



**HAL**  
open science

# Comportement thermique des mâchefers à long terme : étude préliminaire

Laurent Guillou-Frottier

► **To cite this version:**

Laurent Guillou-Frottier. Comportement thermique des mâchefers à long terme : étude préliminaire. Colloque MIOM 2001 : Quel avenir pour les MIOM?, Oct 2001, Orléans, France. 2001. hal-01133041

**HAL Id: hal-01133041**

**<https://brgm.hal.science/hal-01133041>**

Submitted on 18 Mar 2015

**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.

# Comportement thermique des mâchefers à long terme : étude préliminaire

Laurent Guillou-Frottier

BRGM, Service des Ressources Minérales, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans, France.  
Tel : 02 38 64 47 91 ; e-mail : l.guillou-frottier@brgm.fr

## Résumé

- Ce travail présente une étude de faisabilité pour le montage d'un laboratoire expérimental, destiné spécifiquement à la **compréhension des processus thermiques** au cours de la maturation des mâchefers. A partir de quelques **courbes expérimentales** décrivant l'évolution de la température au sein d'un mâchefer soumis à une carbonatation accélérée (Bodéan et Piantone, 1999), une analyse critique est décrite (conditions de l'expérience, représentation biaisée de l'évolution thermique). Ces courbes sont alors analysées dans leurs détails, et il est montré que des **phénomènes insoupçonnés** peuvent être enregistrés thermiquement (présence de convection thermique, possibilité de présence de plusieurs réactions exothermiques, variations dans le processus de refroidissement selon la composition du mâchefer, etc).
- Une **modélisation théorique** du refroidissement d'une colonne de mâchefer est comparée avec les données expérimentales obtenues. Malgré la simplification du modèle (conduction pure dans une plaque isolée par les côtés), il est possible de prédire qu'au cours de la carbonatation, les **propriétés thermiques se modifient au cours du temps**, ce qui s'explique par l'apparition de minéraux néoformés. En particulier, la **diffusivité thermique** diminue d'un facteur 5 environ entre le début de l'expérience (le mâchefer est riche en « ferrailles ») et la fin de la carbonatation, où la valeur de la diffusivité se rapproche de celle des roches terrestres.
- La compréhension du comportement thermique d'un matériau soumis à des sollicitations **contrôlées** ne peut que valoriser et améliorer les informations obtenues sur l'évolution chimique et minéralogique de ce matériau. Dans le cas d'un mâchefer, le fait que les propriétés thermiques semblent évoluer de façon continue au cours du temps, nécessite une **approche expérimentale**, et si possible le développement d'une **approche numérique et théorique nouvelle** où les « constantes » thermiques seraient en réalité fonction du temps.
- L'approche expérimentale préconisée permettrait de mieux caractériser ce matériau complexe, de comprendre les transferts thermiques qui sont mis en jeu en fonction des diverses conditions initiales (composition, taux d'humidité, etc). Enfin, l'approche thermique devrait, à plus long terme, permettre de suggérer des **géométries optimales de stockage** afin de mieux appréhender les contraintes environnementales.

## Expériences préliminaires

- Au cours de l'année 1999, des expériences de laboratoire ont été menées dans le but de comparer un mâchefer frais d'un mâchefer carbonaté, par le biais d'un procédé de carbonatation accélérée (Bodéan et Piantone, 1999). Des mesures de pH ainsi que des mesures de température ont été réalisées. Dans cette procédure, la carbonatation accélérée se traduit par une montée brutale de la température, et le retour à l'équilibre se produit environ 6h après le début de l'expérience. Plusieurs colonnes (cylindres isolés) de mâchefers, dont la composition varie, ont ainsi été soumises simultanément à cette carbonatation (voir schéma). Deux séries d'expériences ont été menées. Dans la deuxième série, l'isolation thermique des colonnes était plus importante, et le temps de retour à l'équilibre plus long.
- Les courbes présentées à droite du schéma expérimental montrent les données thermiques telles qu'elles sont reproduites dans le rapport cité ci-dessus. Étant donné les objectifs de cette étude initiale, les auteurs n'ont pas représenté l'ensemble des données thermiques, et l'on ne retient que l'évolution générale de la température. Quelques points pourtant (commentés sous les figures) peuvent déjà être soulevés.

