



## Fiche d'information sur la méthode « ReFire »

Août 2019

### Destruction thermique des dioxines et des furanes présents dans les cendres volantes issues d'UIOM traitées par lavage acide

État du projet	Fin du projet pilote
Gestion du projet	ZAR, Uni Berne
Installations participantes	KEBAG, KEZO
Durée du projet	07.2018 à 10.2019
Financement	KEBAG, KEZO, OFEV, cantons de Berne, Soleure et Zurich

#### 1 Contexte

Les cendres volantes issues d'usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) contiennent des métaux, qui devront être récupérés conformément à l'état de la technique en vertu de l'ordonnance sur les déchets (OLED) dès 2021. Ces cendres contiennent également divers composés organiques, notamment des polychlorodibenzo-*p*-dioxines et polychlorodibenzofuranes (PCDD/PCDF), ci-après dénommés « dioxines ». Les dioxines se forment par synthèse de novo au cours du processus de refroidissement des effluents gazeux, dans la partie la plus froide de la chaudière, et s'accumulent ainsi dans les cendres volantes. Des travaux exhaustifs ont montré que les teneurs en dioxines peuvent fortement varier en fonction des intrants, des conditions d'incinération et des procédés d'épuration des effluents gazeux. Les variations de température et les teneurs en métaux lourds durant la phase gazeuse peuvent favoriser la synthèse et engendrer des teneurs accrues en dioxines.

Les cendres volantes dont les métaux ont pu être récupérés par lavage acide (processus FLUWA et FLUREC) peuvent déjà aujourd'hui être stockées définitivement dans des décharges ou des compartiments de type D en tant que « cendres volantes traitées par lavage acide », pour autant que leur teneur totale en dioxines ne dépasse pas 1 µg par kg de matière sèche, conformément aux dispositions de l'OLED (annexe 5, ch. 4.1, let. e, et ch. 4.2).

Le processus de lavage acide FLUWA permet de réduire la masse des cendres volantes (de 30 à 50 %), car il sépare les métaux d'une part et les sels solubles d'autre

part. Étant donné que les dioxines ne sont pas solubles dans ces conditions, elles restent dans les cendres volantes traitées par lavage acide, sous une forme enrichie en raison de la réduction de masse. La charge en dioxines devant être stockée reste cependant inchangée. C'est pourquoi, dans la pratique, certaines installations dépassent la valeur limite applicable aux dioxines depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2016. Jusqu'à 2016, les cendres traitées par lavage acide ont été stockées définitivement pendant une vingtaine d'années dans des décharges de types C et D. Aucune atteinte nuisible ni aucune pollution aux dioxines dans les lixiviats n'ont été constatées.

Il existe actuellement, en plus du traitement thermique externe, deux méthodes pour réduire la charge en dioxines des cendres volantes traitées par lavage acide :

- la méthode « exDiox », fondée sur un procédé de flottation (séparation mécanique) des particules de suie suivi d'une destruction thermique par un nouveau passage dans le foyer de l'UIOM ;
- la méthode « ReFire », qui consiste à réintroduire la totalité des cendres traitées par lavage acide dans le foyer de l'UIOM pour une destruction thermique totale de la charge en dioxines.

Cette fiche d'information se concentre exclusivement sur la méthode « ReFire », qui a été testée dans le cadre de plusieurs campagnes au cours des quinze dernières années et est déjà employée à large échelle par une UIOM allemande. Pour la méthode « exDiox », les tests effectués à la KEBAG à Zuchwil en 2005 durant deux semaines se sont révélés concluants. Les résultats sont consignés dans un rapport final<sup>[1]</sup> de l'institut UMTEC. Des recherches complémentaires, dont les résultats seront publiés, sont prévues pour la période 2019 à 2021.

