

LES DÉCHETS SOLIDES



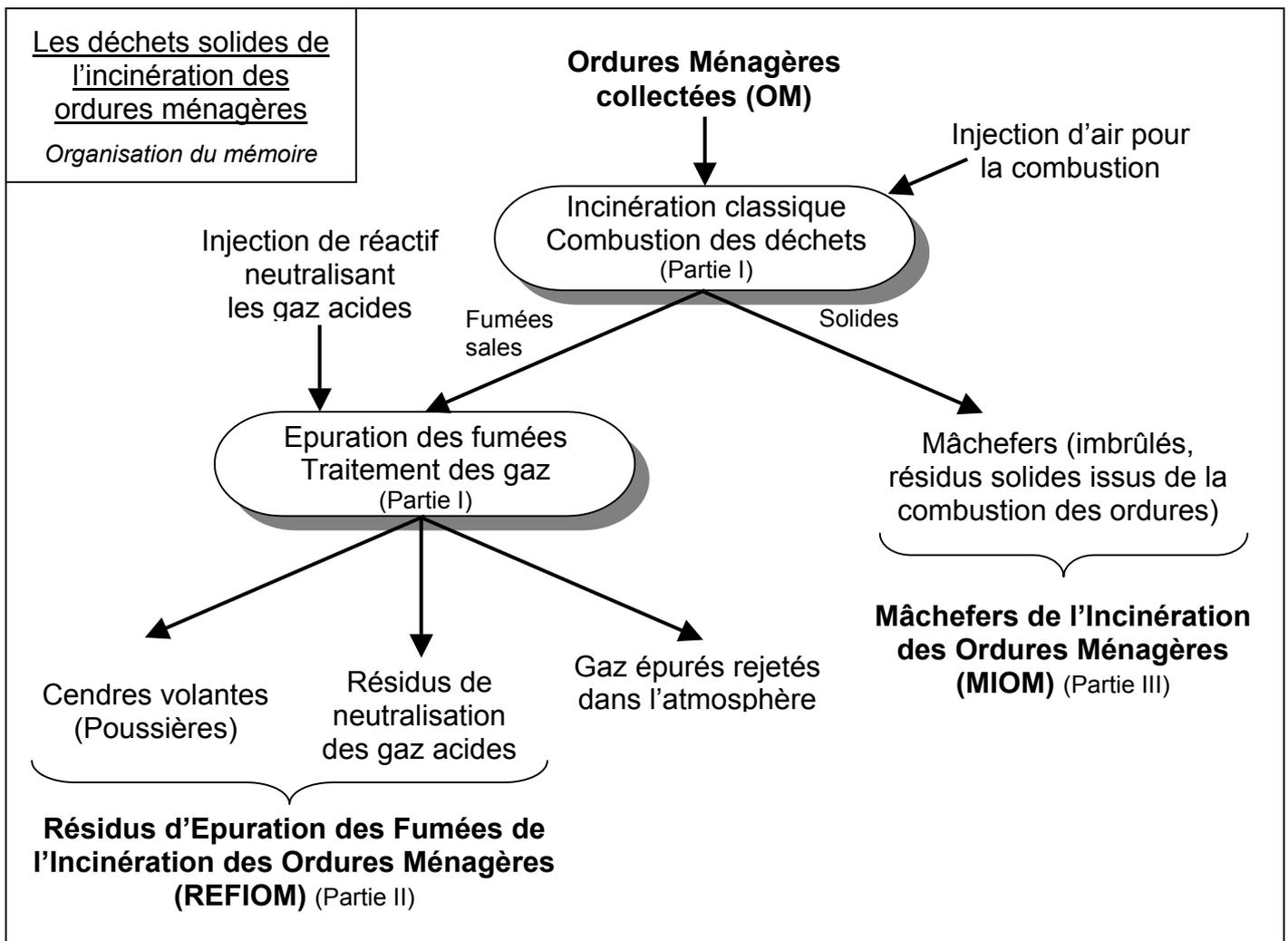
Source : TIRU

DE L'INCINÉRATION DES ORDURES MÉNAGÈRES

Julien BERTHOLON
Maîtrise Sciences de l'Environnement, Milieux Urbains et Industriels
Université de Cergy-Pontoise

Tuteur de mémoire de fin de cycle :
Roger DUVAL Professeur des Universités
Université de Cergy-Pontoise

L'Université de Cergy-Pontoise n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions exposées dans ce mémoire. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.



Plan du mémoire

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 4 |
| I. Les techniques d'incinération | 5 |
| A. Généralités sur l'incinération | 5 |
| B. Les différentes formes de "combustion" | 6 |
| 1. Fours à grille, fours à rouleaux, fours tournant | 6 |
| 2. Fours à lit fluidisé | 7 |
| 3. Thermolyse ou pyrolyse | 8 |
| C. Les techniques de traitement des fumées | 8 |
| 1. Dépoussiérage | 8 |
| a. Electrofiltre | 8 |
| b. Filtre à manches | 9 |
| c. Cyclones ou multicyclones | 9 |
| 2. Neutralisation des gaz acides | 9 |
| a. Procédé humide | 9 |
| b. Procédé semi-humide | 10 |
| c. Procédé semi-sec | 11 |
| d. Procédé sec | 11 |
| e. Condensation | 13 |
| 3. Charbon actif ou coke de lignite | 13 |
| II. Les REFIOM et l'environnement | 14 |
| A. Généralités sur les REFIOM | 14 |
| B. Stabilisation / solidification | 14 |
| 1. Liants hydrauliques | 15 |
| 2. Liants organiques | 15 |
| 3. Vitrification | 16 |
| a. Vitrification dite "classique" | 16 |
| b. Vitrification par creuset froid | 17 |
| C. Valorisation des REFIOM | 18 |
| 1. Les REFIOM sodiques | 18 |
| 2. Les REFIOM calciques | 20 |
| 3. Vitriifiats ou verres de REFIOM | 20 |
| III. Les MIOM et l'environnement | 21 |
| A. Généralités sur les MIOM | 21 |
| B. Maturation et/ou stockage des MIOM | 22 |
| C. Techniques de valorisation des MIOM | 23 |
| 1. Valorisation des métaux | 24 |
| 2. Technique routière et travaux publics | 24 |
| 3. Matériaux de construction, bétons | 25 |
| IV. Bilan massique de l'incinération des ordures ménagères | 26 |
| Conclusion | 27 |
| Annexes | I |
| Annexe 1 : Liste des abréviations utilisées | II |
| Annexe 2 : Liste des illustrations | II |
| Annexe 3 : Seuils réglementaires d'émissions applicables aux UIOM | III |
| Annexe 4 : Seuils réglementaires définissant les catégories de MIOM | III |
| Annexe 5 : Schéma d'une UIOM | IV |
| Annexe 6 : Données complémentaires sur l'incinération des ordures ménagères. | IV |
| Annexe 7 : Composition moyenne des MIOM et REFIOM | V |
| Annexe 8 : Composition moyenne des lixiviats de MIOM et REFIOM | VI |
| Annexe 9 : Eléments de coût pour les UIOM | VII |
| Annexe 10 : Exemple d'abattement de pollution par le traitement des fumées | VII |
| Annexe 11 : Techniques des lits fluidisés | VIII |
| Annexe 12 : Technique de la thermolyse / pyrolyse | IX |

Introduction

La loi du 13 juillet 1992, relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, institue une gestion départementale des déchets ménagers et prévoit la suppression des centres d'enfouissement destinés à les accueillir. Cette loi prescrit, qu'au 1^{er} juillet 2002, seuls les déchets "ultimes" pourront être stockés, les autres devant être valorisés. Un "déchets ultime" est un "déchets qui ne peut pas être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant et dangereux". Les actuels Centres d'Enfouissement Techniques (CET) deviendront des Centres de Stockage de Déchets Ultimes (CSDU). Nous allons anticiper de quelques mois sur la législation et évoquer les CSDU dans ce rapport. D'autres priorités, telles que la réduction à la source des déchets, la valorisation matière et la valorisation énergétique sont aussi de rigueur.

En France, les Ordures Ménagères¹ (OM) peuvent actuellement être valorisées selon trois voies : le recyclage des matériaux (valorisation matière), la fermentation et le compostage (valorisation organique) et la production d'énergie (valorisation énergétique). La production d'énergie est caractérisée par la filière *incinération* et la filière *méthanisation* (extraction du biogaz). Ce rapport ne s'intéresse qu'à la filière *incinération* des ordures ménagères et assimilées (déchets banals des entreprises et administrations collectés en mélange avec les ordures ménagères).

Sur les 30 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés produits chaque année en France, 11 millions de tonnes sont incinérées. L'incinération permet :

- la réduction du volume (90%) et du poids (70%) des déchets entrant et conduit à une minéralisation de ces déchets : les MIOM (Mâchefers d'Incineration des Ordures Ménagères),
- la concentration des principaux polluants, présents dans les déchets entrant ou issus de la combustion, dans les REFIOM (Résidus d'Épuration des Fumées d'Incineration des Ordures Ménagères).
- une valorisation énergétique sous forme de chaleur et/ou d'électricité
- de traiter des déchets non sélectionnés contrairement à d'autres modes de valorisation (tri, compostage...). Des refus de tri peuvent cependant être incinérés.

Ce rapport ne s'intéresse qu'aux déchets solides de l'incinération des ordures ménagères : les MIOM et les REFIOM.

Après quelques généralités sur l'incinération et sur les différentes techniques d'incinération utilisées, nous analyserons les impacts de ces REFIOM et MIOM sur l'environnement. Nous verrons aussi dans quelles mesures ces impacts peuvent être réduits afin de ne pas laisser un lourd héritage aux générations futures. Il est nécessaire d'avoir une approche globale de la gestion des déchets qui passe, bien évidemment, par la valorisation des déchets de déchets.

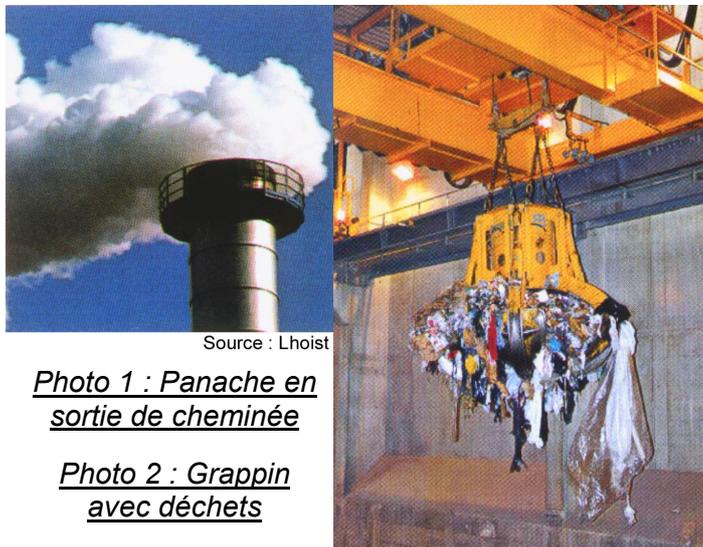
¹ On appelle en général "déchets ménagers" les déchets produits par les ménages, et "ordures ménagères" les déchets collectés dans le cadre des ramassages organisés par les municipalités. Les deux termes ne se recouvrent pas (en milieu rural, certains déchets sont directement éliminés dans la cheminée ou sur le tas de fumier). Ce rapport ne traite que des ordures ménagères puisque tous les déchets incinérés sont auparavant collectés.

I. Les techniques d'incinération

A. Généralités sur l'incinération

L'incinération consiste à brûler les déchets dans des fours spécialement aménagés. En dehors des phases de démarrage et d'arrêt, une alimentation en déchets suffit à entretenir la combustion². L'incinération est aujourd'hui en France et en Europe le second mode de traitement des ordures ménagères après le stockage.

Les installations permettant l'incinération des déchets sont appelées Usine d'Incineration des Ordures Ménagères (UIOM) ou Unité de Valorisation Énergétique (UVE) pour celles qui valorisent l'énergie (chaleur ou électricité). Nous nous intéressons à l'ensemble du parc d'incinérateurs et garderons donc l'appellation UIOM.



Source : Lhoist

Photo 1 : Panache en sortie de cheminée

Photo 2 : Grappin avec déchets

Source : Véritas

Une UIOM est composée d'une fosse de réception des déchets maintenue en dépression pour limiter les odeurs, d'un grappin (*Photo 2*) qui mélange les déchets et alimente les trémies situées au-dessus du four, d'un four qui peut utiliser les techniques décrites dans cette partie, d'un système d'extraction des MIOM (décendreur), d'une chaudière lorsqu'il y a récupération d'énergie, d'équipements de production de vapeur ou d'électricité, d'un système d'épuration des gaz de combustion (dépoussiérage et neutralisation des gaz acides), d'une épuration des liquides dans certains cas et bien entendu d'une cheminée dont la différence de température entre les gaz sortant et l'air extérieur détermine la formation d'un panache (*Photo 1*). Un schéma d'UIOM est présenté en *annexe 5*.