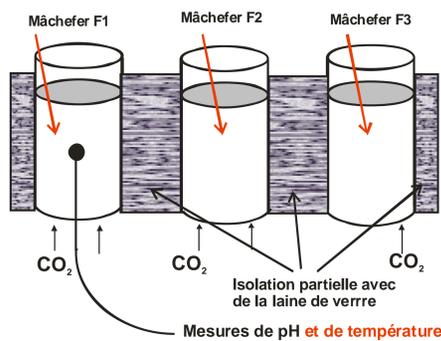
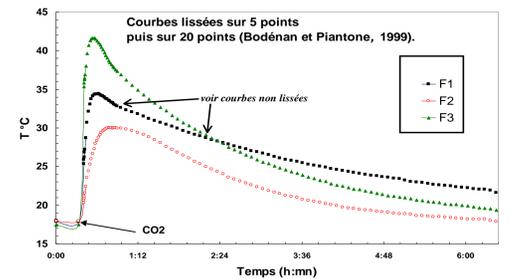
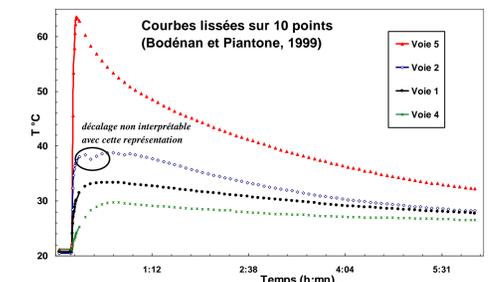


Schéma simplifié des conditions des expériences réalisées dans une salle non climatisée.

Les mesures sont effectuées toutes les 15 à 30s, mais ne sont pas toutes représentées sur les courbes de droite.



Cas des mâchefers frais appelés « F1 », « F2 » et « F3 », soumis à une carbonatation accélérée à  $t_0+15mn$  environ. Les 2 flèches indiquent des comportements atypiques (voir les courbes non lissées).



Cas de la 2ème série d'expériences où les mesures correspondent à différents mâchefers (« voies 1,2, 4 et 5 »). Les courbes lissées empêchent d'interpréter correctement les variations de la température. La signature entourée d'une ellipse ne correspond pas à un défaut de mesure (voir agrandissement à gauche).

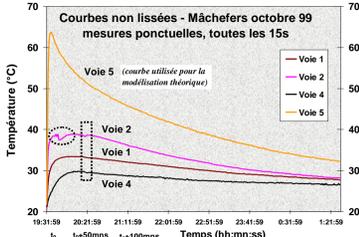
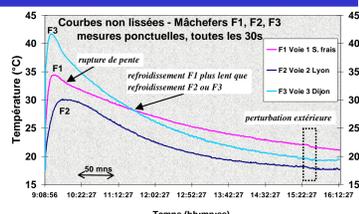
## Courbes non lissées

En utilisant l'ensemble des mesures de température, on distingue aisément le **bruit instrumental** des variations dues au type de transfert thermique.

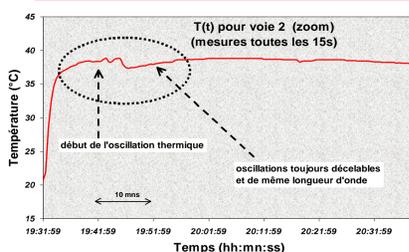
Les **sauts de températures** qui sont mesurés sur chacune des voies (encadrées en pointillés) correspondent à une perturbation extérieure.

La rupture de pente (F1) qui se traduit par un refroidissement plus lent que pour F2 ou F3 suggère la présence, pour ce mâchefer, d'une **nouvelle réaction exothermique** à  $t_0+25mn$ .

Selon la composition du mâchefer, le **maximum thermique peut varier d'un facteur 2** (comparer les voies 4 et 5). La courbe d'amplitude maximum (voie 5) est utilisée pour la modélisation théorique (ci-dessous).



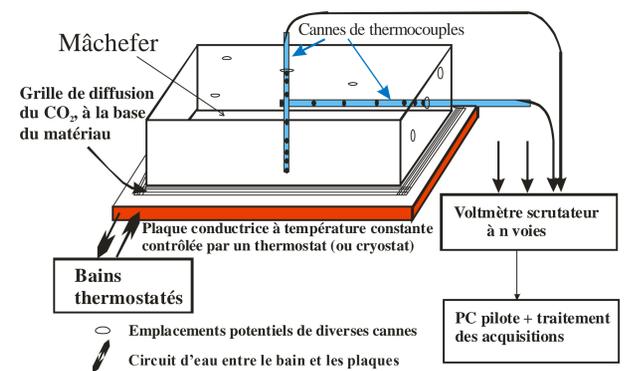
## Détails sur le décalage initialement interprété comme une erreur instrumentale.



Le fait que l'on dispose de mesures effectuées toutes les 30s permet de mieux caractériser l'oscillation identifiée sur la voie 2. Le caractère systématique de l'oscillation permet d'éliminer l'hypothèse d'un bruit expérimental chaotique. Il est proposé que cette signature, qui apparaît pour la température maximum, soit la manifestation d'une **convection thermique locale** (au niveau du thermocouple) ; cela devrait permettre de **tracer la présence de fluide en mouvement**.