#### 2 Faisabilité technique avérée

La méthode « ReFire » appliquée aux cendres volantes traitées par lavage acide issues du processus FLUREC a été testée à la KEBAG et à la KEZO (en 2018 et 2019). Les analyses ont porté sur des installations traitant des effluents gazeux humides ou secs ainsi que des cendres de grille, ce qui permet de tirer des conclusions pour tous

les autres types d'installations utilisés en Suisse à ce jour. Pour simplifier, les cendres de grille sont désignées ci-après par le terme « mâchefers ».

Dans le cadre des essais avec la méthode «ReFire», une des quatre lignes de four de la KEBAG a été utilisée pour la réintroduction entièrement automatique des cendres volantes traitées par lavage acide. Une autre ligne fonctionnant sans réintroduction a servi de référence. Il a ainsi été possible de comparer directement les résultats pendant toute la période des essais. La quantité de cendres lavées réintroduite était proportionnelle à la quantité de cendres volantes de la ligne concernée (soit environ 2 % des intrants).

Les cendres volantes traitées par lavage acide étaient transportées par un convoyeur à bande jusqu'à un récipient de stockage, où elles étaient dosées, puis mélangées à de l'eau afin de pouvoir être pompées (+10 % en poids d'eau) et enfin distribuées à la ligne de four via une conduite circulaire. Le dosage était effectué selon une cadence fixe et uniformément sur toute la largeur de la trémie de remplissage. Cette approche a permis de doser en continu et de manière entièrement automatique les cendres volantes traitées par lavage acide, et ce sans effectuer de maintenance.



Figure 1 : Distribution des cendres traitées par lavage acide sur toute la largeur de la trémie de remplissage de la ligne de four «Re-Fire» via quatre conduites

À la KEZO, la réintroduction a été réalisée en distribuant directement dans la fosse à déchets une quantité adéquate de cendres lavées et en les mélangeant ensuite avec les déchets à l'aide d'une grue.

### 3 Preuves de la destruction thermique des dioxines

Les mâchefers de la ligne de four «ReFire» et ceux de la ligne de référence à la KEBAG et à la KEZO ont été échantillonnés durant plusieurs semaines. Après trois mois de stockage sans traitement à la KEWU de Krauchthal, ils y ont été traités, puis une analyse des dioxines a été réalisée sur les fractions minérales résiduelles. Étant donné que les mâchefers de la KEZO sont évacués sous forme sèche, ceux-ci ont dû être humidifiés et préconçassés avant traitement.



Figure 2 : Répartition et réduction des fractions minérales résiduelles en vue des analyses de laboratoire A et B

Pour chaque ligne de four, ce sont respectivement 9 tonnes (à la KEBAG) et 5 tonnes (à la KEZO) de mâchefers qui ont été traités. Pour chaque usine, 700 kg de fractions minérales ont été prélevés et répartis en deux échantillons de laboratoire représentatifs (A et B) de 30 kg.

À la réintroduction, les cendres traitées par lavage acide affichaient des teneurs en dioxines de 560 ng/kg de matière sèche (à la KEZO) et de 580 ng/kg de matière sèche (à la KEBAG). Les résultats ont montré que les teneurs en dioxines des mâchefers «ReFire» étaient similaires aux teneurs mesurées sur la ligne de référence, soit de 4 à 9 ng/kg de matière sèche (voir tableau 1). Si la destruction des dioxines n'avait pas eu lieu à l'incinération, la charge de dioxine des mâchefers introduits dans les lignes «ReFire» aurait dû être perceptible dans les résultats, qui afficheraient dans ce cas (pour un rapport de 1:18 entre les cendres traitées par lavage acide introduites et la quantité de mâchefers à traiter) une concentration en dioxines dans les mâchefers de l'ordre de 30 ng/kg de matière sèche environ. Les résultats sont unanimes pour tous les mâchefers «ReFire» : aucune augmentation des concentrations de dioxines de cet ordre n'a été constatée. Les faibles variations de concentration pour les échantillons A et B confirment la représentativité des échantillons et montrent en outre que les erreurs de mesure étaient minimales lors de l'analyse de la concentration des dioxines. En outre, aucune augmentation des teneurs en dioxines dans les cendres volantes n'a été constatée dans le cadre des campagnes «ReFire». Selon les analyses, aucune dioxine ne se sont retrouvées dans les cendres volantes ou dans les mâchefers. Il a ainsi été possible de démontrer que les charges en dioxines des cendres traitées par lavage acide peuvent être entièrement détruites par un procédé thermique. De précédentes campagnes d'essais<sup>[1-3]</sup> viennent consolider ce résultat.

