

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**QUALITE ET DEVENIR DES MACHEFERS D'INCINERATION
DE DECHETS NON DANGEREUX
ÉTAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES**

**QUALITY AND FUTURE OF THE BOTTOM ASH FROM
NON-HAZARDOUS WASTE INCINERATORS
STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES**

octobre 2015

P. TEGELBECKERS, A. AUBERT, A.J. JOUVENET – SETEC Environnement

I. MOULIN, L.T. TRAN, S. ELHAMZAOUI – LERM



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Qualité et devenir des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux. Etat des lieux et perspectives, 2015, 134 p, n°13-0241/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2015

RESUME

Aujourd'hui, plus de 3 millions de tonnes de mâchefers bruts, résidus provenant des Unités d'Incinération de Déchets non Dangereux (UIDND) sont produites chaque année en France.

L'étude fait un état des lieux de la réglementation française et européenne relative à ces mâchefers et notamment des modifications induites par la promulgation de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 relatif à la valorisation des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND). L'étude répertorie par ailleurs les méthodes et essais relatifs à la caractérisation des MIDND selon les objectifs visés.

L'étude s'intéresse à l'influence de la composition des déchets, du type de four et des paramètres de conduite sur la qualité des MIDND. Un zoom particulier est réalisé sur les éléments antimoine et soufre ainsi que sur la matière organique et les dioxines.

Les pratiques d'élaboration (traitement et maturation) et de valorisation des MIDND en techniques routières sont détaillées en termes technique et financier, en France et en Europe, afin de mettre en évidence les freins, les leviers et les voies d'optimisation.

En s'appuyant sur des expériences locales ainsi que sur les techniques utilisées ailleurs en Europe, ce présent document recense également les principales pistes de valorisation (dans les matériaux cimentaires, les céramiques et pour l'épuration du biogaz) qui pourraient être envisagées dans le futur ainsi que des modes de traitements différents (refroidissement à l'air, carbonatation accélérée et vitrification).

MOTS CLES

Machefers – MIDND – Réglementation – Caractérisation – Traitement – Valorisation – Antimoine – dioxine – carbone organique – soufre – technique routière – maturation

KEY WORDS

Bottom ash – regulation – characterization – treatment – recovery – antimony – dioxin – organic carbon – sulphur – road building – maturation

CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Aujourd'hui, plus de 3 millions de tonnes de mâchefers (bruts) sont produites chaque année en France. Ce résidu solide provient des Unités d'Incineration de Déchets non Dangereux (UIDND) qui sont, pour certaines, des Centres de Valorisation Energétique (CVE). Il est essentiellement traité en Installation de Maturation et d'Elaboration (IME) puis, pour sa part valorisable, valorisé principalement en technique routière (pour 84%), et, pour l'autre part, dirigé en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) (pour 16%).

En France, sa valorisation, jusqu'alors soumise à la circulaire du 9 mai 1994, est désormais cadrée par l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 (applicable depuis le 1er juillet 2012) relatif au recyclage en technique routière des Mâchefers d'Incineration de Déchets Non Dangereux (MIDND) (bruts).

Au fil des années, l'évolution de contexte économique et la concurrence des autres matériaux ont vu les prix de vente de la grave de mâchefer diminuer de façon notable. D'un prix de vente moyen positif (jusqu'à environ 10 €/t), on est passé par une phase d'évacuation à coût zéro puis une phase pouvant aller jusqu'à un coût négatif.

Cette évolution a fait passer le sujet de la gestion des mâchefers au premier niveau des éléments de réflexion notamment pour les exploitants d'UIDND pour lesquels une baisse des prix trop importante pourrait remettre en cause le modèle économique actuel de leurs installations (pour mémoire le prix de l'enfouissement en ISDND est de l'ordre de 61 à 98 €/HT/t selon l'Etude ADEME publiée en 2013 sur le prix du stockage des déchets non dangereux. Le prix des granulats naturels est de l'ordre de 6 à 10 €/HT/t et celui des autres matériaux recyclés est inférieur à 3 €/t.

Les principaux objectifs de cette étude sont :

- De caractériser et définir la qualité des mâchefers : pour cela il est nécessaire de définir les mâchefers, de présenter leur cadre réglementaire et les normes adaptées à leur caractérisation. Dans un deuxième temps, il faut tenter de définir les relations entre la qualité des mâchefers (bruts) et la composition des déchets entrants et/ou les paramètres opératoires. Cette partie permettra de dégager des pistes d'amélioration éventuelles de la qualité des mâchefers élaborés.
- D'établir un état des lieux des filières de maturation et d'élaboration optimisées.
- D'identifier les filières de valorisation actuelles et émergentes ainsi que d'étudier leurs coûts afin d'analyser la pérennité des procédés.

ETATS DES LIEUX REGLEMENTAIRES ET PERSPECTIVES

Le cadre réglementaire en France

Depuis une vingtaine d'années, un cadre réglementaire encadre la gestion des mâchefers au niveau national et européen. Plusieurs arrêtés les concernant ont été successivement mis en place :

- L'arrêté ministériel du 25/01/91 relatif aux installations d'incinération de résidus urbains qui a été abrogé depuis le 28 décembre 2005 par l'article 35 de l'arrêté ministériel du 20 septembre 2002.
- La circulaire DPPR/SEI/BPSIED n°94-IV-1 du 09/05/94 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains qui sert de base aux arrêtés préfectoraux

CONTEXT AND OBJECTIVE OF THE STUDY

Today, more than 3 million tons of raw bottom ash are produced every year in France. This solid residue originates from the operation of incineration plants for non-hazardous waste, some of which are waste-to-energy processing plants. It is mostly processed in maturation and treatment plants, after which the recoverable part is chiefly recycled to be mostly used for road construction (84%), and the remaining part is sent to storage facilities for non-hazardous waste (16%).

In France, such a recovery, which was until then subject to the memorandum issued on the 9th of May 1994, now falls within the scope of the ministerial order issued on the 18th of November 2011 (decree in force since the 1st of July 2012) concerning the recovery of non-processed bottom ash from the incineration of non-hazardous waste for road construction purposes.

Over the years, changes in the economic circumstances and competition with other materials caused a significant fall in sales prices for processed bottom ash. From a positive average sales price (up to about 10 €/t), to a zero cost removal phase, we have now reached the point where it sometimes includes negative costs.

This evolution has brought to the foreground the subject of bottom ash management among points of discussion for the operators of incineration plants for non-hazardous waste, for which a too excessive drop in sales prices could call into question the current economic model applied for their facilities (for the record, the landfill rates in a storage facility for hazardous waste range from 61 to 98€ ex.TAX/t according to a study on storage prices for non-hazardous waste published by the ADEME -the French Agency for the Environment and Energy Management- in 2013). The price of natural aggregates ranges from 6 to 10 € ex.TAX/t and the price of other recycled materials is lower than 3 €/t.

The main objectives of this study are:

- *To characterize and define the quality of bottom ash; which means defining bottom ash, describing its regulatory framework and the standards adapted to its characterization. Subsequently, work must be undertaken to define the various relationships between the quality of raw bottom ash and composition of the waste input and/or operating parameters. This part will allow for the development of potential improvement strategies for the quality of processed bottom ash.*
- *To constitute a report on the optimization of the maturation and development sectors.*
- *To identify the current and emerging recovery sectors and study their costs in order to assess the sustainability of the various processes involved.*

CURRENT STATE OF REGULATIONS AND PERSPECTIVES

The French regulatory framework

For the last twenty years, a regulatory framework has been regulating the management of bottom ash at a national and European level. To that end, several ministerial orders have successively been implemented:

- *The ministerial order issued on the 01/25/91 concerning urban waste incineration facilities that was repealed on*

d'autorisation d'exploiter qui fixent, jusqu'au 30 juin 2011, les conditions de traitement des mâchefers. Ces arrêtés préfectoraux d'autorisation classent habituellement les mâchefers en sortie de fours d'incinération en trois catégories, en fonction des résultats d'un test de potentiel polluant :

- les mâchefers à faible fraction lixiviable (dits de catégorie « V ») peuvent, sous certaines conditions, être valorisés en techniques routières ;
- les mâchefers intermédiaires (dits de catégorie « M ») peuvent faire l'objet, soit d'une élimination en installations de stockage de déchets ménagers et assimilés ; soit pour une durée maximale de douze mois, d'une maturation en vue d'atteindre les caractéristiques des mâchefers à faible fraction lixiviable et permettre ainsi leur valorisation ;
- les mâchefers à forte fraction lixiviable (dits de catégorie « S ») doivent, pour leur part, être éliminés dans les installations de stockage de déchets ménagers et assimilés.

Ce texte a été abrogé et remplacé par l'arrêté du 18 novembre 2011, applicable le 1er juillet 2012.