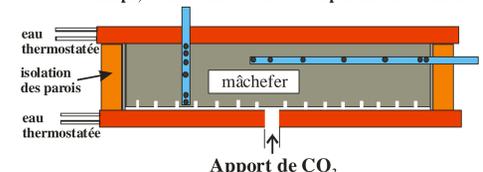
## Dispositif expérimental suggéré

Afin de mieux comprendre les processus thermiques mis en jeu dans les matériaux complexes comme les mâchefers, il est suggéré, en attendant le développement de nouvelles théories ou de nouveaux modèles numériques, de **travailler directement en laboratoire** sur l'analyse de l'évolution thermique d'un mâchefer soumis à diverses **conditions contrôlées** (composition, taux d'humidité, sollicitations thermiques, etc...). Un dispositif simple à mettre en œuvre est présenté ci-dessous :



La plaque supérieure n'est pas représentée pour la visibilité du schéma, mais serait identique à la plaque inférieure, permettant de maintenir une température constante. De même, l'alimentation en CO<sub>2</sub> n'est pas représentée, ni les manomètres et autres sondes de contrôle, facilement incorporables dans le dispositif (voir certains détails ci-dessous). La possibilité de déplacer les différentes cannes de thermocouples permettrait de « **cartographier thermiquement** » l'ensemble du dispositif et donc de mieux comprendre les processus thermiques en jeu (conduction pure, convection locale ou globale, etc...).

Vue en coupe, avec isolation et autre disposition des cannes :



## Modélisation théorique du refroidissement

Puisque la montée en température est brutale, on peut assimiler le mâchefer à un matériau qui **refroidit instantanément** à partir d'une température maximum  $T_1$ , pour retrouver sa température d'équilibre  $T_0$ . Afin de pouvoir reproduire au mieux l'évolution mesurée en laboratoire, la voie 5 est utilisée ( $T_1=63.1^\circ C$  et  $T_0=30.6^\circ C$ ). On se place dans l'hypothèse d'un **régime purement conductif**.

Une modélisation précise nécessiterait de considérer une colonne cylindrique, isolée sur les côtés et refroidie par ses faces supérieures. Toutefois, la solution analytique donnée par Carslaw et Jaeger (1959), fait intervenir des coefficients de transmission de chaleur, inconnus pour les mâchefers.

Dans une première approche, et puisqu'il y a isolation par les côtés, la **colonne est modélisée par une plaque semi-infinie, refroidie par ses faces supérieures**. La solution de conduction s'exprime cette fois-ci à l'aide de la diffusivité thermique  $K$  du matériau :

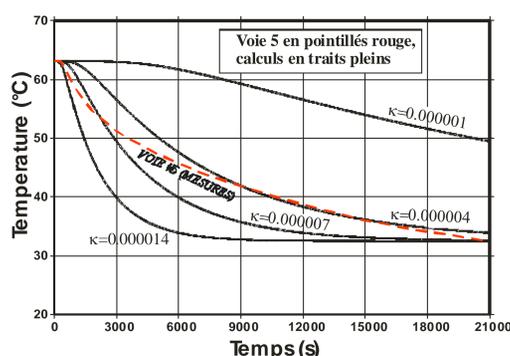
$$T(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2T_0}{n\pi} (1 - (-1)^n) \sin\left(\frac{n\pi z}{d}\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 K t}{d^2}\right)$$

On retrouve une somme de **gaussiennes**, allures visibles sur les courbes expérimentales.

Les résultats présentés sur la figure de droite ont été obtenus pour **différentes valeurs de la diffusivité thermique**  $K$ . Cette valeur entre dans l'expression de la constante de temps régissant la vitesse de refroidissement du mâchefer.

La figure contient, en pointillés rouge, les mesures obtenues sur la voie 5, afin de déterminer la valeur la plus adéquate de la diffusivité thermique.

Cas de la plaque semi-infinie, refroidie par ses faces horizontales



- Les courbes pleines montrent que le refroidissement est d'autant plus rapide que le milieu est conducteur (sa diffusivité thermique est grande).
- Par contre, il apparaît qu'au cours du temps, le mâchefer voit sa diffusivité diminuer d'un facteur 5 environ : alors qu'il est riche en ferrailles au début de la carbonatation, les minéraux néoformés ralentissent la vitesse de refroidissement.
- la diffusivité thermique d'un mâchefer est donc une fonction du temps

## References :

- Bodéan, F, et Piantone, P., Maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères : validation du mécanisme, mise au point d'un test prévisionnel, Rapport d'avancement semestriel, Convention d'études n°23/98 avec le MATE/DPPR, Note BRGM, DR/LPM, n°99/156, juillet 1999.
- Carslaw, H.S., et Jaeger, J.C., Heat conduction in solids, Oxford Univ. Press, 2<sup>nd</sup> ed., 510p., 1959.
- Freyssinet, P., Piantone, P., Azaroual, M., Itard, Y., Clozel, B., Baubron, J.-C., Hau, J.-M., Guyonnet, D., Guillou-Frottier, L., Pillard, F., et Jezequel, P., Evolution chimique et minéralogique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au cours de la maturation, Document du BRGM n°280, 146p., 1998.
- Guillou-Frottier, L., Etude de faisabilité sur la compréhension du régime thermique des mâchefers au cours de leur maturation, Note BRGM, REM/MESY, n°2000/015, 2000.