Tableau 1 : Teneurs en dioxines des échantillons de mâchefers «ReFire» et de référence. Les échantillons A et B ont été répartis et traités de manière indépendante.

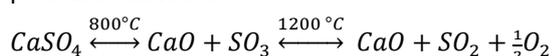
	Teneur en dioxine [ng/kg de matière sèche]	
	Mâchefers A	Mâchefers B
KEBAG « ReFire »	6,6	9,0
KEBAG « Référence »	8,7	5,8
KEZO « ReFire »	5,9	3,7
KEZO « Référence »	6,0	3,9

#### 4 Conséquences sur l'incinération

L'utilisation de la méthode «ReFire» n'a eu aucune répercussion négative sur l'incinération, sur la production de vapeur ni sur le débit des déchets. Comme la part des cendres traitées par lavage correspondait à quelque 2 % des intrants, les effets sur les paramètres de l'incinération se sont avérés négligeables. Globalement, la KEBAG a pu constater une augmentation de la température dans la partie antérieure de la chaudière lors d'utilisations prolongées de la méthode «ReFire». Cette tendance peut s'expliquer par la proportion plus grande de salissures à cet endroit (dépôts de gypse). Cependant, les campagnes d'essais ont montré que cet effet n'est pas clairement lié au processus de réintroduction, car de très importantes charges en soufre dans les effluents gazeux (pouvant conduire au même problème de dépôts de gypse) ont systématiquement été constatées lors des utilisations n'impliquant pas la méthode «ReFire» également.

#### 5 Conséquences sur l'épuration des effluents gazeux

Si le processus FLUWA est réalisé avec des eaux usées acides et neutres du laveur, toutes les charges en soufre issues des effluents gazeux réagissent au calcium se dissolvant des cendres volantes, ce qui résulte en des gypses peu solubles. À la KEBAG, la proportion de gypses dans les cendres volantes traitées par lavage acide se situe autour des 60 à 70 % en poids. Avec la méthode «ReFire», le gypse se dissocie partiellement du fait des températures élevées :



En présence de phases minérales contenant de l'aluminium, comme c'est le cas dans les cendres traitées par lavage, la molécule  $SO_2$  est déjà libérée à des températures moindres (>800 °C). Des températures d'incinération plus élevées accentuent la libération du  $SO_2$ . L'augmentation des charges en  $SO_2$  dans les effluents gazeux engendre une augmentation de la consommation de soude caustique et de bicarbonate lors de l'épuration des effluents gazeux.

Lors des campagnes «ReFire», la KEBAG a enregistré une augmentation de la consommation de soude caustique de l'ordre de 30 % à 50 %. La KEZO a quant à elle noté une augmentation de la consommation de bicarbonate d'environ 30 %. Sur le plan économique, l'augmentation de la consommation de produits chimiques de neutralisation est compensée par les économies réalisées en matière de stockage définitif dans des décharges des cendres volantes traitées par lavage acide (les proportions sont comparables, voir point 9).