- L'arrêté ministériel du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI) qui traite essentiellement de l'incinération mentionne les aspects de stockage, d'élimination, de traitement et de mesures réalisées sur les mâchefers ainsi que la traçabilité des déchets produits en fin d'incinération.
- L'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND).

Suite au Grenelle de l'Environnement, le ministère de l'écologie a entrepris une révision des règles de valorisation des déchets en technique routière, et en particulier des mâchefers. Le but étant d'apporter des garanties d'acceptabilité environnementale en réponse aux objections des associations environnementales. A ce titre, l'arrêté du 18 novembre 2011 redéfinit de nouvelles règles de valorisation. Les dernières modifications de cet arrêté datent du 9 août 2012.

La liste des paramètres et des seuils d'acceptabilité, le contrôle de conformité et les règles relatives à la traçabilité ont été modifiées. Par ailleurs, il n'est plus référence à des catégories de mâchefers sortant du four d'incinération, comme le faisait la circulaire de 1994 ; seuls ceux qui satisfont aux critères d'acceptabilité sont valorisables en technique routière, et obligatoirement après une phase de maturation.

Il est distingué deux catégories :

- Usages routiers de type 1 : usages d'au plus trois mètres de hauteur en sous-couche de chaussée ou d'accotement d'ouvrages routiers revêtus.
- Usages routiers de type 2 :
 - usages d'au plus six mètres de hauteur en remblai technique connexe à l'infrastructure routière ou en accotement, dès lors qu'il s'agit d'usages au sein d'ouvrages routiers recouverts ;
 - usages de plus de trois mètres et d'au plus six mètres de hauteur en sous-couche de chaussée ou d'accotement d'ouvrages routiers revêtus.

La TGAP et la garantie financière

L'application de différentes taxes ou réglementation peut être un frein majeur à l'évolution technique des différentes plateformes d'élaboration de mâchefers. De nos jours, les plateformes doivent tenir compte de différents paramètres afin d'adapter leur capacité.

the 28th of December 2005 by Article 35 of the ministerial order issued on the 20th of September 2002.

- *The memorandum DPPR/SEI/BPSIED n°94-IV-1 issued on the 09/05/94 regarding the disposal of bottom ash resulting from the incineration of urban waste, which serves as a basis for prefectural orders authorizing plants operation and, up to the 30th of June 2011, set the conditions of bottom ash treatment. These prefectural authorization orders usually categorize the bottom ash right out of the furnace, dividing it into three separate categories depending on the results of a test calculating its polluting potential:*

- *low friction leachable bottom ash (also called class «V») can, under specific conditions, be recovered for road construction;*
- *intermediary bottom ash (also called class «M») may be either disposed of within household and assimilated waste storage facilities, or be subjected to a maturing process limited to twelve months in order to reach the characteristics of low friction leachable bottom ash and be eligible for recovery;*
- *high friction leachable bottom ash (also called class «S») on the other hand, have to be disposed of within household and assimilated waste storage facilities.*

This text has been repealed and replaced by the order issued on the 18th of November 2011, in effect since the 1st of July 2012.

- *The ministerial order issued on the 20th of September 2002 regarding incineration and co-incineration facilities for non-hazardous waste as well as plants handling medically-related, and potentially infectious, waste, which mostly focuses on incineration, mentions the storage, disposal, and processing aspects of the latter but also measurements carried out on bottom ash and the traceability of waste produced at the end of the incineration process.*

- *The ministerial order issued on the 18th of November 2011 regarding the recovery of bottom ash from non-hazardous waste-to-energy incinerators for road construction.*

Following the Grenelle Environment Forum, the Ministry of Ecology has undertaken to revise the regulations pertaining to the recovery of waste for road construction, and more specifically bottom ash, with an objective to provide environmental acceptability guarantees in response to the objections of environmental associations. To this end, the order issued on the 18th of November 2011 defines new recovery regulations. The latest changes to its content have been made on the 9th of August 2012.

The list of parameters and thresholds for acceptability, compliance testing and traceability requirements have all been modified. Moreover, this version doesn't refer only to categories of bottom ash just out of the furnace, as was the case in the 1994 memorandum; to be eligible for recovery in road construction, the bottom ash now needs to fulfil the acceptability criteria after a mandatory maturation phase.

A distinction is made between two categories:

- *Type 1 road uses: maximum height of use three meters, as roadbed for the pavement or shoulder of paved road works.*
- *Type 2 road uses:*
 - *Maximum height of use six meters, as fill associated with the roadway or on the shoulder, as long as it is still related to paved road works;*
 - *Height of use greater than three meters but lower than six meters as roadbed for the pavement or shoulder of paved road works.*

Selon leurs caractéristiques, elles sont soumises à des textes ayant un impact financier. Plusieurs réglementations doivent être considérées pour déterminer les impacts financiers :

- La taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) qui comprend une TGAP forfaitaire ICPE perçues par les DREAL et une TGAP perçues par les Douanes (en particulier celle portant sur les tonnages enfouis).
- La garantie financière définie par le décret n°2012-633 du 03/05/2012 et les arrêtés du 31/05/2012 et destinée à assurer la dépollution et la remise en état du site en cas de cessation d'activité ou d'accident.

Le cadre réglementaire en Europe

En Europe, plusieurs directives ont été établies afin d'uniformiser le traitement des déchets et de leurs résidus dans les différents pays membres, chaque état devant traduire ces directives dans sa propre législation.

Bien que ces directives (2008/98/CE et 2000/76/CE (abrogé par l'article 81 de la directive 2010/75/UE)) aient été mises en place, une certaine flexibilité de la part de chaque état membre apparaît dans la traduction des textes. En effet, les directives européennes sont très générales et ne traitent des mâchefers que de manière annexe

Les mesures prises dans les différents pays européens sur le sujet sont donc très différentes, rendant difficile la comparaison entre les différentes filières.

Selon les pays, le cadre réglementaire impose une valorisation de 0% (interdiction de valoriser) à 100% (obligation de valoriser). Pour cela, les différentes législations sont adaptées à la politique globale et rendent donc toutes comparaisons très délicates (trop de paramètres étant différents).

Par exemple au Pays-Bas, le gouvernement néerlandais et les unités de valorisation énergétique ont signé un accord (Green Deal) ayant pour objectif une valorisation de 100% d'ici 2020 ainsi qu'une meilleure garantie de la qualité des mâchefers élaborés. Des engagements sont mis en place pour atteindre cet objectif, du côté du gouvernement qui s'engage à lever les obstacles, à donner toutes les informations nécessaires afin de permettre la pleine élaboration du projet, de l'autre côté les producteurs s'engageant à être responsables de leurs produits face aux clients utilisant les mâchefers élaborés dans les travaux de construction. Le projet doit contribuer à une durabilité économique à court et à long terme.

La comparaison entre les différents pays est également rendue difficile du fait des variations des données concernant les taux de valorisation des mâchefers d'une étude à l'autre (par exemple, les opérations de couverture intermédiaire pour les ISD sont qualifiées d'élimination par la France alors que l'Allemagne et les Pays-Bas les considèrent comme de la valorisation).

LES MACHEFERS ET LEUR CARACTERISATION

Les mâchefers sont de matériaux complexes de par leur hétérogénéité, la grande variété des minéraux et autres phases les composants, et leur évolution dans le temps. Les objectifs de caractérisation des mâchefers peuvent être multiples, besoins réglementaires, caractérisations techniques en vue d'une valorisation, détermination des impacts sur l'environnement éventuels, compréhension des phénomènes (réactivité, comportement à long terme,...). Les méthodes et essais à mettre en œuvre dépendent de ces objectifs. L'étude détaille les différentes méthodes et normes applicables aux

The General Tax on Polluting Activities and the financial guarantee

The imposition of various taxes or regulations can constitute a major obstacle against the technical evolution of the various development platforms for bottom ash. Nowadays, platforms must take into account various parameters in order to realign their capacity.

Depending on their characteristics, these platforms are subject to legal texts that have a financial impact. Several regulations have to be considered in order to determine their financial impact:

- *The French general tax on polluting activities (TGAP) which includes a fixed ICPE (French acronym for facilities classified for environment protection) tax on polluting activities collected by the various French Regional Directorates for Environment, Development and Housing (DREAL), as well as a tax on polluting activities collected by Customs (especially the tax on tonnage landfilled).*
- *The financial guarantee defined within the decree n° 2012-633 issued on the 05/03/2012 and the orders of the 05/31/2012 and aiming at ensuring the proper decontamination and restoration of the site in case of termination of the operation or in the event of an accident.*

The regulatory framework in Europe

In Europe, several directives have been established in order to standardize the treatment of waste and residue within UE member countries, each country being responsible for the translation of these directives into its own legislation.

Although these directives (2008/98/CE and 2000/76/CE (repealed by article 81 of directive 2010/75/UE)) have been implemented, a certain degree of flexibility has been observed in their translation by member countries. Indeed, the European directives are very general and only tackle the subject of bottom ash very briefly.

