

# VALORISATION DE MÂCHEFERS D'INCINÉRATION D'ORDURES MÉNAGÈRES PARTIE 2 : ÉTUDE SUR LE TERRAIN (CHAUSSÉES) ET EN LABORATOIRES (LYSIMÈTRES)

Véronique Bruder-Hubscher\*, Florence Lagarde\*, Maurice Leroy\*, Magali Midy\*\*, François Enguehard\*\*

\* Laboratoire de chimie analytique et minérale, Strasbourg - \*\* Centre de recherche pour l'environnement, l'énergie et le déchet, Limay

Les mâchefers sont les principaux résidus (en poids) de l'incinération des ordures ménagères. Leur production, en France, s'élève à 2,7 millions de tonnes par an. Compte tenu de la nécessité de maîtriser leur utilisation en technique routière, il est intéressant d'étudier cette valorisation en milieu réel par le suivi de chaussées expérimentales. Il s'agit cependant d'une démarche lourde et onéreuse, d'où la mise au point en complément d'un outil de laboratoire (lysimètre) permettant de simuler différentes conditions de valorisation.

La valorisation en conditions réelles d'un mâchefer a été étudiée grâce au suivi de deux chaussées expérimentales sur une durée de 3 ans. D'une manière générale, un faible apport des mâchefers a été mesuré sur la composition des eaux de percolation. Une faible toxicité des percolats a été observée en fin de suivi.

Les différents essais effectués en lysimètres ont permis de montrer une bonne reproductibilité de la composition des percolats. La corrélation avec les chaussées n'a pas encore pu être clairement établie.

**Bottom ash (BA)** is the main residue obtained after incineration of municipal solid wastes. In France, its production rises 2.7 million tons annually. Utilization of BA in road works and embankments is encouraged in France but strictly regulated. In order to evaluate the environmental impact of BA used in road construction under real conditions, two road sections were studied. Nevertheless, this study requires technical and financial means which are important. In this context, a laboratory tool (lysimeter) has been developed in which it is possible to reproduce the conditions of utilization. The experiments carried out during three years, have shown a low contribution of BA on the composition of the percolation water and a low toxicity has been measured on percolates at the end of the study. The different tests carried out in lysimeters have shown a good reproducibility of the composition of the percolate. The correlation between the lysimeters and the road sections has not been clearly observed.

## INTRODUCTION

Depuis le 9 mai 1994, une circulaire ministérielle<sup>[1]</sup> définit les critères et les conditions de valorisation en technique routière des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères pour respecter au mieux l'environnement.

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) étudiés dans le cadre de ce travail proviennent de la plateforme expérimentale de traitement de Brest sur laquelle ils ont subi une maturation d'une durée de 12 mois.

Ces mâchefers ont tout d'abord été caractérisés (Partie I). D'un point de vue géotechnique, ils répondent au cahier des charges établi en collaboration avec les entreprises routières exception faite de leur teneur en eau importante, paramètre qui a pu être modifié facilement. Des tests de lixiviation effectués sur ces mâchefers ont permis de s'assurer de leur appartenance à la catégorie « V » de la circulaire ministérielle, condition indispensable pour que leur utilisation soit possible. Cependant, le test de lixiviation normalisé NF X 31-210<sup>[2]</sup> n'est pas effectué dans les conditions réelles de valorisation. Afin d'évaluer l'impact sur l'environnement, une étude a été effectuée sur le terrain grâce à la mise en œuvre et au suivi de deux chaussées expérimentales. Cependant, cette étude qui nécessite des moyens techniques et financiers importants est également limitée par des conditions imposées. C'est pourquoi, parallèlement au suivi des chaussées expérimentales, un outil de laboratoire a été mis au point sous la forme d'un lysimètre qui permet d'étudier le comportement des mâchefers dans des conditions contrôlées. L'avantage que présente le lysimètre est le nombre d'essais que l'on peut y effectuer ainsi que la durée qui peut être réduite par rapport au cas réel.

## DESCRIPTION DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

### Description des chaussées<sup>[3]</sup>

En juin 1995, deux tronçons de route de 60 mètres de long sur environ 3,5 mètres de large ont été construits dans la région de Brest (figure 1), leur épaisseur est d'environ 70 cm.

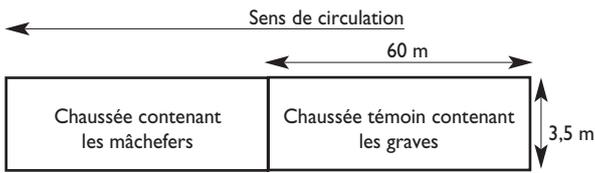


Figure 1 : Disposition des chaussées

Les chaussées se différencient par le matériau constituant la couche de fondation : l'une contient les MIOM (figure 2), l'autre, servant de témoin, est entièrement constituée de graves naturelles.

