



HAL
open science

Le devenir des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

Ahcéne Amokrane, Jean-Marie Blanchard, Hervé Billard, Lise Chatelet Snidaro, Thierry Delineau, Christophe Bourdier

► **To cite this version:**

Ahcéne Amokrane, Jean-Marie Blanchard, Hervé Billard, Lise Chatelet Snidaro, Thierry Delineau, et al.. Le devenir des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. Environnement, Ingénierie & Développement, 1998, N°11 - 3ème Trimestre 1998, pp.31-38. 10.4267/dechets-sciences-techniques.900 . hal-03181926

HAL Id: hal-03181926

<https://hal.science/hal-03181926v1>

Submitted on 26 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

LE DEVENIR DES MÂCHEFERS D'INCINÉRATION D'ORDURES MÉNAGÈRES

PARTIE 2 : TRAITEMENT DES MÂCHEFERS. EFFET DE LA MATURATION, DU TAMISAGE, DU DÉFERRAILLAGE ET DU LAVAGE À L'EAU

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

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

Selon la circulaire du 9 mai 1994, les mâchefers peuvent être valorisés comme remblais si leur potentiel polluant est faible (mâchefers V). Dans le cas contraire, ils doivent être, soit traités dans un centre de maturation pour les rendre valorisables (mâchefers M), soit éliminés dans un centre de stockage (mâchefers S). La présente étude a permis de montrer l'effet bénéfique de la maturation, du tamisage et du lavage à l'eau dans l'amélioration de la qualité environnementale des mâchefers. En revanche, le déferrailage n'a pratiquement aucun effet lorsqu'il est réalisé en amont de la maturation, mais il doit être réalisé en aval pour permettre une valorisation effective (condition souvent exigée d'un point de vue géotechnique). De manière générale, lorsque la maturation ne permet pas d'obtenir directement des mâchefers de classe V, elle peut être couplée à un tamisage à 4 ou 6 mm pour avoir toutes les chances de convertir des mâchefers de classe M ou S en catégorie V.

According to the newsletter of 9 May 1994, municipal solid waste incinerator bottom ashes can be valorised as fill material if their polluting potential is low (V-class). In the opposite case, they have to be treated in a maturation center (M-class), or to be eliminated in a landfill center (S-class). The present study has allowed to show the beneficial effect of three treatments (maturation, sifting and water-washing) in the improvement of the environmental quality of bottom ashes. However, the separation of iron has no effect if it is carried out upstream the maturation, but this treatment has to be prescribed downstream of the maturation to allow an effective valorisation (this is a condition often demanded of a geotechnical viewpoint). In general, if the maturation do not permit to obtain directly a V-class bottom ashes, it can be coupled to a 4 or 6 mm-sifting to convert bottom ashes of M or S-class to a V-class.

INTRODUCTION

Nous avons utilisé dans l'ensemble de ce travail les mêmes échantillons hebdomadaires de mâchefers prélevés sur les sites géographiques A, B, C et D ; nous rappelons ici que ces

échantillons ont été préparés à partir des échantillons journaliers selon le protocole détaillé en Partie I (voir n° 10 pages 15 à 27) et que le but poursuivi est de simuler à l'échelle du laboratoire 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).

PRÉPARATION DES LOTS DE MÂCHEFERS

A partir des prélèvements hebdomadaires de chaque usine d'incinération, nous avons préparé par pelletage alterné :

– 4 lots (MIOM A, B, C et D). Ces lots sont dénommés Référentiels car ils n'ont subi aucun prétraitement.
– 3 lots (MIOM A, B et C) ayant subi au préalable un déferrailage manuel poussé, réalisé à l'aide d'un aimant en U. L'opération de déferrailage a permis d'extraire 14,5 %, 5,5 % et 11,7 % de ferrailles à partir des MIOM A, B et C respectivement.

– 1 lot (MIOM C), traité par lavage à l'eau dans une colonne de perco-lixiviation. Ce lavage a été effectué après avoir fait subir au lot une maturation de 2,5 mois.

– 3 lots (MIOM A, B et C), préalablement tamisés à 4 mm.

– 2 lots (MIOM D), préalablement tamisés à 6 mm dont l'un à l'échelle laboratoire et l'autre à grande échelle au Cered. L'opération de tamisage réalisée à grande échelle correspond en fait à un criblage par cordes de piano, ce qui induit un passage d'éléments nettement plus grossiers que ceux obtenus par un tamisage effectif à 6 mm (tamisage réalisé à l'échelle laboratoire). Le suivi de ces 2 lots devrait permettre de conclure à l'efficacité du tamisage lorsqu'il est réalisé à grande échelle (criblage).

Chaque lot, d'environ 50 à 60 kg, a fait l'objet de caractérisations physico-chimiques (lixiviation X31-210 et analyse sur solide) à 1 mois et 2,5 mois de maturation sur des échantillons préparés par pelletages alternés des lots.

Dans le cas du lot brut de MIOM D, le suivi physico-chimique à 2,5 mois de maturation a concerné également un échantillon sur lequel on a effectué un tamisage à 6 mm (simulation du tamisage lorsqu'il est réalisé en aval de la maturation).

Cet échantillon sera comparé à celui prélevé à partir du lot de MIOM D tamisé à 6 mm, puis mûré 2,5 mois. Il sera ainsi possible de conclure à l'efficacité du tamisage selon qu'il est réalisé en amont ou en aval de la maturation.

TECHNIQUES ANALYTIQUES

Sur l'ensemble des lixiviats X31-210 (Lix1, Lix2 et Lix3), nous avons réalisé le suivi du pH, de la conductivité et du potentiel polluant (fraction soluble, COT, Cl⁻, SO₄²⁻, 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 le taux d'imbrûlés et les teneurs en chaux libre, sulfates et en soufre. Le taux d'imbrûlés (perte au feu à 550 °C pendant 4 heures) a été déterminé sur des échantillons séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 h. L'analyse élémentaire du soufre a été effectuée par dosage du SO₂ par infra-rouge, après avoir oxydé le soufre en SO₂ dans un four d'induction à 1 800 °C sous courant d'oxygène. La détermination des sulfates sur solide a été réalisée par chromatographie ionique après avoir effectué une extraction à l'eau sous micro-ondes pendant 15 minutes. La teneur en chaux libre (chaux non 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.

