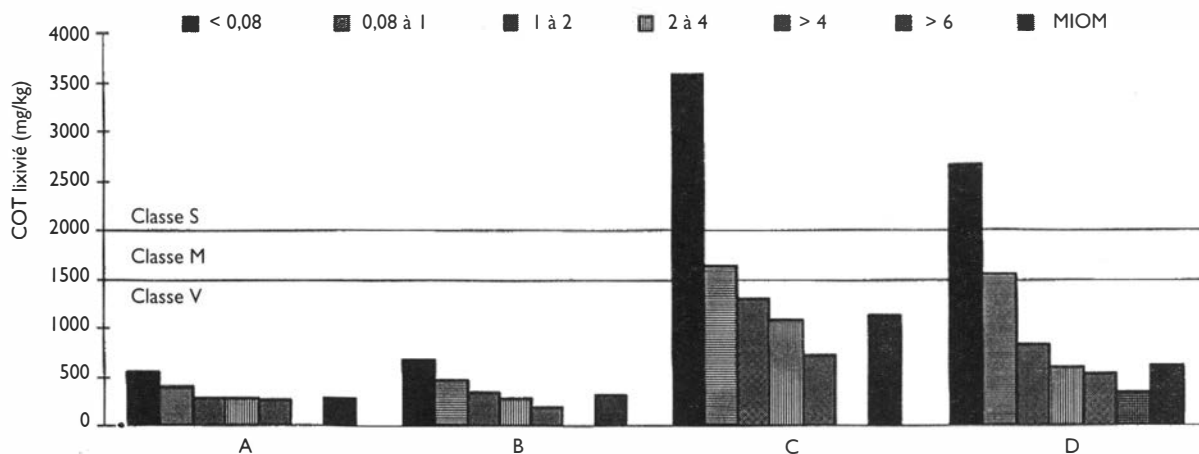


Figure 6 : COT lixivié (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

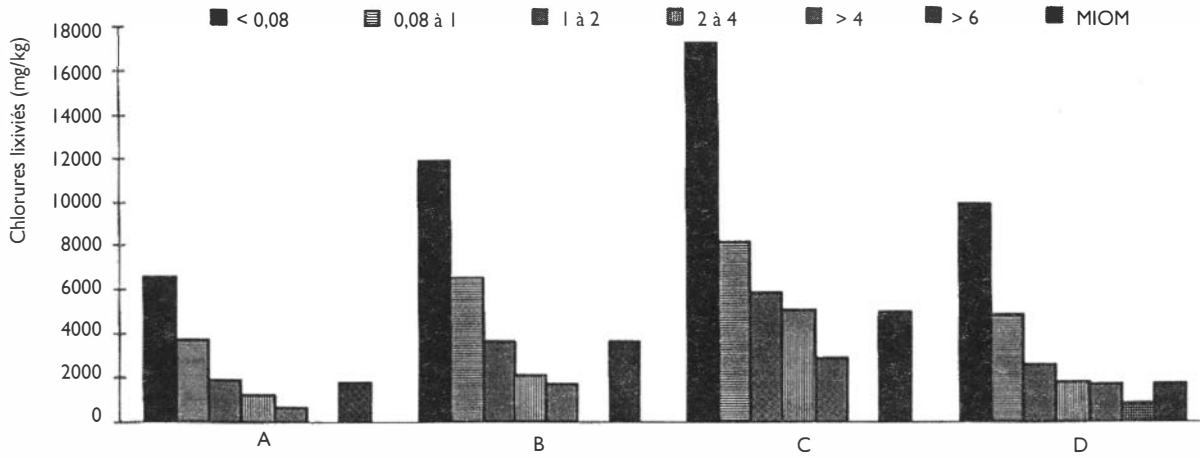


Figure 7 : Chlorures lixiviés (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

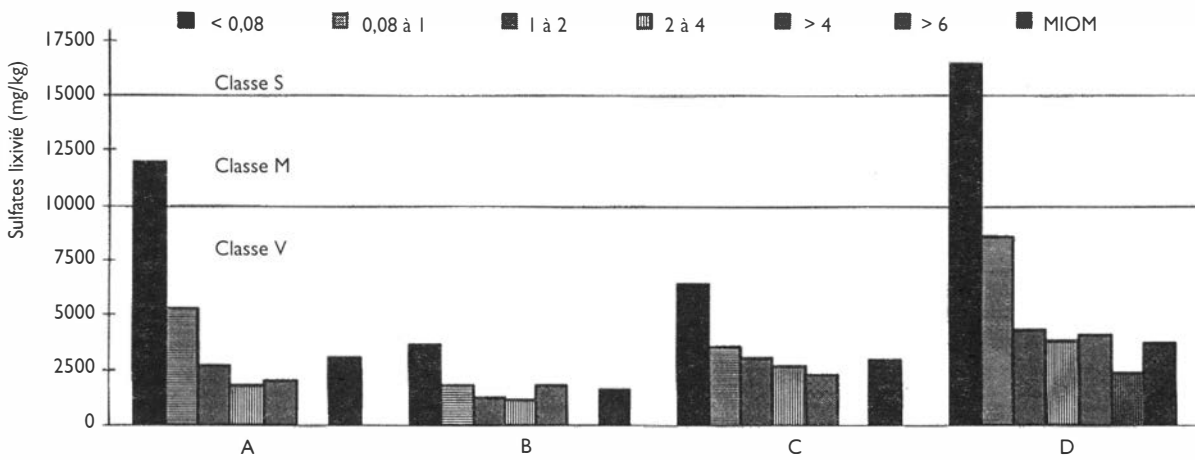


Figure 8 : Sulfates lixiviés (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