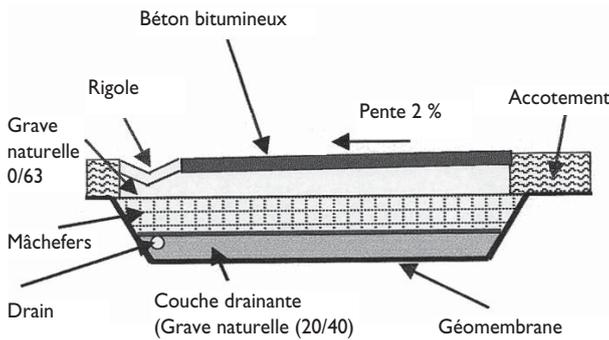


Figure 2 : Coupe transversale de la chaussée contenant les mâchefers

Depuis la mise en place des chaussées et durant tout le suivi (3 ans), les eaux de percolation ont été récupérées dans des citernes à l'aide de drains, puis analysées. Les eaux de ruissellement et de pluie ont également été recueillies et analysées.

### Description des lysimètres

Suite à une étude bibliographique<sup>[4, 5, 6]</sup>, deux lysimètres ont été construits<sup>[7]</sup>. Chaque lysimètre est constitué d'un tube cylindrique (1,5 mètre de long et 0,5 mètre de diamètre) en acier inoxydable fixé à un châssis. À la base de ce tube a été soudé un cône dont l'extrémité la plus petite est connectée à un bidon récepteur qui permet la récupération des eaux de percolation. Pour minimiser les variations de température, les lysimètres sont enveloppés d'une mousse isolante. Chaque lysimètre est percé de trois ouvertures fermées par un couvercle en acier inoxydable permettant de sortir le matériau et de remplir plus aisément le lysimètre. Les matériaux de remplissage reposent sur une superposition de deux grilles. La première est suffisamment résistante pour supporter la masse des matériaux ainsi que la pression qui va être appliquée durant l'étude, la seconde est surmontée par un géotextile empêchant le passage des fines. La figure 3 représente une coupe du lysimètre.

Afin de pouvoir établir un lien entre les lysimètres et les chaussées expérimentales, les lysimètres ont été remplis avec des matériaux similaires à ceux constituant les différentes sous-couches routières. Les mâchefers utilisés dans

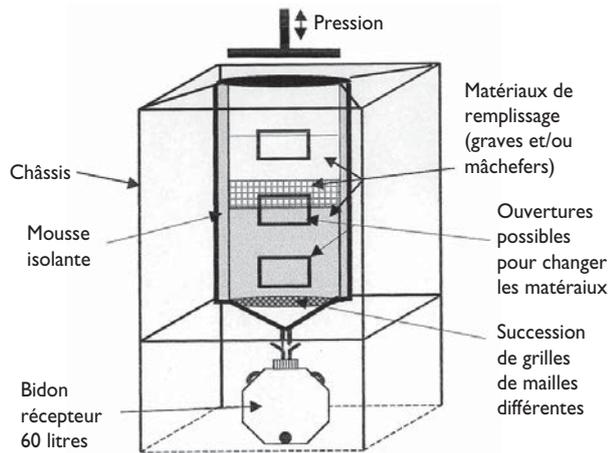


Figure 3 : Coupe du lysimètre

les lysimètres proviennent du même lot que ceux des chaussées. Bien que les graves naturelles ne proviennent pas de la même gravière, les catégories granulométriques mises en œuvre dans les chaussées et les lysimètres sont identiques. Pour chaque essai, deux lysimètres ont été utilisés simultanément, l'un dit témoin et l'autre test. Le lysimètre témoin constitue une référence par rapport au lysimètre test dans lequel on fait varier un paramètre.

Quatre essais ont été effectués afin d'étudier d'une part la reproductibilité des tests en lysimètres, d'autre part l'influence du débit d'eau d'arrosage et de la pression sur la composition des percolats et enfin la corrélation entre lysimètres et chaussées. Les différents essais sont décrits dans le tableau 1.

Lors du remplissage, les matériaux utilisés dans les lysimètres sont compactés à l'aide d'une centrale hydraulique qui commande un vérin à l'extrémité duquel est fixée une plaque en acier inoxydable en contact avec le matériau. Afin de réduire la durée d'une étude, l'équivalent d'une semaine

Tableau 1 : Description des essais effectués en lysimètres

Essais	Arrosage	Pression		Temps (semaines)		Matériaux	
		Témoin	Test	Témoin	Test	Témoin	Test
1	Quantité d'eau qu'il a plu sur les chaussées	Aucune	Aucune	4	Graves	Mâchefers	
2	Quantité d'eau qui a percolé sur les chaussées	Aucune	Aucune	4	Graves	Mâchefers	
3	Quantité d'eau qu'il a plu sur les chaussées	Aucune	Cycles répétés 260 bars (10h/j)	4	Mâchefers	Mâchefers	
4	Quantité d'eau qu'il a plu sur les chaussées	Aucune	Aucune	9	Graves	Mâchefers	

de pluie sur les chaussées a été arrosé en une journée sur les lysimètres. L'arrosage des lysimètres a été effectué manuellement, plusieurs fois par jour afin d'alterner les périodes sèches et humides. L'eau utilisée est une eau ultra-pure (résistivité 18 MΩ à pH de 5,6) car il n'a pas été possible de reconstituer la composition de l'eau de pluie tombée sur les chaussées du fait de sa variation dans le temps. Le second essai diffère des autres par la quantité d'eau arrosée qui correspond à la quantité d'eau qui a percolé dans la chaussée contenant les mâchefers, soit environ le quart de celle versée lors des autres essais.