TRAITEMENT DE LAVAGE DU MIOM C - TEST DE PERCO-LIXIVIATION EN COLONNE

Le lavage des mâchefers à l'eau est un mode de traitement susceptible d'améliorer notablement la qualité environnementale des mâchefers, puisqu'il permet de se débarrasser du maximum de leur fraction soluble. Par ailleurs, ce traitement permet de simuler à l'échelle laboratoire l'effet du lessivage d'un tas de mâchefer par les eaux de pluie (cas de stockage des mâchefers en tas ou en couches épaisses).

L'étude du traitement de lavage a été réalisée uniquement sur le MIOM C, qui présente en général des fractions solubles assez élevées en sortie d'usine d'incinération. En fait, le lavage a été réalisé sur un des 2 lots de MIOM C ayant subi une maturation de 2,5 mois.

Dispositif expérimental

Le dispositif de perco-lixiviation utilisé est composé d'une colonne en verre de 10 cm de diamètre et 1 m de hauteur (figure 1). Elle est fermée à ses deux extrémités par des cloches fixées à l'aide de brides (l'étanchéité est assurée par des joints toriques). A l'extrémité basse, une grille de sou-

tènement recouverte d'une membrane géotextile permet d'éviter l'entraînement des particules fines de mâchefers. L'eau permutée, stockée dans un réservoir, est refoulée en continu en haut de la colonne par une pompe péristaltique. Un chevalet permet son aspersion sur une plus grande surface de mâchefers.

La colonne a été remplie de 8 kg de mâchefer secs, ayant subi au préalable une maturation de 2,5 mois. Le compactage du mâchefer dans la colonne a été assuré à l'aide d'une table vibrante, sur laquelle était posée la colonne. Ensuite, le mâchefer a été recouvert d'une couche de géotextile (aspersion uniforme sur toute la section), avant d'être arrosé en continu à raison de 1,25 l/h pendant 250 heures (ce qui permet d'atteindre à la fin du test un rapport eau/mâchefer de 30 à 40).

Nous avons collecté des échantillons à différentes échéances qui ont été filtrés à 0,45 mm et analysés (pH, conductivité, fraction soluble, chlorures, sulfates, plomb, cadmium et

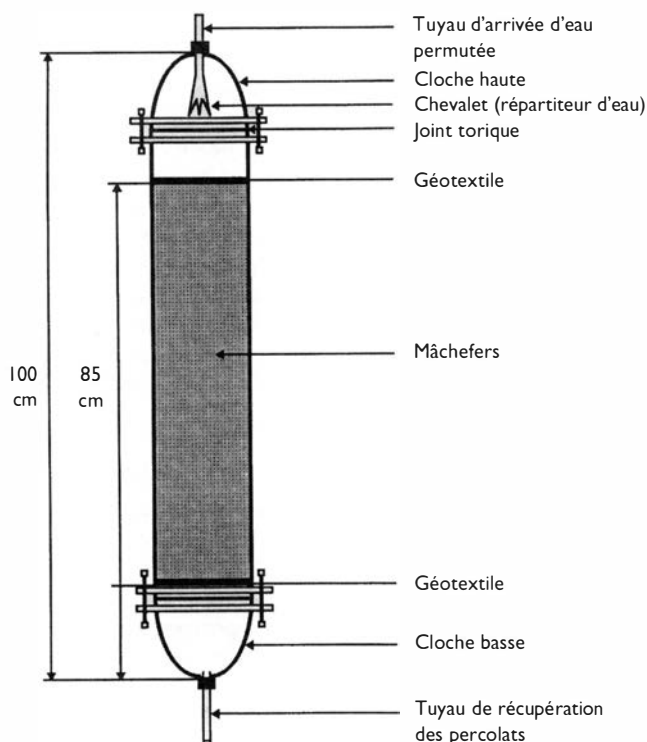


Figure 1 : Colonne de perco-lixiviation

chrome).

Résultats

Les résultats expérimentaux (fraction soluble, sulfates, chlorures et métaux lourds) sont présentés dans les figures 2 à 4. Les quantités extraites en fraction soluble, DCO, chlorures, sulfates et métaux lourds (Pb, Cd et Cr) sont une fonction croissante du volume cumulé d'eau, ou encore du rapport cumulé (L/S) c.