La France possède le plus grand parc d'incinérateurs de l'Union Européenne avec un grand nombre de petits incinérateurs devenus souvent obsolètes. On assiste actuellement à une diminution du nombre d'UIOM (150 incinérateurs fermés entre 2000 et 2002) et une augmentation de leur capacité moyenne (150 000 t/an en 2002). Au 30 janvier 2002, le parc d'UIOM en fonctionnement comporte 161 installations, dont 77 usines d'une capacité supérieure à six tonnes par heure (6 t/h) et 84 installations d'une capacité inférieure à 6 tonnes par heure (6 t/h). On compte sur l'ensemble du parc plus de 110 installations en conformité, représentant une capacité totale de l'ordre de 1680 t/h, 5 installations en cours de mise en conformité et une quarantaine d'installations non conformes, représentant une capacité totale de l'ordre de 110 t/h. Des données complémentaires sont disponibles en *annexe 6*.

En France, l'incinération coûte actuellement entre 30 et 40 centimes par jour et par habitant (éléments de coût en *annexe 9*). Ce coût va certainement augmenter dans les années à venir avec l'interdiction de stockage (au 1^{er} juillet 2002 selon la loi du 13 juillet 1992) des ordures ménagères brutes en CSDU de classe 2 (déchets non dangereux) et les normes

² La législation oblige à maintenir les gaz de combustion à une température de 850°C en sortie de foyer durant au moins deux secondes afin de détruire le plus possible de composés organiques (dont les dioxines et furanes contenu dans les déchets). La température idéale de combustion est située autour de 900°C. Si cette température n'est pas atteinte, la combustion ne sera pas totale et si elle est dépassée, les cendres entrent en fusion et collent aux grilles qu'elles détériorent.

environnementales sur les émissions atmosphériques sont de plus en plus strictes (directive européenne du 28 décembre 2000). Ce coût de traitement, lorsqu'il y a valorisation énergétique, est sensiblement équivalent à celui du stockage en CSDU de classe 2. Une tonne d'ordures ménagères à incinérer coûte environ 70 € lorsqu'il y a valorisation énergétique (100 €/t dans le cas contraire).

Cependant, si les quantités de déchets stockés en CSDU de classe 2 sont fortement réduites à l'aube de l'échéance de juillet 2002, les quantités de déchets stockés dans les 11 CSDU de classe 1 (déchets dangereux correspondant aux REFIOM), augmentent.

B. Les différentes formes de "combustion"

Même si le but premier des incinérateurs est de se débarrasser des ordures ménagères, il est important de noter l'influence du type de combustion sur les déchets produits et l'énergie fournie par les UIOM. Le rendement énergétique des UIOM varie selon les techniques utilisées. Il est de l'ordre de 65 % pour les installations les plus anciennes, de 85 % pour celles qui sont récentes et peut aller jusqu'à 90 % pour les incinérateurs utilisant la technique du lit fluidisé. Cette partie présente les aspects techniques des différentes formes de combustion qu'il existe.

1. Fours à grille, fours à rouleaux, fours tournant

Les MIOM et REFIOM que nous évoquerons dans ce rapport sont issus de ces types de four. Les bilans massiques présentés à la fin de ce mémoire correspondent aussi à ces fours. Ils sont les plus nombreux et présentent donc un intérêt supplémentaire d'étude.

Les déchets, après passage par la trémie, progressent dans le four. Ils sont en couche relativement mince pour faciliter l'alimentation en air. Les débits d'alimentation en déchets et en air sont généralement constants pour optimiser la combustion : température, oxydation, temps de séjour... Le four, ou chambre de combustion, comporte trois zones successives : la zone de séchage en tête, la zone de combustion au centre et la zone de fin de combustion et d'évacuation des mâchefers en bas.

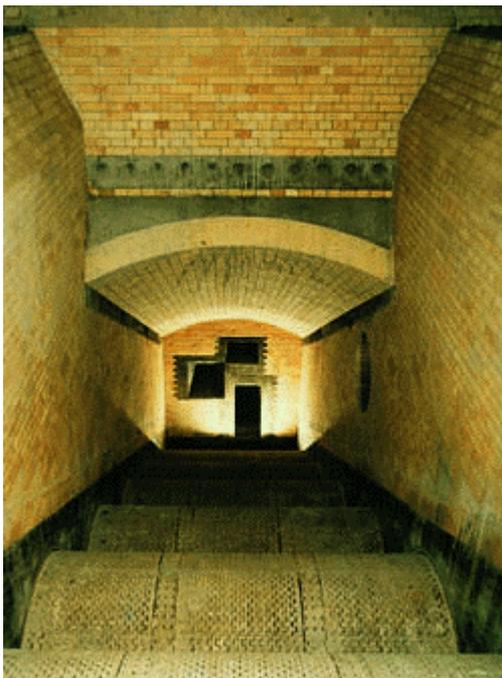


Photo 3 : Four à rouleaux (Source : Vinci)
(Vu d'en haut)



Photo 4 : Four à gradins (Source : Vinci)
(Vu d'en haut)

Le four à grille (*Photo 4*) est actuellement le plus utilisé dans les UIOM. Il est composé d'une grille où les déchets progressent (pendant une durée de 2 à 3 heures) au fur et à mesure qu'ils sont brûlés. En général, les grilles, légèrement inclinées, sont composées d'éléments mobiles en acier réfractaire pour faciliter le mélange air/déchets et assurer une bonne combustion. Il existe un très grand nombre de grilles différentes. Les fours peuvent être constitués de plusieurs grilles installées en gradins pour optimiser l'avancée des déchets et leur combustion ou de grilles horizontales avec un système de poussoir pour faire avancer les déchets au cours de leur combustion. Certains fours possèdent des systèmes de refroidissement des grilles à base d'eau (circulation d'eau à basse température à l'intérieur des grilles).

L'air de combustion, aspirée dans la fosse de réception des déchets, est injectée à travers la grille par le bas. Cet air sert aussi à refroidir les grilles afin de les protéger. Un apport d'air secondaire, introduit au-dessus de la grille avant l'évacuation des fumées, termine la combustion.

Les fours à rouleaux (*Photo 3*) sont constitués de gros rouleaux à fonctionnement autonome qui tournent dans le sens de l'inclinaison du four. L'air est injecté par l'intérieur des rouleaux. La surface de combustion est alors plus grande que dans les fours à grille traditionnels. Ils sont utilisés dans des installations de capacité moyenne à forte.

Il existe aussi des fours tournant ou oscillant autour d'un axe longitudinal légèrement incliné. Les déchets sont introduits dans un tambour oscillant de forme cylindrique où ils s'enflamment pour subir une combustion classique. L'originalité réside dans le cylindre prolongé par un cône d'extraction des MIOM. Le tout est entouré d'une double enveloppe dans laquelle circule l'air de combustion. Les gaz chauds circulent à contre courant à l'intérieur du four et peuvent pyrolyser partiellement les déchets.

2. Fours à lit fluidisé

Ce type de four a été conçu pour l'utilisation de combustibles de mauvaise qualité (tourbes, charbons) et a été adapté à la combustion des ordures ménagères. Les déchets doivent être triés, déferrailés et broyés afin de garder une granulométrie constante. Ce mélange est ensuite homogénéisé avant d'être introduit dans le four. Le four maintient les déchets en suspension, en général au sein d'une masse de produits inertes (sable), grâce à un système d'injection d'air à la base de la chambre de combustion (fluidisation du lit). Le mouvement du lit entraîne un brassage des déchets et la présence d'inertes facilite l'homogénéisation de la température du four. Il existe plusieurs types de fours à lit fluidisé : le lit fluidisé dense, le lit fluidisé rotatif et le lit fluidisé circulant. La différence réside dans la forme des fours, le type d'injection d'air (central, latéral, à grande vitesse...) et le mouvement des particules. Ces techniques sont détaillées en *annexe 11*.

Les déchets solides issus de ce type d'incinération sont de plusieurs types : les cendres lourdes obtenues à la base du four, les cendres sous-chaudière, les cendres de pré-dépoussiérage obtenues à la base du cyclone, les cendres de dépoussiérage issus d'un électrofiltre ou d'un filtre à manche et les résidus d'épuration des fumées issues de la neutralisation des gaz acides. Les cendres sous foyer sont considérées comme des MIOM. Les résidus issus du traitement des gaz par lavage, injection de réactif, ou tout autre moyen équivalent, sont considérés comme des REFIOM. Par ailleurs, les cendres sous chaudière, les cendres sous cyclone et les cendres issues du dépoussiérage par électrofiltre ou filtre à manche sont analysées et classées MIOM ou REFIOM selon les résultats obtenus.

La combustion est plus complète que dans les fours classiques et peut conduire à de meilleurs rendements. Mais les incertitudes réglementaires limitent le développement de cette technique. En effet, les résidus d'incinération ont des caractéristiques (composition et comportement à la lixiviation) sensiblement différentes de ceux de l'incinération dite "classique". En France, cinq unités fonctionnant avec des lits fluidisés traitent des ordures ménagères.

3. Thermolyse ou pyrolyse

La thermolyse est une décomposition thermique des déchets en absence d'air (avec défaut d'air pour la pyrolyse) à une température de l'ordre de 500°C, dans un four rotatif. Les déchets doivent être préalablement broyés et séchés. Le four opère à pression atmosphérique et fait appel aux mécanismes de craquage qui permettent de séparer les composés chimiques d'un solide. Après combustion, les fumées de composition différentes de celles de l'incinération "classique" sont traitées (électrofiltre, filtre à manches...). Le solide récupéré est lavé et trié (séparation des sels, inertes, verres, métaux ferreux ou non ferreux). Il reste alors le "coke", combustible à fort pouvoir calorifique.

Ce procédé est très peu utilisé compte tenu des incertitudes réglementaires (statut du "coke" en tant que combustible), des coûts annoncés et du manque de débouchés pour les différents combustibles. Des informations supplémentaires sur cette technique sont disponibles en *annexe 12*.

Dans la suite de ce rapport, nous ne prendrons pas en compte les résidus de la thermolyse étant donné la faible utilisation de cette technique et la grande différence avec les REFIOM et MIOM courants.

C. Les techniques de traitement des fumées

Quelle que soit la technique de combustion utilisée l'incinération des ordures ménagères génère des émissions polluantes : poussières (cendres volantes, cendres sous chaudière), gaz acides (HCl, SO_x, HF...), métaux lourds (plomb, chrome,...), dioxines et furanes (molécules organochlorées contenues dans les déchets ou formées lors de la combustion). Il est nécessaire de maîtriser ces émissions, à l'aide d'un système de traitement des fumées, pour éviter le transfert de pollution vers l'atmosphère. Ces traitements de fumées génèrent des déchets solides : les REFIOM, dont les compositions sont données en *annexe 7*. Les seuils réglementaires d'émission des UIOM sont présentés en *annexe 3* et un exemple d'abattement de pollution en *annexe 10*.

Nous allons voir les principaux éléments de ce traitement des fumées, tant au niveau du dépoussiérage que de la neutralisation des gaz acides ou des dioxines et furanes. L'étape du traitement des fumées a lieu après la valorisation énergétique si elle existe. Les fumées sont à des températures de l'ordre de 350°C en sortie de chaudière.

1. Dépoussiérage

Ce traitement permet d'éliminer les polluants particulaires : poussières issues de la combustion (cendres volantes) et les produits de neutralisation des gaz acides dans certains procédés. De nombreux métaux lourds, souvent particulaires, peuvent être captés lors du dépoussiérage. Il existe trois types de dépoussiérage : par électrofiltre, filtre à manche et cyclone. Il peut être intéressant, dans le cadre de la valorisation des produits de neutralisation des acides, d'effectuer un dépoussiérage en amont : il s'agit alors d'une double filtration des fumées.

a. Electrofiltre

Le principe de l'électrofiltre fait intervenir les paramètres suivants : charges des particules, champ électrique appliqué, réenvol et résistivité des poussières. Les fumées passent entre des électrodes soumises à une différence de potentiel de quelques dizaines de milliers de volts. Les particules se chargent négativement et s'accumulent sur les électrodes positives. Un dispositif de battage mécanique (petits marteaux qui frappent les électrodes) fait tomber les

particules dans un collecteur avant d'être stockées puis évacuées. Le système de battage peut être électromagnétique mais le but recherché est le même.

Lors d'un traitement des fumées par voie humide, l'électrofiltre est essentiel pour optimiser le lavage des fumées qui intervient juste après. Il est utilisé en amont d'une double filtration avec les procédés sec, semi-sec et semi-humide.

b. Filtre à manches

Ce type de filtre (*Photo 5*) est le plus souvent utilisé pour récupérer les produits de neutralisation des gaz acides avec les procédés sec, semi-sec et semi-humide. Les gaz à dépoussiérer passent à travers des manches en tissu (feutre ou membrane) capables d'arrêter les particules les plus fines. Pour décolmater et récupérer les résidus filtrés, la technique consiste à injecter de l'air à faible pression (pour ne pas remettre les particules en suspension) en sens inverse du flux principal et à récupérer les particules dans un collecteur avant de les stocker et les évacuer.