Lors du troisième essai, les vibrations engendrées par le passage des véhicules sur une route ont été simulées en appliquant une pression au sommet du lysimètre à l'aide du système utilisé pour le compactage des matériaux lors du remplissage.

Le quatrième essai est effectué sur une durée plus importante afin d'étudier les phénomènes à plus long terme.

### Analyses effectuées

Les paramètres étudiés dans les percolats (tableau 2) sont ceux cités par la circulaire du 9 mai 1994. Pour comparer l'impact des mâchefers à celui du salage des routes en période hivernale, les chlorures ont également été dosés.

**Tableau 2 : Paramètres étudiés dans les percolats des lysimètres et des chaussées expérimentales et dans les eaux de ruissellement (circulaire ministérielle du 9 mai 94 <sup>[1]</sup>)**

Paramètres pris en compte pour les eaux de rejet plate-forme	Paramètres pris en compte pour le potentiel polluant des mâchefers	Paramètres supplémentaires
Arsenic (As), cadmium (Cd), plomb (Pb), cyanures (CN), chrome VI (Cr VI), demande chimique en oxygène (DCO), fluorures (F), mercure (Hg), pH, Indice Phénol (IP) et hydrocarbures (HC)	As, Cd, Cr VI, Hg, Pb, Carbone organique total (COT), Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Chlorures (Cl), Demande biologique en oxygène (DBO5)

Le suivi de l'évolution de la composition des percolats et des eaux de ruissellement a été effectué avec une fréquence d'analyse d'environ un dosage complet par mois pour les chaussées et un dosage par semaine dans le cas des lysimètres.

## RÉSULTATS

### Bilans hydriques

Les quantités d'eau qu'il a plu, percolé et ruisselé, mesurées une fois par semaine sur les chaussées ont permis d'effectuer un bilan hydrique (tableau 3).

On constate que 17 % de la quantité d'eau de pluie a percolé dans les chaussées avec des disparités entre la chaussée témoin et celle contenant les mâchefers qui n'ont pas pu être expliquées. D'autre part, la quantité totale d'eau qui a percolé dans les deux chaussées est à peu près équi-

**Tableau 3 : Bilan hydrique obtenu pour les chaussées**

	Eaux de percolation	Eaux de ruissellement
	% percolé/pluie	% ruisselé/pluie
Chaussée témoin	15	16
Chaussée mâchefers	20	16
Total	17	16

valente à celle qui a ruisselé. Au vu de ces résultats, on constate qu'une proportion importante de l'eau de pluie s'est évaporée ou accumulée dans l'ouvrage.

En ce qui concerne les lysimètres, un bilan hydrique a également été effectué en connaissant les quantités d'eau arrosées et recueillies chaque jour (tableau 4).

**Tableau 4 : Bilan hydrique obtenu pour les lysimètres**

Essais		% percolé/arrosé
1	Témoin	69,4
	Mâchefer	72,3
2	Témoin	61,5
	Mâchefer	79,3
3	Sans pression	63,2
	Avec pression	62,6
4	Témoin	85,4
	Mâchefer	82,7

Pour tous les essais, plus de 60 % de l'eau versée est récupérée en bas du lysimètre. Le ruissellement est inexistant et l'évaporation peu importante par rapport aux chaussées expérimentales compte tenu du fait que les lysimètres ne sont pas exposés aux variations saisonnières, notamment la chaleur de l'été. Par ailleurs, d'après les résultats de l'essai 3, il ne semble pas que la pression ait une grande influence sur la quantité d'eau qui percole. Les résultats montrent également qu'il n'y a pas de grande différence entre les volumes percolés d'un lysimètre à l'autre lors d'un même essai.

### Composition des eaux de percolation

#### Les chaussées

L'évolution des concentrations (mg/l) obtenues pour chaque paramètre a été étudiée en fonction du temps (jour d'analyse des percolats). Les concentrations ponctuelles mesurées dans les percolats des deux chaussées ont été comparées entre elles et avec celles mesurées dans les eaux de ruissellement. Les résultats obtenus pour tous les paramètres ont également été comparés à des seuils réglementaires :

- seuil des concentrations admises pour les eaux potables (directives CEE n° 80/778 : Official J. of European Communities, 1980 et OMS, 1993)

- seuil des concentrations autorisées pour les installations classées (arrêté de 1<sup>er</sup> mars, JO de la République Française, 1993),

- seuil des concentrations autorisées pour les eaux de rejet de plate-forme de maturation (circulaire ministérielle 1994). Les concentrations minimales et maximales mesurées dans les percolats des chaussées ainsi que les seuils réglementaires

