

# Carbonatation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères : étude pilote et modélisation des effets thermiques

KAIBOUCHI Sonia, BROU Jean-Sébastien, BLANC Denise, GERMAIN Patrick, MOSZKOWICZ Pierre  
Laboratoire d'analyse environnementale des procédés et des systèmes industriels (LAEPSI)  
INSA de Lyon -20, avenue Albert Einstein - 69621 Villeurbanne Cedex

La carbonatation des mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM) est la principale réaction chimique qui concourt à leur stabilisation lors de leur maturation. Dans les conditions réelles, les mâchefers sont entreposés et soumis aux conditions atmosphériques pendant des durées pouvant atteindre plusieurs mois. La carbonatation de la portlandite, composé majeur des mâchefers, joue notamment un rôle important, en réduisant la fraction soluble et en induisant un abaissement du pH des solutions aqueuses en contact avec le matériau. Un résultat bénéfique est alors la diminution des solubilités de certains métaux lourds (Pb, Zn...) et la réduction du risque de leur mobilisation, ce qui permet la valorisation des MIOM en travaux publics.

L'objectif de l'étude est de quantifier à l'échelle pilote la réaction de carbonatation des mâchefers, en caractérisant les volumes de gaz carbonique susceptibles de réagir avec le solide, et en mettant en évidence les différents paramètres pouvant influencer ce phénomène de carbonatation. Le dispositif expérimental est constitué d'un cylindre contenant environ 10 dm<sup>3</sup> de MIOM et pouvant être balayé par un courant de CO<sub>2</sub> pur. Cinq thermocouples permettent de suivre les températures du gaz à différents niveaux et à la sortie de pilote. En effet, la réaction de carbonatation est exothermique et la donnée des variations des températures peut permettre d'identifier les caractéristiques thermodynamiques et cinétiques de cette réaction, dans les différentes conditions expérimentales du pilote. Cette démarche nécessite le développement d'un modèle thermique du procédé. Les résultats obtenus permettent de confirmer le rôle prépondérant de la carbonatation de la portlandite. Le front de carbonatation qui progresse dans le pilote entraîne une montée brutale de la température, suivie par un refroidissement contrôlé par la conduction.

La méthodologie ainsi mise en œuvre peut permettre de caractériser le potentiel de « carbonatibilité » d'un MIOM, paramètre utile pour la maîtrise du procédé de maturation mis en œuvre sur le terrain.

## Mots-clefs

*mâchefers, carbonatation, effets thermiques, portlandite.*

Carbonation of the bottom ashes resulting from the incineration of municipal solid waste (MSWI) is the main chemical reaction occurring during their weathering. In real conditions, MSWI weathering consists in a several months storage under atmospheric conditions. The carbonation of portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub>) which is the major calcium compounds permit to reduce the soluble fraction and the pH of the aqueous solutions in contact with material. As a matter of fact, solubility of certain heavy metals (Pb, Zn...) is reduced and the risk of their mobilization is also reduced.

The aim of the study is to quantify bottom ashes carbonation, by characterizing volumes of carbon dioxide likely to react with the solid. A lab-scale pilot was used. It was essentially composed by a metallic cylinder which contains approximately 10 dm<sup>3</sup> of MSWI, which can be swept by a pure CO<sub>2</sub> flow. Gas temperature was measured at 5 points. As a matter of fact, carbonation reaction is exothermic and temperature evolutions permit to obtain thermodynamic and kinetic characteristics of this reaction. Heat transfers in pilot were modelled to obtain these characteristics.

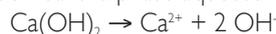
Results obtained permit to confirm the role of portlandite. Inside the pilot, the carbonation progress according to an ascending face current. So that temperature increase very quickly and then decrease slowly controlled by conduction.