Photo 5 : Filtre à manches
(Source : Lab)

Couplée avec l'utilisation de filtres à manches, une nouvelle génération de filtres est apparue pour la destruction de dioxines et furanes : les filtres catalytiques (couplage de la filtration sur membrane et de la catalyse). Le catalyseur, intégré dans le feutre des manches, détruit la totalité des dioxines et furanes présentes dans les fumées. Ce procédé est plus efficace que le charbon actif car les dioxines et furanes sont détruites et non adsorbées (stockées) par le charbon. Ces filtres gardent, bien entendu, leur rôle de dépoussiéreur.

c. Cyclones ou multicyclones

Cette technique consiste à mettre les fumées en rotation afin de les centrifuger. Les gaz arrivent de façon tangentielle dans le cyclone : les poussières sont rassemblées en périphérie par la force centrifuge et les gaz dépoussiérés sont évacués par le centre du cyclone. Les multicyclones sont composés de plusieurs petits cyclones au sein d'une gaine commune. C'est la technique la moins chère et la moins efficace pour dépoussiérer les fumées. Elle est de plus en plus abandonnée.

2. Neutralisation des gaz acides

Les fumées doivent subir un traitement complémentaire visant à neutraliser les gaz acides qu'elles contiennent : HCl, HF, SO_x, etc. Il convient de distinguer plusieurs grandes familles de procédés de traitement des gaz acides, Mais ces systèmes ont le même but : neutraliser les acides au moyen d'une base et séparer les produits de réactions. La quantité optimale de réactif nécessaire est calculée en continu en fonction de la composition des fumées brutes. Actuellement, la base la plus utilisée est la chaux. Mais le bicarbonate de sodium (procédé NeutRec[®]) peut aussi l'être lors d'un traitement par voie sèche.

a. Procédé humide

Ce procédé (*Figure 1*) est en général adapté aux grosses installations car il permet de répondre aux exigences les plus sévères. Il s'agit automatiquement d'une double filtration qui conduit à la production de deux types de résidus : les cendres volantes (90 % des REFIOM produits en volume) et le gâteau de filtration (10 %).

Les fumées dépoussiérées sont refroidies en dessous de leur point de rosée (60 à 80°C) par l'injection d'eau afin de condenser les acides sous forme liquide. Pour neutraliser ces acides,

du lait de chaux ou de la lessive de soude (soude caustique) est injecté(e) en fines gouttelettes à très grande vitesse dans une tour de lavage. Le lait de chaux est une préparation liquide dans laquelle de la chaux est préalablement mise en solution dans l'eau. En sortie de la tour, les gaz sont épurés des acides.

Il est nécessaire de traiter les eaux de lavage issues de ce procédé par neutralisation, coagulation, floculation, décantation et déshydratation par filtre presse (ou filtre à bande). Ce traitement physico-chimique des eaux de lavage conduit à la production d'un gâteau de filtration (*Photo 6*) et d'eau claire mais salée. Le gâteau est obtenu après la déshydratation par filtre presse des boues décantées. Le gâteau de filtration contient les métaux lourds sous forme d'hydroxydes précipités et les polluants insolubles. Il est caractérisé par une faible teneur en chlorures partis en solution.



*Photo 6 : Gâteau de filtration brut
(Source : TIRU)*

L'eau salée peut être traitée sur place par évapoconcentration. De nombreux cycles successifs d'évaporation et de condensation permettent de récupérer les sels valorisables (surtout les chlorures).

La stœchiométrie, correspondant à ce procédé humide, est de l'ordre de 1. Cela signifie qu'il faut une demi-mole de chaux CaO pour neutraliser une mole de chlore. Cette technique est la plus intéressante au niveau de la quantité de réactif utilisée.

Cette technique est la seule qui permet de capter efficacement le mercure en sortie de laveur en raison des faibles températures. Il est ajouté du Tri-Mercapto-Triazine (TMT 15) aux eaux de lavage pour le faire précipiter.

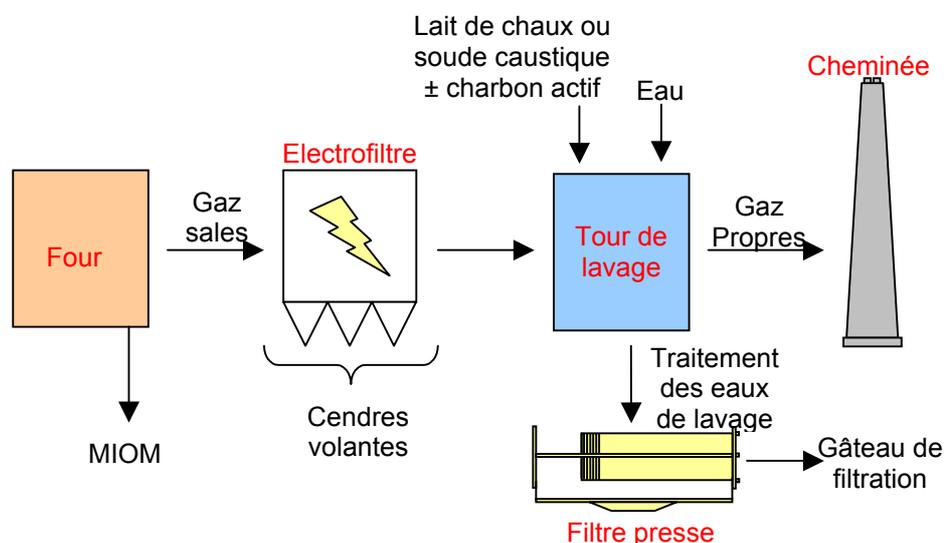


Figure 1 : Procédé humide de traitement des fumées (double filtration)

b. Procédé semi-humide

Le procédé semi-humide (*Figure 2*) consiste, pour neutraliser les gaz acides, à pulvériser de fines gouttelettes de lait de chaux dans les gaz à épurer. Ce réactif est injecté dans les fumées à l'intérieur d'un réacteur, où vont se faire les réactions chimiques. La différence avec le procédé humide est l'absence d'eau pour condenser les fumées. Il n'y a pas d'effluent liquide en sortie de réacteur : la phase liquide est totalement évaporée.

La première partie de la réaction se déroule en phase humide (avec l'eau du lait de chaux). C'est la phase d'absorption des acides dans les gouttelettes. La température des gaz sèche le

lait de chaux et la seconde partie de la réaction se fait en phase sèche lorsque toute l'eau s'est évaporée. C'est la phase de neutralisation des acides par les particules de chaux. Les fumées sont ensuite filtrées au moyen d'un filtre à manche afin de récupérer les REFIOM calciques (polluants et excès de chaux).

La stœchiométrie des réactifs injectés dans ce procédé est de 1,2 à 1,6. Les réactions, plus lentes que dans le procédé humide, obligent à augmenter la quantité de réactif.

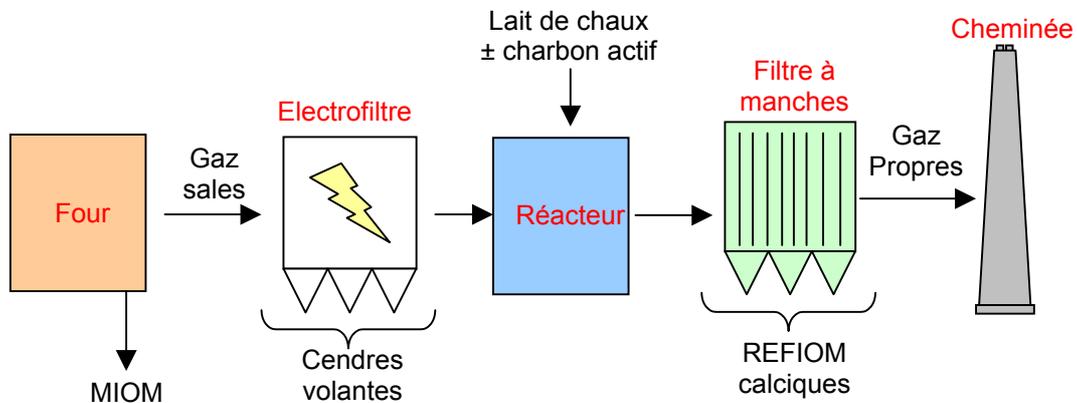


Figure 2 : Procédé semi-humide de traitement des fumées (double filtration)

c. Procédé semi-sec

Les fumées sont tout d'abord refroidies par vaporisation d'eau. La pression partielle en eau dans les fumées augmente. La neutralisation se fait par injection de chaux pulvérulente dans l'enceinte d'un réacteur. Ce procédé (*Figure 3*), après filtration des produits de neutralisation, donne les mêmes REFIOM qu'avec le procédé semi-humide. C'est pourquoi ils ne sont pas exprimés dans les *annexes 7 et 8*. La stœchiométrie est de 1,5 à 2,5.

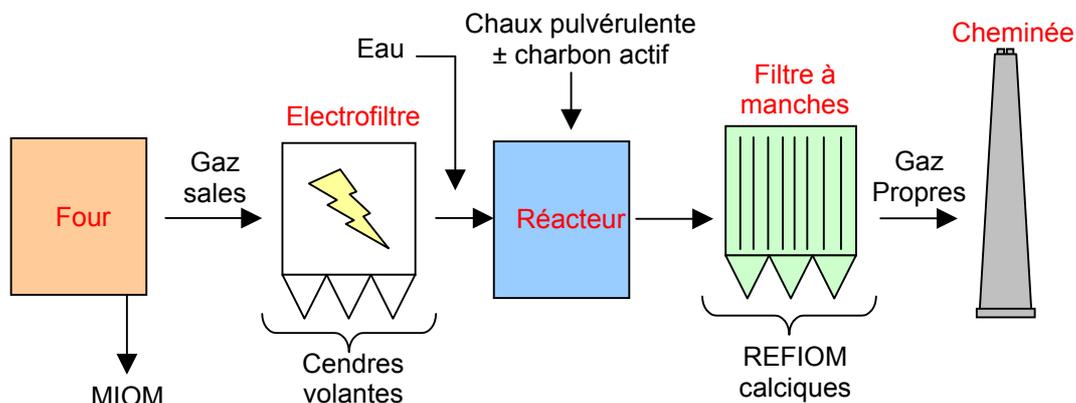


Figure 3 : Procédé semi-sec de traitement des fumées (double filtration)

d. Procédé sec

Dans le procédé par voie sèche (*Figure 4*), deux types de réactifs peuvent être utilisés : la chaux, comme précédemment, ou le bicarbonate de sodium (procédé NeutRec[®] de Solvay).

De plus en plus d'UIOM utilisent le procédé sec d'épuration des fumées à cause de la directive européenne (2000/76 CE) relative aux effluents liquides et parce que ce procédé est plus évolutif que les autres. Des seuils réglementaires plus stricts correspondent simplement à une augmentation de réactif.

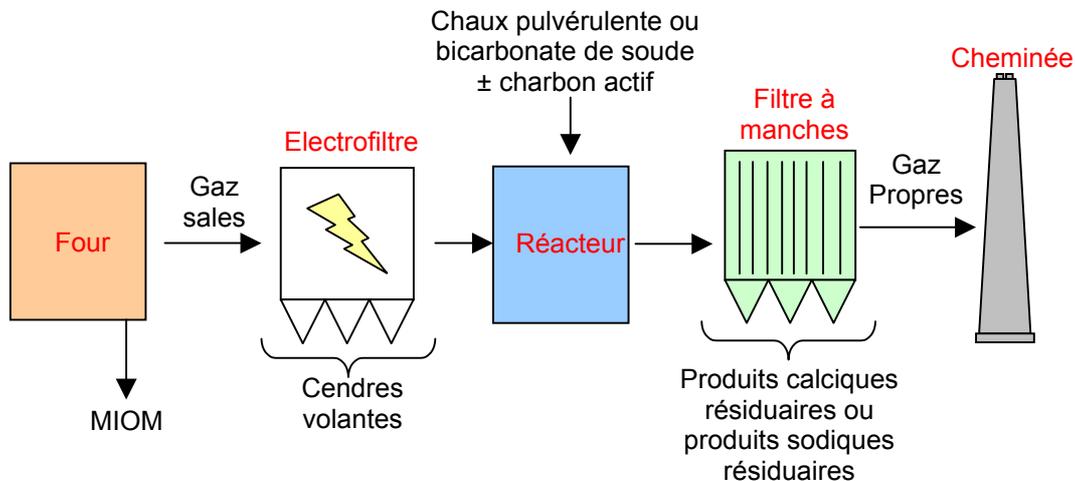


Figure 4 : Procédé sec de traitement des fumées (double filtration)

α. Procédé à la chaux

Les fumées, refroidies entre 200 et 250°C, rentrent dans le réacteur. De la chaux pulvérulente, le plus souvent hydratée, y est injectée. Après un temps de contact relativement long (2 à 6 secondes), les produits de réaction se forment. Les gaz passent alors dans un filtre à manches pour que les REFIOM calciques soient séparés des fumées. Il est utilisé un filtre à manche pour allonger le temps de contact entre les gaz et le réactif. L'inconvénient de ce procédé par rapport aux autres est que les réactions sont lentes : il faut donc beaucoup de réactif pour neutraliser les acides. La quantité de REFIOM formée est aussi augmentée.