**Tableau 5 : Concentrations minimales et maximales (mg/l) mesurées dans les percolats et valeurs réglementaires**

	Chaussée témoin		Chaussée mâchefers		Seuil eau potable (CEE n° 80/778, 1980 OMS, 1993)	Seuil rejet installation (Arrêté, 1993)	Seuil rejet plate-forme (Circulaire Ministérielle 1994)
	Mini.	Maxi.	Mini.	Maxi.			
Pb	0,001	0,047	0,001	0,067	0,05	0,5	0,5
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	125	710	44	3000	250	-	-
As	0,007	0,24	0,013	0,25	0,05	0,1	0,1
Cd	< 5.10 <sup>-4</sup>	1,5.10 <sup>-3</sup>	< 5.10 <sup>-4</sup>	1,7.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>	0,2	0,2
COT	5,7	15,6	10,9	167	-	-	-
Cl <sup>-</sup>	26	199	79	3715	200	-	-
CrVI	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05 (Cr total)	0,1	0,1
CN <sup>-</sup>	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05	0,1	0,1
DBO5	1	17	4	210	-	100	-
DCO	25	54	39	543	-	300	125
F <sup>-</sup>	0,45	1,1	0,28	1,21	-	15	15
HC	< 0,01	0,15	< 0,01	4,3	0,01	10	10
Hg	< 2.10 <sup>-5</sup>	0,018	< 2.10 <sup>-5</sup>	6,7.10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	0,05	0,05
pH	6,6	9,8	6,7	7,9	6,5 - 9	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5
IP	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,7	5.10 <sup>-4</sup>	0,3	0,5

celui d'un salage hivernal<sup>[7]</sup>.

D'une manière générale, nous avons observé un apport faible des mâchefers sur la composition des eaux de percolation.

À partir des concentrations mesurées dans les percolats, il a été possible de déterminer la quantité cumulée extraite Q (mg/kg de MS : matière sèche) durant le suivi (relation I).

$$Q = \sum_i (C_i \times V_i) / m \quad (I)$$

où

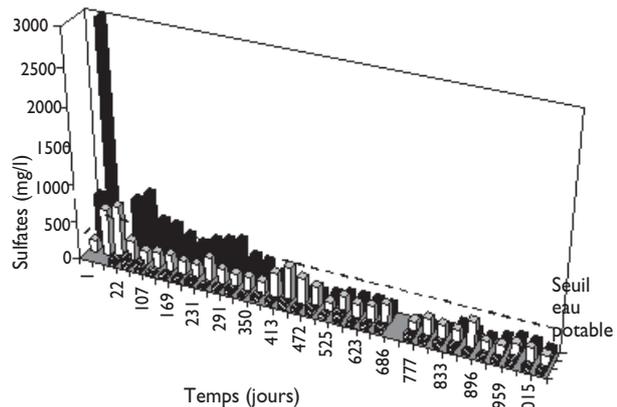
C<sub>i</sub> est la concentration dans le percolat i prélevé (mg/L)  
V<sub>i</sub> est le volume du percolat i (L)

m est la masse sèche totale des matériaux mis en œuvre dans les chaussées (kg).

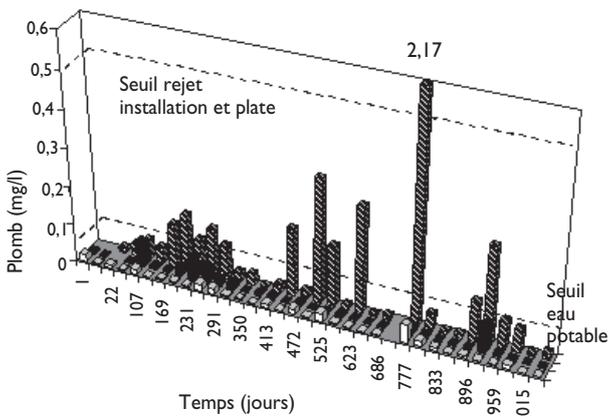
Cette relation permet de déterminer les quantités totales libérées en fin d'étude pour chaque chaussée et durant chaque année de suivi (tableau 6). Elle a été utilisée pour chacun des paramètres étudiés, excepté pour le pH, la DCO et la DBO5 dont les résultats

sont présentés dans le tableau 5.

Pour une grande partie des paramètres, on observe des concentrations inférieures aux seuils d'installations classées et/ou de rejet plate-forme, voire inférieures au seuil de l'eau potable pratiquement tout au long du suivi. C'est le cas des métaux lourds, des fluorures et du pH. Le cas du plomb est présenté sur la figure 4. Des valeurs élevées pour les hydrocarbures et l'arsenic sont observées de manière occasionnelle, ce qui semble provenir d'une contamination extérieure. Dans le cas des chlorures, des sulfates (figure 5), du COT, de la DCO et de la DBO5, on observe des valeurs élevées en début d'étude puis assez rapidement des concentrations inférieures aux seuils de rejet installations classées et/ou plate-forme. Il a également pu être montré que l'apport des chlorures est du même ordre de grandeur que



**Figure 5 : Suivi des sulfates dans les percolats des chaussées (■ : mâchefers, □ : témoin) et des eaux de ruissellement (▨)**



**Figure 4 : Suivi du plomb dans les percolats des chaussées (■ : mâchefers, □ : témoin) et des eaux de ruissellement (▨)**

ne peuvent être cumulés. De plus, la proportion percolée par rapport à la quantité lixiviée a également été calculée pour les paramètres dont les concentrations dans les percolats sont supérieures aux limites de détection.