## INTRODUCTION

La maturation est une étape clé pour la valorisation des mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM). Ce processus permet de diminuer le risque de mobilisation des polluants contenus dans ces matériaux soumis aux aléas de leur mise en œuvre, par exemple en techniques routières [Kayabali K., 2000], [Drouadaine I., 1997], [Goacolou H., 1995]. Le procédé « industriel » est généralement très simple et consiste à laisser le mâchefer exposé aux conditions atmosphériques pendant quelques mois [Lac C., Fourcy P., 2001]. Les principaux mécanismes chimiques impliqués sont l'oxydation des ferrailles et des imbrûlés et la carbonatation des éléments alcalins et alcalino-terreux [Freyssinet P., 2002], [Freyssinet, 1998], [Blanchard J.-M., 1989]. Ces réactions exothermiques provoquent un

échauffement pendant les trois premiers mois de la maturation. Une conséquence de la carbonatation est une diminution du pH de l'eau interstitielle contenue dans la porosité du matériau, qui passe généralement de valeurs proches de 11/12 à des valeurs de l'ordre de 8/9. A ces pH, les solubilités des principaux métaux lourds présents dans les mâchefers sont fortement réduites [Fournier P., 1995], [Johnson C.A., 1995]. La littérature rapporte en général que la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) est le principal composé du calcium qui réagit avec le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) atmosphérique pendant la maturation [Freyssinet P., 1998], [Anthony E.J., 2000]. Cette réaction a lieu en phase aqueuse et peut être décomposée en deux étapes :

- dissolution dans la phase aqueuse :



- carbonatation :



Pour caractériser ce processus de carbonatation, nous avons mis en contact le mâchefer avec du  $\text{CO}_2$  pur dans un pilote de laboratoire ouvert pour le gaz. C'est en suivant les évolutions des températures que la cinétique de la réaction exothermique peut être déterminée, en développant un modèle couplant la réaction chimique et les effets thermiques.

## MATÉRIELS ET MESURES

Le pilote installé (figure 1) est constitué par un cylindre de diamètre interne 0,2 m en acier inox (épaisseur 3 mm). L'espace pouvant être rempli de mâchefer a un volume de 10 L. La hauteur de remplissage a été fixée à 17,5 cm. Le pilote est étanche à l'air de manière à éviter toute réaction d'oxydation.

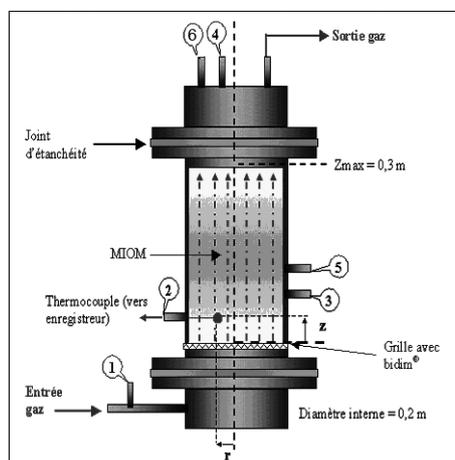


Figure 1 : Schéma du pilote de carbonatation

Le mâchefer étudié a été obtenu dans une usine d'incinération de déchets municipaux située à Lyon. Le mâchefer a été déferrallé et présente un aspect homogène. Les échantillons ont été prélevés sur l'aire de stockage de l'usine et sont « âgés » de quatre mois. La composition élémentaire a été déterminée par analyse ICP-AES (Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy) après digestion avec du métaborate de lithium suivie par une attaque acide. Les principaux résultats sont rapportés dans le

COMPOSÉ	% MASSIQUE	COMPOSÉ	% MASSIQUE
$\text{SiO}_2$	49,3	$\text{MgO}$	2,6
$\text{CaO}$	16,3	$\text{Na}_2\text{O}$	6,0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7,5	$\text{K}_2\text{O}$	1,1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,6	$\text{TiO}_2$	0,6
$\text{MnO}$	0,1	$\text{P}_2\text{O}_5$	1,2

Tableau 1 : Analyse du MIOM en éléments majeurs

tableau 1. La valeur de la conductivité thermique a été évaluée par des mesures préalables, sans réaction chimique, au sein du mâchefer. Une valeur de  $l = 0,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  constitue une première estimation. La teneur en eau du mâchefer a été déterminée par séchage pendant 48 heures à une température égale à  $105^\circ\text{C}$ . Sa valeur est de 15 % en masse pour les échantillons testés.