Cependant, afin de compenser la cinétique des réactions, il est possible de diminuer encore la température des gaz avant réaction (une condensation des fumées plus grande engendre des réactions gaz-liquide plus rapides que gaz-solide). L'autre solution au problème de cinétique est



Photo 7 : Chaux hydratée (à gauche) et Spongiacal®/Captacal® (à droite) (Source : Balthazard & Cotte et Lhoist)

développée par certains fabricants de chaux qui ont mis au point de la chaux activée (Photo 7) dont les propriétés sont nettement différentes. Le réactif fabriqué par Balthazard & Cotte et Lhoist s'appelle Spongiacal® / Captacal®. Cette chaux particulière est dopée et broyée selon un procédé bien précis. La surface spécifique (supérieure à 35 m²/g), la porosité (volume poreux supérieur à 0,2 cm³/g), la basicité ainsi que la réactivité sont alors considérablement augmentées. La captation des polluants est nettement meilleure pour une quantité de réactif inférieure. Cependant, ce procédé est pénalisé par la carbonatation de la chaux par le CO₂ des fumées qui bloque sa réactivité.

La stœchiométrie de réactif dans ce type de procédé est de l'ordre de 2,5 dans le cas d'une chaux hydratée classique et de 2 avec l'utilisation de chaux activée.

β. Procédé au bicarbonate de sodium

Près de 20 UIOM en France, sur les 161, utilisent ce mode de traitement des fumées. Le procédé sec au bicarbonate de sodium (procédé NeutRec[®] comme Neutralisation et Recyclage des produits sodiques résiduels) est équivalent au procédé sec à la chaux mais avec un réactif différent. Le bicarbonate de sodium utilisé est issu du carbonate de sodium, lui-même issu du calcaire et du sel.

Le bicarbonate de sodium finement broyé est injecté dans le réacteur et reste en contact avec les fumées pendant deux secondes environ. La température minimale est de 140°C. La neutralisation des gaz acides par le bicarbonate de sodium comporte une étape d'activation thermique. Mis en contact avec les fumées chaudes, le bicarbonate de sodium se transforme rapidement en carbonate de sodium à haute surface spécifique et à porosité élevée. Cette transformation du bicarbonate de sodium en "carbonate activé" confère au procédé NeutRec[®] d'excellentes performances de neutralisation des acides. Les produits de neutralisation, les Produits Sodiques Résiduels (PSR), sont récupérés par un filtre à manche. La stœchiométrie est de l'ordre de 2 mais l'exploitant récupère moins de REFIOM qu'il n'a injecté de bicarbonate (réaction chimique dont certains produits sont gazeux et non solides).

Dans ce procédé, il n'est pas important de dépoussiérer les fumées avant d'injecter du bicarbonate de sodium : la quantité de réactif reste la même. Cependant, afin de pouvoir recycler facilement les PSR, il est intéressant d'effectuer la séparation des cendres volantes et des PSR par une double filtration.

e. Condensation

Le dépoussiérage des fumées doit être fait en amont par un électrofiltre. Ce procédé consiste à refroidir les fumées jusqu'aux alentours de 50°C pour qu'elles se condensent. L'eau condensée lors du refroidissement des fumées permet de capter les acides. Ainsi, les acides et les métaux lourds sont absorbés par l'eau condensée ou sont directement condensés. Les condensats sont récupérés et neutralisés par du lait de chaux avant d'emprunter le réseau d'épuration des eaux adéquat.

Ce procédé, qui a du mal à se développer, est limité aux petites installations. Il engendre des coûts d'investissement énormes, compte tenu des matériaux spéciaux nécessaires pour résister à l'acidité des condensats.

3. Charbon actif ou coke de lignite

Contrairement aux idées reçues, les procédés d'épuration des gaz ne captent ni les métaux lourds ni les dioxines ni les furanes. C'est l'action du dépoussiérage qui est la raison de la diminution des concentrations de ces polluants : les polluants particuliers ou fixés aux poussières sont récupérés par le système de dépoussiérage.

Le procédé au charbon actif est utilisé pour le traitement des métaux lourds, dioxines et furanes en complément de tous les traitements de fumées vus précédemment. Il est mis en œuvre si une UIOM dépasse les seuils réglementaires. Le charbon actif est un matériau issu du traitement thermique de charbon minéral. Sa surface spécifique est ainsi augmentée. Les polluants sont adsorbés (stockés) dans le charbon actif. En substitution au charbon actif, il peut être utilisé du coke de lignite.

Plusieurs types d'utilisation existent dans le cadre du traitement des fumées d'incinération des ordures ménagères. Il peut être injecté, sous forme particulaire, directement dans les gaz à épurer (voie sèche, semi-sèche ou semi-humide). Cette forme se retrouve donc dans les REFIOM collectés en aval. L'autre utilisation est le filtre à charbon actif : le charbon actif est enfermé dans une enceinte que les eaux de lavage des gaz (voie humide) traversent. Il est en général nécessaire de mettre plusieurs enceintes en batterie.

II. Les REFIOM et l'environnement

A. Généralités sur les REFIOM

Les REFIOM sont de trois types selon les différents procédés d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères : les cendres volantes, les gâteaux de filtration et les produits secs de neutralisation des gaz acides.

La quantité de REFIOM dépend du mode de traitement des fumées. On peut estimer leur quantité moyenne entre 3 et 5 % du tonnage incinéré. Des données moyennes de composition des REFIOM sont fournies en *annexes 7 et 8*. Le contenu des REFIOM est caractérisé par sa richesse en sels (chlorure de calcium, chlorure de sodium...) produits par les réactions acide-base de neutralisation des gaz acides. Ils contiennent une grande quantité de métaux.

Le caractère dangereux des REFIOM provient de leur capacité à libérer, ou relarguer, les polluants tels les métaux lourds et les dioxines et furanes. Par exemple, le plomb contenu dans un verre en cristal (30 % contre 1 % dans les REFIOM) ou le zinc qui revêt les toitures sont sous une forme chimique qui les empêche naturellement d'être relargués dans leur environnement. Le principal vecteur du transport des polluants vers l'extérieur est l'eau.

Depuis le 30 mars 1995, les REFIOM doivent être stabilisés et solidifiés avant d'être stockés en CSDU de classe 1 (arrêté du 18 décembre 1992 modifié le 18 février 1994 qui fixe les conditions d'acceptation en CSDU de classe 1). En effet, si la matrice des REFIOM stabilisés ne retient pas suffisamment les polluants, ils risquent d'être captés par l'eau naturelle et polluer les aquifères ou être absorbés par des organismes vivants. Cette caractéristique, pour un matériau donné, à relarguer un de ses constituants est appelée la lixivibilité et doit être contrôlée avant stockage. Les REFIOM bruts étant pulvérulents, ils doivent aussi être solidifiés (résistance mécanique adéquat).

La France en produit chaque année 400 000 tonnes. Le stockage en CSDU de classe 1 coûte en moyenne 183 €/t de déchets (transport et stockage, hors stabilisation / solidification), les sites sont très peu nombreux et il est de plus en plus difficile d'en ouvrir. Beaucoup d'exploitants d'UIOM réfléchissent donc à un système de valorisation *in situ* pour remplacer le stockage.

B. Stabilisation / solidification

La stabilisation des REFIOM est une opération qui consiste à diminuer leur toxicité, le plus souvent sous une forme chimique moins facilement mobilisable par l'environnement. Cette étape ne change pas forcément les propriétés physiques du déchet. Elle est considérée comme un pré-traitement si la détoxification est incomplète. Des tests de lixiviation vérifient la bonne stabilisation : les polluants ne doivent pas être relargués.

La solidification est une opération qui transforme le REFIOM en un solide, le plus souvent monolithique afin de réduire au maximum les contacts entre le déchet et l'environnement. Le relargage des polluants est ainsi réduit. Cette étape est parfois confondue avec celle de la stabilisation (des réactions chimiques peuvent avoir lieu lors de la solidification). La solidification doit être contrôlée par des tests de résistance mécanique : aucun délitement ou fissuration ne doit apparaître.

Parallèlement, la notion d'enrobage / encapsulation consiste à entourer le déchet d'une enveloppe imperméable et chimiquement inerte : "big-bag" et CET ou CDSU sont les exemples macroscopiques les plus pertinents appliqués à notre cas. Les liants organiques sont des applications microscopiques de l'encapsulation des déchets.

Les buts recherchés par la stabilisation / solidification sont donc les suivants : amélioration des possibilités de manutention et des propriétés physiques du déchet ; limitation de la solubilité et/ou de la mobilité des constituants ; diminution de la surface à travers laquelle se font les transferts ou pertes de substances dangereuses et la limitation de la perméabilité du déchet obtenu.

Plusieurs techniques de stabilisation / solidification des REFIOM sont actuellement disponibles. La plus courante est celle qui utilise des liants hydrauliques. La stabilisation / solidification par des résines organiques est assez peu répandue (au stade pilote) alors que la vitrification prend un essor important.

1. Liants hydrauliques

Un grand nombre de REFIOM sont stabilisés / solidifiés par des liants hydrauliques et d'autres adjuvants spécifiques, étudiés au cas par cas. Cette technique assure une bonne stabilité physique et chimique des produits solidifiés pour un coût raisonnable, une mise en œuvre facile et une application large. Les produits sont inertes aux ultraviolets, difficilement biodégradable et relativement insolubles dans l'eau.

Les principales actions de ce traitement sont : de neutraliser les acides faibles et les bases fortes, de favoriser la précipitation de certains sels solubles (métaux lourds piégés), d'adsorber dans les silicates tétraédriques les ions restant en solution après précipitation et de participer aux processus de solidification et gélification (matrice solide peu perméable).

Le poids et le volume des REFIOM, après traitement aux liants hydrauliques, est multiplié par deux (97 % de matière inerte et 3 % de polluants dangereux dont le tiers sous forme stable). Ceci pose donc des problèmes de coût et d'espace dans les CSDU de classe 1. Un autre problème à résoudre est la présence d'impuretés susceptibles de nuire à la prise du ciment. Les matières organiques, les sels de manganèse, cuivre, plomb, étain, zinc, les sels de sodium et certains chlorures peuvent retarder de quelques jours, voire inhiber, la prise des liants hydrauliques. Ces composés sont, de plus, lixiviables et risquent d'engendrer des gonflements et fissures. La présence de chaux en excès risque d'augmenter le pH et de former des complexes métalliques solubles (zinc et plomb). La longévité des solides obtenus (étudiée par Inertec, filiale de Sita et Soletanche-Bachy) peut être diminuée par la présence d'hétérogénéités (ségrégation des composés lors de la solidification, présence d'air).

Le coût de ce traitement est de l'ordre de 275 à 340 €/t en incluant le transport délicat de ces matières dangereuses et leur stockage. Des brevets sont déposés sur les différents procédés par Inertec, Ecofix, Ashrock...

Les liants hydrauliques peuvent être remplacés par du laitier de hauts fourneaux vitrifié moulu et employé de la même manière. Cette technique, au stade de pilote, peut engendrer des problèmes de résistance mécanique.

2. Liants organiques

Les liants organiques sont utilisés pour la stabilisation des déchets radioactifs ou organiques difficilement destructibles par incinération. On les rencontre peu lors de la stabilisation / solidification des REFIOM. Il est néanmoins intéressant de les citer puisqu'il est possible de les utiliser. Les principales limites sont d'ordre économiques (grande quantité de polymère) et technique (instabilité à la lumière et à la chaleur, les nitrates et chlorures ne sont pas compatibles avec les résines, pas de neutralisation chimique) et réglementaire (test de non-fermentescibilité qui caractérise leur tenue à long terme avant leur stockage en CSDU).

L'action principale de ces liants est d'encapsuler les déchets sans réaction directe entre le déchet et le polymère (confinement des polluants). La très faible perméabilité des solides obtenus leur confère des performances souvent meilleures que celles des liants hydrauliques.

Ces liants se divisent en deux sous-groupes suivant les caractéristiques du matériau utilisé : les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

Les résines thermodurcissables (urée formaldéhyde et epoxyde principalement) n'ont aucune application dans le domaine des déchets non radioactifs. Elles sont issues d'une réaction de polymérisation de monomères en présence d'un catalyseur (elles ne ramollissent pas lors d'une montée en température mais se décomposent). Les déchets sont mélangés avec des monomères, ou pré-polymères, qui ont pour but de les piéger (pas de liaison chimique entre les monomères et les déchets) : c'est une microencapsulation.

Les résines thermoplastiques (asphalte-bitume, polyéthylène, polypropylène, nylon, polystyrène mais aussi plastiques extraits de la collecte sélective des ordures ménagères) sont des matériaux organiques dont la viscosité diminue quand la température augmente. Ces liants sont insolubles dans l'eau, ont de bonnes propriétés de couverture et une élasticité leur conférant une bonne résistance mécanique. Cependant, le solide facilement déformable doit être conditionné en fûts servant de conteneur (moule assurant une bonne résistance mécanique). L'utilisation simple consiste à mélanger le déchet avec la résine à une température appropriée et de couler le mélange dans les fûts qui seront théoriquement stockés en CDSU de classe 1.

Contrairement aux procédés inorganiques, ces techniques nécessitent des équipements complexes et une main d'œuvre spécialisée. La consommation d'énergie est plus importante en raison de la fonte des polymères et de la déshydratation éventuelle du déchet. La tenue à long terme des solides obtenus n'est pas encore prouvée et ces techniques n'ont pas encore dépassé le stade pilote.

3. Vitrification

a. Vitrification dite "classique"

Le procédé de vitrification (Figure 5) vise à traiter les cendres volantes issues du dépoussiérage des fumées afin d'obtenir un vitrifiat, ou verre de REFIO (matrice vitreuse où les polluants sont parfaitement confinés dans un matériau non poreux). Cette technique est une alternative aux techniques précédemment exposées mais qui offre au déchet la possibilité d'être assimilée à une matière première secondaire. Le but recherché est donc légèrement différent : créer de la matière valorisable et non stabiliser / solidifier un déchet toxique pour le stocker.