Dans tous les cas, on observe une diminution des quantités libérées au cours du temps. D'autre part, on constate que le test de lixiviation n'est pas représentatif de ce qui se passe en réalité mais qu'il offre une marge d'erreur importante car les quantités lixiviées sont toujours supérieures aux quantités percolées.

Cette étude a été complétée par des tests toxicologiques appliqués à des percolats prélevés en fin de suivi sur les deux chaussées. Les résultats obtenus font état d'une faible toxicité que l'on pouvait prévoir compte tenu de la com-

**Tableau 6 : Quantités totales (mg/kg de MS) percolées durant le suivi - Comparaison avec les quantités lixiviées**

		Quantités cumulées extraites (Q)				Quantités lixiviées (Qlix.)	Q/Qlix (%)
		1 <sup>ère</sup> année	2 <sup>ème</sup> année	3 <sup>ème</sup> année	Total		
As	Témoin	6,2x10 <sup>-3</sup>	6,4x10 <sup>-3</sup>	2,8x10 <sup>-3</sup>	1,5x10 <sup>-2</sup>	0,17	8,8
	Mâchefer	2,5x10 <sup>-2</sup>	3,8x10 <sup>-3</sup>	1,5x10 <sup>-3</sup>	3,0x10 <sup>-2</sup>		
COT	Témoin	1,2	0,9	0,3	2,4	164	1,5
	Mâchefer	15,5	1,95	0,45	17,9		
Cl <sup>-</sup>	Témoin	6,8	6,3	4,4	17,5		
	Mâchefer	223	21,5	4,5	249		
F <sup>-</sup>	Témoin	7,8x10 <sup>-2</sup>	6,4x10 <sup>-2</sup>	6,1x10 <sup>-2</sup>	0,2		
	Mâchefer	1,1x10 <sup>-1</sup>	6,3x10 <sup>-2</sup>	3,1x10 <sup>-2</sup>	0,2		
HC	Témoin	3,9x10 <sup>-3</sup>	1,2x10 <sup>-3</sup>	6,2x10 <sup>-4</sup>	5,7x10 <sup>-3</sup>		
	Mâchefer	0,2	2,3x10 <sup>-2</sup>	4x10 <sup>-3</sup>	0,23		
Pb	Témoin	1,1x10 <sup>-3</sup>	5,6x10 <sup>-4</sup>	4,3x10 <sup>-4</sup>	2,1x10 <sup>-3</sup>	0,11	1,9
	Mâchefer	7,1x10 <sup>-3</sup>	5,8x10 <sup>-4</sup>	8,0x10 <sup>-4</sup>	8,5x10 <sup>-3</sup>		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Témoin	35	18	11	64	118	54
	Mâchefer	145	25	7	177		

position et de la valeur du pH (7) de ces percolats. Il aurait été intéressant d'effectuer ces mêmes tests au début de l'étude, période durant laquelle des concentrations plus élevées ont été mesurées dans les percolats.

*Apport sur un sol*

Il nous a paru intéressant d'étudier l'apport des mâchefers sur le sol qui se trouverait sous la chaussée. Or, la mesure n'a pu être effectuée sur le terrain car les chaussées sont isolées de l'environnement par une géomembrane. Ainsi, un scénario a été envisagé. En se plaçant dans les conditions les plus défavorables, on imagine que les éléments les plus toxiques (arsenic, cadmium, chromeVI, mercure et plomb) libérés en trois ans par les mâchefers s'accumulent en surface dans une couche de 10 cm d'épaisseur d'un sol. La quantité q (mg/kg de MS) en éléments apportée par les percolats de la chaussée contenant les mâchefers et se retrouvant dans cette couche est obtenue par la relation 2.

$$q = Q \times m / m_{sol} \tag{2}$$

où :

Q : quantité cumulée libérée de la chaussée contenant les mâchefers après trois ans (mg/kg de MS),

m : masse sèche des matériaux dans les chaussées (kg),

m<sub>sol</sub> : masse d'un sol (densité de 1500 kg/m<sup>3</sup>) dans la couche de 10 cm sous la chaussée (31 500 kg).

Les quantités calculées ainsi pour chaque éléments ont été comparées à des teneurs en éléments dans des roches et des sols données par la littérature (tableau 7).

Les valeurs calculées à partir des quantités mesurées dans les percolats sur trois ans de suivi restent bien inférieures à celles mesurées dans des roches ou des sols non contaminés. Par conséquent, on peut supposer que d'un point de vue quantitatif, la chaussée contenant les mâchefers n'apporte pas des quantités importantes en éléments qui pourraient contaminer un sol.