Quatre thermocouples de type T ont été placés au cœur du mâchefer ( $r = 0$ ), à différentes hauteurs ( $z = 0,5, 4, 9$  et  $14$  cm). Les températures du gaz à l'entrée et à la sortie du pilote ont aussi été mesurées. Les températures en différents points de l'enveloppe métallique ont été mesurées avec des thermocouples de paroi de type K. L'acquisition et le stockage de toutes ces mesures constituent l'essentiel de la base de données sur laquelle s'appuie l'identification de la cinétique et de l'effet thermique du processus de carbonatation.

## MODÉLISATION

L'objectif de la modélisation est de pouvoir interpréter les résultats obtenus en mesurant les évolutions des températures au sein du mâchefer pendant sa carbonatation en termes de suivi du déroulement de cette réaction. La base de la modélisation est constituée d'un bilan thermique et d'un bilan matière qui intègrent les transferts de chaleur et la réaction chimique. Le mâchefer est un milieu poreux et les deux phases solide (humide) et gaz (air,  $\text{CO}_2$  ou mélange des deux) doivent être considérées.

### Hypothèses générales constitutives du modèle

Les phénomènes physiques et chimiques se déroulent dans trois phases (solide, aqueuse et gazeuse), mais la phase aqueuse étant immobilisée dans la microporosité du mâchefer, nous n'avons considéré que deux phases : solide (humide) et gazeuse. La conductivité thermique du gaz étant très inférieure à celle du solide, la conduction dans la phase gazeuse est négligée. Les transferts radiatifs sont négligés aux températures de l'expérimentation.

La réaction de carbonatation est supposée instantanée, ce qui est confirmé par l'observation d'un déplacement de type piston d'un front raide de carbonatation.

Malgré le caractère relativement hétérogène du mâchefer, il a été supposé que l'écoulement du gaz reste de type piston, sans chemins préférentiels, et que les équations peuvent être écrites en deux dimensions spatiales ( $r$ , distance à l'axe de symétrie, et  $z$ , coordonnée verticale à partir de la base du pilote).

Les pertes de charge sont négligeables.

**Modélisation thermique****Conservation de l'énergie dans la phase solide :**

$$(1 - \varepsilon) * \rho * C_p * \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda * (1 - \varepsilon) * \Delta T + h_{int} * dS * (\theta - T) + (1 - \varepsilon) * \alpha * W_r$$

où :

 $\Delta T (r,z)$  : Laplacien de  $T(z,r)$  $\varepsilon$  : coefficient de porosité $\rho$  : masse volumique du mâchefer $\lambda$  : transmissivité thermique du mâchefer $\theta (r,z)$  : température du gaz $T(r,z)$  : température du mâchefer $C_p$  : capacité calorifique massique du mâchefer $h_{int} * dS$  : coefficient de transfert gaz-solide $W_r$  : densité de puissance thermique de la réaction chimique

Les différents termes de l'équation traduisent les phénomènes d'accumulation d'énergie ou variation d'énergie interne, de conduction à l'intérieur de la phase solide, d'échange convectif entre la phase solide et la phase gazeuse, et de dégagement de chaleur par la réaction de carbonatation (avec :  $\alpha = 1$  si la réaction s'effectue,  $\alpha = 0$  si la réaction n'a pas débuté ou est terminée). La condition initiale est la suivante :

$t = 0, T(r,z) = T_\alpha \quad \forall r \text{ et } z$ , avec  $T_\alpha =$  température ambiante

La paroi latérale du réacteur est soumise à une condition aux limites de Fourier. En effet, au niveau de la paroi latérale, le flux conductif latéral entre le solide poreux et l'ambiance extérieure, à travers la paroi métallique, peut être caractérisé par un coefficient de transfert global  $h_{ext}$  :

$$r = R \quad \forall t \text{ et } z \quad -\lambda * \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R} = h_{ext} * (T_p(z,t) - T_\alpha)$$

Sur l'axe de révolution du cylindre, le flux conductif en  $r = 0$  est nul :

$$r = 0 \quad \forall t \text{ et } z \quad -\lambda * \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=0} = 0$$

**Conservation de l'énergie en phase gaz :**

$$\varepsilon * \rho' * C_p' * \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\varepsilon * v * \frac{\partial \theta}{\partial z} * \rho' * C_p' - h_{int} * dS * (\theta - T)$$

où :

 $\varepsilon$  : coefficient de porosité $\rho'$  : masse volumique du gaz $T(r,z)$  : température du mâchefer $\theta (r,z)$  : température du gaz $C_p'$  : capacité calorifique massique du mâchefer $v$  : vitesse du gaz

Les différents termes de l'équation traduisent les phénomènes d'accumulation d'énergie, de transport de chaleur dû au flux de gaz,

d'échange convectif entre la phase gaz et la phase solide.