The measures taken on the subject within the various European countries are therefore quite different, making comparisons between sectors difficult.

Depending on the country, the regulatory framework imposes a recovery that ranges from 0% (recovery processes are prohibited) to 100% (they are mandatory). On that matter, the various regulations are adapted to global politics, therefore making comparisons difficult (too many different parameters).

For example, in the Netherlands, the governments and the energy recovery units have signed an agreement (Green Deal), the objective of which is to reach a 100% rate for recovery before 2020, and to guarantee a better quality processed bottom ash. Commitments are implemented in order to reach these goals, on the one hand on the government's side, which is committed to lifting the various obstacles and providing the other parties with all the information needed to implement the project, and on the side of the operators, who commit to being held accountable for their product by clients using processed bottom ash for road construction. The project must be consistent with both short and long-term economic sustainability.

Comparing the various countries is also made difficult by the variations of data linked with bottom ash recovery rates from one study to the next (for example, intermediary covering operations for waste storage facilities are considered as disposal in France, but as recovery in Germany and the Netherlands).

mâchefers relatives à l'échantillonnage, les caractérisations physiques, chimiques minéralogiques ainsi que les caractérisations techniques et environnementales relatives à des usages particuliers.

QUALITE DES MACHEFERS

La qualité des mâchefers, c'est-à-dire l'ensemble de leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques est variable et dépendante a priori de nombreux paramètres dont la composition des déchets entrants mais également du type d'incinérateur et des paramètres de conduite. L'étude détaille l'influence de ces principaux paramètres.

Influence de la composition des déchets, du type de four et de la conduite des fours

Les caractéristiques physico-chimiques des mâchefers présentent une variabilité importante, liée à la composition des déchets entrants dépendant elle-même, de la région, du type de collecte (présence ou non de tri sélectif en amont), de la saison, mais également du type d'incinérateur (notamment pour les fours à lit fluidisé) et de son mode de conduite (excès d'air, temps de séjour...).

Les différents paramètres de la composition des déchets ont une influence certaine sur la qualité des mâchefers mais celle-ci est à relativiser de par le nombre important de ces paramètres qui n'agissent pas tous de la même manière et rendent l'analyse de l'impact de chacun délicate et de par le fait que cette composition est « bornée » de par leur définition.

L'optimisation du procédé d'incinération permet d'obtenir une bonne qualité de mâchefers. Cette optimisation est obtenue en agissant notamment sur les paramètres suivants : homogénéisation des ordures, continuité du débit d'ordures ménagères entrant, température, injection d'air (brassage et apport en oxygène)... Tous ces paramètres de conduite sont particulièrement contrôlés par les exploitants qui les optimisent en continu.

Concernant le type de four, seuls les fours à lit fluidisé conduisent à des mâchefers différents en termes de granulométrie (broyage des déchets en amont du four et structure même du lit) et d'humidité (pas de refroidissement humide des mâchefers).

Le type de refroidissement (sec ou humide) a également un impact (à minima sur l'humidité et la teneur en particules fines) mais le refroidissement à sec est très peu utilisé en Europe (il y a des exemples en Suisse mais aucune valorisation n'est envisagée après) et pas du tout en France.

Paramètres influençant la spéciation de l'antimoine dans les mâchefers

L'antimoine et ses composés ont actuellement une grande variété d'applications industrielles (retardateurs de flamme, stabilisation du plastique, pesticides, insecticides, batteries, semi-conducteurs électroniques...) impliquant leur présence dans le flux de déchets entrants à des teneurs non négligeables (10 à 60 ppm, estimation de l'IAWG en 1997). La spéciation avec laquelle l'antimoine pénètre dans la chambre de combustion, joue un rôle important dans le processus de volatilisation et donc de partition au sein de l'incinérateur. L'antimoine présents dans les déchets serait majoritairement sous forme d'oxyde ; la forme Sb_2O_5 est stable thermiquement et reste piégé dans les mâchefers, la forme trioxyde se volatilise partiellement mais une partie reste également piégée dans les

BOTTOM ASH AND ITS CHARACTERIZATION

Bottom ash is a complex material given its heterogeneity, its great variety of minerals, bases and components, as well as their evolution in time. The characterization objectives for bottom ash can develop through multiple perspectives; regulatory needs, technical characterization for recovery, identification of the potential impact on the environment, understanding phenomena (reactivity, long-term behavior...). The methods and tests to be implemented depend on these objectives. The study explains in detail the various methods and standards applicable to bottom ash regarding sampling, physical, chemical and mineralogical characteristics as well as the technical and environmental characteristics related to specific uses.

BOTTOM ASH QUALITY

The quality of bottom ash, that's to say that its whole set of physical, chemical and biological characteristics can vary, and depends a priori on numerous parameters, such as the composition of the waste input, but also the type of incinerator used and the operating parameters. The study provides a detailed assessment of the influence of these main parameters.

Influence of the composition of waste input, type of furnace and furnace operating parameters

The physicochemical characteristics of bottom ash show considerable variety, linked with the composition of input waste, which itself depends on the region, the waste collection method (upstream waste sorting), the season but also the type of incinerator (especially fluidized-bed furnaces) and its operating mode (excess air, length of time spent inside...).

The various waste combustion parameters have a clear influence on bottom ash quality, but one that should be put into perspective due to the sheer number of these parameters, which don't have the same effect and render an analysis of the separate impact of each one very complicated, but also because of the fact that, as its definition indicates, its composition is restricted by definition.

The optimization of the incinerating process allows for the acquisition of good quality bottom ash. This optimization is achieved through influencing the following parameters in particular: waste homogenization, continuity of the input waste flow, temperature, air injection (mixing oxygen supply)... All these operating parameters are thoroughly controlled by the operators who continually optimize them.

Regarding the type of furnace, only fluidized-bed furnaces lead to differences in bottom ash in terms of granulometry (waste crushing prior to incineration and the very structure of the bed) and humidity (no use of wet cooling techniques for bottom ash).

The cooling type (dry or wet) also has an impact (at least on the humidity and fine particle concentration) but dry cooling methods are rarely used in Europe (there are examples in Switzerland but recovery is not considered afterwards) and not at all used in France.

mâchefers par oxydation après réaction avec les composés basiques présents dans les mâchefers.

Paramètres influençant les teneurs en dioxines/furanes dans les mâchefers

La modernisation en France des usines d'incinération d'ordures ménagères, et notamment la mise en conformité avec les dispositions de l'arrêté ministériel du 25 janvier 1991, a entraîné une forte diminution des émissions de dioxines des UIDND par les rejets atmosphériques. Les dioxines se retrouvent essentiellement dans les cendres volantes et les résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères. Elles sont présentes en quantité beaucoup moins importante dans les mâchefers.

Les facteurs favorables à la formation des dioxines sont une température de combustion trop faible, des conditions oxydantes non homogènes dans le four, une combustion incomplète des matières organiques conduisant à la formation de précurseurs de dioxines. Il est désormais admis que la présence de précurseurs dans les entrants ne joue pas de rôle particulier dans la formation des dioxines si la combustion efficace est réalisée à haute température. C'est la synthèse de novo qui serait préférentiellement à l'origine de la formation des dioxines dans les incinérateurs à des températures de 300 à 700°C mesurées plus spécifiquement dans la chaudière et les systèmes d'épuration des fumées. Dans le cas des mâchefers, ces conditions pourraient se rencontrer en sortie de four lorsque la vitesse de grille n'est pas suffisamment rapide.

La présence de dioxines dans les mâchefers reste faible, les variabilités observées dépendraient plus des conditions de conduite du four et notamment de la vitesse de trempe que de la composition des déchets entrants.

Paramètres influençant les teneurs en matière organique dans les mâchefers

La majorité du carbone initialement dans les déchets n'étant pas détruite par combustion se retrouve dans les mâchefers mais à des teneurs équivalentes à celles des cendres et résidus d'épuration. La très grande majorité de la matière organique présente dans les mâchefers est sous forme de cellulose et de lignine le reste étant constitué de molécules généralement extractibles à l'eau (substances humiques, acides carboxyliques, composées hydroxylés). Seule une part très faible est extractible par des solvants organiques (alcanes, stéroïdes, acides gras saturés et phtalates, HAP composés organo-chlorés dont les dioxines).

La préparation des déchets entrants (homogénéisation) et la conduite du four générant les conditions d'une bonne combustion ont par conséquent une influence forte sur les teneurs en matières organiques des mâchefers. Des études s'intéressant plus particulièrement à la fraction organique extractible par des solvants organiques ont montré que la composition des déchets, notamment leur saisonnalité influencerait la composition de cette fraction organique des mâchefers.