**Tableau 7 : Teneurs en éléments dans 10 cm d'un sol calculées avec les quantités percolées - Comparaison avec des teneurs dans des roches et des sols (mg/kg de MS).**

	As	Cd	CrVI	Hg	Pb
<i>Teneurs dans un sol en contact avec les percolats</i>					
	0,26	6,87x10 <sup>-4</sup>	1,33x10 <sup>-2</sup>	4,24x10 <sup>-4</sup>	1,77x10 <sup>-2</sup>
<i>Roches [8]</i>					
			(Cr total)		
1,5 – 10	0,09 - 0,16		11 – 317	0,02 - 0,45	0,9 - 32
<i>Sols non contaminés [9]</i>					
			(Cr total)		
1 – 5	0,01 - 0,7		19 – 90	0,03 - 0,3	2 - 200

*Apport à long terme*

Pour la plupart des paramètres, les quantités cumulées extraites ont tendance à se stabiliser dans le temps. Il est intéressant d'extrapoler cette tendance sur une échelle de temps afin de déterminer les quantités susceptibles d'être libérées durant 15 ans (Qlibérée 15 ans). Les quantités libérées durant les trois premières années ainsi que celles susceptibles d'être libérées entre la quatrième et la quinzième année ont été comparées avec la quantité totale libérée en 15 ans. Cette dernière quantité a également été comparée à la quantité lixiviée à t = 0.

Cette extrapolation a été faite pour les paramètres dont les concentrations sont supérieures à la limite de détection et supérieures à celles obtenues pour le témoin (tableau 8).

**Tableau 8 : Quantités susceptibles d'être libérées par la chaussée contenant les mâchefers en 15 ans**

	Quantités libérées (mg/kg de MS)		% libéré sur 15 ans		Qlibérée 15 ans/Qlix (%)
	3 ans	15 ans	1 - 3 ans	4 - 15 ans	
As	3,0x10 <sup>-2</sup>	5,8x10 <sup>-2</sup>	52	48	-
COT	18	30	60	40	10,4
Cl <sup>-</sup>	249	366	68	32	-
Pb	8,5x10 <sup>-3</sup>	1,6x10 <sup>-2</sup>	53	47	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	177	312	57	43	79,4

Dans l'hypothèse où la tendance reste constante dans le temps, on observe une plus grande proportion libérée durant les trois premières années. Lorsque l'on compare les quantités percolées en 15 ans avec les quantités lixiviées, on constate que cette période ne suffit pas à extraire le carbone organique total et les sulfates lixiviables. Le temps nécessaire pour que ces deux paramètres soient libérés serait de 239ans pour le COT et de 18 ans pour les sulfates.

**Les lysimètres**

Grâce à trois essais menés de façon identique sur une durée plus ou moins longue, il a été possible d'étudier la reproductibilité des essais. D'une manière générale, on n'observe pas de grandes différences d'un essai à l'autre pour le pH, les chlorures, les sulfates et le COT. Les différences observées dans le cas de la DCO et de la DBO5 ont été attribuées au mode de conservation des échantillons et aux difficultés que présente le dosage de ces deux paramètres.

D'autre part, une influence du débit d'eau d'arrosage n'a pas été observée pour la valeur du pH, de la DBO5 et de la DCO. Par contre, dans le cas des sulfates, les quantités libérées ont été moins importantes pour un débit faible. De nombreuses hypothèses ont été émises pour expliquer les résultats observés pour les chlorures et le COT mais il n'a pas été possible de conclure quant à une influence du débit. Enfin, il n'apparaît pas de différence que l'on applique ou non une pression sur le système.

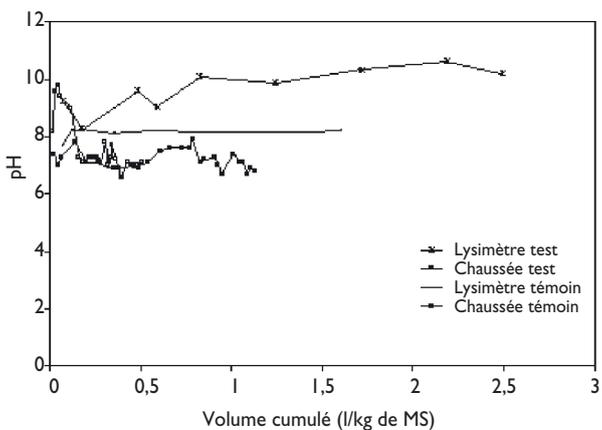
**Comparaison des résultats obtenus sur les chaussées et en lysimètre**

Afin de rendre homogènes les résultats obtenus pour les lysimètres et par la suite de pouvoir les comparer à ceux des chaussées expérimentales, les quantités extraites (mg/kg de MS) ont été exprimées en fonction des volumes percolés cumulés (litres/kg de MS). Les résultats obtenus pour les chaussées expérimentales ont été comparés à ceux obtenus pour l'essai 4 en lysimètre qui a été suivi sur une période plus longue.

*Le pH (figure 6)*

On observe dans un premier temps que les valeurs du pH mesurées dans les percolats des chaussées sont inférieures à celles des lysimètres excepté en début de suivi pour la chaussée témoin pour laquelle les valeurs de pH sont basiques (pH = 10). Les valeurs basiques observées pour les lysimètres étaient prévisibles car le pH des lixiviats obtenus sur les mâchefer à t = 0 est compris entre 10,4 et 10,8 et l'eau utilisée pour les lixiviations et pour l'arrosage des lysimètres a une composition identique. Ce n'est pas le cas pour les chaussées où les valeurs du pH de la pluie ne sont pas constantes dans le temps.