L'exploitation approfondie des courbes d'extraction (figures 3

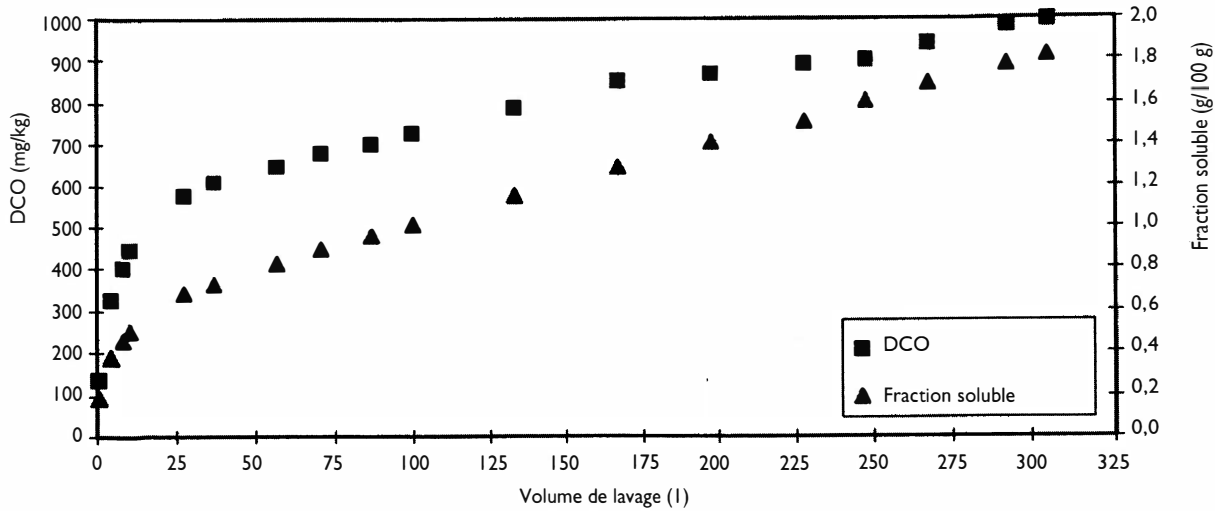


Figure 2 : Lavage du mâchefer C. DCO et fraction soluble extraites

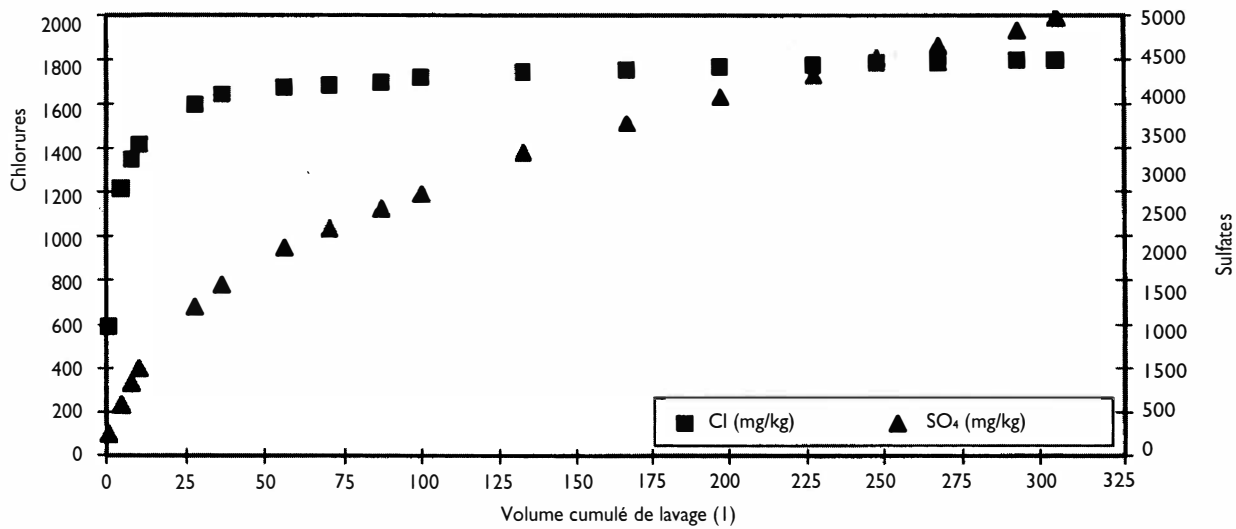


Figure 3 : Lavage du mâchefer C. Chlorures et sulfates extraits

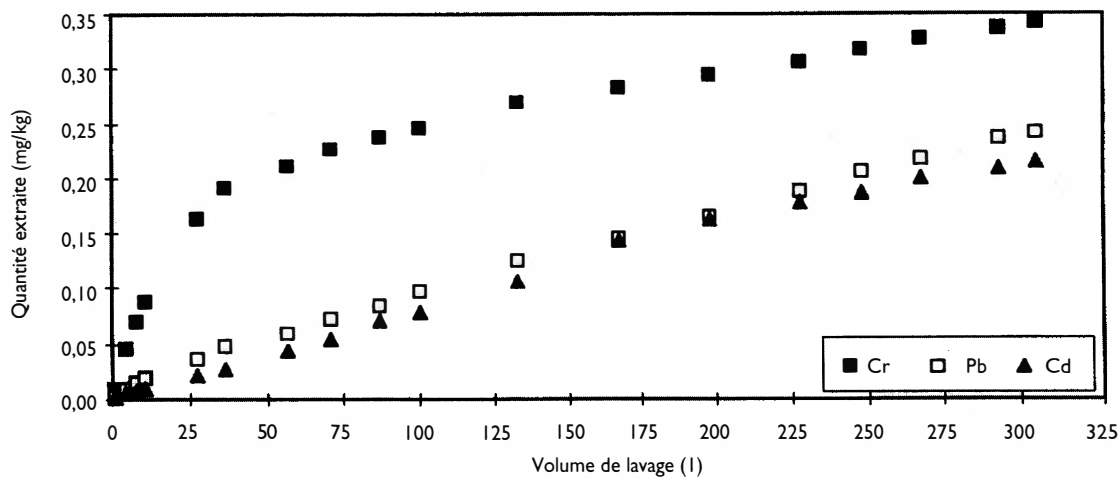


Figure 4 : Lavage du mâchefer C. Métaux lourds extraits

à 6) est possible en utilisant le modèle d'extraction développé par Abdelgafour (1989). Ce modèle permet d'estimer la quantité potentiellement lixiviable (quantité totale extractible) pour un volume d'eau percolé infini.

De manière résumée, le modèle d'extraction permet de quantifier la courbe d'extraction par la relation suivante :

$$Q_c = Q_{c\text{ inf}} \frac{V_c}{V_c + V_{1/2}}$$

avec : $V_{1/2}$: volume de demi-extraction (l)

V_c : volume cumulé d'eau (l)

Q_c : quantité extraite cumulée (mg/kg)

$Q_{c\text{ inf}}$: quantité cumulée extraite pour un volume percolé infini (mg/kg)

Une autre écriture de la relation précédente donne :

$$\frac{V_c}{Q_c} = a V_c + b \text{ avec } a = \frac{1}{Q_{c\text{ inf}}} \text{ et } b = \frac{V_{1/2}}{Q_{c\text{ inf}}}$$

La représentation graphique de $(V_c/Q_c) = f(V_c)$ permet de déterminer la quantité totale extractible, c'est-à-dire $Q_{c\text{ inf}}$ (inverse de la pente a de la droite).