Paramètres influençant la spéciation du soufre dans les mâchefers

Le soufre entrant dans l'incinérateur est présent dans les composés organiques et inorganiques, la grande majorité provenant de l'acide sulfurique, de l'industrie chimique, agricole, du caoutchouc, de la gomme mais également sous forme de plâtre.

La présence de sulfates et indirectement de sulfures dans les mâchefers en quantité notable peut conditionner leur valorisation. La maîtrise du comportement du soufre dans

Parameters influencing the speciation process for the antimony contained in bottom ash

Antimony and its components currently have a wide range of industrial applications (flame retardant, stabilization of plastic, pesticides, insecticides, batteries, electronic semiconductor,...) that imply their presence within the input of waste in significant amounts (10 to 60 ppm, as estimated by the IAWG in 1997). The speciation with which antimony enters the combustion chamber plays an important part in the volatilization process, and therefore the partitioning process that takes place in the incinerator. The antimony present in the waste would in great majority be there in the form of oxide; the chemical form Sb_2O_5 is thermally stable and stays trapped in the bottom ash, the trioxide form partially volatilizes, but part of it stays trapped in the bottom ash due to oxidation after the reaction with the alkaline components present within the bottom ash.

Parameters influencing the amount of dioxins/furans found in bottom ash

The modernization of household waste incineration plants in France, especially after they were brought into conformity with the disposition of the ministerial order issued on the 25th of January 1991 has caused a significant decrease in dioxin emissions by incineration plants for non-hazardous waste through atmospheric release. Dioxins are therefore found in the fly ash and smoke purification residue from the incineration of household waste. They are also found, in far less significant amounts, in bottom ash. The favorable factors for the formation of dioxins are a combustion temperature set too low, non-homogeneous oxidizing conditions in the furnace, incomplete combustion of organic matter leading to the formation of dioxin precursors. It is now recognized that the presence of precursors in the input does not play a particular part in the formation of dioxins if the combustion is efficient and carried out at high temperature. Preferentially, it is the De Novo synthesis that could be causing the formation of dioxins in incinerators at temperatures ranging from 300 to 700°C, measured more specifically in the boiler and the smoke purification systems. In the case of bottom ash, these conditions could be met when exiting the furnace, if grate speed isn't sufficient.

The presence of dioxins in bottom ash remains very low, and the variabilities observed could depend more on the furnace's operating conditions, and especially the quenching speed, than on the composition of the waste input itself.

Parameters influencing the amount of organic matter found in bottom ash

The majority of the carbon initially found in waste, which isn't destroyed by combustion, can be found again in bottom ash, but in amounts similar to those found in fly ash and smoke purification residue. The vast majority of the organic matter found in bottom ash appears in the form of cellulose and lignin, the rest is made of molecules that are usually water extractable (wet substances, carboxylic acids, hydroxylated compounds). Only a very small portion of it is extractable using organic solvents (alkanes, steroids, saturated fatty acids and phthalates, polycyclic aromatic hydrocarbons, organo-chlorine compounds including dioxins).

Since the preparation of the waste input (homogenization) and the operating parameters of the furnace generate the right conditions for good combustion, they have a strong influence on the organic matter contents present in bottom ash. Studies taking a closer look at the water-extractable fraction of organic matter using organic solvents demonstrated that the composition of waste, and more

l'incinérateur selon la diversité des entrants et les paramètres de combustion permettrait de proposer des moyens d'action. Le sujet est vaste et nécessiterait des travaux spécifiques mais cette étude présente quelques éléments permettant une première approche.

Même si, localement certaines zones d'un incinérateur peuvent se trouver en conditions réductrices expliquant la présence ponctuelle de sulfures dans les mâchefers, en conditions de combustion normales, les conditions sont plutôt oxydantes ainsi le soufre se trouve préférentiellement sous forme de sulfates. Certains de ces sulfates, notamment métalliques peuvent être décomposés thermiquement lors de l'incinération pour former, en fonction de la température du four, SOx dans les fumées. En revanche, toujours en conditions oxydantes, les sulfates de calcium, de sodium, de magnésium et de potassium sont stables thermiquement. Ainsi, d'un point de vue théorique, l'introduction de plâtre en amont conduit, sauf conditions spécifiques, à la formation d'anhydrite CaSO4 dans le mâchefer avant extinction. Par ailleurs, d'autres spéciations du soufre en entrée peuvent conduire également à la formation de CaSO4.

ELABORATION DES MIDND ET VALORISATION EN TECHNIQUES ROUTIERES

Traitement et maturation

Lorsque les mâchefers sortent de l'incinération, ils doivent encore passer par plusieurs étapes avant une éventuelle valorisation selon leur comportement à la lixiviation. C'est à cette étape que l'élaboration de la grave de mâchefer se met en place.

Pour obtenir un matériau à usage routier dont les caractéristiques géotechniques sont conformes aux normes concernant les granulats et les graves, les mâchefers doivent subir un certain nombre de traitements mécaniques et chimiques.

La maturation classique est une maturation à l'air libre de 1 mois à 1 an selon l'étude AMORCE (DT50) de 2012) durant laquelle la carbonatation de la chaux par le dioxyde de carbone atmosphérique a lieu. Cette réaction permet la diminution du pH entraînant la précipitation des métaux lourds jusque-là sous forme solubles. Ces éléments se retrouvent alors piégés dans la structure des mâchefers maturés et une diminution du potentiel polluant est donc obtenue.

Après la maturation, 3 principaux types de traitements mécaniques ont pu être observés sur les installations existantes :

- le type I : criblage et séparation des ferreux ;
- le type II : criblage, séparation des ferreux et des non ferreux ;
- le type III : criblage, séparation des ferreux, des non ferreux, broyage des refus et éventuellement séparation des imbrûlés légers.

Cette typologie proposée par l'ADEME reste d'actualité même si la tendance va plutôt vers les types II et III qui favorisent la valorisation des métaux.

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs constats peuvent être établis pour la France :

- les plateformes de type I sont plutôt des plateformes de petites capacités (< 10 000 t/an) ;
- quel que soit le type d'installations concernées, la majorité des plateformes est d'une capacité située entre 10 000 et 50 000 t/an ;

particularly its seasonality, could influence the contents of that organic fraction of bottom ash.

Parameters influencing the speciation of sulfur in bottom ash

The sulfur entering the incinerator is found in organic and inorganic compounds, the vast majority of it coming from sulfuric acid, the chemical and agricultural sectors and gum, but also plaster.

The presence of phthalates and indirectly that of sulfur in bottom ash in significant quantities can condition its recovery. Controlling the behavior of sulfur in the incinerator according to the diversity of the waste input and the combustion parameters would make it possible to suggest means of action. The subject matter is vast and would require specific work, but this study introduces a few elements, allowing for an initial approach.

Even though locally certain areas within an incinerator can be under reducing conditions that would explain the exceptional presence of sulfurs in bottom ash, in normal combustion conditions oxidizing is fairly common, therefore sulfur is preferentially found in the form of sulfates. Some of these sulfates, often metallic, can be thermally decomposed during the incineration to form SOx in the fumes, depending on the temperature of the furnace. However, still in oxidizing conditions, calcium, sodium, and magnesium sulfates are thermally stable. Therefore, from a theoretical perspective, the introduction of plaster before combustion triggers the formation of CaSO4 anhydrite in the bottom ash before the quenching phase. Furthermore, other types of speciation of sulfur when it enters the furnace can also lead to the formation of CaSO4.

BOTTOM ASH TREATMENT AND RECOVERY FOR ROAD CONSTRUCTION

Processing and maturation

When the bottom ash leaves the incinerator, it still has to go through several steps before a potential recovery depending on its behavior during the leaching process. It is during this stage that the treatment of processed bottom ash is set in motion.

In order to obtain a material to be used for road construction works, the geotechnical characteristics of which are compliant with the various standards pertaining to aggregates and processed bottom ash, the bottom ash has to undergo a number of mechanical and chemical treatments.

The typical maturation process lasts from 1 month to one year, in the open air, (according to the AMORCE (DT50) study published in 2012), a time during which lime carbonation by the carbon dioxide present in the atmosphere takes place. This reaction allows for a decrease in the pH level, causing the precipitation of heavy metals that were until then in soluble form. These elements then find themselves trapped within the structure of the processed bottom ash; therefore a decrease in polluting potential is effectively obtained.

When maturation has taken place, 3 main types of mechanical treatments have been observed in existing facilities:

- *type I: screening and separation of ferrous elements;*
- *type II: screening, separation of ferrous and non-ferrous elements;*

- lorsque la capacité des IME augmente, les plateformes ont tendance à s'équiper de manière à optimiser la valorisation des métaux.