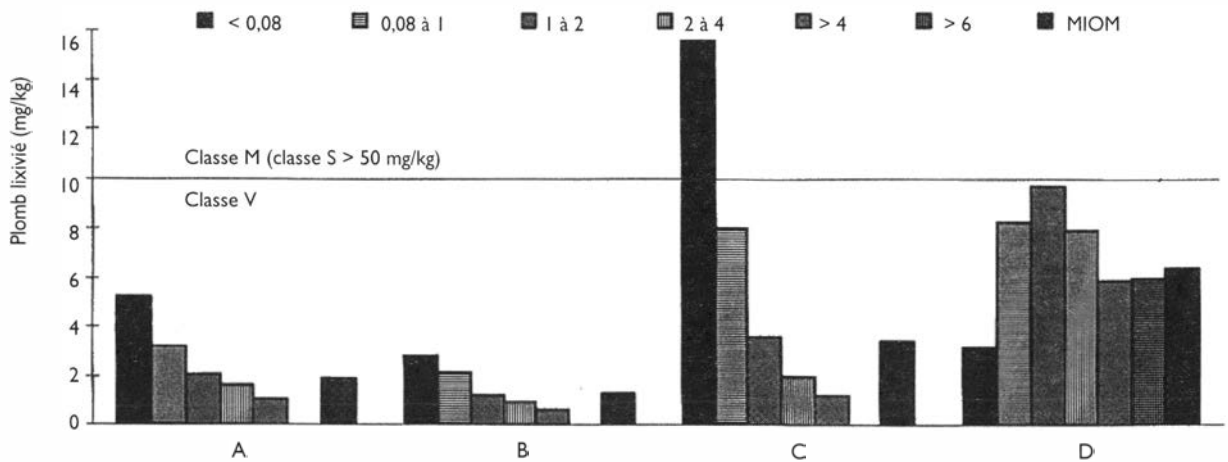


Figure 9 : Plomb lixivié (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

## Mâchefers d'incinération

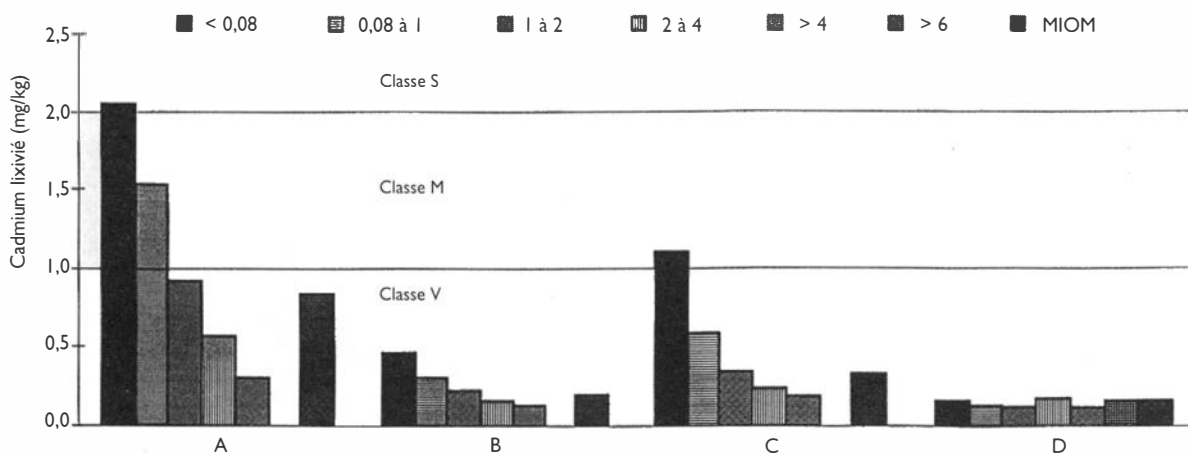


Figure 10 : Cadmium lixivié (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

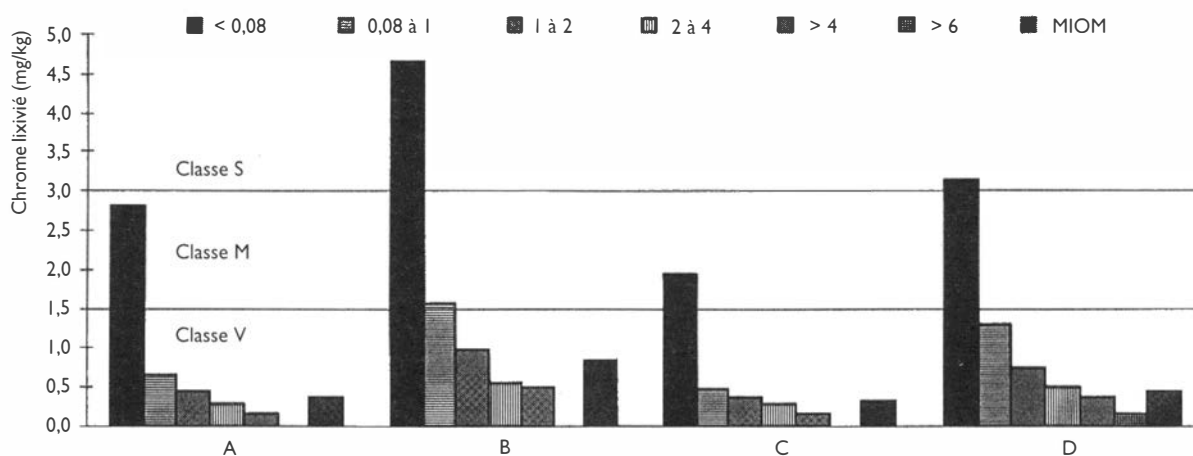


Figure 11 : Chrome lixivié (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

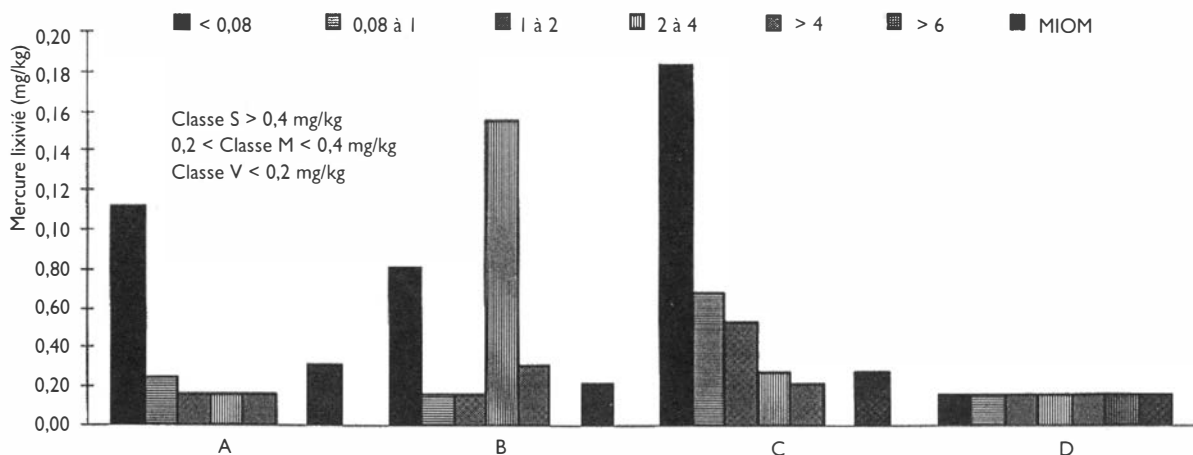


Figure 12 : Mercure lixivié (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

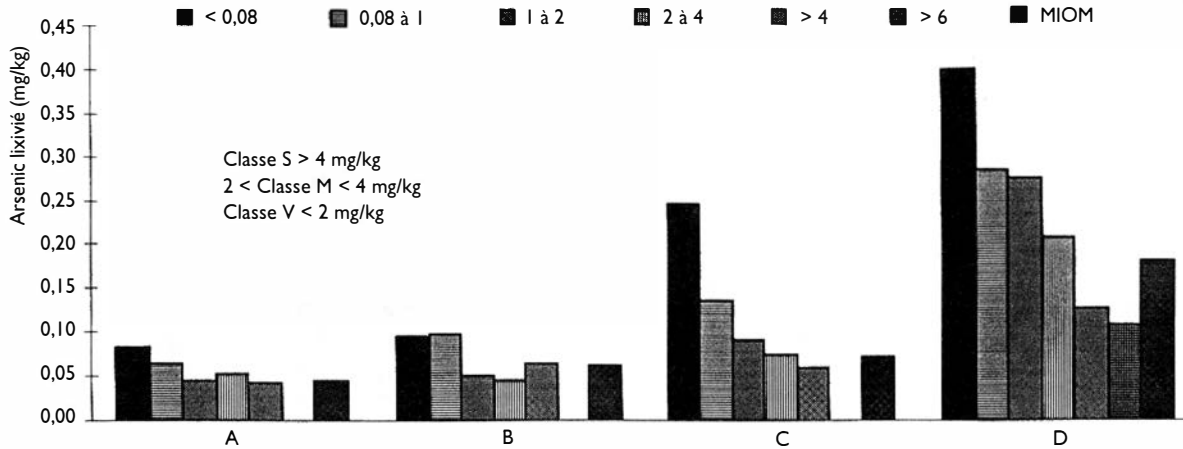


Figure 13 : Arsenic lixivié (la légende > 4 se réfère à φ 4-6 mm dans le cas de D)

calcium total comme de chaux libre. Il n'est donc pas possible d'expliquer les variations du pH d'une fraction granulométrique à une autre en se basant uniquement sur la teneur en chaux libre ou en calcium total.