Les valeurs des paramètres a (pente de la droite) et b (ordonnées à l'origine) sont obtenues par régression linéaire effectuée sur l'ensemble des points expérimentaux.

Les différents résultats correspondant à cette représentation graphique sont rassemblés dans le tableau I, où R est le coefficient de régression linéaire.

Tableau I : Paramètres du modèle d'extraction

Paramètre	a (mg/kg) ⁻¹	b (l/mg/kg)	R ²	Q _{c inf} *	X31-210* avant lavage	X31-210* après lavage
Fraction soluble	5,18.10 ⁻⁵	0,0028	0,94	1,93	2,29	0,82
Sulfates	0,018	0,011	0,97	5555	5770	2300
Chlorures	0,055	0,021	0,99	1818	3390	125
DCO	0,099	0,023	0,99	1010	—	—
Plomb	2,42	646	0,79	0,41	4,93	0,19
Cadmium	0,89	1120	0,35	1,12	0,16	0,20
Chrome	2,69	109	0,99	0,37	0,15	0,14

* : mg/kg sauf pour la fraction soluble (g/100g)

Le modèle semble être bien valide pour tous les paramètres (coefficient de régression R de 0,8 à 0,99), sauf dans le cas du cadmium (R de 0,35).

Dans le cas du cadmium, le modèle n'est donc pas adapté pour décrire convenablement son comportement à l'extraction. On peut expliquer ce résultat par le fait que le relargage de cet élément était très faible. Sa concentration dans les percolats était inférieure à la limite de détection (les résultats concernant cet élément manqueraient de fiabilité). Les quantités extraites par le test X31-210 après le lavage sont toujours inférieures aux quantités maximales extractibles. Le lavage a donc permis d'atténuer le potentiel polluant du mâchefer.

En revanche, les quantités extraites par le test X31-210 (rapport L/S égal à 10) avant le lavage sont toujours supérieures (sauf pour le chrome et le cadmium) aux quantités

maximales extractibles par le test de perco-lixiviation (rapport L/S infini). C'est une façon de dire que les conditions expérimentales utilisées dans le test de lixiviation X31-210 conduisent à des conclusions sévères quant à la qualité environnementale des mâchefers.

TRAITEMENT DE MATURATION, TAMISAGE ET DÉFERRAILLAGE

Pour des raisons de lisibilité, nous avons utilisé dans les figures 7 et 8 la nomenclature suivante :

- MIOM : MIOM brut n'ayant pas subi de maturation
- TamC : MIOM D tamisé au Cered et n'ayant pas subi de maturation
- Réf1 et Réf2 : Lots bruts (référentiels), maturés pendant 1 et 2,5 mois
- Déf1 et Déf2 : Lots déferrillés et puis maturés pendant 1 et 2,5 mois
- Tam1 et Tam2 : Lots tamisés et puis maturés pendant 1 et 2,5 mois
- TamC1 et TamC2 : MIOM D tamisé au Cered et puis maturé pendant 1 et 2,5 mois
- Réf2Tam : MIOM D maturé 2,5 mois et puis tamisé à 6 mm
- Lav : MIOM C maturé pendant 2,5 mois et puis lavé à l'eau

Suivi du pH

Pour l'ensemble des MIOM étudiés, on peut remarquer une diminution du pH en cours de maturation (figure 5).

Avec des valeurs initiales d'environ 10,8 (MIOM A), 10,9 (MIOM B), 11,3 (MIOM C) et 12 (MIOM D), le pH diminue au cours de la maturation pour atteindre les valeurs allant de 9,5 à 9,8 (MIOM A), de 9,5 à 9,7 (MIOM B), de 9,3 à 10,4 (MIOM C) et de 9 à 10,5 (MIOM D).

Cette diminution de pH pourrait être expliquée par la carbonatation de la chaux selon la réaction (1). Finalement, le pH tend à long terme

vers 8,3 (pH d'équilibre des bicarbonates).



Dans tous les cas (sauf pour les MIOM bruts), les pH des premiers lixiviats (Lix 1) sont plus faibles que ceux des autres lixiviats (Lix 2 et 3), avec des valeurs de 8,5-8,8 (MIOM A), 8,6-9,1 (MIOM C), 8,3-9,0 (MIOM B) et 8,5-10 (MIOM D). Ce résultat doit mériter une attention particulière puisque la solubilité du plomb et du cadmium est étroitement liée au pH (le minimum de solubilité est obtenu à pH de 9-11 pour les hydroxydes de plomb et 10,5-12,5 pour les hydroxydes de cadmium).