Les cendres sont introduites en continu dans le four de vitrification. Dans la partie centrale du four, un système de chauffe (torche à plasma, arc électrique sans projection d'air ou certains procédés utilisés en métallurgie) porte en fusion les produits à traiter (de 1350 à 1450°C). Le temps de séjour des cendres dans le four permet un taux d'infondus nul et une parfaite homogénéité du vitrifiat (phénomènes de convection du bain dû au système de chauffe). Le vitrifiat passe ensuite dans une zone de tranquillisation et le produit en fusion est évacué par un orifice de coulée, vers un dispositif de refroidissement et de conditionnement adapté à l'utilisation finale du vitrifiat. Le refroidissement étant rapide,

Figure 5 : Procédé de vitrification des cendres volantes de procédé humide (Source : Europlasma)

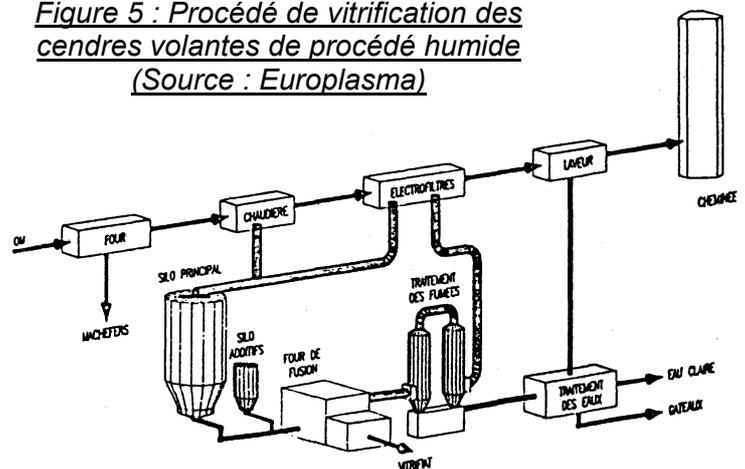


Photo 8 : Coulée de vitrifiat en sortie de four (Source : Europlasma)

le liquide obtenu en sortie du four (*Photo 8*) passe à l'état vitreux, ou amorphe (mélange homogène non cristallin). Ce refroidissement rapide permet d'éviter la formation de phases réduites cristallisées facilement altérables (sulfures, phosphures) et favorise les phases plus résistantes comme la spinelle. Le vitrifiat représente environ 90 % de la masse traitée, mais le volume ne représente que 15 % du volume initial.

Les fumées dégagées par le four de vitrification sont traitées de la même manière que celles de l'UIOM à laquelle l'unité de vitrification est en général associée.

Le procédé de vitrification est optimisé pour un système d'épuration des fumées par voie humide : les sels contenus dans les REFIOM de voie sèche (chlorures et sulfates) se volatiliseront dans le four de vitrification et l'obligation de les neutraliser nécessiterait d'augmenter la quantité de réactifs. L'excès de calcium (ou de sodium) dans le REFIOM obligerait aussi d'augmenter notablement la température de fusion dans le four. Il est donc plus intéressant de séparer les cendres volantes des autres REFIOM pour les vitrifier. Pour les mêmes raisons que précédemment, il n'est pas judicieux de vouloir vitrifier le gâteau de filtration. De plus, les polluants y sont sous une forme stable.

La vitrification engendre un coût d'exploitation de l'ordre de 380 €/t de cendre. Ce coût inclut l'ensemble des charges d'exploitation et reste supérieur à la stabilisation / solidification classique. Cependant, cet écart est à ramener au statut des sous-produits qui, dans le cas de la vitrification, ne sont pas des déchets ultimes mais des matières premières secondaires valorisables.

Actuellement en France, une unité de vitrification est en exploitation à Cenon (Bordeaux). D'autres, comme à Saint-Ouen pour le Sycotom de Paris, Bègles (Bordeaux) ou Nice se mettent en place. Ce procédé est généralisé dans d'autres pays comme le Japon où près d'une quarantaine d'unités de vitrification sont en exploitation. Les pays comme la Belgique, la Corée ou Taiwan, qui ont de gros problèmes de dioxine à résoudre, sont en train d'étudier l'alternative de la vitrification.

b. Vitrification par creuset froid

Il existe une autre forme de vitrification. Étudiée depuis 20 ans par le Centre d'Etudes Atomiques (CEA) pour la vitrification de déchets nucléaires, la vitrification par creuset froid (*Figure 6*) est également adaptée à des applications civiles. Des essais de vitrification d'amiante, de mâchefers et de boues de station d'épuration ont été réalisés avec succès. Le CEA vient de breveter un procédé de vitrification par creuset froid des REFIOM chargés en chlorures (c'est le cas des REFIOM issus du traitement des fumées par voie semi-humide, semi-sèche ou sèche).

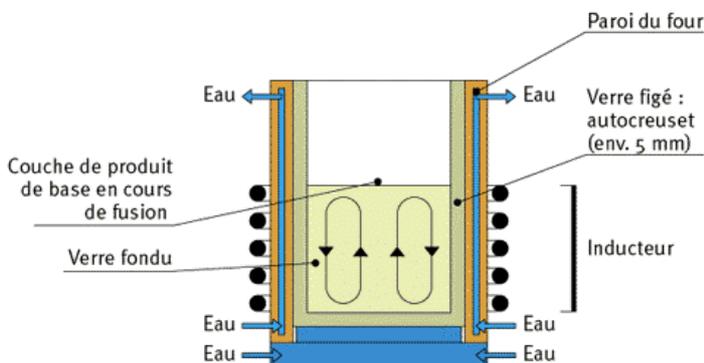


Figure 6 : Principe de la vitrification par creuset froid (Source : CEA)

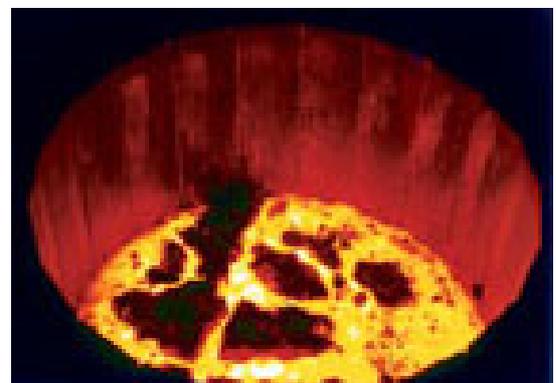


Photo 9 : Four de vitrification par creuset froid (Source : CEA)

Le système de chauffe est caractérisé par un inducteur (courant de Foucault). La technique du creuset froid, également appelé "autocreuset", consiste à isoler la paroi du four du matériau en fusion en interposant une fine couche solide (1 à 10 mm) du même matériau ; celle-ci se forme spontanément, au contact des parois du four refroidies par circulation d'eau. Quand cet "isolant" est en place, il est possible de traiter des déchets toxiques qui mettraient en péril le four, monter à des températures extrêmes (2500°C et plus typiquement 1400°C pour les REFION), élaborer des matériaux ultra-purs sans craindre un contact avec les parois. Seule contrepartie : à température identique, la consommation énergétique est plus élevée que dans un four de vitrification classique.

Mais jusqu'ici, la vitrification des REFION restait difficile du fait de leur teneur en chlorures, volatils aux températures de vitrification. Pour contourner cette difficulté, les REFION sont chauffés dans un four de vitrification par creuset froid. L'élévation de température génère des produits gazeux chargés en métaux lourds sous forme de chlorures (zinc, plomb, cadmium, chrome, etc.). Ces produits gazeux sont récupérés, puis lavés dans un réacteur gaz / liquide afin de bloquer les métaux dans une solution aqueuse. Cette solution passe ensuite dans un appareil de précipitation, ce qui permet de récupérer les métaux. Le précipité est filtré, lavé, puis réintroduit dans le four où il se prête alors à la vitrification puisque les métaux sont alors sous forme d'oxydes. Sur la *Photo 9*, on distingue clairement le verre encore solide (fragments rouges et noirs) et le verre liquide (jaune).

Il faut surtout savoir qu'au lieu de "bétonner" chaque année 12 000 tonnes de REFION (la stabilisation / solidification au liants hydrauliques double le poids des REFION), la vitrification (classique ou par creuset froid) permettrait d'obtenir environ 5000 tonnes de verres totalement inertes et valorisables. Les différences de consommation d'énergie et de coût sont-elles en équilibre avec le changement de statut du produit ?

C. Valorisation des REFION

1. Les REFION sodiques

La production de REFION sodiques est couplée à l'épuration des fumées d'UIOM par voie sèche utilisant le bicarbonate de sodium comme réactif. Ils correspondent à l'ensemble *cendres volantes et PSR*. Selon le type de filtration, simple ou double, le traitement de ces REFION est différent. Ces produits contiennent aussi le charbon actif éventuellement mis en œuvre au cours du traitement des fumées.

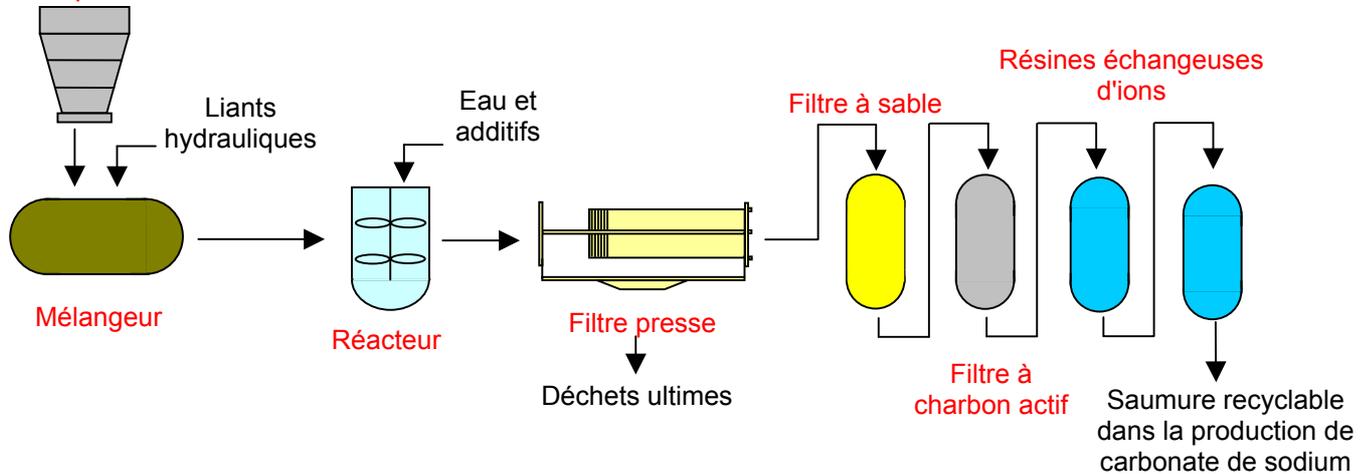
Simple filtration des fumées

Les REFION sodiques issus d'une simple filtration sont mélangés à des liants hydrauliques, puis mis en solution aqueuse avec certains additifs. La suspension formée passe par un filtre presse qui sépare les insolubles. On obtient une saumure et un gâteau de filtration. La saumure brute passe sur un filtre à sable et sur un filtre à charbon actif pour que les composés organiques restants soient adsorbés. Les dernières traces de résidus sont éliminées par le passage sur des résines échangeuses d'ions (essentiellement les métaux lourds). La saumure, parfaitement épurée (25 % de sels secs en masse), peut alors être injectée dans la fabrication de carbonate de sodium en tant que matière première de substitution. Le gâteau de filtration, contenant les liants hydrauliques, se solidifie et constitue un matériau inerte (selon les normes françaises de stabilisation) et adapté à un stockage en CSDU de classe 1. L'utilisation d'un filtre presse diminue les occlusions d'air et le risque de ségrégation des composés lors du durcissement : les hétérogénéités chimiques et mécaniques sont réduites, la longévité du solide est augmentée et l'absence de fraction soluble résout le problème de la lixivibilité. Grâce au recyclage interne de tous les fluides de

lavage et de régénération des résines échangeuses d'ions, le procédé ne présente aucun effluent aqueux. Cette technique (Figure 7), procédé Revatech[®], est mise en œuvre par Resolest.

Cendres volantes et PSR mélangés issus d'une simple filtration

Figure 7 : Principe de la valorisation des cendres volantes et produits sodiques résiduels mélangés



Double filtration des fumées

Les PSR (séparés des cendres volantes) sont mis en solution aqueuse à pH contrôlé, avec certains additifs. La suspension formée passe par un filtre presse qui sépare les insolubles : hydroxydes de métaux lourds, charbon actif et restes de cendres volantes. On obtient une saumure brute et un gâteau de filtration. La saumure fait l'objet d'une épuration complémentaire (filtre à sable, charbon actif et résines échangeuses d'ions), et atteint une pureté (25 % de sels secs en masse) qui permet sa valorisation dans la fabrication de carbonate de sodium. Le gâteau de filtration constitue les seuls déchets ultimes à stocker en CSDU de classe 1 (avec les cendres volantes). Comme dans le cas de la valorisation des PSR, le procédé (Figure 8) ne présente aucun effluent aqueux.