Au début de l'expérience, la phase gaz et la phase solide du mâchefer sont supposées à l'équilibre et donc à la même température :

$$t = 0 \quad \theta = T_\alpha \quad \forall r \text{ et } z$$

Le gaz est injecté par le fond du réacteur. La température de la phase gaz en  $z=0$  peut donc être supposée constante (condition de Dirichlet) :

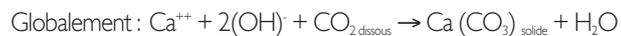
$$z = 0 \quad \theta = \theta_{gaz} \quad \forall t \text{ et } r, \text{ avec } \theta_{gaz} = \text{température d'entrée du gaz}$$

**Modélisation de la réaction de carbonatation**

Les MIOM contiennent différents composés calciques, et principalement la portlandite. Celle-ci provient de la chaux vive (CaO) produite dans le four par calcination des carbonates de calcium présents dans les déchets. La chaux vive est ensuite éteinte au moment de la trempe des MIOM en sortie de four pour les refroidir :



La portlandite réagit avec le  $\text{CO}_2$  dissous pour former du carbonate de calcium (ou calcite,  $\text{CaCO}_3$ ) selon les réactions suivantes (ces réactions peuvent aussi avoir lieu avec d'autres ions présents en faibles quantités tels que  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ) :



La cinétique de carbonatation est alors contrôlée par les transferts solide-liquide et gaz-liquide de dissolution en phase aqueuse du calcium et du  $\text{CO}_2$ , eux-mêmes limités par les solubilités de ces composés. D'autres composés du calcium et d'éléments alcalins et alcalino-terreux présents dans le mâchefer peuvent être carbonatés. Nous avons cependant supposé dans une première approche que la carbonatation de la portlandite produit l'essentiel de l'effet thermique qui est observé. La cinétique de la réaction de carbonation est alors un élément essentiel de la modélisation, car elle contrôle la vitesse de progression d'un « front de carbonatation » qui a été observé. Ainsi, lorsque le  $\text{CO}_2$  entre dans le pilote, il est consommé par la réaction dès qu'il rencontre le mâchefer. Puis, il progresse au fur et à mesure que la portlandite est consommée.

Dans un volume élémentaire d'épaisseur  $dz$ , le bilan matière s'écrit en tenant compte de la stœchiométrie de la réaction :

$$\frac{S_o}{M_{\text{Ca(OH)}_2}} * A * dz = \frac{\Phi}{M_{\text{CO}_2}} * dt$$

où :

$S_o$  ( $\text{g/m}^3$  de mâchefer) : concentration massique en  $\text{Ca(OH)}_2$  disponible dans le MIOM

$M_{\text{Ca(OH)}_2}$  ( $\text{g/mol}$ ) : masse molaire de la portlandite

$A$  (m<sup>2</sup>) : aire de la section du pilote  
 $dz$  (m) : épaisseur du volume élémentaire  
 $\Phi$  (g/s) : flux massique du CO<sub>2</sub>  
 $M_{CO_2}$  (g/mol) : masse molaire du CO<sub>2</sub>  
 $dt$  : pas de temps élémentaire

On obtient alors l'expression de la vitesse de déplacement du

$$|v|_{front} = \frac{dz}{dt} = \frac{\Phi}{S_o * A} * \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{CO_2}} \quad \text{front de carbonatation :}$$