Suivi de la conductivité

L'évolution de la conductivité n'est pas la même d'un mâche-

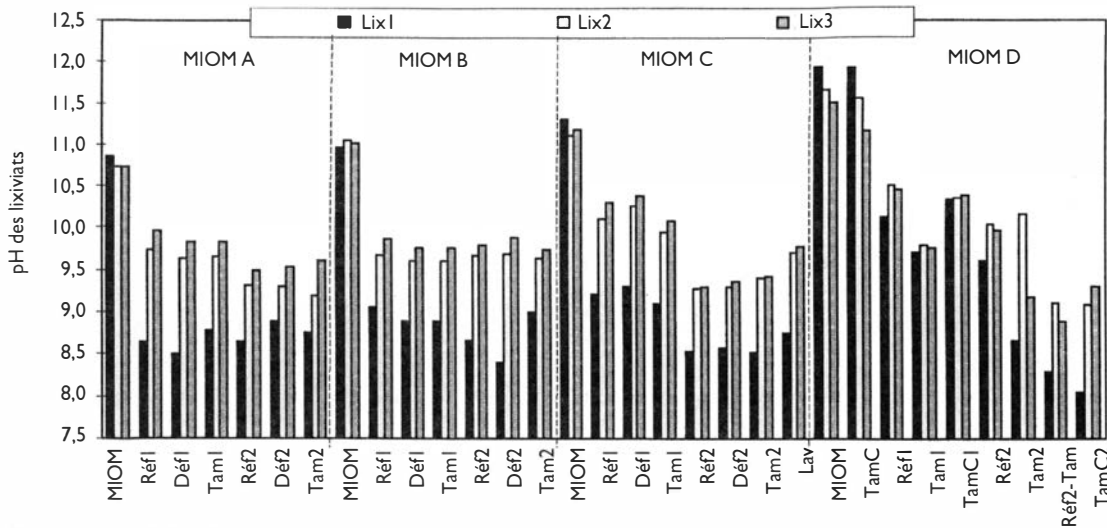


Figure 5 : pH des lixiviats

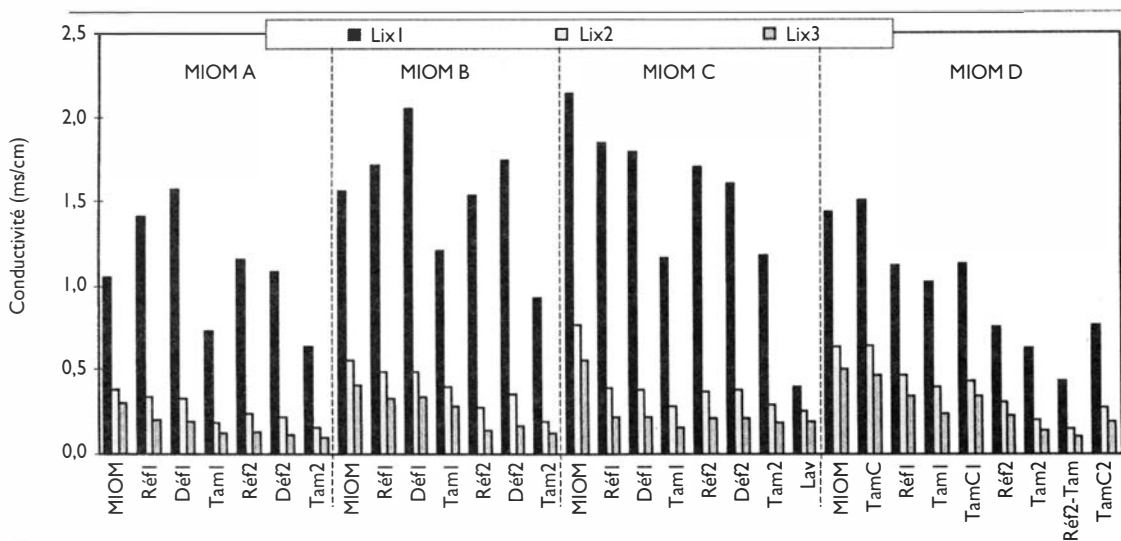


Figure 6 : Conductivité des lixiviats

fer à l'autre. Elle semble diminuer en cours de maturation dans le cas de C et D (figure 6). En revanche, son augmentation dans le cas de A et B après 1 mois de maturation indiquerait une plus grande lixiviation des éléments les plus solubles. Toutefois, elle tend à diminuer pour ces échantillons après 1,5 mois de maturation supplémentaire.

Les lots maturés et prétraités par déferrailage montrent, pour l'ensemble des mâchefers, des conductivités assez identiques à celles obtenues à partir des mâchefers maturés et non prétraités. Le déferrailage n'aurait aucun effet dans l'atténuation de la conductivité.

Les lots tamisés montrent tous des conductivités plus faibles que celles des référentiels non prétraités. Le tamisage semble avoir contribué à l'atténuation du potentiel polluant. Par ailleurs, on peut remarquer que les conductivités des lots D maturés puis tamisés sont plus faibles que celles des mêmes lots D tamisés préalablement avant d'être maturés

dans les mêmes conditions. Il semble donc que l'atténuation du potentiel polluant, du moins du potentiel polluant dû aux éléments les plus solubles, soit plus élevée lorsque le tamisage est réalisé en aval qu'en amont de la maturation. Dans le cas du MIOM C, le lot de mâchefers lavés et maturés présente les plus faibles conductivités. Le lavage à l'eau en colonne a lessivé une grande partie de la fraction soluble.

Suivi des autres paramètres

Afin d'exploiter les différents résultats expérimentaux, nous avons défini un % de variation d'un paramètre analytique, dans le but d'évaluer l'effet de la maturation et des prétraitements (déferrailage, tamisage et lavage à l'eau) dans l'atténuation (ou l'augmentation) de ce paramètre. Ce pourcentage de variation est défini par la relation :

$$\% \text{ variation} = 100 \frac{C_1 - C_0}{C_0}$$

Les concentrations C_0 et C_1 sont les concentrations (mg/kg ou g/100 g) respectivement avant et après traitement. Par exemple, pour étudier l'effet de la maturation, C_0 est la concentration dans le MIOM brut et C_1 est la concentration dans le MIOM mûri. Dans le cas des autres traitements (déferrailage, tamisage et lavage à l'eau), on détermine le pourcentage de variation pour estimer l'effet net de ces traitements. La concentration C_0 est exprimée par rapport au MIOM mûri (et non par rapport au MIOM brut), alors que C_1 est exprimée par rapport au même échantillon de MIOM mûri et traité par tamisage, déferrailage ou lavage à l'eau.

Nous avons rassemblé dans le tableau 2 les caractéristiques physico-chimiques des 4 mâchefers bruts non mûris, et dans les tableaux 3 à 4 les pourcentages de variation (le signe + signifie augmentation et le signe - signifie diminution). A partir de l'ensemble des résultats obtenus, il apparaît que l'effet net du tamisage correspond toujours à une diminution du potentiel polluant des mâchefers. Les pourcentages de variation sont toujours négatifs et oscillent entre -10 et -70 %. Le tamisage à 4 ou 6 mm permettrait de diminuer le potentiel polluant global en raison de l'élimination des fractions fines qui sont les plus concentrées. Néanmoins, quelques valeurs positives correspondant à des augmentations du potentiel polluant sont observées pour le cadmium et le plomb (+40 % pour le cadmium et +130 pour le plomb).