**Conductivité**

Tous les MIOM (notamment le MIOM C) conduisent à des lixiviats dont la conductivité et la fraction soluble sont relativement élevées (1 à 5 mS/cm pour la conductivité et 1,5 à 6,5 g/100 g pour la fraction soluble).

Dans tous les cas, les fractions fines (en particulier la fraction 0-0,08 mm) conduisent aux lixiviats de conductivité et de fraction soluble les plus élevées (figures 2 et 3).

**Chaux libre**

Les teneurs en chaux libre de tous les mâchefers et de toutes les fractions granulométriques varient entre 1 et 10 g Ca/kg, soit 0,1 et 1 g Ca/100 g (figure 4).

Ces teneurs sont très faibles au regard des valeurs communément admises dans la littérature (10 à 15 g Ca/100 g). Pour expliquer cette grande différence, on peut incriminer la nature de la chaux rapportée dans la littérature. Il s'agit vraisemblablement du calcium total et non de la chaux libre. On vérifiera ci-après qu'en effet les teneurs en calcium total de nos échantillons sont de l'ordre de 5 à 10 g/100 g pour les mâchefers et de 2 à 30 g/100 g pour les fractions granulométriques (cf. figure 14 analyse élémentaire du calcium).

Quoi qu'il en soit, la chaux libre semble de manière générale être plus concentrée dans les fractions fines que les fractions grossières, mis à part quelques exceptions (fractions 0-0,08 mm du MIOM A, 0,08-1 mm du MIOM B et 1-2 mm du MIOM C).

**Les autres paramètres**

Pour les autres paramètres analytiques (imbrûlés, COT, chlorures, sulfates, plomb, cadmium, chrome, mercure et arsenic), on peut de manière générale établir la règle suivante : les fractions fines conduisent à des lixiviats plus char-

gés que ceux issus des fractions grossières (figures 5 à 13). Cependant, le mercure ne semble pas vérifier cette règle pour les fractions 1-2, 2-4 et φ > 4 mm du MIOM A, 0,08-1 et 1-2 mm du MIOM B et toutes les fractions du MIOM D. On peut expliquer ces « anomalies » par le fait que pour ces fractions la teneur lixiviée en mercure est inférieure à la limite de détection (0,5 µg/l).

On observe le même résultat pour le cadmium dont la teneur est inférieure à la limite de détection (0,1 mg/l) pour toutes les fractions du MIOM D.

Néanmoins, le plomb a montré deux « anomalies » dans le cas du MIOM D, sans pour autant que sa teneur soit proche ou inférieure à la limite de détection. En effet, sa teneur lixiviée semble être, dans le cas du MIOM D, la plus faible pour la fraction la plus fine φ < 0,08 mm et la plus élevée pour la fraction « intermédiaire » 1-2 mm.

En se basant sur les prescriptions de la circulaire du 9 mai 1994, qui répertorie les mâchefers en trois classes V, M et S, nous avons fait ressortir dans le tableau 1 les fractions granulométriques qui sont déclassées en catégorie M ou S. La fraction fine (φ < 0,08 mm) semble être, dans la majori-

Tableau 1 : Classification des MIOM (f1 et f2 sont les fractions 0-0,08 et 0,08-1 mm)

Paramètre (mg/kg)*	Classification des MIOM A, B, C et D	
	Fractions déclassées en M ou S	
	M	S
Imbrûlés	Aucune fraction	La majorité des φ
Fraction soluble	φ1 de B, C et D	Aucune fraction
Sulfates	φ1 de A	φ1 de D
COT	φ2 de C	φ1 de C et D
Plomb	φ1 de C	Aucune fraction
Cadmium	φ1 de C, φ1 et φ2 de A	Aucune fraction
Chrome	φ1 des 4 MIOM	Aucune fraction
Mercure	Aucune fraction	Aucune fraction
Arsenic	Aucune fraction	Aucune fraction

\* mg/kg sauf pour la fraction soluble (g/100 g) et les imbrûlés (g/100 g)

## Mâchefers d'incinération

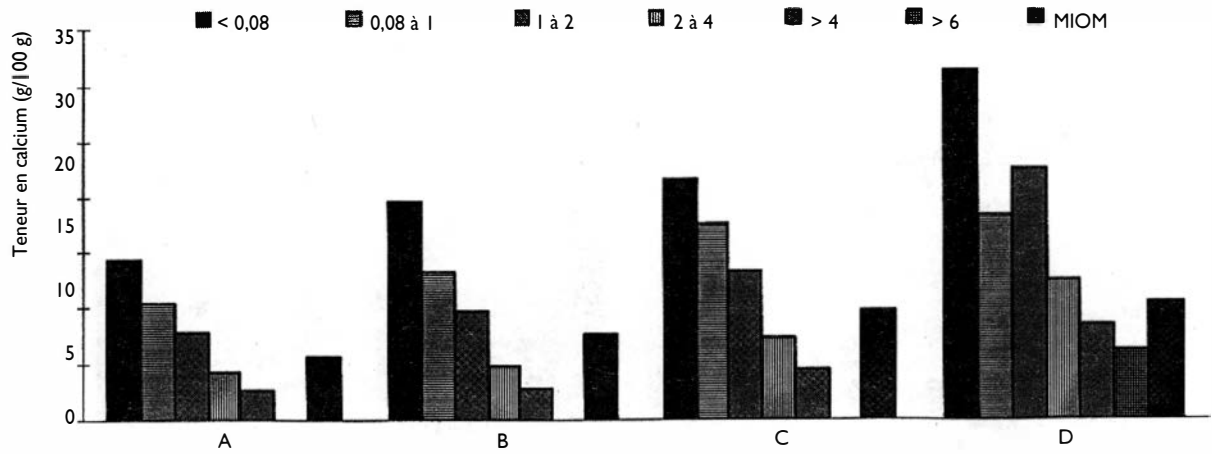


Figure 14 : Teneurs en calcium (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