Dans le schéma type classique (proposé par le CEWEP), les mâchefers sont issus d'une UIDND après un refroidissement humide (le plus répandu) puis ils subissent le traitement décrit dans la figure suivante :

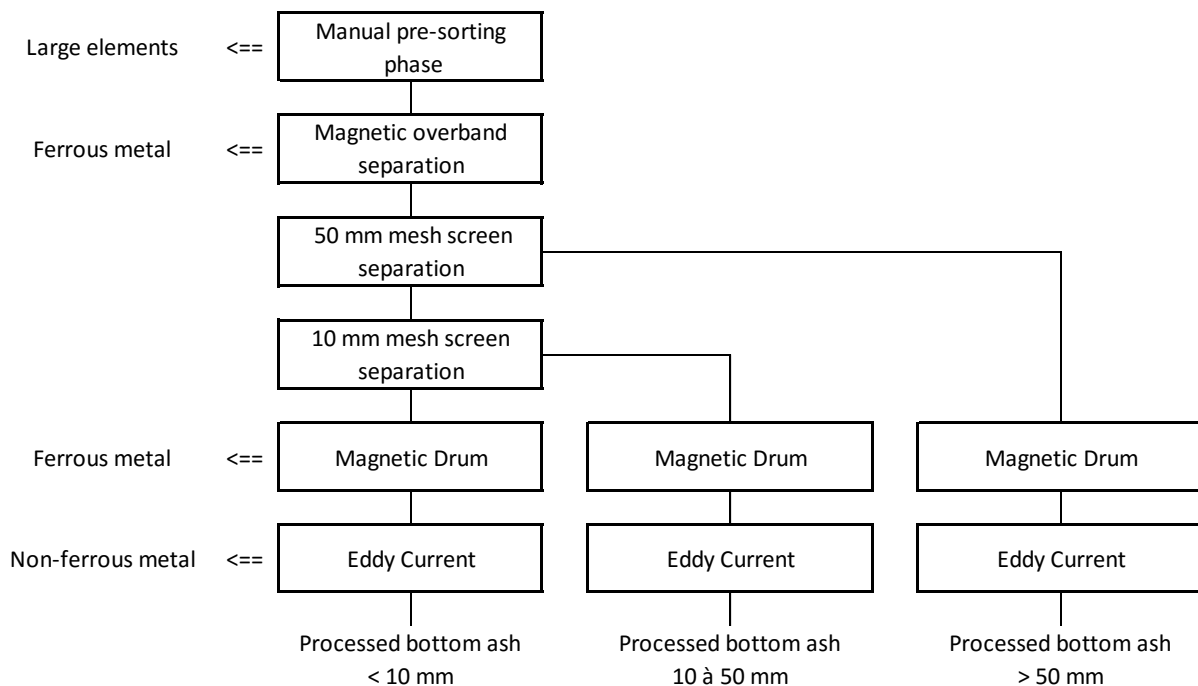
- *type III: screening, separation of ferrous and non-ferrous elements, refusal grinding and potentially separating light combustion residue*

This typology suggested by the ADEME (French Agency for the Environment and Energy Management) is still relevant today, even though types II and III seem to be more widely used since they favor the recovery of metals.

On the basis of the obtained results, several assessments can be made regarding France:

- *type I platforms are mostly small capacity ones (< 10 000 t/year) ;*
- *whatever the type of facility concerned, the majority of platforms have a capacity ranging from 10 000 to 50 000 t/an ;*
- *whenever the capacity or maturation and treatment plants is increased, platforms tend to equip themselves in order to maximize the recovery of metals.*

In the diagram illustrating the standard scenario presented below (suggested by the CEWEP), bottom ash is gathered in an incineration plant for non-hazardous waste after undergoing wet cooling (the most widely used method) and then the treatment described in the figure below:



Presentation scheme of the various processed bottom ash production types in Europe (source: CEWEP)

On peut noter que dans ce type de schéma, la valorisation des métaux est poussée. La destination des gros éléments n'est pas évoquée mais on peut imaginer une étape de broyage/concassage avant une réintroduction dans la boucle. Selon le CEWEP, cette technologie est rentable de par les rendements obtenus pour la séparation des métaux ferreux et non-ferreux.

It can be noted that, in this type of presentation scheme, the recovery process is comprised of more steps. The specific destination of large elements isn't addressed but we can easily speculate on a grinding/crushing phase before they are reintroduced within the recovery loop. According to the CEWEP, this technology is cost-efficient due to the improved efficiency brought by the separation of ferrous and non-ferrous metals.

Ce schéma n'est pas très éloigné des schémas classiquement utilisés en France même si la séparation des métaux (surtout les non ferreux) est plus poussée.

This presentation scheme is not that different from those typically used in France, even though the separation of metals (especially ferrous and non-ferrous ones) is more thorough.

Parmi les évolutions possibles, l'augmentation de l'efficacité de la séparation des métaux reste la piste privilégiée notamment par l'augmentation du nombre de fractions traitées. En

particulier, des sociétés ont développé des process pour récupérer les métaux dans les fractions les plus fines.

Après cette étape de traitement mécanique, les mâchefers élaborés deviennent utilisables pour les travaux en technique routière. Cependant, pour améliorer leur comportement, des traitements plus spécifiques peuvent être réalisés.

Valorisation en technique routière

La valorisation en technique routière est la voie principale dans le recyclage de la grave de mâchefers. En effet, en 2012, 77% des IME valorisaient leurs mâchefers élaborés par cette technique (le reste étant valorisé en remblais de friches industrielles jusqu'au 1er juillet 2012 ou en ISDND). L'avantage principal est d'obtenir leur écoulement massif. La demande en granulats naturels ou recyclés est très importante mais les quantités de matière première diminuent. De plus, les caractéristiques que possèdent les graves de mâchefers (texture granuleuse) leur confèrent une bonne portance pouvant être utilisés dans ces techniques. Il est possible d'utiliser les lots de mâchefers élaborés dans plusieurs types de constructions : en remblai et en couche de forme. Pour n'importe quelle utilisation, les contacts entre les mâchefers élaborés et les eaux météoriques devront être limités afin d'éviter une lixiviation des polluants et de diminuer leur portance.

En France, plusieurs utilisations sont possibles en conformité avec l'arrêté du 18 novembre 2011 :

- en remblais avec des applications différentes selon le type de MIDND (1 ou 2) ;
- en couche de formes pour les types 1 et 2 ;
- en couches d'assises pour le type 1 uniquement.

En Europe, chaque pays ayant sa propre réglementation, les valorisations des mâchefers élaborés sont différentes. Ils sont utilisés principalement en travaux routiers, travaux de génie-civil et utilisés comme matériel pour la construction de site d'enfouissement.

Ils sont parfois utilisés dans des digues comme aux Pays-Bas et au Danemark.

Au Danemark, les mâchefers sont également utilisés comme granulats de sous base pour les bâtiments industriels, les petites routes, des parkings, des digues et des voies d'accélération des autoroutes.

Coût de la valorisation en technique routière

Le coût de la valorisation en technique routière peut être décomposé en deux étapes :

- le coût d'évacuation des MIDND en IME à partir des UIDND ;
- le coût de la valorisation en technique routière à proprement parlé.

La principale source d'informations sur ces sujets reste l'enquête de l'ADEME sur l'état des lieux de la gestion des mâchefers datant d'octobre 2012. En effet, les différents interlocuteurs contactés lors de cette étude n'ont pas permis d'obtenir beaucoup plus d'information.

Sur la base de cette étude, il a été établi que le coût d'évacuation des mâchefers en IME variait de 5,00 €/HT/t à 55,00 €/HT/t. La variabilité des coûts dépend de plusieurs paramètres :

- le contexte local ;
- la distance entre l'UIDND et l'IME (transport) ;

Among the various potential evolutions, increasing efficiency during the separation of metals remains the preferred path, especially because of the observed increase in the number of fractions processed. Some firms particularly developed processes focused on recovering metals in the finest of fragments.

After this mechanical processing step, the processed bottom ash becomes suitable for use in the road works sector. However, in order to improve its behavior, more specific processing methods can be carried out.

Bottom ash recovery for road works

The recovery of bottom ash for road works is the main recycling path for processed bottom ash. Indeed, in 2012, 77% of waste maturation and treatment plants processed their bottom ash for recovery in the road works sector (the rest being recovered as backfill for brownfield sites up until the 1st of July 2012, or in storage facilities for non-hazardous waste). The main advantage of these practices was mass disposal; there is a high demand for natural or recycled aggregates, but the quantities of raw material are decreasing. Furthermore, the characteristics of bottom ash (granular texture) provide a better bearing capacity, which could prove useful in the sector of road works. Processed bottom ash packages can be used for several types of works: as backfill or as roadbed. For all other types of uses, the contact between the processed bottom ash and rain water must be limited in order to avoid the leaching of polluting agents and decrease their bearing capacity.

In France, there are several options for usage in compliance with the order issued on the 18th of November 2011:

- Embankment, various applications according to the type of bottom ash (1 or 2);
- As subgrade for types 1 and 2;
- As base course for type 1 only.