#### 6 Conséquences sur le captage des poussières et la qualité des cendres volantes

Aucune augmentation de la quantité de cendres volantes n'a été observée lors des campagnes d'essais. Cependant, il faut préciser qu'il n'est pas possible d'analyser dans ce type d'installation les quantités de cendres volantes pour une ligne de four en particulier et que la KEBAG a utilisé la méthode «ReFire» uniquement sur une de ses quatre lignes. La même constatation peut être faite pour les campagnes de la KEZO, qui a testé la méthode «ReFire» sur une de ses trois lignes seulement. Avec cette méthode, les cendres volantes présentaient une teneur plus élevée en métaux volatiles : ceux-ci, en particulier l'antimoine et l'étain, ne sont extraits que dans une faible proportion au cours du processus FLUWA. Pour ces deux métaux, les teneurs dans les cendres volantes sur la ligne de four «ReFire» étaient de 50 % à 100 % plus élevées que sur la ligne de référence. Les teneurs ont augmenté en l'espace de deux à trois jours pour se stabiliser à un niveau constant par la suite. La méthode n'a donc pas débouché sur un circuit fermé, mais plutôt sur le développement d'un nouvel équilibre. Pour le zinc, l'augmentation de la concentration était moindre (environ 10 %). Il convient de relever que l'augmentation pour le zinc n'était pas statistiquement significative étant donné que les teneurs en métaux dans les cendres volantes des quatre lignes de four de la KEBAG sont soumises à de fortes variations ( $\pm 30$  %).

#### 7 Conséquences sur la récupération des métaux contenus dans les cendres volantes

La méthode «ReFire» n'a eu aucune conséquence négative sur la récupération des métaux, mis à part une baisse du potentiel de récupération du plomb. Les essais ont par ailleurs montré une légère augmentation du taux de récupération du zinc, laquelle n'était toutefois pas statistiquement significative. Les effets sur le plomb étaient quant à eux très clairs. Lors du processus FLUWA, dès la précipitation du « calcium disponible » sous forme de gypse, la concentration en sulfate a augmenté du fait

de la charge accrue en sulfate dans les eaux usées du laveur. Dès lors, du sulfate de plomb peu soluble a été libéré et du plomb, ainsi ramené dans les cendres traitées par lavage. Seule une faible proportion de ce métal a pu être récupéré. En moyenne, la récupération du plomb lors du processus «ReFire» a chuté de >60 % à <30 %. Les effets étaient très marqués à la KEBAG, car les cendres volantes de la KEBAG et de la KEZO qu'elle a traitées affichaient une teneur en calcium très faible, ce qui limitait fortement le calcium disponible pour la précipitation du sulfate.

## 8 Conséquences sur les mâchefers

Avec la méthode «ReFire», le flux de substances des cendres volantes traitées par lavage acide ne quitte pas l'UIOM : seuls les mâchefers, qui contiennent une proportion adéquate de cendres traitées par lavage, sont mis en décharge. Après que les deux flux de substance sont stockés dans des décharges de type D (conformément à l'OLED), la pollution reste identique du point de vue de la charge.

Lorsque les cendres volantes ont été évacuées avec les mâchefers, que ce soit sous forme humide ou sèche, aucune répercussion négative sur la récupération des métaux n'a pu être observée. Du point de vue des dioxines, la qualité des mâchefers «ReFire» et celle de ceux de référence étaient identiques (voir le point 3 du tableau 1). Il n'y a eu aucun transfert des dioxines dans les mâchefers «ReFire». En fonction de la stabilité thermique spécifique des composés, d'autres éléments ont connu un enrichissement dans les mâchefers «ReFire» par comparaison avec les mâchefers de référence, en particulier l'antimoine, le plomb et l'étain (voir tableau 2).

Tableau 2 : Enrichissement et appauvrissement de certains éléments dans les mâchefers «ReFire» par comparaison avec les mâchefers de référence. Les valeurs supérieures à 100 % correspondent à un enrichissement et celles en deçà de 100 % à un appauvrissement. L'écart-type est de  $\pm 10$  %. Par conséquent, les résultats sont statistiquement significatifs s'ils sont supérieurs à 110 % ou inférieurs à 90 %.