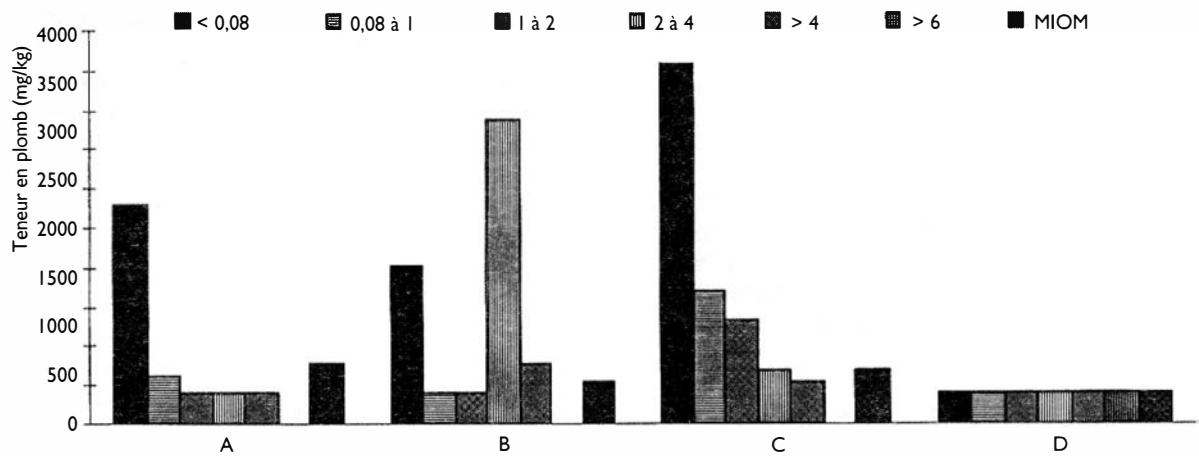


Figure 15 : Teneurs en plomb (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

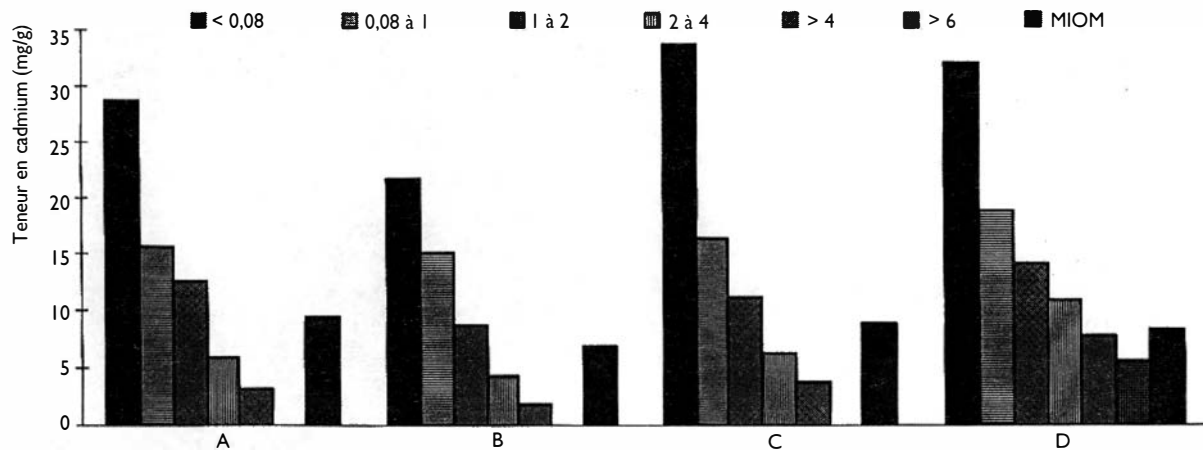


Figure 16 : Teneurs en cadmium (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)



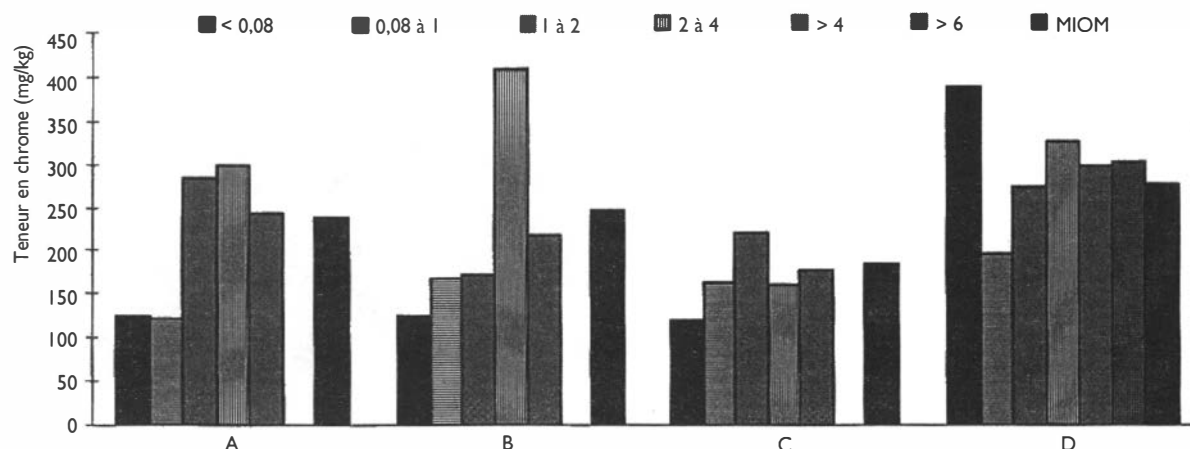


Figure 17 : Teneurs en chrome (la légende > 4 se réfère à  $\phi$  4-6 mm dans le cas de D)

té des cas, déclassée en catégorie M. Son déclassement en catégorie S est dû au COT dans le cas du MIOM D et aux sulfates dans le cas des MIOM C et D. Toutefois, presque toutes les fractions granulométriques sont déclassées en catégorie S par les imbrûlés.

On peut remarquer que le mercure et l'arsenic ne déclassent aucune fraction granulométrique (qui sont toutes de catégorie V).

### Analyse élémentaire

Mis à part le chrome, les teneurs en calcium, plomb ou cadmium sont plus élevées dans les fractions fines que dans les fractions grossières (figures 14 à 17).

Dans le cas du chrome, on ne retrouve plus la distribution décroissante de sa teneur en fonction de la taille granulométrique. La teneur en chrome semble augmenter lorsque la taille des grains passe de 0,08 à 4 mm pour les MIOM A, B et C. Dans le cas du MIOM D, elle est plutôt la plus élevée dans la fraction la plus fine (0-0,08 mm) et la plus faible dans la fraction 0,08-1 mm. Elle semble toutefois augmenter lorsque la taille des grains passe de 1 à 4 mm.

En faisant abstraction de quelques cas rares et surtout du chrome, on peut dire que la teneur totale ou lixiviée des polluants est d'autant plus importante que la taille des grains est faible.

### Taux de lixiviation

Sur la base des teneurs déterminées par analyse élémentaire et des teneurs lixiviées (test X31-210), il est possible de déterminer le taux de lixiviation (pourcentage de la teneur lixiviée du MIOM), ce qui permet d'apprécier dans quelle mesure la lixiviation extrait les éléments étudiés (plomb, cadmium et chrome, tableaux 2 et 3).

Les taux de lixiviation du plomb et du chrome sont très faibles, ne dépassant pas 1 %. En revanche, ils sont plus élevés dans le cas du cadmium (1 à 5 % pour les MIOM B, C et D et 7 à 10 % pour le MIOM A).