In Europe, knowing that each country has its own regulations, the recovery methods for processed bottom are different. The processed bottom ash is used for road works, civil engineering works and as material for the construction of landfill sites.

Processed bottom ash is often used for dams in the Netherlands and in Denmark.

In Denmark, it is also used sub-base aggregates for industrial buildings, small roads, parking areas, dams and acceleration lanes.

Costs of recovery for road construction

The recovery costs for road construction can be divided into two steps:

- The costs incurred by the removal of processed bottom ash from non-dangerous waste incineration plants towards maturation and treatment plants;
- The actual recovery costs for road works.

The main source of information on the current state of processed bottom ash management remains the study published by the ADEME (French Agency for the Environment and Energy Management) in October 2012. Indeed, the various participants contacted for this study did not allow for much more information to be gathered.

On the basis of that study, it has been established that the costs attached with the removal of processed bottom ash from incineration plants towards maturation and treatment

- le type de préparation des mâchefers (déferraillage ou extractions des métaux ferreux et non ferreux)

Sur la base de la même étude, il a été établi plusieurs cas de figure :

- 26% donnent gratuitement les MIDND aux sociétés de Travaux Publics ;
- 32% vendent les MIDND entre 1,00 €HT/t à 2,50 €HT/t ;
- 42% paient les sociétés de Travaux Publics entre 4,70 €HT/t à 7,62 €HT/t pour évacuer les MIDND.

Il est à noter que ces fourchettes de prix sont peu significatives. En effet, chaque cas est un cas particulier.

TRAITEMENT EN VUE D'UNE VALORISATION SPECIFIQUE

D'autres traitements, récents ou non, existent afin d'optimiser les caractéristiques des mâchefers : le refroidissement à l'air, la carbonatation accélérée et la vitrification.

Refroidissement à l'air

Cette technique de refroidissement à l'air des mâchefers a pour but d'obtenir une meilleure qualité de métaux afin de les extraire par la suite et de les recycler. Cette méthode est actuellement uniquement utilisée dans une UIOM en Suisse.

Selon les premiers retours d'expérience, les principaux avantages de cette technique par rapport à la technique classique sont :

- un brûlage plus complet par une postcombustion des résidus organiques ;
- une meilleure qualité des métaux car l'oxydation est diminuée ;
- une réduction de poids de 20% due à l'absence d'eau ;
- une possibilité de séparation directe en fraction fine (0 à 5 mm) et grossière (> 5 mm).

Les inconvénients de cette technique sont notamment l'augmentation d'émission de poussières et des valeurs plus élevées en Sb, Br et Pb.

A ce jour, il n'a pas pu être prouvé que l'utilisation de la grave de mâchefers issue de cette technique était possible. En effet, la valorisation des mâchefers est interdite en Suisse. Cette technologie est donc, pour l'instant, réservée au cas où la grave de mâchefers est destinée à être enfouie.

Carbonatation accélérée

Lors de la maturation, la carbonatation se réalise sur plusieurs mois et une stabilisation totale n'est pas possible. Cette réaction principale de la maturation peut être améliorée en augmentant le taux de CO₂ dans l'atmosphère sous laquelle les mâchefers sont exposés. Du point de vue économique, cette méthode n'est peut-être pas viable car cela signifierait enfermer les mâchefers dans une chambre avec un surplus de dioxyde de carbone et cela engendrerait des coûts supplémentaires (pompe, construction de la chambre, by-pass...). Pour diminuer ce problème, les fumées sortant du four d'incinération pourraient être utilisées comme source de CO₂. Cette technique permettrait de traiter à la fois les fumées en diminuant la teneur en CO₂ et peut être d'améliorer le traitement des mâchefers.

plants range from 5,00 € ex. TAX/t à 55,00 € ex. TAX/t. The variations in costs depend on several parameters:

- *The local context;*
- *The distance between the waste incineration plant and the treatment and maturation plant (transport);*
- *The processing method used for the bottom ash (magnetic overband separation or extraction of ferrous and non-ferrous metals).*

On the basis of the same study, several scenarios were established:

- *26% give processed bottom ash to public works contractors free of charge;*
- *32% sell processed bottom ash at a price ranging from 1,00 € ex. TAX/t to 2,50 € ex. TAX/t ;*
- *42% pay public works contractors a price ranging from 4,70 € ex. TAX/t to 7,62 € ex. TAX/t for them to remove the processed bottom ash.*

It should be noted that these price brackets are not very significant, since each case is different.

TREATMENT FOR RECOVERY IN A SPECIFIC SECTOR

Other treatments exist, recent or not, that aim at optimizing the characteristics of bottom ash: air cooling, accelerated carbonation and vitrification.

Air cooling

This cooling technique produces a better quality metal to be extracted from bottom ash and recycled. This method is currently being used only in one household waste incineration plant in Switzerland.

According to early feedback on this experience, the main advantages of using this technique instead of the usual one are as follows:

- *A more thorough burning process through the post-combustion of organic residue;*
- *Metals of a better quality since the oxidation process is decreased;*
- *A weight reduction of 20% due to the lack of water;*
- *A means to directly separate fine (0 à 5 mm) and coarse (> 5 mm) fraction.*

The drawbacks associated with this technique include an increase in dust emissions and higher levels of Sb, Br and Pb.

To this day, it hasn't been proven that the bottom ash produced using this technique is actually usable. Indeed, bottom ash recovery is prohibited in Switzerland. This technology is therefore, for the time being, only used when processed bottom ash has to be landfilled.

Accelerated carbonation

During the maturation process, the carbonation phenomenon happens over a period of several months, and full stabilization cannot be reached. This main reaction of the maturation process can be improved by increasing CO₂ levels in the atmosphere the bottom ash is exposed to. From an economic standpoint, this method isn't sustainable, since it would entail storing the bottom ash in an isolated chamber with high levels of carbon dioxide, which would generate additional costs (pump, construction of the chamber, by-pass...). In order to alleviate this problem, the fumes from the incinerator could be used as a

A ce stade des recherches, la pertinence technique n'est pas démontrée sur les possibilités de valorisation ultérieure et elle n'est pas pertinente au niveau industriel.

Vitrification

La vitrification transforme complètement le matériau hétérogène que constitue les mâchefers en un matériau vitreux (ou amorphe selon les conditions d'élaboration et de refroidissement) présentant les caractéristiques d'un déchet inerte qui pourrait donc être utilisé à terme dans d'autres applications que dans les techniques routières (par exemple, ajouté dans du ciment ou de la céramique).

La vitrification est un procédé dans lequel les mâchefers subissent une fusion à haute température (entre 1 100 et 1 400°C environ). Le niveau de température doit être adapté de manière à atteindre une viscosité permettant l'écoulement du vitrifié.

Le refroidissement peut être réalisé de 2 manières :

- lentement, dans ce cas la coulée est recueillie sous forme de lingot et l'on obtient un vitrifié amorphe assimilable à un caillou ;
- rapidement, dans ce cas la coulée est plongée dans un bac d'eau et l'on obtient un vitrifié granulaire ou techno-sable (solides noirs vitreux plus ou moins).

La vitrification présente certains avantages :

- Une homogénéité accrue ; la fusion puis le trempage pour le refroidissement des vitrifiés permettent d'obtenir des granulats assimilables à un techno-sable (particules de moins de 5 mm) beaucoup plus homogène que les mâchefers.
- Une possibilité de valorisation facilitée des métaux ferreux et non-ferreux ; de par leurs propriétés physico-chimiques différentes, les métaux ferreux et non-ferreux peuvent être aisément séparés après la vitrification. La séparation au niveau des mâchefers bruts n'est pas forcément indispensable.
- Une destruction complète des dioxines et des furannes ; les hautes températures nécessaires pour la vitrification entraînent la destruction complète des dioxines et des furannes et le refroidissement rapide des vitrifiés ne permet pas leur reformation.
- La vitrification permet de bloquer certains métaux lourds sous forme d'oxydes métalliques notamment si la température est basse (< 1 200°C).

Mais la vitrification présente également des inconvénients :

- La vitrification ne permet pas de bloquer ni les composés chlorés et soufrés qui sont peu solubles dans la solution fondue.
- Dans le cas de températures élevées (> 1 400°C), la vitrification ne permet pas de bloquer certains métaux qui peuvent se volatiliser (c'est le cas notamment du mercure, du plomb, du zinc et du cadmium).
- La vitrification a souvent un coût énergétique élevé.
- La vitrification est une technologie complexe avec une gestion des éventuelles phases non vitreuses (métaux, sels) qui peut également s'avérer délicate.
- Un traitement en aval du gaz est nécessaire pour capturer ses polluants.