	Mâchefers « ReFire »		Mâchefers « ReFire »	
	KEBAG	KEZO	KEBAG	KEZO
<b>Al</b>	100 %	101 %	<b>Ni</b>	118 % 102 %
<b>Ba</b>	101 %	93 %	<b>P</b>	110 % 99 %
<b>Ca</b>	105 %	102 %	<b>Pb</b>	<b>129 % 115 %</b>
<b>Cr</b>	93 %	109 %	<b>S</b>	99 % <b>112 %</b>
<b>Cu</b>	94 %	89 %	<b>Sb</b>	<b>153 % 133 %</b>
<b>Fe</b>	104 %	101 %	<b>Si</b>	99 % 98 %
<b>K</b>	102 %	97 %	<b>Sn</b>	<b>108 % 124 %</b>
<b>Mg</b>	99 %	105 %	<b>Ti</b>	103 % 102 %
<b>Mn</b>	97 %	98 %	<b>Zn</b>	98 % 96 %

Na	95 %	97 %
----	------	------

Pour le soufre, une augmentation statistiquement significative dans les mâchefers «ReFire» a pu être observée uniquement à la KEZO. Cette hausse concorde avec l'augmentation moindre de la consommation de produits chimiques de neutralisation à la KEZO par rapport à la KEBAG (voir point 5) étant donné que le soufre y a été transféré dans les effluents gazeux dans une moindre mesure.

L'augmentation de la teneur en plomb dans les mâchefers «ReFire» a été obtenue par une réduction du potentiel de mobilisation de ce métal au cours du processus FLUREC et sa précipitation sous forme de sulfate de plomb. Il est donc recommandé de traiter séparément et de façon neutre la vidange du laveur (voir point 10).

## 9 Résumé

La réintroduction des cendres volantes traitées par lavage acide dans le foyer des UIOM (méthode «ReFire») permet de détruire complètement les dioxines. Cette méthode élimine le flux de substances des cendres lavées, les mâchefers étant les seuls résidus de l'incinération devant être mis en décharge. Cependant, l'augmentation de la charge en SO<sub>2</sub> a des répercussions négatives sur le flux des effluents gazeux et nécessite une consommation considérablement accrue de produits chimiques de neutralisation. Sur le plan économique, cet effet est largement compensé : des économies peuvent être réalisées en matière de stockage définitif, car les mâchefers présentent une teneur en matière sèche plus élevée que les cendres volantes traitées par lavage acide. À l'avenir, une optimisation de l'épuration des effluents gazeux des UIOM devrait déboucher sur de nouvelles améliorations et garantir, avec une nouvelle méthode «ReFire 2.0», une augmentation bien moindre du SO<sub>2</sub>.

## 10 Recommandations et perspectives

Aujourd'hui, la méthode «ReFire» est limitée par la libération du SO<sub>2</sub>. Actuellement, la majeure partie de la charge en soufre présente dans les effluents gazeux est transférée dans les cendres traitées par lavage sous forme de gypse, ce qui constitue une solution d'avenir. Une approche prometteuse pour les installations «ReFire» utilisant le processus FLUWA serait de séparer la vidange acide et la vidange neutre du laveur et de les traiter séparément. Cette façon de procéder permettrait, plutôt que de transférer la charge en sulfate dans les cendres traitées par lavage, de récupérer celle-ci sous forme de gypse techniquement pur et de la récupérer par précipitation du en aval (méthode «ReFire 2.0», voir figure 3). Dans le cas du plomb, il a été possible de prévenir les répercussions négatives lors de la récupération des métaux conformément à l'OLED.

Contrairement aux procédures existantes, le gypse n'a pas été mis en décharge avec les cendres traitées par lavage, mais a fait l'objet d'une valorisation matière, ce qui procure des avantages écologiques et permet également de réduire les volumes stockés définitivement et de fermer durablement les cycles de matières. De nouveaux essais portant sur la méthode «ReFire 2.0» sont en cours de planification. Les résultats sont attendus au cours des deux prochaines années.