Dans cette expression,  $S_o$  n'est pas connu a priori mais peut être

$$n_{Ca(OH)_2 \text{ consommées}} = n_{CO_2 \text{ absorbées}} = \frac{\rho * V}{M_{Ca(OH)_2}}$$

estimé à partir de la valeur mesurée de la quantité totale de CO<sub>2</sub> qui est « absorbée » par la carbonatation du mâchefer :

$$S_o = n_{Ca(OH)_2 \text{ consommées}} * M_{Ca(OH)_2} * \rho_{MIOM}$$

où :  
 $n_{Ca(OH)_2 \text{ consommées}}$  : moles de Ca(OH)<sub>2</sub> consommées par kg de MIOM  
 $n_{CO_2 \text{ absorbées}}$  : moles de CO<sub>2</sub> absorbées par kg de MIOM  
 $\rho$  : masse volumique du CO<sub>2</sub> à 25°C  
 $V$  : volume de CO<sub>2</sub> absorbé par kg de MIOM  
 $M_{Ca(OH)_2}$  : masse molaire de la portlandite  
 $\rho_{MIOM}$  : masse volumique du MIOM

Le couplage entre le modèle thermique et le modèle réactionnel repose donc sur deux hypothèses :  
 - un déplacement du front de réaction à une vitesse  $v$  proportionnelle à la vitesse de réaction  
 - une puissance thermique  $W_r$  elle aussi proportionnelle à la vitesse de réaction (la valeur de l'enthalpie de réaction de carbonatation de la portlandite peut dépendre du contexte chimique : on relève des valeurs allant de -59 kJ.mol<sup>-1</sup> (à pH = 12) à -92 kJ.mol<sup>-1</sup> (à pH = 7) [Bodenan F., 2000].

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

### Principaux résultats expérimentaux

La figure 2 représente les évolutions des températures en quatre points situés au sein du mâchefer ( $z = 0.5 ; 4 ; 9$  et  $14$  cm). Les montées des températures sont assez brutales et correspondent à une même vitesse, ce qui valide dans une certaine mesure l'hypothèse d'un front réactif exothermique. Les décroissances des températures sont lentes, là aussi avec des vitesses pratiquement égales. Le refroidissement est principalement contrôlé par les transferts de chaleur du solide chaud vers le gaz plus froid qui le traverse.

Les courbes de la figure 3 mettent en relation les variations de débit

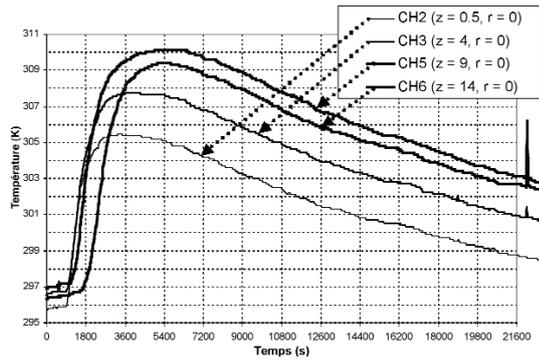


Figure 2 : Évolutions des températures au sein du MIOM

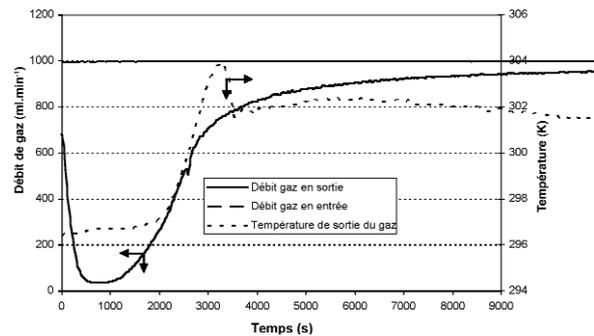
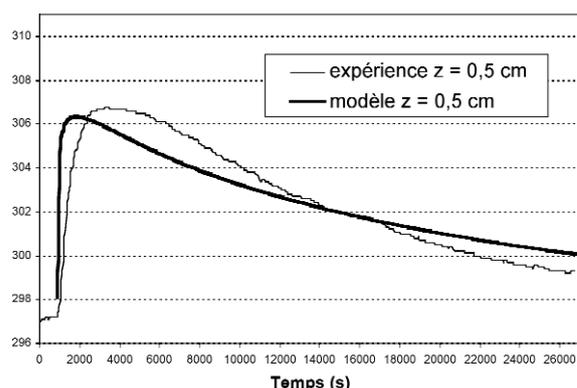
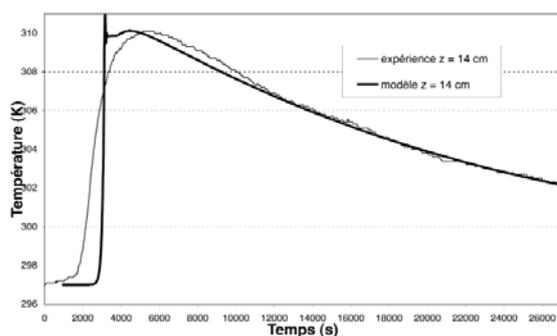