La vitrification paraît être une technique de stabilisation des mâchefers à approfondir à condition d'étudier plus en détails le contrôle et l'optimisation de la consommation énergétique pour la rendre économiquement viable. La reproductibilité avec des MIDND français reste également à valider car les installations existantes sont à l'étranger.

source of CO₂. This technique would therefore not only purify the fumes by decreasing their CO₂ levels, but it may also lead to an improvement in bottom ash processing methods.

At this early stage of research, technical relevance hasn't been demonstrated regarding future recovery possibilities, and it isn't relevant at the industrial level.

Vitrification

The vitrification process completely transforms the heterogeneous material that bottom ash is made of into a glassy material (or amorphous depending on the preparation and cooling conditions) that presents all the characteristics of inert waste, and could therefore ultimately be used for other applications than road construction (for example, added to cement or ceramic).

Vitrification is a process during which bottom ash undergoes high temperature fusion (between about 1 100 and 1 400°C). The temperature level should be adapted in order to reach suitable viscosity to allow for the vitrificate to flow.

The cooling process can be carried out two different ways:

- *Slowly, in which case the liquid melt is collected in the form of ingots, and an amorphous stone-like vitrificate forms;*
- *Rapidly, in which case the liquid melt is submerged in a water tank and a granular or techno-sand vitrificate forms (glassy black solids, more or less glassy).*

Vitrification has certain advantages:

- *An increased homogeneity; fusion followed by quenching to cool the vitrificate in order to obtain aggregates similar to techno sand (particles < 5 mm) and much more homogeneous than bottom ash.*
- *A facilitated potential for recovery for ferrous and non-ferrous metals; due to the differences in their respective physicochemical properties, ferrous and non-ferrous metals can easily be separated after vitrification. Separating them on the level of raw bottom ash isn't strictly necessary.*
- *A complete destruction of dioxins and furans; the high temperatures required for vitrification lead to the complete destruction of dioxins and furans, and the cooling speed for the resulting vitrificate prevents them from reforming.*
- *The vitrification process also blocks heavy metals in the form of metal oxides, especially when the temperature is low (< 1 200°C).*

But vitrification also comes with drawbacks:

- *Vitrification cannot block sulfurous or chlorinated compounds which aren't very soluble in the melted solution.*
- *In the case of high temperature (> 1 400°C), the vitrification process cannot block some metals, which can then volatilize (as is especially the case for mercury, lead, zinc and cadmium).*
- *Vitrification is often associated with high energy costs.*
- *Vitrification is a complex technology, and the management of some of the non-glassy phases (metals, salts) can be a delicate operation.*
- *Gas needs to be treated beforehand in order to isolate the pollutants it contains.*

Vitrification seems to be a bottom ash stabilization technique to be refined, as long as energy consumption

Traitement humide

Une autre technologie innovante a fait ses preuves en Allemagne, en Belgique (Flandres) et aux Pays-Bas. Après une extraction humide des mâchefers en UIDND, ceux-ci subissent un second traitement humide qui a pour but d'améliorer la qualité de la grave de mâchefers obtenue (en fabriquant un matériau qui peut remplacer les matières premières de construction classiques au sens des réglementations de ces pays) ainsi que celle de la séparation des métaux (jusqu'à 11% de métaux ferreux et 3% de métaux non ferreux).

Par contre, elle présente un inconvénient majeur qui est l'utilisation d'eau (forte augmentation des volumes utilisés) et le traitement associé des effluents liquides.

AUTRES VOIES DE VALORISATION

Valorisation dans les matériaux cimentaires

Trois axes sont étudiés ou pratiqués :

- L'introduction des MIDND dans le cru de cimenterie,
- L'introduction comme constituant secondaire dans les ciments permettant la production d'un ciment composé,
- L'utilisation comme granulats pour béton ou coulis.

En France, les cimentiers ont élaboré une charte précisant les limites d'acceptabilité à l'entrée de l'usine des déchets ajoutés directement au cru. Ces conditions restent très générales et comportent une teneur minimale en éléments majeurs constitutifs du cru, des restrictions sur les teneurs en métaux lourds et une teneur limite en hydrocarbures totaux. Cependant, en pratique, chaque cimenterie possède des contraintes internes spécifiques à son installation, son approvisionnement et son mode de fonctionnement. Ces contraintes peuvent porter sur des caractéristiques physiques (teneur en eau, granulométrie,...) et chimiques.

En France, l'industrie cimentière est plutôt réticente à la valorisation des MIDND dans le cru des cimenteries en raison principalement de la grande variabilité de la composition chimique des MIDND et de la présence de certains polluants comme les métaux lourds, le chlore, les alcalins ou les imbrûlés susceptibles de dégrader la qualité du clinker.

Cette pratique est pourtant envisagée dans d'autres pays et même autorisée en Italie et au Japon où des industriels ont mis au point une technologie spécifique permettant l'incorporation de MIDND dans le cru de cimenterie.

Plusieurs études traitent de la valorisation des MIDND comme constituant secondaire d'un ciment et montrent que les mâchefers ne développent qu'un faible pouvoir pouzzolanique. Par ailleurs, la valorisation comme constituant secondaire d'un ciment implique un broyage fin des MIDND qui ne peut s'opérer qu'après une séparation poussée des métaux ferreux et non ferreux. Le coût de ce traitement semble prohibitif en regard des propriétés médiocres des MIDND pour ce type d'application.

L'utilisation des MIDND comme granulats pour béton a été envisagée très rapidement ainsi que la réactivité des MIDND en présence de ciment et les pathologies susceptibles d'en découler.

Il est donc apparu très tôt que les étapes de traitement post combustion jouent un rôle primordial dans le potentiel de valorisation des MIDND comme granulats pour béton. Les étapes de déferrailage, criblage et retrait des non ferreux sont bien sûr primordiales. Les performances de ces opérations de tri et plus particulièrement du retrait des non ferreux auront un impact direct sur la durabilité des bétons incorporant des

control and optimization are studied in greater detail in order for it to become economically sustainable.

The repeatability of the process with French processed bottom-ash also remains to be validated, since the existing facilities are located abroad.

Wet treatment

Another innovative technology has proved effective in Germany, Belgium (Flanders) and the Netherlands. After bottom-ash has been subjected to wet extraction in an incineration plant for non-hazardous waste, it goes through a second wet treatment in order to improve the quality of the processed bottom ash (manufacturing a material that can replace raw materials customarily used in the construction sector within the meaning of these countries' respective legislation) as well as the quality of the metal separation process (up to 11% of ferrous metal and 3% of non-ferrous metal).

The main drawback of this method is the use of water (significant increase in the water volumes used) and the associated treatment of liquid effluents.

OTHER RECOVERY METHODS

Recovery in cementitious materials

Three different approaches are being studied or practiced:

- *The introduction of processed bottom ash in raw cement meal,*
- *Its introduction as a minor component in cements, to allow for the production of a blended cement,*
- *Using bottom ash as aggregate in concrete or grout.*

In France, cement manufacturers have developed a charter specifying the acceptability thresholds for input waste to be added directly to raw cement meal. These conditions remain very general and include a fixed minimum content for the main cement raw meal constituents, restrictions regarding heavy metal content, and a fixed content limit in total hydrocarbons.

In practice, however, each cement plant has its own internal constraints specific to each facility, its organization regarding supply and its operating mode. These constraints may address physical characteristics (water content, granulometry...) and chemical ones.

In France, the cement industry is rather reluctant to the practice of processed bottom ash recovery for cement raw meal, mainly because of the high variability of processed bottom ash in terms of contents, and especially the presence of certain pollutants such as heavy metals, chlorine, alkalis or combustion residue liable to decrease clinker quality.

However, this recovery method is being considered in other countries, even authorized in Italy in Japan where manufacturers have developed a technology specifically designed to add processed bottom-ash in raw cement meal.

Several studies addressing the recovery of processed bottom ash as a minor component of cement show that bottom ash only develops weak pozzolanic properties. Moreover, recovery for use as a minor component of cement implies that the processed bottom ash must undergo fine crushing, which is only possible after a detailed sorting process between ferrous and non-ferrous metals. This method of treatment seems prohibitively expensive in view of the mediocre properties of processed bottom ash for this type of application.

MIDND. Des expériences industrielles de fabrications de blocs de béton préfabriqués ou de béton de remblayage de tranchée ont vu le jour.

Les travaux sur l'incorporation des MIDND dans les bétons restent encore d'actualité. Les enjeux sont liés à la maîtrise de la qualité du granulats de MIDND et de sa variabilité tant d'un point de vue environnemental que technique. Des étapes de prétraitement spécifiques apparaissent indispensables pour ce type de valorisation, tout l'enjeu étant de conserver un équilibre économique.

Céramique

La céramique pourrait être également une nouvelle voie de valorisation pour les mâchefers élaborés.

Les céramiques sont des composés très hétérogènes et les mâchefers ont une composition proche du feldspath (composé de silice et d'alumine) ; ils pourraient donc remplacer ce composé dans la fabrication de la céramique.