**Renseignements complémentaires**

OFEV, division Déchets et matières premières : Kaarina Schenk

Tél. 058 464 46 03 ; kaarina.schenk@bafu.admin.ch

**Experts**

Université de Berne, Fachstelle für Sekundärrohstoffe:

Urs Eggenberger

Tél. 031 631 87 98; urs.eggenberger@geo.unibe.ch

Stiftung ZAR: Stefan Schlumberger

Tél. 032 686 54 30; stefan.schlumberger@kebag.ch

- [1] R. Fierz, R. Bunge (2006): Schlussbericht exDIOX - Dioxinentfernung aus sauer gewaschener KVA-Filterasche, UMTEC.
- [2] J. Vehlow, H. Braun, K. Horch, A Merz, J. Schneider, L. Stieglitz, H. Vogg (1990): Semi-Technical Demonstration of the 3R Process 3R, Waste Management & Research, 8, pp. 461-472.
- [3] C. Marb, T. Bogner, M. Schindler, M. Schuller (2004): Aufgabe eines sauer extrahierten Kessel-/Elektrofilterasche-Gemischs am MHKW Kempten, Bayer. Landesamt für Umweltschutz (éd.).

**Bibliographie**

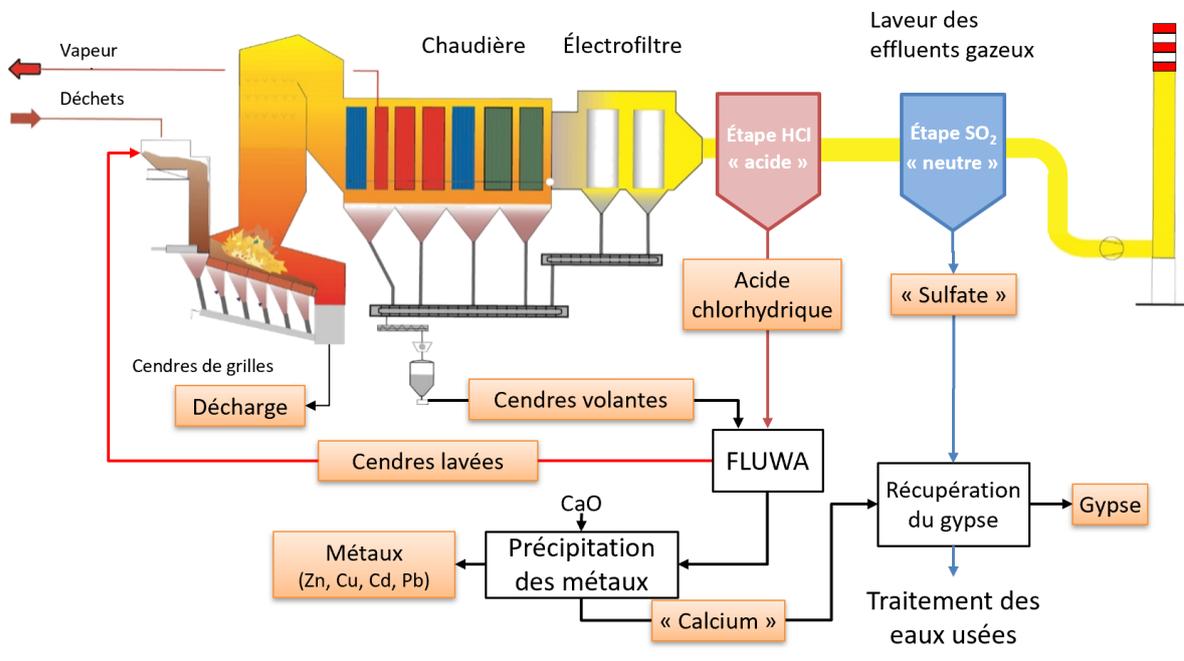


Figure 3 : Méthode «ReFire 2.0» détruisant les dioxines grâce à la séparation des vidanges du laveur ainsi que la récupération du gypse et du métal