Figure 3 : Variations du débit et de la température du gaz en sortie du réacteur

et de température du gaz en sortie du pilote. Trois phases principales sont observables. La première correspond à la purge du pilote. Le débit de sortie chute jusqu'à atteindre une valeur proche de 0 pendant que la carbonatation s'amorce. Lors de cette phase, la température du gaz en sortie reste constante. En effet elle correspond alors à l'air qui était initialement présent dans le pilote avant le début de l'expérience et qui n'est pas réchauffé par la réaction de carbonatation. La seconde phase correspond à la période de carbonatation au sein du pilote. Le débit de sortie est quasi-nul, car le gaz entrant est totalement consommé par la réaction. La chaleur libérée par la réaction provoque un début d'échauffement du gaz. La troisième phase correspond à une augmentation progressive du débit de gaz en sortie du réacteur. Cette évolution relative l'hypothèse du front de carbonatation : en effet, en « arrière » du front de carbonatation, il reste de la portlandite et du CO<sub>2</sub> peut encore être consommé par la réaction de carbonatation. En parallèle, la température de sortie du gaz augmente fortement car le gaz, dont le débit est faible, est fortement réchauffé par la réaction et au contact du solide chaud. A la fin de cette phase, on note une chute brutale de la température. Cette chute correspond à l'arrivée en tête du pilote du front de carbonatation. Enfin, débit et température reviennent lentement vers les valeurs limites (débit d'entrée du gaz et température ambiante) en absence de réaction.

### Validation de la modélisation

Les figures 4 et 5 présentent les courbes expérimentales et obtenues par simulation pour deux points situés à l'intérieur du pilote ( $z = 0,5$  cm ;  $r = 0$  cm) et ( $z = 14$  cm ;  $r = 0$  cm). Les simulations ont été obtenues après identification des trois paramètres ajustables

Figure 4 : Evolutions des températures expérimentales et simulées ( $z = 0,5$  cm)Figure 5 : Evolutions des températures mesurées et simulées ( $z = 14$  cm)

du modèle (par minimisation de l'écart quadratique entre résultats expérimentaux et simulés) :

- coefficient de transfert interne solide-gaz,  $h_{int} \cdot dS = 1000 \text{ W.m}^{-3} \cdot \text{K}$
- conductivité thermique du mâchefer,  $\lambda = 0,5 \text{ W/m.K}$
- enthalpie molaire de la réaction,  $\Delta H_r = -67 \text{ kJ/mol}$ .

Une étude de sensibilité a été menée pour ces trois paramètres : La valeur de la conductivité thermique influe très sensiblement sur le refroidissement du MIOM. Pour  $\lambda < 0,5 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , le refroidissement du mâchefer obtenu par simulation est plus lent que la réalité. Pour  $\lambda > 0,5 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , les températures maximales atteintes obtenues par simulation sont inférieures à celles atteintes dans l'expérience.

L'influence de la valeur de  $h_{int} \cdot dS$  est moins sensible que celle de la conductivité. Une valeur comprise entre 800 et  $1200 \text{ W.m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$  ne modifie pas très significativement les vitesses de refroidissement obtenues par la simulation. L'influence est plus sensible sur la température maximale obtenue en pied du pilote.