Dans le cas du MIOM D, l'effet net du tamisage réalisé en aval de la maturation semble conduire à l'atténuation du potentiel polluant de manière plus forte que lorsqu'il est réalisé en amont de la maturation, sauf apparemment pour le COT et la chaux libre (les pourcentages d'atténuation sont les mêmes pour un tamisage réalisé en amont comme en aval de la maturation).

L'effet net du déferrailage semble être relativement faible pour la majorité des paramètres analytiques (variation de l'ordre de -5 à +30 %), sauf pour le plomb (-50 à +30 %) et le chrome (+40 %). Toutefois, on peut dire de manière générale que le déferrailage ne contribue que de manière modérée dans l'atténuation ou l'augmentation du potentiel polluant global.

L'effet net prévisible du lavage en colonne correspond à des diminutions importantes du potentiel polluant (pourcentages d'atténuation allant de -50 à -100 %). Néanmoins, il ne semble pas avoir d'effet dans l'atténuation des teneurs en imbrûlés (+30 %) ou en chaux libre (-4 %) et des teneurs lixiviables en cadmium (+20 %) ou en mercure (-6 %).

En faisant abstraction des sulfates, et des métaux lourds (plomb, chrome et arsenic), l'effet net de la maturation semble correspondre à l'amélioration de la qualité environnementale des mâchefers. Les pourcentages de variation sont toujours négatifs et oscillent entre 0 et -80 %.

Dans le cas des sulfates et des métaux lourds (plomb, chrome et arsenic), la maturation semble conduire à une augmentation du potentiel polluant (jusqu'à +100 % pour les sulfates et +250 % pour les métaux lourds). Le cas des sulfates peut s'expliquer par l'oxydation du soufre en cours de maturation.

En effet, le suivi du soufre et des sulfates (sulfates totaux) a montré une diminution de la teneur en soufre en faveur de l'augmentation de celle en sulfates (ici les teneurs en soufre et en sulfates sont les teneurs du mâchefer et non les teneurs lixiviables via le test X31-210).

Dans le cas du plomb, la carbonatation naturelle des mâchefers peut favoriser la baisse de la solubilité du plomb en intervenant de deux façons distinctes :

Baisse du pH des mâchefers selon la réaction



Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des mâchefers bruts

Paramètre (mg/kg)*	MIOM A	MIOM B	MIOM C	MIOM D
<i>Comportement à la lixiviation X31-210</i>				
Fraction soluble	2,15	2,82	2,73	2,106
Chlorures	1792	3632	5015	1708
Sulfates	3078	1589	2932	3696
COT	279,4	310,3	1118,9	620,4
Plomb	1,85	1,25	3,44	6,411
Cadmium	0,838	0,20	0,33	0,155
Chrome	0,37	0,84	0,31	0,465
Mercure	0,031	0,022	0,028	0,016
Arsenic	0,047	0,062	0,071	0,183
<i>Analyses sur solide</i>				
Imbrûlés	5,24	6,98	5,61	4,228
Chaux libre	1,83	2,91	3,37	3,938
Soufre (mg S/kg)	6000	4800	7500	6700
Sulfates (mg S/kg)	37200	24000	35100	63000

(*) g/100 g pour la fraction soluble, les imbrûlés et la chaux libre

Tableau 3 : % de variation. Effet des traitements (MIOM A)

Effet net de la maturation	Maturation à 1 mois		déferrailage 1 mois / 2,5 mois		du tamisage 1 mois / 2,5 mois	
	1	2,5	1	2,5	1	2,5
<i>Suivi du comportement à la lixiviation X31-210</i>						
Fraction soluble	-18,4	-41,7	+9,2	+32,9	-48,0	-33,5
Chlorures	+22,2	-4,3	+16,6	-5,3	-54,4	-56,6
Sulfates	+85,5	+40,3	+3,3	-14,3	-55,7	-47,3
COT	-66,6	-44,6	+0,5	+0,6	-66,6	+0,2
Plomb	-78,2	+155,0	-48,5	-25,6	+85,1	-39,9
Cadmium	-79,0	-84,0	+12,3	+23,8	-5,7	+38,7
Chrome	+83,8	-66,8	-5,6	+42,5	-68,1	-8,2
Mercure	-	-50,2	-	+0,6	-	+0,2
Arsenic	-	+232,3	-	+0,6	-	+0,2
<i>Suivi sur solide</i>						
Imbrûlés	+24,0	-3,9	+3,2	+9,0	-46,4	-43,1
Chaux libre	-9,0	-64,9	-1,5	-8,8	-51,5	-28,9
Soufre	-31,7	-30,0	-	-	-	-
Sulfates	+93,5	+54,8	-	-	-	-

Cette baisse de pH favorise la stabilité d'espèces peu solubles comme $Pb(OH)_2$ au détriment des espèces solubles telles que $HPbO_2^-$. Il faut noter que la solubilité du plomb est relativement faible pour des pH < 9. A l'opposé, pour des pH élevés (supérieurs à 12), la solubilité des espèces contenant du plomb devient importante.

Synthèse d'une espèce peu soluble selon la réaction



La baisse de pH, obtenue par cette dernière action, est faible. L'évolution du pH est imposée par l'espèce majoritaire qui est le calcium (sous formes d'hydroxyde et carbonate).