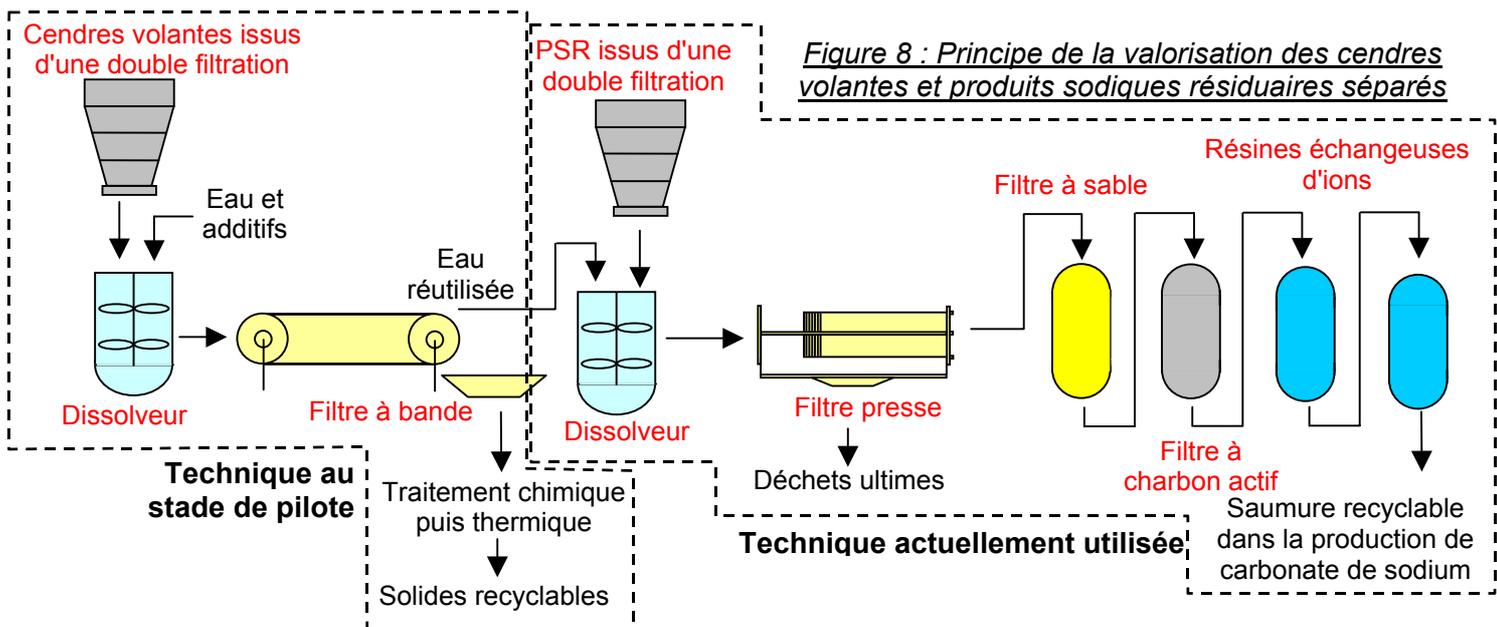


Figure 8 : Principe de la valorisation des cendres volantes et produits sodiques résiduels séparés

Un procédé similaire combine le traitement des PSR avec celui des cendres volantes issues d'une double filtration. Il s'agit du procédé Neutrec Solides[®] (Figure 8) breveté par Solvay. Ce procédé est au stade pilote et les premiers résultats de l'étude seront disponibles en 2003.

Les cendres volantes préalablement lavées passent sur un filtre à bande. Le gâteau de filtration est stabilisé chimiquement puis traité thermiquement pour former une matière valorisable (sans dioxine ni furane). Le traitement chimique par phosphatation (formation de phosphates de métaux lourds stables) diminue le retard de prise des liants hydrauliques, supprime les gonflements, freine le retrait et améliore les performances mécaniques des mortiers. Le traitement thermique améliore la résistivité du béton et augmente la teneur en verre. Ce traitement thermique sert à détruire les organiques (notamment dioxines et furanes). Des études de laboratoire sont en cours pour définir les domaines d'applications possibles de ce solide : bâtiments et travaux publics. L'eau de lavage des cendres volantes est utilisée comme eau de dissolution dans le procédé de traitement des PSR décrit précédemment. Ce procédé recycle d'une part la totalité des sels solubles contenus dans les cendres volantes et les PSR, et d'autre part une très grosse partie des insolubles. Ceci réduit la masse de déchets ultimes du dépoussiérage et de la neutralisation des acides à moins de 4 kg/t d'ordures ménagères incinérées. Dans l'optique de ce futur traitement des cendres volantes et PSR, le système de double filtration est souvent conseillé, dès maintenant, aux exploitants désireux d'utiliser le procédé sec au bicarbonate de sodium.

Les procédés de traitement des PSR sont d'autant plus intéressants pour les exploitants que les produits sortant des unités de traitement ne sont pas soumis à la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP). En effet, ces produits ne sont pas considérés comme des déchets mais comme matière première secondaire valorisable.

2. Les REFION calciques

Lors du traitement des fumées par voie humide à base de chaux, les sels calciques solubles produits par les réactions acide-base partent en solution. Nous avons vu qu'il était possible de les extraire des effluents liquides par évapoconcentration. De nombreux cycles successifs d'évaporation et condensation permettent de recueillir ces sels.

Le chlorure de calcium CaCl_2 (principal sel extrait, en quantité) peut-être recyclé comme sel de déneigement. Le sulfate de calcium CaSO_4 est un matériau inerte, proche du gypse, qui peut servir dans le renforcement de galeries de mines. Le fluorure de calcium CaF_2 n'est ni soluble ni toxique. Les voies de valorisation sont donc grandes. En France, il est cependant impossible d'utiliser ces sels pour le déneigement. Ces sels sont alors utilisés pour accélérer la prise du béton ou comme absorbeur d'humidité (conditionné en sachets).

Le procédé Trefid[®] de Balthazard & Cotte consiste à valoriser les REFION calcique par une double dessalinisation (saumure de CaCl_2 et de NaCl et précipité de CaSO_4), suivie d'une lixiviation basique à la soude (élimination des métaux lourds), d'un lavage (extraction de la soude et des métaux puis régénération de la soude avec du CO_2 issu de l'UIOM) et d'une neutralisation (eau et gaz carbonique). Les produits de ce traitement sont : un résidu stable dont l'utilisation comme matière première secondaire peut être envisagée comme remblai routier et des boues d'hydroxydes métalliques issues d'un filtre presse à stabiliser avant stockage en CSDU de classe 1.

3. Vitripiats ou verres de REFION

Le devenir du vitripiat en tant que matière première secondaire, dépendra de la législation à venir, notamment de l'arrêté sur les résidus de procédés thermiques (RPT) à paraître courant 2002. Cet arrêté va déterminer les tests et les seuils qui s'appliqueront à ces résidus.

Il est techniquement possible de séparer les métaux (boues métallifères) du vitripiat. Ces boues sont alors traitées par l'industrie métallurgique pour recycler les principaux métaux lourds (Plomb, Zinc) comme matière première (170 kg de métaux par tonne de boue métallifère). Cette filière reste encore innovante (séparation des boues métallifères et du vitripiat) et économiquement limitée. Dans la plupart des cas, les métaux ne seront pas extraits

et resteront dans le vitrifiat ou seront volatilisés lors du processus de vitrification. C'est le cas du vitrifiat dont nous parlerons dans cette partie.

Du fait de sa faible teneur en métaux lourds et de son excellent comportement aux tests de lixiviation (lixiviation proche de zéro), le vitrifiat minimise à long terme les risques de contamination de la nappe phréatique. En effet, de nombreux tests de stabilité à long terme (équivalents à ceux réalisés par le CEA sur les déchets radioactifs) montrent que ces verres sont stables sur des durées de 500 000 ans (vitesse d'altération faible). De nombreux tests montrent que le taux d'infondus (très inférieur à 1 %) est similaire à celui d'un verre à vitre classique. La quantité de métaux de transition (cobalt, zinc, plomb, manganèse, cuivre) est par ailleurs similaire à la composition des vitraux des grandes cathédrales. Ces métaux, sous forme d'oxydes sont stables et ne risquent pas d'être relargués dans l'environnement. De plus, les paramètres d'écotoxicologie observés sont conformes aux critères d'évaluation de l'écotoxicité des déchets. Le vitrifiat possède approximativement la composition d'une roche basaltique (teneur en éléments toxiques inférieure aux seuils de potabilisation de l'eau).



Photo 10 : Pavé de vitrifiat
(Source : Europlasma)

Valorisable, le vitrifiat pourra donc être utilisé comme matériau de construction (pavés, dalles) ou de remblai. La communauté urbaine de Bordeaux, propriétaire du vitrifiat de l'unité de Cenon, va mettre en œuvre la réalisation et l'utilisation de pavés de vitrifiat (Photo 10) pour réaliser un giratoire et un abris de bus. Cependant, si sa valorisation n'est pas possible, il devra être stocké en CET de classe 3 comme déchet inerte. Cette alternative restera économiquement viable compte tenu du prix de stockage en CET de classe 3. Le coût de la vitrification deviendra certainement compétitif lorsqu'un exutoire sera trouvé pour les vitrifiats.

La vitrification offre, sur un plan écologique, des avantages significatifs dans la qualité et le comportement à long terme des produits obtenus et la garantie de la destruction complète des dioxines présentes dans les cendres volantes. C'est l'atout majeur du procédé de vitrification.

III. Les MIOM et l'environnement

A. Généralités sur les MIOM

L'incinération des ordures ménagères en France conduit à la production de 3 millions de tonnes de MIOM par an (80 à 90 % des déchets solides de l'incinération). Ces MIOM représentent 25 % du tonnage incinéré et 10 % du volume entrant.

Ces résidus solides sont constitués de la partie lourde et incombustible des déchets incinérés. Ils se présentent sous forme de granule de couleur grise (Photo 11). La teneur en éléments imbrûlés témoigne de la maîtrise de la combustion des ordures. Les MIOM subissent, à la sortie du four, une extinction humide (en général plongés dans de l'eau) suivie d'un premier déferrailage à l'aide de tambours magnétiques. Les objets encombrants (monstres) sont aussi retirés.



Photo 11 : MIOM en sortie de four
(Source : Tiru)

La composition moyenne des MIOM bruts est la suivante : 62 % de verre et d'alumine, 18 % de calcaire et de chaux, 15 % d'eau (jusqu'à 25 %), 2 % de sels, 1 à 2 % d'imbrûlés et moins de 1 % de métaux lourds. Une composition plus précise (MIOM et lixiviats de MIOM) est donnée en annexe 7 et 8.

Si l'exploitant de l'UIOM choisit de valoriser les MIOM (s'il existe des débouchés), des analyses de lixiviation vont déterminer leur devenir. Les seuils limites réglementaires, présentés en *annexe 4*, sont précisés par la circulaire du 9 mai 1994. Les grandes catégories, basées sur les résultats de lixiviation, sont les suivantes :

- V : les MIOM sont directement valorisables;
- M : les MIOM nécessitent une période de maturation;
- S : les MIOM ne sont pas valorisables et doivent être stockés en CSDU de classe 2.

Des études montrent que la teneur en dioxines des MIOM est de l'ordre de celle des sols non pollués. D'autres études montrent que les transferts de polluants vers l'environnement sont très faibles et n'ont lieu que par l'intermédiaire des particules en suspension.

Le relargage est très limité, compte tenu des conditions d'utilisation restrictives. Il reste cependant le problème de la variation de niveau des nappes phréatiques et de la remontée capillaire des eaux situées à proximité du lieu de mise en place. En effet, les tests de lixiviation permettent de caractériser le potentiel polluant mais ne donnent pas de précision sur les modes de diffusion de ces polluants *in situ*, en fonction des sols.

B. Maturation et/ou stockage des MIOM

Les MIOM sont des produits encore en évolution à la sortie de l'extracteur de l'UIOM. Pour être valorisés, ils vont subir une période de maturation de trois à douze mois si les tests de lixiviation l'exigent. La maturation se fait sur une plate-forme de traitement des MIOM appelée Installation de Maturation et d'Elaboration (IME) des mâchefers. Ces plates-formes peuvent aussi servir de lieu de stockage tampon ou de transit si les MIOM sont directement valorisables.

En France, on compte actuellement une quarantaine d'IME qui traitent plus de 2,25 millions de tonnes de MIOM par an, soit près de 70 % de la production totale de MIOM. La mise en service de plus de 60 % des installations (traitant 65 % du tonnage) s'est faite entre 1995 et 1998. Les plates-formes ont des capacités de traitement très variables, de 10 000 t/an à plus de 200 000 t/an (la moyenne se situe à 40 000 t/an).