Le calcium libre (chaux libre) ne représente que 1 à 5 % de

Tableau 2 : Taux de lixiviation (MIOM A et B)

Fraction (mm)	MIOM A				MIOM B			
	Ca	Pb	Cd	Cr	Ca	Pb	Cd	Cr
$\phi < 0,08$	1,5	0,3	7,2	2,3	2,7	0,2	2,2	3,7
0,08 - 1	3,7	0,2	9,8	0,5	2,5	0,1	2,0	0,9
1 - 2	2,4	0,2	7,3	0,2	4,6	0,09	2,6	0,6
2 - 4	2,3	0,3	9,5	0,09	5,5	0,1	3,9	0,1
$\phi > 4$	2,8	0,5	9,6	0,06	7,0	0,08	7,0	0,2
MIOM	3,2	0,2	8,8	0,2	3,8	0,1	2,9	0,3

Tableau 3 : Taux de lixiviation (MIOM C et D) (la légende  $\phi > 4$  se réfère à la fraction 4-6 mm dans le cas du MIOM D)

Fraction (mm)	MIOM C				MIOM D			
	Ca	Pb	Cd	Cr	Ca	Pb	Cd	Cr
$\phi < 0,08$	5,4	1,1	3,2	1,6	3,6	0,1	0,5	0,8
0,08 - 1	3,7	0,6	3,6	0,3	5,7	0,2	0,7	0,7
1 - 2	2,2	0,3	3,1	0,2	3,5	0,5	0,8	0,3
2 - 4	5,2	0,3	3,7	0,2	4,7	0,4	1,6	0,2
$\phi > 4$	2,5	0,4	4,9	0,09	4,6	0,3	1,4	0,1
$\phi > 6$	-	-	-	-	2,4	0,7	2,9	0,05
MIOM	3,5	0,5	3,7	0,2	3,8	0,4	1,9	0,2

la teneur totale en calcium. Il est possible que la majeure partie de la chaux libre se soit carbonatée pendant le temps qui s'est écoulé (environ 2 semaines) entre l'analyse et le prélèvement des mâchefers à l'usine d'incinération. Il faut souligner que la teneur totale en calcium concerne non seulement le calcium combiné sous forme de chaux libre mais également le calcium combiné sous d'autres formes éventuellement présentes dans les mâchefers (calcite  $\text{CaCO}_3$ , anhydrite  $\text{CaSO}_4$ , ettringite  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 25\text{H}_2\text{O}$ , gehlenite  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ , akermanite  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ , wollastonite  $\text{b-Ca}_2\text{SiO}_3$ , etc.).

**BILANS MASSIQUES**

La détermination de la contribution des différentes fractions granulométriques dans le potentiel polluant global implique l'établissement de bilans massiques mettant en jeu les quantités massiques lixiviées (et non pas seulement les concentrations lixiviées). Pour ce faire, nous avons défini le pourcentage de contribution (% contribution), déterminé par la relation suivante :

$$\% \text{ Contribution}_i = 100 \frac{C_i \cdot \omega_i}{C_{\text{MIOM}}}$$

avec :

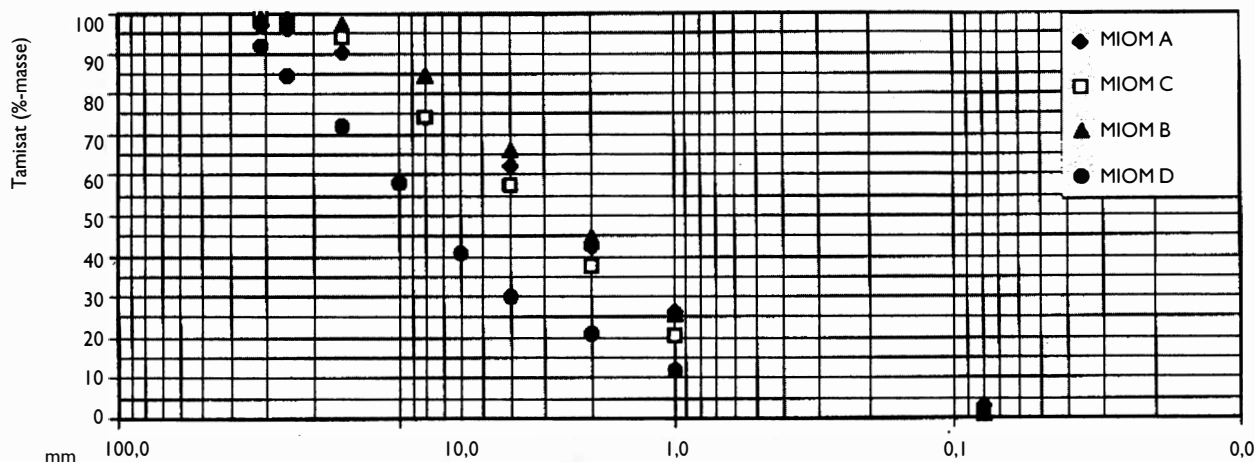
$C_{\text{MIOM}}$  : concentration dans le mâchefer lui-même.

$C_i$  : concentration dans la fraction granulométrique  $F_i$ .

$\omega_i$  : pourcentage massique de la fraction granulométrique  $F_i$ .

**Tableau 5 : Pourcentages de contribution (MIOM B)**

$\phi$ (mm)	$\phi > 0,08$	0,08-1	1-2	2-4	$\phi > 4$
Fraction soluble	2,3	33,1	20,8	18,9	24,9
Chlorures	4,2	46,3	19,7	13,3	16,4
Sulfates	2,8	27,5	15,2	15,6	38,8
COT	2,7	26,8	20,8	19,4	20,2
Plomb	2,9	43,6	18,6	17,5	17,4
Cadmium	2,8	36,9	20,9	17,3	21,9
Chrome	6,3	42,2	20,3	12,9	18,2
Mercure	1,9	7,4	5,7	64,8	20,2
Arsenic	1,8	36,4	14,1	15,0	32,7
Imbrûlés	3,4	42,0	24,5	17,2	13,0
Chaux libre	2,2	27,6	28,1	19,2	22,9



**Figure 18 : Courbes granulométriques des quatre mâchefers**

Les pourcentages massiques  $\omega_i$  sont déterminés par analyse granulométrique (figure 18). Quant aux pourcentages de contribution, ils sont indiqués dans les tableaux 4 à 6. Bien qu'elle soit la plus concentrée, la fraction 0-0,08 mm ne contribue qu'à raison de 0,5 à 10 % dans le potentiel polluant global des mâchefers (16 et 20 % respectivement pour le mercure et le chrome dans le cas de A). Ces faibles pourcentages de contribution sont dus au fait que la fraction la plus

**Tableau 4 : Pourcentages de contribution (MIOM A)**

$\phi$ (mm)	$\phi > 0,08$	0,08-1	1-2	2-4	$\phi > 4$
Fraction soluble	6,3	33,1	16,6	16,3	27,6
Chlorures	10,7	46,1	16,2	13,7	13,3
Sulfates	11,5	39,6	13,6	11,2	24,1
COT	5,5	31,0	14,8	18,1	30,6
Plomb	8,1	38,1	17,4	16,7	19,6
Cadmium	7,7	44,9	18,6	14,1	14,6
Chrome	20,0	36,5	16,9	13,0	13,7
Mercure	16,4	28,2	12,2	14,9	28,3
Arsenic	4,9	29,3	14,4	20,1	31,3
Imbrûlés	9,8	49,8	15,9	14,8	9,8
Chaux libre	3,9	52,1	17,3	11,5	15,2