Les valeurs du pH plus basses observées dans le cas des chaussées ne peuvent pas s'expliquer par la présence des graves naturelles car après lixiviation de ces matériaux, on obtient des pH similaires pour les graves utilisées sur le site de Brest (7,1 – 7,5) et dans les lysimètres (7,6). De plus, les valeurs du pH mesurées pour la chaussée témoin en début de suivi sont également basiques. La différence de la com-



**Figure 6 : Comparaison de la valeur du pH obtenue pour les chaussées et les lysimètres**

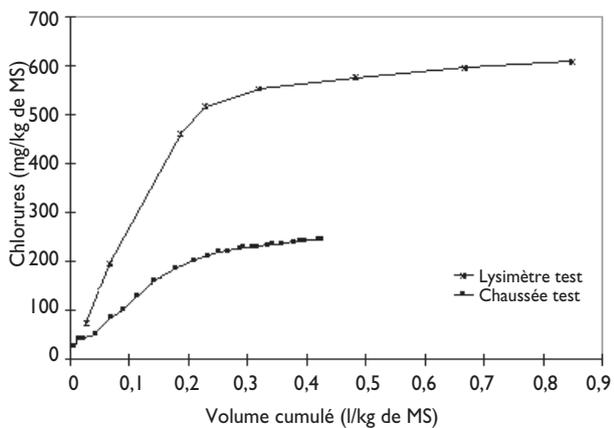
position d'eau d'arrosage peut peut-être expliquer les deux courbes différentes obtenues pour les chaussées et les lysimètres. L'eau arrosée sur les lysimètres est plutôt acide (5,6). L'eau de pluie qui arrose le site expérimental a une valeur de pH se situant autour de la neutralité (6,6), voire basique à certains moments.

Des réactions de précipitation et de complexation des ions hydroxydes avec les composants du mâchefer pourraient peut-être expliquer ce phénomène.

*Les anions*

Tout d'abord, dans le cas des chlorures (figure 7), on observe des courbes ayant la même tendance pour les lysimètres et les chaussées. Les fortes quantités libérées en début d'étude deviennent moins importantes, ce qui se caractérise par un palier. On observe cependant un décalage entre les deux courbes qui n'a pas pu être expliqué par les résultats obtenus pour les témoins pour lesquels les quantités cumulées libérées sont très faibles par rapport à celles des tests. Ce décalage ne s'explique pas non plus par la différence de composition de l'eau versée sur les lysimètres et précipitée sur les chaussées car l'eau de pluie analysée sur le site est plus chargée en chlorures que l'eau arrosée sur les lysimètres.

On pourrait également penser corréler ces résultats aux différences de valeurs de pH observées. Or, d'après l'étude menée par Stegemann et al., les quantités de chlorures libérées sont indépendantes de la valeur du pH [5].

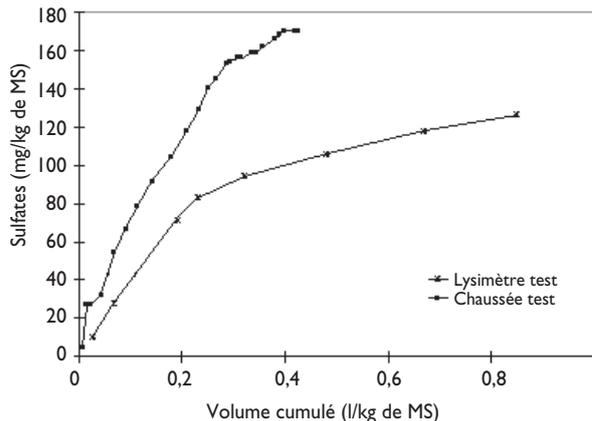


**Figure 7 : Comparaison des quantités de chlorures libérées pour la chaussée et pour le lysimètre contenant les mâchefers**

Dans le cas des sulfates (figure 8), on observe tout d'abord des courbes ayant la même tendance pour les lysimètres et les chaussées. On observe également un décalage entre les deux courbes avec des concentrations en sulfates plus importantes dans les percolats des chaussées. L'écart entre la chaussée et le lysimètre peut en partie s'expliquer par la forte concentration mesurée dans les percolats de la chaussée en début de suivi (3000 mg/l) par rapport aux autres concentrations qui sont de l'ordre de 800 mg/l (figure 5). Cette valeur a pour conséquence d'augmenter considérablement la pente de la courbe en début de suivi.

Les différences observées pourraient également être expliquées par les résultats obtenus pour les témoins dont les quantités cumulées libérées ne sont pas négligeables par rapport au test surtout dans le cas des chaussées (11 mg/kg de MS pour le lysimètre et 64 mg/kg de MS pour la chaussée).

Enfin, les valeurs de pH différentes obtenues pour le lysimètre et la chaussée peuvent influencer la libération des sulfates. En effet, si l'on considère qu'une partie des sulfates est liée au calcium du mâchefer, le gypse formé est moins soluble à pH 10 qu'à pH 8.