Tableau 4 : % de variation. Effet des traitements (MIOM B)

Effet net Maturation à	de la maturation		du déferrailage		du tamisage	
	1 mois	2,5 mois	1 mois	2,5 mois	1 mois	2,5 mois
<i>Suivi du comportement à la lixiviation X31-210</i>						
Fraction soluble	1,2	- 30,2	+ 12,7	+ 14,5	- 23,7	- 37,5
Chlorures	+ 3,0	+ 1,0	+ 34,1	+ 24,0	- 41,1	- 55,4
Sulfates	+ 243,3	+ 126,8	+ 9,1	+ 16,3	- 14,9	- 30,2
COT	- 60,1	- 49,9	+ 0,7	+ 18,8	- 24,9	- 20,0
Plomb	- 85,1	+ 275,5	- 4,9	+ 0,6	+ 127,9	- 1,8
Cadmium	- 10,7	- 26,1	+ 0,7	+ 6,1	- 5,8	+ 21,4
Chrome	- 45,8	- 43,0	- 8,5	+ 29,2	- 11,3	- 78,3
Mercure	-	- 28,4	-	- 1,0	0	-
Arsenic	-	+ 150,7	-	+ 38,6	0	-
<i>Suivi sur solide</i>						
Imbrûlés	- 1,4	- 4,1	- 14,3	+ 2,2	- 31,3	- 52,9
Chaux libre	+ 7,5	- 51,8	- 1,2	+ 4,7	- 38,0	- 25,8
Soufre	- 18,7	- 33,3	-	-	-	-
Sulfates	+ 230	+ 117	-	-	-	-

Tableau 5 : % de variation. Effet des traitements (MIOM C)

Effet net Maturation à	de la maturation		du déferrailage		du tamisage		du lavage 2,5 mois
	1 mois	2,5 mois	1 mois	2,5 mois	1 mois	2,5 mois	
<i>Suivi du comportement à la lixiviation X31-210</i>							
Fraction soluble	- 9,0	- 15,9	+ 0,6	- 9,5	- 25,4	- 26,9	- 64,1
Chlorures	+ 3,5	- 32,4	- 5,2	+ 12,4	- 53,2	- 44,8	- 96,3
Sulfates	+ 21,5	+ 96,8	- 5,7	- 4,6	- 22,6	- 29,2	- 60,2
COT	- 55,7	- 64,2	+ 3,8	+ 8,2	- 18,6	- 7,4	- 45,6
Plomb	- 91,0	+ 43,5	+ 27,5	- 42,8	- 36,5	- 4,0	- 96,2
Cadmium	- 31,4	- 50,4	- 35,9	- 5,8	- 40,8	- 5,9	+ 20,0
Chrome	+ 222,4	- 50,4	+ 14,2	- 26,3	- 37,0	- 13,0	- 5,7
Mercure	-	- 44,9	-	+ 0,5	-	+ 0,4	-
<i>Suivi sur solide</i>							
Arsenic	-	+ 115,7	-	+ 0,5	-	+ 0,4	-
Imbrûlés	+ 24,9	- 13,7	+ 5,9	+ 28,3	- 77,0	- 50,5	+ 27,8
Chaux libre	- 29,1	- 56,6	+ 2,1	+ 4,8	- 49,5	- 36,3	- 3,6
Soufre	- 41,3	- 34,7	-	-	-	-	-
Sulfates	+ 30,8	+ 48,7	-	-	-	-	-

Tableau 6 : % de variation. Effet des traitements (MIOM D). TamC signifie tamisé au Cered (échelle semi-industrielle). TamLabo signifie tamisage réalisé à 6 mm à l'échelle laboratoire

Effet net Maturation à	de la maturation du MIOM brut		de la maturation du MIOM TamC		du TamLABO du MIOM brut		du TamLABO après maturation du MIOM brut
	1 mois	2,5 mois	1 mois	2,5 mois	1 mois	2,5 mois	2,5 mois
<i>Suivi du comportement à la lixiviation X31-210</i>							
Fraction soluble	- 24,7	- 51,5	- 37,1	- 46,4	- 21,4	- 2,8	- 11,6
Chlorures	- 12,8	- 42,2	- 26,1	- 54,9	- 39,6	- 37,0	- 57,8
Sulfates	+ 51,0	- 14,7	+ 22,4	- 15,9	- 6,5	- 17,8	- 59,5
COT	- 49,7	- 79,8	- 7,6	- 61,6	- 30,5	- 25,7	- 25,2
Plomb	- 97,2	- 97,1	- 96,9	- 93,4	- 6,5	+ 92,6	+ 77,3
Cadmium	+ 0,7	+ 21,1	+ 6,7	- 0,1	+ 12,5	- 0,9	- 16,9
Chrome	+ 38,7	- 5,8	+ 95,2	- 46,4	- 92,0	- 74,1	- 78,6
Mercure	-	+ 0,9	-	- 0,1	-	- 0,9	- 0,3
Arsenic	-	+ 6,0	-	+ 63,5	-	- 12,1	+ 30,3
<i>Suivi sur solide</i>							
Imbrûlés	- 10,3	- 42,8	+ 2,0	+ 7,7	- 65,2	- 22,3	- 31,0
Chaux libre	- 47,3	- 48,2	- 45,1	- 72,1	- 37,8	- 48,0	- 48,3
Soufre	- 52,2	-	-	-	-	-	-
Sulfates	+ 8,6	-	-	-	-	-	-

ANALYSE PAR DIFFRACTION DE RAYONS X

Afin de déterminer, dans la mesure du possible, la nature des composés contenus dans les mâchefers bruts mais aussi après leur maturation, nous avons réalisé au Centre de diffractométrie de l'Université Claude Bernard de Lyon une analyse par diffraction des rayons X. L'analyse a été réalisée sur des poudres préparées par broyage fin (taille de particules inférieures à 80μ) à partir de certains échantillons de MIOM D, à savoir :

- trois fractions granulométriques brutes, non maturées (0-0,08 ; 0-2 et 0-6 mm),
- deux fractions granulométriques $\varnothing > 6$ mm (brute et après maturation de 2,5 mois),
- un échantillon de mâchefer maturé pendant 2,5 mois.