Afin de protéger les eaux souterraines d'éventuelles pollutions, les alvéoles des IME sont aménagées de la façon suivante : 1 m d'argile en sécurité passive et une membrane en Polyéthylène Haute Densité (PeHD) de 2,5 mm en

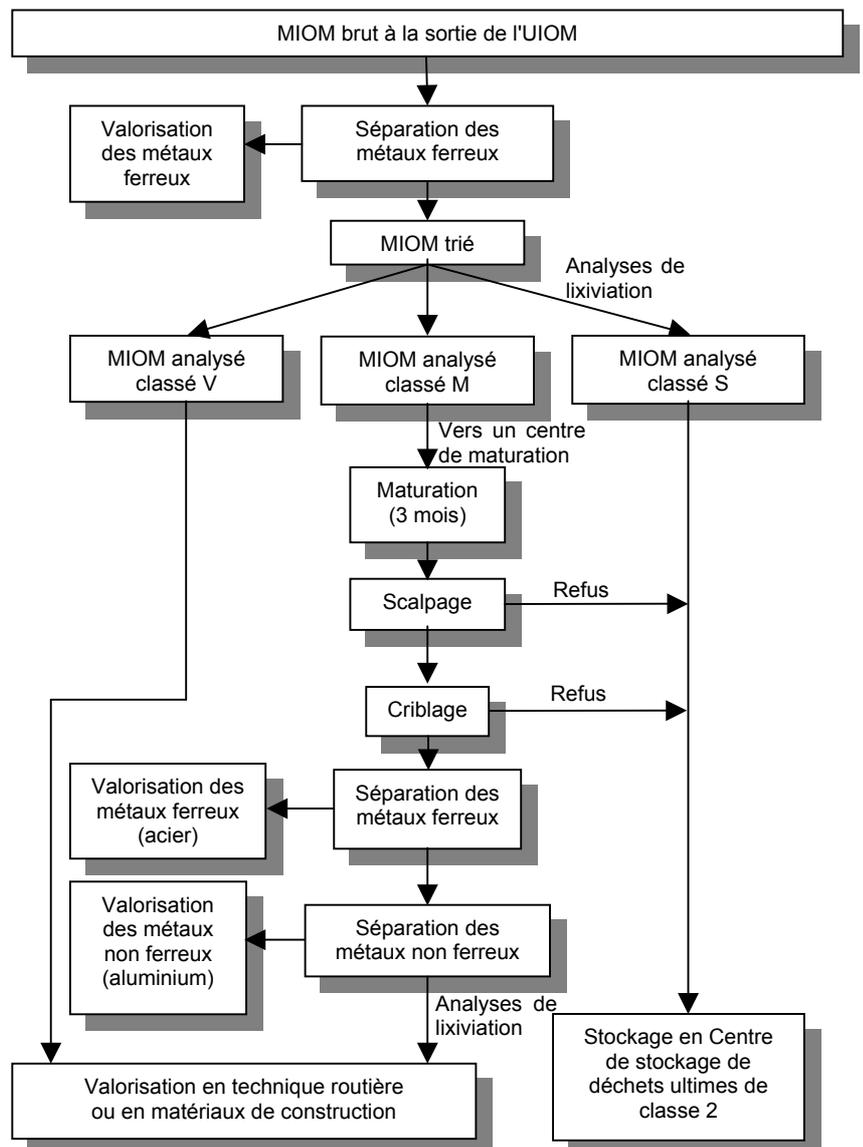


Figure 9 : Les différentes voies possibles des MIOM

sécurité active, sur laquelle repose une couche de sable de 50 cm. Les lixiviats sont traités en station d'épuration ou peuvent être utilisés pour arroser les MIOM et accélérer la maturation. Les étapes subies par les MIOM sont résumées dans l'organigramme de la *Figure 9*.

La maturation des MIOM consiste à laisser les réactions chimiques exothermiques se faire naturellement afin que les polluants soient stabilisés (moins mobilisables) et que la résistance mécanique augmente. Les principales réactions chimiques font intervenir la forte teneur en eau en sortie d'UIOM (15 %), les eaux météoritiques et l'air : oxydation lente des ferrailles et des imbrûlés, carbonatation de la chaux et minéralisation (stabilisation des métaux : la baisse du pH dû à la carbonatation de la chaux induit la formation d'hydroxydes métalliques stables et insolubles).

L'élaboration a lieu au cours de la maturation ou après. Il s'agit de la préparation proprement dite qui a pour but de donner une homogénéité au mâchefer : retirer les éléments indésirables (imbrûlés et nodules d'aluminium responsables de gonflements) et/ou les éléments valorisables (métaux ferreux et non ferreux).

On obtient après quelques mois : une baisse importante du Carbone Organique Total (COT), une baisse légère de la fraction soluble, une baisse très sensible du plomb et des autres métaux lorsqu'ils sont détectables et une augmentation des sulfates. Le relargage des chlorures se fait en quelques années, celui des sulfates en une centaine d'années alors que les métaux et le COT font partie prenante de la minéralisation.

Des traitements aux liants hydrauliques (1 à 7 % de la masse finale), visant à améliorer les caractéristiques mécaniques des MIOM et élargir leur champ d'application, sont mis en œuvre sur certaines plates-formes. Ils permettent aussi de baisser le taux de sulfates, si celui-ci est trop élevé, pour passer de la catégorie "M" à la catégorie "V".

Après traitement en IME, la plupart des MIOM classés "M" peut passer "V". Les MIOM qui, après un an, ne correspondent pas aux exigences de la catégorie "V", sont stockées en CSDU de classe 2. Les coûts de traitement et de stockage s'ajoutent donc.

Le coût global de gestion d'une plate-forme (incluant investissement, exploitation et recettes) est situé autour de 14 €/t. Ce coût est à ramener à l'objectif initial : détourner les MIOM du stockage en CSDU (70 €/t) et les substituer à l'utilisation de granulats naturels.

C. Techniques de valorisation des MIOM

Le taux de valorisation des MIOM était de 56 % en 1995 et de 96,7 % fin 2001. Certaines IME peuvent arriver à un taux de 98,4 % lorsque les étapes suivantes sont réalisées : criblage, séparation des ferreux et non ferreux, broyage du refus et séparation des imbrûlés légers.

La valorisation des MIOM fait partie des écovariantes dans le domaine des travaux publics ou de la construction. Il s'agit d'utiliser toutes les techniques qui consistent à réutiliser des matériaux plutôt que d'en extraire d'autres.

Sans valorisation, les MIOM doivent aller en CSDU de classe 2, pour un coût (incluant transport, redevance au CSDU et TGAP) d'environ 70 €/t. Une étude SOFRES/AMF/ADEME note que *"la valorisation des mâchefers permet de réduire le coût de gestion des mâchefers d'un facteur 2 à 4 selon la distance du CET, soit d'environ 7 à 15 % du coût d'incinération, et d'environ 2 à 5 % du coût de la gestion des ordures ménagères."*

Cependant, les limites de la valorisation des MIOM sont essentiellement dues à la faible extraction des non ferreux qui, pourtant, est un enjeu majeur dans la qualité du matériau utilisé en technique routière. La commercialisation des MIOM, issus d'une IME, est difficile puisque le matériau est encore considéré comme un déchet. Près de 20 % des IME le mettent à disposition gratuitement et 16 % (essentiellement des collectivités locales) assurent, en plus, le chargement et le transport.

1. Valorisation des métaux

L'acier est le premier élément séparé du reste des MIOM grâce à l'utilisation de tambours magnétiques. La récupération des métaux ferreux issus des MIOM est économiquement très intéressante par rapport au recyclage brut qui nécessite plus d'investissements et de main d'œuvre. Les fabricants préfèrent ce type de ferraille puisqu'elle est de meilleure qualité et directement utilisable. L'aluminium, second élément extrait, est récupéré par induction (courant de Foucault : champs électromagnétiques qui s'oppose aux métaux non ferreux). Ces deux métaux sont rachetés par les filières correspondantes.

Les recettes à la tonne d'ordures ménagères incinérée, pour la majorité des IME sont de l'ordre de 1 €/t pour les métaux ferreux et 1 €/t pour les non ferreux.

On observera que la récupération de l'acier et de l'aluminium obéissent à deux logiques distinctes. La récupération de l'acier vise essentiellement à déferrailler les MIOM pour leur donner une composition homogène, et leur permettre ainsi d'être utilisés. La récupération de l'aluminium a, en plus, un objectif financier : bien qu'elle concerne des volumes beaucoup plus faibles, elle rapporte aussi davantage (l'aluminium représente trois fois moins en masse, mais rapporte trois fois plus que l'acier).

2. Technique routière et travaux publics

L'utilisation des MIOM en technique routière (*Photo 12 et 13*) s'est d'abord limitée à la réalisation de remblais. Des réalisations routières en sous-couche ont ensuite vu le jour. C'est en testant des utilisations en couche de base (directement sous le bitume) que des problèmes sont apparus : des gonflements de la surface bitumineuse. Ces gonflements ont été expliqués par la présence d'aluminium dans les MIOM : réactions chimiques s'accompagnant d'une augmentation de volume si la pression des couches supérieures est faible. Pour utiliser les MIOM en couche de base, il est donc indispensable de leur faire subir un traitement adéquat, au liants hydrauliques (ciment) ou hydrocarboné (mousse de bitume) et d'en retirer l'aluminium. Les particules fines doivent être éliminées et la quantité d'imbrûlés contrôlée. Le ciment permet d'améliorer la résistance mécanique, mais aussi de réduire la lixivabilité des métaux.

Actuellement, en technique routière, les MIOM sont essentiellement utilisés en couche de forme (ronds points, parking, autoroute) ou remblai (bords d'autoroute, remblais de quais SNCF, comblement de mines) pour des chantiers nécessitant des quantités importantes. Ils peuvent remplacer le sable traité au liant hydraulique. Les intérêts de ce matériau sont : la prise hydraulique naturelle, la granulométrie constante en sortie d'IME, la portance élevée et une teneur en eau optimale. Cependant, la circulaire du 9 mai 1994 limite l'utilisation des MIOM. Ils doivent être compactés rapidement après leur mise en place, afin de réduire les phénomènes de tassement différentiel et de lessivage. Les autres conditions d'utilisation en technique routière sont les suivantes :

- dans une zone non inondable ;
- à une distance d'au moins 30 mètres de tout cours d'eau ;
- en dehors de tout périmètre d'un point de captage d'eau ;
- les MIOM ne doivent pas être utilisés en remblais de tranchées comportant des canalisations métalliques (possibilité d'effet de pile).

Ces prescriptions, respectant le principe de précaution, seront reprises ou modifiées par l'arrêté "Résidus de Procédés Thermiques" (RPT) qui devrait paraître courant 2002.

Les résultats d'études réalisées en conditions réelles sur des MIOM utilisés en technique routière apportent les conclusions suivantes :

- apport faible des mâchefers sur la composition des eaux de percolation ;
- apport de chlorures du même ordre de grandeur que celui d'un salage hivernal ;

- apport de métaux lourds bien inférieurs aux teneurs de sols non contaminés ;
- diminution importante des quantités relarguées après un an ;
- faible toxicité (pH neutre) ;
- pas de changement des caractéristiques géotechniques.



Photos 12 et 13 : Utilisation de MIOM en technique routière (Source : YPREMA)

Selon le type de procédé utilisé, les recettes sont situées entre 1 et 7,5 €/t de MIOM sortant d'IME lorsque ceux-ci ne sont pas mis à disposition gratuitement. Les entreprises traitant les MIOM ont déposé les noms de leurs produits : Ecograve® est une marque déposée par Yprema, Grave Urbaine® par TIRU et Scorcim® par Jean Lefebvre (Vinci Environnement).

Mais dans le cadre de cette valorisation, plusieurs problèmes restent à résoudre : la compatibilité des rythmes de production avec les rythmes d'utilisation (période de l'année, quantité), l'hétérogénéité des MIOM d'une UIOM à l'autre et la réticence des maîtres d'ouvrages à utiliser ce type de matériau.

3. Matériaux de construction, bétons

Une technique de valorisation des MIOM consiste à en substituer 50 % en masse aux matières premières lors de la fabrication de ciments. Ces ciments, équivalents aux ciments Portland pour certains ou à prise rapide pour d'autres, sont utilisés dans l'élaboration d'éléments préfabriqués en ciment. Cette technique, mise au point au Japon, est développée par Taiheiyo Cement Corporation : ces ciments utilisés pour la formulation de matériaux légers, comme les parpaings de cloisons non porteuses, sont appelés Ecociments®. L'aluminium doit être préalablement extrait des MIOM. En effet, en présence d'humidité, il devient instable et gonfle. Les métaux lourds sont vaporisés dans le four et sont ensuite extraits sous forme de chlorures, captés lors de l'épuration des gaz produits. Les dioxines sont détruites à la température du four et un refroidissement rapide empêche leur reformation. Les tests de lixiviation de ces ciments sont satisfaisants puisque la quantité de métaux lourds ne dépasse pas les limites de détection et le relargage des chlorures est inférieur aux seuils de potabilisation de l'eau.