**Tableau 6 : Pourcentages de contribution (MIOM C)**

$\phi$ (mm)	$\phi > 0,08$	0,08-1	1-2	2-4	$\phi > 4$
Fraction soluble	4,4	27,5	20,0	19,1	29,0
Chlorures	6,0	29,9	20,0	19,9	24,2
Sulfates	4,0	23,4	18,7	18,8	35,0
COT	5,0	29,8	18,2	17,5	29,5
Plomb	8,4	45,5	18,6	11,9	15,6
Cadmium	6,1	34,6	19,2	15,0	25,1
Chrome	11,0	27,8	21,2	18,6	21,3
Mercure	8,1	31,8	22,8	14,0	23,2
Arsenic	5,0	29,8	18,2	17,5	29,5
Imbrûlés	5,7	32,7	19,6	19,7	22,4
Chaux libre	6,4	38,6	15,8	23,9	15,2

fine (0-0,08 mm) représente au plus 5 % du poids global du mâchefer.

Contribuant à raison de 25 à 50 % au potentiel polluant global, la fraction 0,08-1 mm semble être la fraction la plus polluante dans le cas des MIOM A, B et C. On peut corrélérer ce résultat au fait que cette fraction est fortement concentrée (bien que moins concentrée que la fraction 0-0,08 mm) et est présente à un taux massique relativement élevé (20

à 25 % du poids global de ces mâchefers).

Dans le cas du MIOM D, la fraction la plus polluante semble être plutôt la fraction  $\phi > 6$  mm (20 à 60 % de contribution). Les fractions 1-2 et 2-4 mm semblent contribuer de manière assez équitable dans le potentiel polluant global (10 à 15 % pour A, 15 à 25 % pour B et 15 à 20 % pour C). Seul le mercure ne vérifie pas ce résultat dans le cas de B (5 % de contribution par la fraction 1-2 mm et 65 % de contribution par la fraction 2-4 mm). De la même manière, les fractions 1-2, 2-4 et 4-6 mm du MIOM D présentent des pourcentages de contribution assez identiques (de l'ordre de 10 à 15 %).

Bien qu'elle soit en général la moins concentrée, la fraction la plus grossière  $\phi > 4$  ou 6 mm contribue énormément au potentiel polluant global (15 à 35 %)

En adoptant un raisonnement identique à celui utilisé dans l'établissement de bilans matières sur le potentiel polluant,

**Tableau 7 : Pourcentages de contribution (MIOM D)**

$\phi$ (mm)	$\phi > 0,08$	0,08-1	1-2	2-4	4-6	$\phi > 6$
Fraction soluble	3,3	18,2	11,7	9,0	11,2	46,6
Chlorures	5,9	31,5	13,3	10,1	10,9	28,4
Sulfates	4,5	25,5	10,12	9,4	11,7	38,7
Imbrûlés	4,2	26,0	13,0	11,1	8,1	37,6
COT	4,7	29,3	12,5	9,4	9,6	34,5
Chaux libre	3,1	30,5	18,0	14,5	10,8	23,0
Plomb	0,5	13,7	12,7	11,1	9,4	52,6
Cadmium	1,0	9,7	6,5	10,7	8,0	64,1
Chrome	7,6	34,3	15,4	11,2	9,7	21,8
Mercure	1,0	11,0	8,7	9,3	10,7	59,2
Arsenic	2,6	20,1	15,3	12,3	8,7	41,0
Imbrûlés	4,2	26,0	13,0	11,1	8,1	37,6
Chaux libre	3,1	30,5	18,0	14,5	10,8	23,0

**Tableau 8 : Analyse élémentaire. Pourcentages de contribution (MIOM A et B)**

Fraction (mm)	MIOM A				MIOM B			
	Ca	Pb	Cd	Cr	Ca	Pb	Cd	Cr
$\phi < 0,08$	7,3	5,7	9,6	1,6	3,3	1,8	3,7	0,6
0,08 - 1	41,1	51,7	40,9	12,5	44,3	33,7	51,6	17,2
1 - 2	21,3	22,5	22,7	20,1	25,0	23,5	23,1	13,8
2 - 4	14,4	11,6	13,2	25,8	14,0	16,0	12,6	9,0
$\phi > 4$	15,9	8,5	13,6	39,9	13,3	25,1	9,0	30,9

**Tableau 9 : Analyse élémentaire. Pourcentages de contribution (MIOM C et D) (la légende  $\phi > 4$  se réfère à la fraction 4-6 mm dans le cas du MIOMD)**

Fraction (mm)	MIOM C				MIOM D			
	Ca	Pb	Cd	Cr	Ca	Pb	Cd	Cr
$\phi < 0,08$	4,0	3,4	7,0	1,2	3,2	1,8	3,7	1,4
0,08 - 1	35,0	33,3	36,0	17,0	20,2	26,9	23,5	7,4
1 - 2	24,3	25,8	22,9	21,4	19,5	12,0	13,9	8,2
2 - 4	15,8	20,8	15,0	17,9	11,7	11,7	11,5	10,5
$\phi > 4$	20,8	16,6	19,0	42,5	8,9	14,3	9,5	11,0
$\phi > 6$	-	-	-	-	36,5	33,4	37,8	61,5

nous avons évalué la contribution de chaque fraction granulométrique à la « charge chimique » globale des mâchefers (tableaux 8 et 9).

De manière générale, la fraction fine ( $\phi < 0,08$  mm) ne semble contribuer qu'à raison de 1 à 10 % à la charge globale des mâchefers. En conséquence, le tamisage des mâchefers réalisé à 0,08 mm ne permettrait de réduire la charge globale des mâchefers que de 1 à 5 %.

Dans le cas des autres fractions granulométriques ( $f > 0,08$  mm), la charge chimique est majoritairement répartie soit dans la fraction  $\phi > 6$  mm (cas du MIOM D), soit encore dans la fraction 0,08-1 mm (cas de A, B ou C).

Quoi qu'il en soit, 30 à 50 % de la charge chimique des mâchefers est contenue dans la fraction 0-1 mm. Ce pourcentage de contribution peut atteindre 60 à 80 % pour la fraction 0-2 mm et 70 à 90 % pour les fractions 0-4 ou 0-6 mm. Le tamisage réalisé à 1, 2 ou 4 mm pourrait diminuer la charge chimique des mâchefers de respectivement 30 à 50 %, 50 à 70 %, 60 à 90 %. Ainsi, le tamisage permettrait d'une part de réduire le potentiel polluant des mâchefers comme il a été montré auparavant, et d'autre part d'entraîner la prise hydraulique puisque la charge chimique en calcium comme en chaux est sensiblement diminuée par tamisage.

### EFFET DU TAMISAGE

Afin d'estimer dans quelle mesure le tamisage diminue ou augmente le potentiel polluant des mâchefers, nous avons introduit la notion de % d'atténuation.