Une fois les spectres enregistrés, les différentes raies de diffraction sont comparées à toutes celles des fiches ASTM de composés contenant les mêmes éléments majeurs que les échantillons de mâchefers. Ces raies de diffraction permettent par recouvrements successifs de citer seulement les combinaisons cristallisées dont les teneurs sont supérieures à 5%.

Les diagrammes de diffraction obtenus semblent montrer la présence d'anhydrite ($CaSO_4$), de calcite ($CaCO_3$), et de quartz SiO_2 . Cette composition minéralogique semble être qualitativement la même pour toutes les fractions granulométriques. Toutefois, il semble que les teneurs en calcite sont plus élevées sur les échantillons maturés que sur les

échantillons bruts. Ce qui laisse penser qu'une carbonatation de la chaux a eu lieu en cours de maturation. Par ailleurs, la teneur en calcite semble augmenter lorsque la taille granulométrique diminue. La carbonatation semble être favorisée lorsque la granulométrie des mâchefers est faible.

CONCLUSION

Par suivi physico-chimique de différents lots de mâchefers, il a été possible d'étudier l'effet de quatre modes de traitements (maturation, tamisage, déferrailage et lavage à l'eau) sur leur qualité environnementale.

Le déferrailage ne semble pas constituer un traitement très intéressant, puisqu'il n'a pas permis d'atténuer le potentiel polluant (les pourcentages d'atténuations varient entre -5 et + 30 %).

Mis à part les sulfates, le plomb, le chrome et l'arsenic, l'effet net de la maturation s'avère correspondre à l'amélioration de la qualité environnementale. Les pourcentages d'atténuation obtenus après 2,5 mois de maturation sont négatifs (compris entre 0 et - 80 %).

Dans le cas des sulfates, du plomb, du chrome et de l'arsenic, la maturation s'accompagne de l'augmentation du potentiel polluant (jusqu'à + 100 % pour les sulfates et +250 % pour les trois métaux lourds). Nous avons interprété l'augmentation de la teneur en sulfates par l'oxydation du soufre en sulfates. L'augmentation du potentiel polluant du plomb est probablement liée à la diminution du pH de lixiviation en raison de la carbonatation de la chaux en cours de maturation. Quoi qu'il en soit, les teneurs lixiviées en sulfates, plomb, chrome et arsenic doivent être intégrées dans un plan d'assurance qualité en tant qu'indicateur de suivi de la qualité d'un tas de mâchefer.

Le tamisage réalisé à 4 ou 6 mm permet une diminution sensible du potentiel polluant (-10 à -70 % d'atténuation). Néanmoins, nous avons observé une augmentation du potentiel polluant pour le plomb et le cadmium bien que le mâchefer soit traité par tamisage. Pour ces deux éléments, la diminution du pH n'est probablement pas la seule cause de l'augmentation de leur potentiel polluant.

En plus de l'effet bénéfique du tamisage dans l'amélioration de la qualité environnementale des mâchefers, on peut ajouter l'effet prévisible favorable du tamisage dans l'entrave de la prise hydraulique, puisqu'il a permis de réduire la teneur initiale en chaux. En effet, en se fiant à nos observations visuelles après 1 et 2,5 mois de maturation, la prise en masse des lots de mâchefers déferrillés s'est révélée beaucoup plus avancée que celle des lots bruts (non traités), alors qu'elle s'est avérée beaucoup moins avancée sur les lots traités par tamisage que sur les lots bruts.

Il a été possible de constater que l'atténuation du potentiel polluant est plus intéressante pour un tamisage réalisé en aval qu'en amont de la maturation.

En étudiant le traitement à l'eau, nous avons montré la sévérité du test X31-210 puisque les teneurs extraites par ce test à partir du mâchefer non lavé sont toujours supérieures

aux quantités maximales extractibles par le test de percolixiviation sur le même mâchefer. Quoi qu'il en soit, le lavage a permis d'atténuer de façon efficace le potentiel polluant. Par ailleurs, le modèle d'extraction utilisé s'est avéré valide pour décrire le comportement du mâchefer à l'extraction par percolixiviation. On peut penser se servir de ce modèle à des fins pratiques pour simuler l'effet des eaux de pluie dans le lessivage du potentiel polluant d'un mâchefer mis en stockage.

Sur la base de l'ensemble de ces conclusions, il est possible de définir d'un point de vue environnemental les meilleurs scénarios de traitement des mâchefers, en vue de les valoriser en techniques routières, particulièrement en remblais. Le déferrailage n'est pas conseillé en tant que mode de prétraitement en amont de la maturation. Il ne devrait être réalisé qu'en aval de la maturation lorsque l'on envisage de valoriser les mâchefers. Le tamisage peut être effectué en amont comme en aval de la maturation, bien qu'il semble être plus efficace lorsqu'il est réalisé en aval. Le lavage à l'eau permet de réduire notablement le potentiel polluant des mâchefers. Cependant, ce prétraitement, contraignant d'un point de vue technico-économique, est *a priori* à proscrire, puisque le tamisage couplé à la maturation devrait suffire à obtenir des mâchefers de qualité environnementale acceptable. Pour finir, il faut bien avoir présent à l'esprit que tout ce qui vient d'être dit devra être confirmé ou infirmé par les essais pilotes réalisés sur le site du Cered.

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

- Abdelghafour M. *Réalisation et mise au point d'un test de lixiviation sous pression*. Thèse de doctorat. Insa de Lyon. Juillet 1989. 243 p.
- Afnor X31-210-Déchets : *essais de lixiviation*. Paris. Décembre 1992, 13 p.
- 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. 116 p.
- 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.
- Blanchard J.-M., Comel C., Navarro A., Revin Ph., Veron J. & Pillay G. *Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. 1 - Principales propriétés*. TSM l'Eau, n° 3, mars 1989, p. 127-132.
- Coutaz L. *Valorisation des mâchefers d'usines d'incinération d'ordures ménagères*. Thèse de doctorat. Insa de Lyon. 1996. 231 p.
- Ministère de l'Environnement. *Circulaire mâchefers du 9 mai 1994*. Paris. 14 p.