La sensibilité sur la valeur identifiée de  $\Delta H_r$  est forte car ce paramètre influe fortement sur les températures maximales obtenues par simulation. La valeur identifiée caractérise donc nettement l'effet thermique de la réaction de carbonatation. Elle est d'ailleurs cohérente avec la valeur théorique qui varie en fonction du pH<sup>[1]</sup>. Dans le pilote, le pH du milieu réactionnel évolue pendant la carbonatation dans une gamme qui peut provoquer une variation de l'enthalpie de réaction de l'ordre de 15 %. La valeur identifiée représente donc une valeur moyenne qui intègre cette variabilité. Un quatrième paramètre de la modélisation joue un rôle moindre : le coefficient de transfert  $h_{ext}$  à la paroi latérale du pilote, qui ne peut pas être identifié par la seule mesure des températures sur l'axe du

pilote. L'influence de ce paramètre serait sensible sur les profils radiaux de températures et sur le refroidissement final du pilote.

## CONCLUSIONS

Le suivi des températures dans un pilote de laboratoire de carbonatation d'un mâchefer a permis de caractériser les aspects thermocinétiques de la réaction. Les résultats expérimentaux confirment que la réaction de carbonatation de la portlandite est la réaction prépondérante et que la cinétique est contrôlée par les transferts gaz-liquide et solide-liquide, eux-mêmes limités par les solubilités du  $\text{CO}_2$  et du calcium dans la phase aqueuse. La modélisation couplant transferts thermiques et réaction chimique permet, même sous une forme simplifiée (hypothèse de la propagation d'un front de carbonatation instantanée), de bien rendre compte des principaux résultats expérimentaux et d'identifier quantitativement l'enthalpie de la réaction de carbonatation. Une amélioration nécessaire reste la levée de l'hypothèse simplificatrice du front de carbonatation instantanée, en introduisant une cinétique de réaction qui prendra en compte le fait que la portlandite n'est pas totalement accessible instantanément au  $\text{CO}_2$  dissous. Il sera alors possible d'obtenir les éléments nécessaires pour prévoir sur le plus long terme le déroulement de la réaction totale de carbonatation.

Cette expérience peut alors certainement être mise à profit pour l'élaboration d'une méthode de détermination d'un indicateur de « carbonatabilité » d'un mâchefer et d'un outil prévisionnel, qui serait utile pour permettre une meilleure gestion logistique de ces matériaux pendant la période de stockage sur la plateforme de maturation.

## Références

- Kayabali K, Bulus G. The usability of bottom ash as an engineering material when amended with different matrices. *Engineering Geology*, 2000, vol. 56, pp. 293-303.
- Drouadaine I, Pascual C., Seigneurie C., Jozon C. Valorisation des mâchefers d'incinération en technique routière : étude de l'impact environnemental et des performances mécaniques. *Revue Générale des Routes et des Aéroports (RGRA)*, 1997, n° 755, pp. 35-39.
- Goacolou H, Drouadaine I, Pascual C. & al. Pour la valorisation des mâchefers en travaux routiers. *Revue Générale des Routes et des Aéroports (RGRA)*, 1995, n° 729.
- Lac C., Fourcy P. Intérêts, enjeux et bilans des installations de maturation et d'élaboration des mâchefers. In : *Quel avenir pour les MIOM ?* 16-18 octobre 2001, Orléans : BRGM, 2001, pp. 17-22.
- Freyssinet P, Piantone P, Azaroual M. & al. Chemical changes leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash submitted to weathering. *Waste Management*, 2002, vol. 22, pp. 159-172.
- Freyssinet P, Piantone P, Azaroual M. & al. Evolution chimique et minéralogique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au cours de la maturation. Editions BRGM, 1998. 138 p.
- Blanchard J-M, Comel C., Navarro A. & al. Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. *TSM-L'eau*, 1989, vol. 84, n° 3, pp. 127-140.
- Fournier P, Fournier J., Bellaoui B., Pit R. Effet du pH sur les résultats de lixiviation. *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris*. 1995, t. 320, Série II, pp. 43-50.
- Johnson C.A, Brandenberger S, Baccini P. Acid neutralizing capacity of municipal waste incinerator bottom ash. *Environmental Science and Technology*, 1995, vol. 29, n° 1, pp. 142-147.
- Anthony E.J., Jia L., Roque W., Burwell S. Pacification of high calcic residues using carbon dioxide. *Waste Management*, 2000, vol. 20, pp. 1-13. Bodenan F., Pitone P., Azaroual M. et al. Maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères : mise au point d'un test prévisionnel. BRGM. RP-50001-FR, 2000, 56 p.