Le potentiel polluant de la fraction  $\phi > d_k$  après tamisage du mâchefer à  $d_k$  (enlèvement de la fraction 0- $d_k$ ) se définit par la relation :

$$(\text{Pot})_k^{\text{Tamisat}} = \frac{C_{\text{MIOM}} - \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{i=k} C_i \omega_i}{100 - \sum_{i=1}^{i=k} \omega_i}$$

Le pourcentage d'atténuation du potentiel polluant du mâchefer se définit par la relation :

$$\% \text{ Att} = 100 \frac{C_{\text{MIOM}} - (\text{Pot})_k^{\text{Tamisat}}}{C_{\text{MIOM}}}$$

Les pourcentages d'atténuation ainsi calculés sont consignés dans les tableaux 10 à 13. A partir de ces résultats, il est possible de remarquer que le tamisage des mâchefers à 0,08 mm ne diminue que très faiblement leur potentiel polluant global. Les pourcentages d'atténuation sont d'au plus de 10 % pour l'ensemble des paramètres analytiques.

En revanche, le pourcentage d'atténuation devient intéressant lorsqu'il s'agit de tamiser les mâchefers à des diamètres supérieurs à 0,08 mm, notamment aux diamètres les plus élevés tels que 2, 4 ou 6 mm. A ce titre, le tamisage permettrait de diminuer le potentiel polluant de 10 à 30 % (tamisage à 1 mm), 20 à 45 % (tamisage à 2 mm) et 25 à 60 % (tamisage à 4 ou 6 mm).

**Tableau 10 : Effet du tamisage. % d'atténuation (MIOM A)**

Tamisage à	0,08 mm	1 mm	2 mm	4 mm
Fraction soluble	3,3	17,5	23,3	26,4
Chlorures	7,9	41,3	53,0	64,5
Sulfates	8,8	33,6	38,6	35,9
COT	2,6	13,7	15,1	18,6
Plomb	5,3	26,9	36,8	47,9
Cadmium	4,9	35,6	50,0	61,1
Chrome	17,5	40,7	53,5	63,5
Mercuré	13,8	24,7	24,7	24,7
Arsenic	1,9	10,5	10,4	16,6
Imbrûlés	7,0	45,0	57,1	74,0
Chaux libre	0,9	40,2	53,5	59,5

**Tableau 11 : Effet du tamisage. % d'atténuation (MIOM B)**

Tamisage à	0,08 mm	1 mm	2 mm	4 mm
Fraction soluble	1,1	13,1	20,8	26,0
Chlorures	3,0	33,3	46,1	51,2
Sulfates	1,6	6,1	1,4	- 15,4
COT	1,5	18,5	28,3	40,0
Plomb	1,7	27,9	36,9	48,3
Cadmium	1,6	18,8	28,9	34,8
Chrome	5,1	30,6	43,6	45,8
Mercuré	0,7	- 22,2	- 53,9	40,0
Arsenic	0,5	16,7	13,6	2,7
Imbrûlés	2,1	26,3	45,4	61,3
Chaux libre	1,0	5,4	23,8	32,0

**Tableau 12 : Effet du tamisage. % d'atténuation (MIOM C)**

Tamisage à	0,08 mm	1 mm	2 mm	4 mm
Fraction soluble	2,7	14,6	23,0	31,9
Chlorures	4,3	19,6	29,4	43,1
Sulfates	2,3	8,9	13,8	17,7
COT	3,9	16,0	25,1	35,8
Plomb	6,7	42,1	55,9	63,3
Cadmium	4,4	25,6	35,8	41,0
Chrome	9,4	23,2	36,1	49,9
Mercuré	6,4	24,6	40,4	45,4
Arsenic	3,3	18,2	24,8	30,7
Imbrûlés	4,0	22,6	32,7	47,3
Chaux libre	4,8	31,1	37,3	64,2

De manière générale, on peut dire que le pourcentage d'atténuation est d'autant plus important que le diamètre de tamisage est élevé.

Néanmoins, il semble dans certains cas que le tamisage conduise à des pourcentages d'atténuation négatifs. Ce qui correspondrait à une augmentation du potentiel polluant. C'est le cas des sulfates (tamisage de B à 4 mm), du mercure (tamisage de B à 1 ou 2 mm ou de D à 1, 2, 4 ou 6 mm), du

**Tableau 13 : Effet du tamisage. % d'atténuation (MIOM D)**

Tamisage à	0,08 mm	1 mm	2 mm	4 mm	6 mm
Fraction soluble	2,2	10,7	15,6	17,3	21,3
Chlorures	4,9	28,8	37,7	43,8	52,1
Sulfates	3,5	20,5	24,5	27,9	34,7
COT	3,7	24,9	32,4	36,8	41,7
Plomb	- 0,5	2,4	7,7	11,2	11,1
Cadmium	2,10 <sup>2</sup>	- 1,5	- 4,5	- 3,1	- 8,2
Chrome	6,7	34,0	46,2	55,0	63,2
Mercuré	- 6,10 <sup>5</sup>	- 7,10 <sup>4</sup>	- 1,10 <sup>3</sup>	- 2,10 <sup>3</sup>	- 4,10 <sup>3</sup>
Arsenic	1,6	12,1	21,8	29,0	30,8
Imbrûlés	3,2	20,6	28,3	34,6	36,5
Chaux libre	2,1	24,5	39,0	51,6	61,1

**Tableau 14 : Pourcentages d'atténuation de la charge chimique (MIOM A et B)**

Mâchefer	MIOM A				MIOM B			
	φ (mm) 0-0,08	0-1	0-2	0-4	0-0,08	0-1	0-2	0-4
Calcium	4,4	29,8	47,2	57,7	2,1	29,4	50,5	60,5
Sulfates	5,1	27,0	40,3	54,7	1,7	16,9	24,6	27,2
Plomb	2,8	42,1	65,0	77,4	0,5	13,0	25,6	25,4
Cadmium	6,8	32,7	53,3	63,7	2,5	39,9	61,0	73,4
Chrome	- 1,4	- 16,7	- 14,6	- 6,3	- 0,6	- 10,6	- 23,6	8,2

**Tableau 15 : Pourcentages d'atténuation de la charge chimique (MIOM C et D)**

Mâchefer	MIOM C				MIOM D				
	φ (mm) 0-0,08	0-1	0-2	0-4	0-0,08	0-1	0-2	0-4	0-6
Calcium	2,3	23,5	41,5	51,2	2,2	12,9	27,9	35,0	38,3
Sulfates	4,8	22,2	34,5	47,2	4,9	33,3	49,5	57,7	65,8
Plomb	1,6	20,6	40,0	60,9	0,8	18,9	25,1	31,8	43,6
Cadmium	5,4	28,5	45,5	55,3	2,7	17,2	25,7	32,3	36,1
Chrome	- 0,6	- 2,7	3,2	0,1	0,4	- 3,7	- 4,7	- 3,7	- 3,9

plomb (tamisage de D à 0,08 mm) et du cadmium (tamisage de D à 1, 2, 4 ou 6 mm).

Par ailleurs, on peut observer dans d'autres cas que le pourcentage d'atténuation diminue lorsque le diamètre de tamisage augmente. C'est le cas du cadmium (MIOM D), des sulfates (MIOM A et B), de l'arsenic et du mercure (MIOM B). Afin de mieux prévoir l'effet du tamisage dans l'atténuation du potentiel polluant d'un mâchefer, il faut connaître non seulement la distribution du potentiel polluant dans les fractions granulométriques, mais aussi la distribution granulométrique (analyse granulométrique). Cette détermination permet d'établir des bilans de matière qui tiennent compte simultanément de ces deux facteurs.