**Figure 8 : Comparaison des quantités de sulfates libérées pour la chaussée et pour le lysimètre contenant les mâchefers**

#### Les autres paramètres

Dans le cas du COT, on observe des courbes ayant la même tendance pour les lysimètres et les chaussées. Le décalage observé entre les deux courbes n'a pas pu être expliqué ni par les résultats obtenus pour les témoins, ni par les deux types de graves différentes utilisés, ni par la différence de composition de l'eau versée sur les lysimètres et précipitée sur les chaussées.

En ce qui concerne la DCO et la DBO5, il semblerait qu'il ne soit pas possible de comparer les résultats obtenus dans le cas des chaussées et des lysimètres car l'environnement extérieur (contamination possible) ainsi que la manière de conserver les échantillons sont des facteurs qui influencent fortement leur détermination.

En ce qui concerne les autres paramètres (arsenic, cadmium, chrome VI, mercure, plomb, hydrocarbures, indice phénol, cyanures et fluorures), les concentrations mesurées dans les percolats des lysimètres sont inférieures aux limites de détection.

## CONCLUSIONS

L'étude de la valorisation de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères a été effectuée à la fois dans les conditions réelles (chaussées expérimentales) et en laboratoire (lysismètres).

Le suivi de deux chaussées expérimentales sur une durée de trois ans a permis d'observer un apport faible des mâche-

fers sur la composition des eaux de percolation et une absence de toxicité en fin d'étude. Il a également été montré que le test de lixiviation normalisé préconisé pour déterminer le potentiel polluant d'un mâchefer n'est pas représentatif de ce qui se passe dans la réalité mais offre toutefois une marge de sécurité importante.

Les tests effectués en lysimètres ont montré des concentrations en arsenic, cadmium, chrome VI, mercure, plomb, hydrocarbures, indice phénol, cyanures et fluorures dans les percolats inférieures aux limites de détection. Les essais sont relativement reproductibles entre eux. D'autre part, il ne semble pas y avoir une influence du débit d'eau d'arrosage excepté pour les sulfates. De plus, il n'apparaît pas de différence lorsque l'on applique ou non une pression sur le système. Enfin, en comparant les résultats obtenus pour les chaussées et les lysimètres, il n'a pas pu être possible pour le moment d'établir clairement une corrélation. Des essais supplémentaires sont nécessaires pour approfondir et mieux comprendre les résultats obtenus. Il serait par exemple intéressant de tenir compte de la composition de l'eau d'arrosage ou de faire varier l'équivalence de temps entre les chaussées et les lysimètres. D'autre part, il faut également considérer la différence d'apport d'eau (pluie sur les chaussées et arrosage manuel sur les lysimètres) ainsi que la structure différente des deux ouvrages à l'origine de chemins préférentiels plus marqués dans les lysimètres du fait de l'effet de la paroi.

\* **Véronique Bruder-Hubscher, Florence Lagarde, Maurice Leroy,**

Laboratoire de chimie analytique et minérale (LCAM) - 25, rue Becquerel - 67087 Strasbourg

\*\* **Magali Midy, François Enguehard,**

Centre de recherche pour l'environnement, l'énergie et le déchet (Creed) - 291, avenue Dreyfous Ducas - 78520 Limay

#### Remerciements :

Nous adressons nos remerciements à Mademoiselle V. Mayeux et à Monsieur Ph. Bajeat de l'ADEME pour leurs précieuses suggestions, à Mademoiselle K. Wicker pour la mise en œuvre des chaussées, à Mesdames I. Paris et C. Coughanowr qui ont supervisé une partie de l'étude, à Monsieur R. Lassartesses et Mademoiselle P. Adam pour leur collaboration et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à cette étude.

## Bibliographie

- Ministère de l'environnement : Circulaire sur l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains, DPPR/SEI/BPSIED/FC/FC n°94-IV-I du 9 Mai 1994 - Paris : ministère de l'Environnement, 1994.
- NF X 31-210 Déchets : Essais de lixiviation, Association française de normalisation (Afnor), Paris, 1992.
- Wicker K., *Compte rendu d'avancement du Programme de Recherche sur les mâchefers n° 9 (Document Creed)*, 1995.
- Corvin D.L., Le Mert R.D., *Construction and evaluation of an inexpensive weighing lysimeter for studying contaminant transport*, *Journal of Contaminant Hydrology*, **15**, 107-123, 1994.
- Stegemann J.A., Schneider J., Baetz B.W., Murphy K.L., *Lysimeter washing of MSW incinerator bottom ash*, *Waste Management and Research*, **13**, 149-165, 1995.
- Bergström L., *Use of lysimeters to estimate leaching of pesticides in agricultural soil*, *Environmental Pollution*, **67**, 325-347, 1990.
- Hubscher V., Coughanowr C., *Impact des mâchefers utilisés en technique routière (Document Creed)*, 1996.
- Merian E., *Metals and their compounds in the environment. Occurrence, analysis and biological relevance*, VCH, ISBN 3-527-265216X, 1438 pages, 1991.
- Baker D.E., Chesnin L., *Chemical monitoring of soils for environmental quality and animal and human health*, *Adv. Agron.*, **27**, 305-374, 1975.