L'incorporation des mâchefers peut être envisagée dans plusieurs produits. Plusieurs études ont été réalisées et notamment sur les produits suivants :

- Les porcelaines sont caractérisées par une absorption d'humidité très faible et de hautes valeurs de densité et propriétés mécaniques. Elles sont composées de 25 à 50% de kaolin, de 50 à 60% de feldspath et de 5 à 10% de quartz.
- Les carreaux poreux, de moins bonne qualité, sont composés de 30 à 40% d'argile, de 20 à 50% de feldspath et de 10 à 15% de carbonate.
- Les vitrocéramiques sont des matériaux mis en forme à l'état de verre qui subissent un traitement thermique de cristallisation volontaire, contrôlé et partiel.

Bien que les résultats paraissent concluants concernant l'incorporation de mâchefers dans de la céramique argileuse ou feldspathique, cette faisabilité au niveau technique s'oppose à la faisabilité du point de vue économique. Les quantités de mâchefers utilisables sont très faibles (de l'ordre de 100 000 tonnes par an au maximum) et la faisabilité technique montrée sur de faibles quantités nécessiteraient de réaliser des prototypes industriels.

Biogaz

L'épuration des biogaz d'ISD peut également être une voie de valorisation. Actuellement, ce gaz qui est produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales dans des conditions anaérobies est souvent valorisé dans diverses applications. En fonction de ces applications, le traitement (épuration) du biogaz peut être différent.

De par ses propriétés d'adsorption, les mâchefers peuvent rentrer dans la chaîne d'épuration du biogaz notamment pour les composés soufrés comme l'hydrogène sulfuré (H₂S) ainsi que les mercaptans (malodorants et toxiques).

Les mâchefers peuvent donc être utilisés comme matériau filtrant sous différentes formes et notamment utilisés comme :

- couverture des ISD ;
- élément de process.

Couverture des ISD

Dans les ISD, les déchets sont stockés en couches successives couvertes de matériels de recouvrement (terre, argile...) tous les 1 à 2 m et compactées de manière régulière. La hauteur totale de couche peut atteindre environ 20 m.

Sur la base de taux de captation expérimentaux, il a été proposé un modèle de mise en œuvre d'une installation pilote

The use of processed bottom ash as aggregate for concrete has been promptly considered, as well as the reactivity of processed bottom ash in contact with cement and the pathologies liable to derive from it.

It was therefore obvious very early that the post-combustion processing steps play a major part in the recovery potential of processed bottom ash as aggregate for concrete. Steps such as magnetic overband separation, screening and removal of non-ferrous metals are therefore essential. The results of these sorting operations, especially the removal of non-ferrous metals, will have a direct impact on the sustainability of the concrete containing processed bottom ash. Industrial experiences have been initiated such as manufacturing prefabricated concrete blocks and trench backfilling concrete.

The studies on the incorporation of processed bottom ash in concretes are still relevant. Issues regarding the management of aggregate quality in processed bottom ash and its variability from both an environmental and a technical standpoint are at their core. Specific pre-treatment steps appear indispensable for this type of recovery; the whole challenge is therefore to maintain an economic balance.

Ceramics

Ceramics could also constitute a new recovery path to consider for processed bottom ash.

Ceramics are very heterogeneous compounds, with a similar composition to that of feldspars. (alumina-silicate mineral); bottom ash could therefore replace this particular component involved in the manufacture of ceramic material.

The incorporation of bottom ash can be considered for various products. Several studies have been carried out, especially regarding the following products:

- *Porcelains are characterized by very weak moisture absorption properties, high density values and mechanical properties. They are made of 25 to 50% kaolin, 50 to 60% feldspar and 5 to 10% quartz.*
- *Porous tiles, which are poorer quality, are made of 30 to 40% clay, 20 to 50% feldspar and 10 to 15% carbonate.*
- *Glass-ceramic materials are shaped when in a glass state, and undergo a controlled and partial thermal crystallization treatment.*

Although the results seem conclusive regarding the incorporation of bottom ash in clayey or feldspathic ceramics, its economic feasibility doesn't match its technical feasibility. Indeed, very small amounts of bottom ash are usable (around 100 000 tons maximum per year) and proving its technical feasibility on small quantities would require to design and build manufacturing prototypes.

Biogas

The purification of biogas from waste storage facilities can also be considered as a potential recovery path. Currently, gas produced through the fermentation of organic animal or plant matter under anaerobic conditions is often recovered for various applications. Depending on these applications, biogas treatment (purification) can be different.

Due to its adsorption properties, bottom ash can be used during the biogas purification process, especially so for sulfur compounds such as hydrogen sulfide (H₂S) and mercaptans (odorous and toxic).

Bottom ash can therefore be used as filter material in various ways such as:

sur une alvéole (3 500 m²) afin de permettre de valider les résultats obtenus.

Selon les informations recueillies auprès de certains exploitants d'ISD, il existe des études en cours sur l'utilisation de mâchefers dans leurs centres de stockage, notamment pour participer à une première épuration du biogaz.

Enceinte filtrante

Des études ont été réalisées pour utiliser les mâchefers comme matériau filtrant et des brevets ont même été déposés

Selon le brevet déposé pour le compte de SITA Bioénergies l'existence d'un tel procédé se justifie par la nécessité de disposer d'installation fixe ou mobile utilisable sur des champs d'application moins restreint que sur les ISD.

Afin d'augmenter l'efficacité des mâchefers, des produits de charge ou additifs peuvent être mélangés aux mâchefers en vue d'optimiser la capacité de filtration (amélioration de la porosité, de l'aération de la charge, des propriétés mécaniques ou chimiques de la charge traitante...).

La question de la destination des mâchefers saturés n'est pas évoquée dans les documents étudiés mais il est probable que la seule source d'élimination soit les ISDD

CONCLUSION

L'évolution de la réglementation française, par la promulgation d'un Arrêté Ministériel, constitue un net progrès. Malgré cela, il apparaît que la filière de valorisation de la grave de mâchefers actuellement préconisée (utilisation en techniques routières) reste économiquement difficilement rentable (concurrence des autres matériaux, naturels ou recyclés ; éloignement entre les sites de production de la grave et les sites d'utilisation ; contraintes de suivi...).

Des discussions entre les principaux acteurs de la filière (administrations, producteurs, exploitants, utilisateurs) sont toujours en cours afin de tenter d'optimiser ce mode de valorisation en améliorant la communication (sur la qualité du matériau et ses propriétés techniques ; sur la pertinence de réutilisation de matériau produit localement dans le cadre de la politique actuelle d'économie circulaire ; sur la pertinence de la promotion du matériau dans les cahiers des charges...) et en proposant des élargissements du périmètre concerné par son utilisation.

En s'appuyant sur des expériences locales ainsi que sur les techniques utilisées par nos voisins européens, ce présent document recense également les principales pistes de valorisation qui pourraient être envisagées dans le futur ainsi que des modes de traitements différents.

- *Covering for waste storage facilities;*
- *Process element.*

Covering for waste storage facilities

In waste storage facilities, waste is stored in successive layers covered with covering materials (soil, clay) every 1 to 2 m and evenly compacted. Total layer height can reach about 20 m.

On the basis of experimental capture rates, an implementation model for a pilot facility in a cell (3 500 m²) has been suggested in order to validate the obtained results.

According to data gathered from various waste storage facility operators, there are several ongoing studies focused on the use of bottom ash in waste storage sites, especially in biogas purification process.

Filter material

Studies have been carried out in order to use bottom ash as filter material, patents have even been registered.

According to the patent registered on behalf of SITA Bioénergies, the existence of such a procedure is justified by the need to have access to fixed or mobile structures that can be used with a broader scope than waste storage facilities.

In order to improve the efficiency of bottom ash, loading products (produits de charge) or additives can be mixed with it to maximize filter capacity (improving porosity, aeration of the load(charge), mechanical and chemical properties of the treating load (charge traitante)...).

The issue of the destination of saturated bottom ash isn't raised in the studied materials, but it is likely that the only means of elimination is hazardous waste storage facilities.

CONCLUSION

The evolution of French regulations, prompted by the promulgation of a Ministerial Order, represents significant progress. However, it appears that the recovery path currently taken regarding processed bottom ash (used for road construction) is still hardly cost-effective (competes against other materials, natural or recycled; distance between processed bottom ash production sites and locations of use; follow-up constraints...).

Discussions between the main stakeholders of the sector (administrations, producers, operators, users) are still ongoing that focus on trying to optimize this recovery method through better communication (on the quality of the material used and its technical properties; on the relevance of reusing locally-produced material within the framework of the current policy centered on circular economy; on the relevance of promoting the material within the technical specifications...) and the submission of proposals aimed at widening the scope of its use.

Building on both local experiences and techniques used elsewhere in Europe, this document identifies the main recovery leads which could be considered in the future, as well as different processing methods.