Quoi qu'il en soit, le tamisage pourrait constituer un moyen efficace pour entraver la prise en masse des mâchefers dans le temps, puisqu'il permettrait de diminuer la teneur initiale des mâchefers en chaux libre de 1 à 5 % (tamisage à 0,08 mm) jusqu'à 30-40 % (tamisage à 1 ou 2 mm), voir 50-

60 % (tamisage à 4 ou 6 mm). On rappelle que la chaux est reconnue par son aptitude à se carbonater, si bien qu'elle contribue fortement à la prise en masse des mâchefers.

Les pourcentages d'atténuation de la charge chimique susceptibles d'être obtenus par tamisage sont calculés en adoptant le même raisonnement que pour les pourcentages d'atténuation du potentiel polluant. Les pourcentages ainsi calculés sont consignés dans les tableaux 14 et 15.

Comme dans le cas du potentiel polluant, le tamisage des mâchefers à 0,08 mm ne diminue que très faiblement la charge chimique (1 à 7 % d'atténuation). Dans le cas où le tamisage est réalisé à des diamètres supérieurs à 0,08 mm, notamment à 2, 4 ou 6 mm, l'atténuation de la charge chimique devient importante. En effet, le tamisage pourrait diminuer la charge chimique des MIOM de 10 à 40 % (tamisage à 1 mm), ou de 25 à 60 % (tamisage à 2 mm), voire de 30 à 70 % (tamisage à 4 ou 6 mm).

Cependant, la charge chimique du chrome semble augmenter à la suite du tamisage des mâchefers (les pourcentages d'atténuation de la charge chimique sont en effet négatifs).

En conclusion, en faisant abstraction de quelques cas rares, le tamisage permettrait d'améliorer la qualité environnementale des mâchefers en réduisant aussi bien leur potentiel danger (potentiel polluant) que leur potentiel risque (charge chimique).

## CONCLUSION

Afin de mieux connaître la qualité environnementale des mâchefers, nous avons évalué, pour quatre mâchefers d'origines différentes, la distribution de la charge chimique (analyse élémentaire) et du potentiel polluant (comportement à la lixiviation X31-210) dans différentes fractions granulométriques.

De manière générale, les fractions fines (notamment la fraction 0-0,08 mm) montrent des teneurs en éléments polluants plus élevées que les fractions grossières. Toutefois, en tenant compte de l'analyse granulométrique des mâchefers, il ressort que la fraction la plus fine (0-0,08 mm) ne contribue qu'à raison de 1 à 10 % dans le potentiel polluant global des mâchefers comme dans leur charge chimique globale.

En revanche, la fraction contribuant le plus au potentiel polluant global ou à la charge chimique globale semble être  $\phi > 6$  mm dans le cas du MIOM D et 0,08-1 mm dans le cas des MIOM A, B et C. Cette différence semble s'expliquer par le fait que le MIOM D n'est pas criblé en sortie d'usine d'incinération contrairement aux trois autres MIOM. De ce fait, la fraction  $\phi > 6$  mm du MIOM D représente un pourcentage massique suffisamment élevé pour contribuer majoritairement au potentiel polluant global comme à la charge chimique globale.

Quoi qu'il en soit, le potentiel danger (charge chimique) comme le potentiel risque (potentiel polluant) sont répartis en moyenne à raison de 30-50, 50-70 et 60-90 % respectivement entre les fractions 0-1, 0-2 et 0-4 mm.

Le tamisage des mâchefers à 2 ou 4 mm permettrait donc de réduire le potentiel polluant global de 20 à 60 % selon l'indicateur de pollution.

Par ailleurs, il pourrait contribuer à entraver la prise hydraulique des mâchefers lorsqu'ils sont mis en stockage, puisque la teneur totale en calcium ou celle en chaux libre sont sensiblement diminuées par tamisage. Dans ce cas, les mâchefers peuvent être repris plus aisément après leur maturation (sans tamisage, les mâchefers durcissent davantage au cours de leur maturation qui se produit naturellement pendant le stockage). La simulation expérimentale de l'effet du tamisage sur la qualité des MIOM a été étudiée sur divers tas de mâchefers et sera discutée dans une seconde partie.

En tout état de cause, pour pouvoir prévoir l'effet du tamisage dans l'amélioration de la qualité environnementale d'un mâchefer, il faudrait connaître de manière assez précise la répartition granulométrique du potentiel polluant de ce mâchefer. Ce qui suppose la connaissance à la fois du comportement à la lixiviation de diverses fractions granulométriques et de la courbe granulométrique du mâchefer. Il serait finalement possible de fixer le diamètre de tamisage (2, 4 ou 6 mm) qui permettrait les meilleures performances en terme de réduction du potentiel polluant et d'entrave de la prise hydraulique.

**Ahcène Amokrane\*, Jean-Marie Blanchard\*,**

Insa-Lyon, Laepsi - 20 avenue Albert Einstein - Bâtiment 404 - 69621 Villeurbanne cedex

**Hervé Billard\*\*,**

France-Déchets - Avenue Jean Jaurès - BP 29 - 78440 Gargenville

**Lise Chatelet-Snidaro\*\*\*, Thierry Delineau\*\*\*, Christophe Bourdier\*\*\*,**

Cered France-Déchets - Route de la Chapelle Réanville - BP 2265 - 27950 Saint-Marcel

Les auteurs précisent que ce travail s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche réalisé au Cered avec le soutien financier de l'Ademe.

## Bibliographie

- Amokrane A. & Blanchard J.-M. *Élaboration d'un guide de stockage des mâchefers d'incinération en vue de leur valorisation en techniques routières*. Rapport final d'activité. Contrat de Recherche. Convention Insavalor/France-Déchets n° 3446. Avril 1996. 116p.
- Amokrane A. & Blanchard J.-M. *Simulation expérimentale de divers modes de traitement des mâchefers*. Rapport final d'activité. Contrat de Recherche. Convention Insavalor/France-Déchets n° 3808. Février 1997. 151 p.
- Afnor X31-210-Déchets : *essais de lixiviation*. Paris. Décembre 1992, 13 p.
- Ministère de l'Environnement. *Circulaire mâchefers du 9 mai 1994*. - Paris. 14p.
- Coutat L. *Valorisation des mâchefers d'usines d'incinération d'ordures ménagères*. Thèse de Doctorat. Insa de Lyon. 1996. 231 p.
- Blanchard J.-M., Comel C., Navarro A., Revin Ph., Veron J. & Pillay G. *Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. I - Principales propriétés*. TSM l'Eau, N°3, mars 1989, p. 127-132.
- Eighmy T.T., Eusden J.D., Marsella K., Hogan J., Domingo D., Krzanowski J.E. & Stampfli D. *Particle Petrogenesis and speciation of elements in MWS Incineration bottom ashes*. Proc. of the Intern. Conf. On Environmental aspects of construction with wastes materials. Maastrich, Netherland, 1-3 June 1994. p. 111-136.