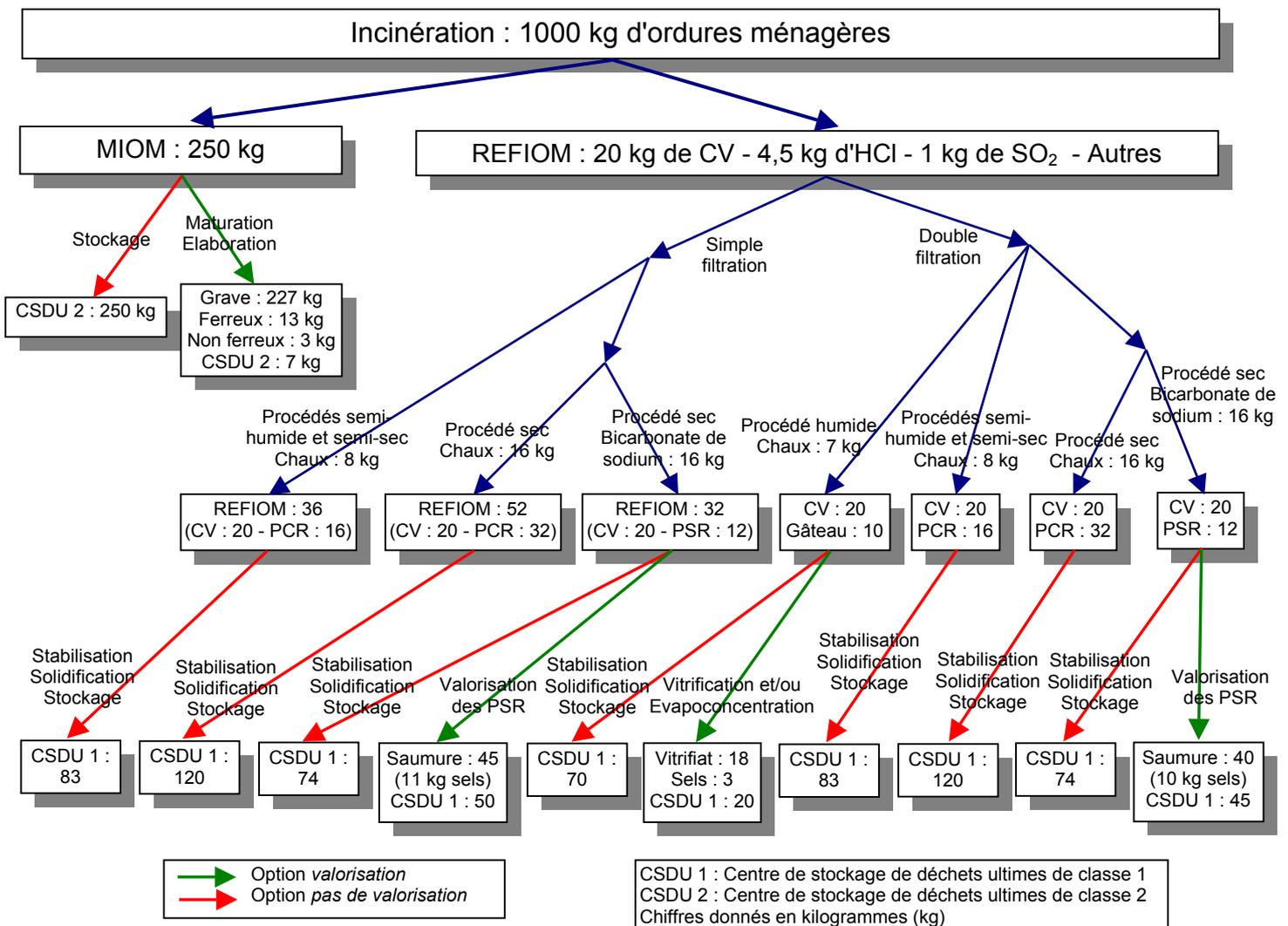
Les MIOM peuvent aussi être utilisés en substitution partielle du feldspath dans la fabrication de carreaux de grès (carrelage). Cette technique, mise au point par Eco-Conception Conseil, est au stade de pilote industriel afin de mettre en évidence la durabilité et la qualité du produit. Les avantages sont nombreux par rapport à la technique classique : coût des matériaux utilisés réduit, température de cuisson diminuée (de 1200°C à 1180°C) et résistance mécanique augmentée (de 20 à 40 %). Cependant, la présence de métaux non ferreux limite le procédé aux carreaux de couleur foncée.

IV. Bilan massique de l'incinération des ordures ménagères

Le bilan matière complet des entrées et sorties d'une UIOM doit prendre en compte les solides, liquides et gaz. Nous allons nous limiter aux solides en étudiant leur bilan massique. Cependant, il est bon de noter que la consommation en eau est comprise entre 0,5 et 1,6 m³/t de déchets incinérés (un procédé humide peut consommer à lui seul 0,6 à 1 m³/t) et que le volume d'air nécessaire à la combustion est estimé à 5500 Nm³/t incinérée. Il faut aussi savoir que le bilan massique de chaque UIOM est spécifique. Il dépend essentiellement des conditions d'exploitation, mais aussi du tri des déchets avant incinération, des habitudes alimentaires locales et des variations saisonnières. Les données fournies par la *figure 10* sont donc des estimations moyennes : plus que la précision de ces chiffres, il faut en retenir l'ordre de grandeur.

Plus qu'un bilan massique de ces solides (REFIOM et MIOM), nous allons étudier l'ensemble de la filière *déchets solides de l'incinération* en y incluant la valorisation éventuelle des MIOM et REFIOM par les techniques actuellement en exploitation. Les procédés au stade pilote (Neutrec Solides[®], vitrification par creuset froid), n'ayant pas fournis suffisamment de résultats, n'y sont pas représentés. La technique de stabilisation utilisée dans ce bilan (en dehors du procédé de vitrification) correspond aux liants hydrauliques.

Figure 10 : Bilan massique de l'incinération des ordures ménagères



Conclusion

Le "zéro pollution" n'existe pas. Il est cependant possible de trouver le meilleur compromis entre le flux de polluants et le flux acceptable par le milieu récepteur. Il s'agit là d'un volet de l'éco-compatibilité d'un déchet. Les techniques réduisant les impacts des déchets de l'incinération sur l'environnement existent. Au stade de pilote ou déjà en exploitation, ce rapport nous montre qu'elles peuvent être efficaces. Le problème, d'ordre économique et politique, est leur utilisation encore restreinte.

Au niveau réglementaire, l'année 2002 est une année charnière : l'échéance du 1^{er} juillet 2002 interdisant le stockage des ordures ménagères brutes en CSDU de classe 2, la transcription en droit français de la directive européenne concernant les émissions polluantes des UIOM et l'arrêté "Résidus de Procédés Thermiques" (RPT) basé sur le principe d'éco-compatibilité qui proposera une orientation unique pour chaque type de déchets issus de procédés thermiques. Cette réglementation sera pourtant amenée à s'adapter à nouveau, compte tenu du caractère éminemment évolutif des produits (REFIOM essentiellement) issus des techniques de dépollution de plus en plus innovantes.

Mais plutôt qu'un système "end of pipe" qui consiste à mettre des filtres pour limiter la pollution, il serait préférable de privilégier les technologies propres (*Best Available Technology (BAT)* : "meilleure technologie possible") et de limiter les déchets à la source. Que ce soit par le biais de l'éco-conception, du réemploi, du tri sélectif ou de la valorisation des déchets de déchets, de nombreuses voies existent et se développent. Cependant, une étude pour le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) montre que la valorisation matière des déchets, par rapport à la valorisation énergétique, n'est pas forcément la meilleure solution (cours des matières recyclées, dégagement de CO₂ et consommation d'énergie). C'est un fait, mais le choix reste à faire.

Satisfaite que ses déchets soient retirés sur le pas de sa porte, la population reste cependant hostile à ces centres de traitement des déchets. Ce syndrome, NIMBY (*Not In My Back Yard* : "pas dans mon arrière-cour"), est basé sur les quelques points noirs qui restent actuellement présents. Il conduit cependant à certains paradoxes. Le premier est que les difficultés d'ouvrir de nouvelles installations (modernes et moins polluantes) peut contribuer à conserver les plus anciennes, certes plus polluantes, mais qui ont le mérite d'exister. Le second paradoxe concerne la fermeture d'usines hors normes qui peut, dans un premier temps, conduire à l'augmentation de l'enfouissement des déchets. Et enfouissement rime avec absence de valorisation... Ce syndrome est donc en opposition avec la plupart des UIOM de plus en plus souvent certifiées ISO 14 001 (référentiel du système de management environnemental) qui respectent les normes instaurées et les bonnes méthodes d'exploitation.

Bibliographie

Actes du congrès international sur les procédés de stabilisation des déchets du 13 au 16 avril 1999 (Stab & Env 99). Société Alpine de Publication, 1999.

ADEME, *Documents divers* (notes de synthèse, guides techniques, atlas des déchets, etc.)

BASUYAU, Vincent, *Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères valorisées en technique routière : l'expérience de l'île de France*, dans Print Industries. Octobre 2001.

BOEN, Roger, "Matériaux ultra-purs ou déchets toxiques, le creuset froid s'adapte à tout", dans *CEA technologies n° 55*, Mars 2001.

BRODEAUX, Celia, *Bilan hydrique du centre de traitement des mâchefers de Lagny sur Marne*. Rapport de stage, Octobre 2001.

COUTAZ, Lionel, *Valorisation des mâchefers d'usines d'incinération d'ordures ménagères*. Rapport de thèse, Janvier 1996.

Dictionnaire de l'écologie. Encyclopaedia Universalis, Albin Michel, 1999.

FOURCY, Patrick, *Stabilisation / solidification de REFIOM par une cendre volante de lit fluidisé : performances et mécanismes de transfert*. Rapport de thèse, Octobre 2000.

GOACOLOU, Honoré *et alii*, *Scorcim pour la valorisation des mâchefers en travaux routiers*, dans *Revue générale des routes et des aérodromes - n° 729* Mai 1995.

LE GOUX, Jean-Yves, LE DOUCE, Catherine, *L'incinération des déchets ménagers*. Economica, 1995.

MARAVAL, Serge, *Stabilisation / solidification de déchets ultimes, Etude comparative de divers liants hydrauliques et de la vitrification, cas des cendres volantes d'incinération d'ordures ménagères*. Rapport de thèse, Novembre 1994.

SILVESTRE, Pierre, "Le mâchefer d'UIOM et son utilisation en BTP", dans *Annales des Ponts et Chaussées n°97*, 2001.

SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, *L'incinération des déchets et la santé publique*. SFSP, 1995.

TANOSAKI, Takao, *et alii*, "Ecociment une expérience au Japon d'un nouveau type de ciment permettant le recyclage des déchets", dans *Déchets Sciences et Techniques n° 23*, 2001.

Remerciements

Ont participé à la réalisation de ce mémoire (documentation et prospectus) :

| | | |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ATI - Incinérateurs Muller | Lhoist | Sidac |
| Bertin Technologies | Ministère de | Taiheiyo Cement corporation |
| BRGM | l'aménagement du territoire | Thide Environnement |
| Bureau Véritas | et de l'environnement | Traidec |
| CEA | MTZ Global technologies | W.L. Gore & Associates |
| Hamon Environmental | NTCE Air pollution control | |
| Lab Group – Genevet | SEMARDEL | |

Et plus particulièrement (documents, contacts et/ou entretiens) :

| | |
|--|--|
| ADEME - <i>Matthieu Orphelin</i> | Solvay France Neutrec - <i>Laurent Dugas et Fabrice Giraud</i> |
| Balthazard & Cotte - <i>Daniel Daviller</i> | Syctom de Paris - <i>Olivier Yvonnet</i> |
| CERCHAR - <i>Claudine Lohez</i> | TIRU - <i>Catherine Chenault</i> |
| Europlasma - <i>Aline Lepicard et Eric Duhoo</i> | Trivalor - <i>Corinne Lac et Patrick Fourcy</i> |
| ORDIF / IAURIF - <i>Céline Bertholet</i> | Université de Cergy-Pontoise - <i>Roger Duval</i> |
| Novergie - <i>M^{me} Balot, Claire Letourneux et Elise Da Foncea</i> | Vinci Route / Eurovia - <i>Honoré Goacolou</i> |
| Resolest - <i>Florent Maire</i> | YPREMA - <i>Vincent Basuyau et Sandrine Delcroix</i> |

Annexes

| | |
|--|------|
| Annexe 1 : Liste des abréviations utilisées | II |
| Annexe 2 : Liste des illustrations | II |
| Annexe 3 : Seuils réglementaires d'émissions applicables aux UIOM | III |
| Annexe 4 : Seuils réglementaires définissant les catégories de MIOM | III |
| Annexe 5 : Schéma d'une UIOM | IV |
| Annexe 6 : Données complémentaires sur l'incinération des ordures ménagères. | IV |
| Annexe 7 : Composition moyenne des MIOM et REFIOM | V |
| Annexe 8 : Composition moyenne des lixiviats de MIOM et REFIOM | VI |
| Annexe 9 : Eléments de coût pour les UIOM | VII |
| Annexe 10 : Exemple d'abattement de pollution par le traitement des fumées | VII |
| Annexe 11 : Techniques des lits fluidisés | VIII |
| Annexe 12 : Technique de la thermolyse / pyrolyse | IX |

Annexe 1 : Liste des abréviations utilisées

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

BTP : Bâtiments et Travaux Publics

CEA : Centre d'études atomiques

CET : Centre d'Enfouissement Technique (classe 2 et 3 jusqu'en juillet 2002. Après cette date, les CET de classe 2 deviendront des CSDU de classe 2)

CSDU : Centre de Stockage des Déchets Ultimes (classe 1 ou 2)

CV : Cendres Volantes

DIB : Déchets Industriels Banals

DIS : Déchets Industriels Spéciaux

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

ITOMA : Inventaire (annuel) des installations de Traitement des Ordures Aénagères

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

MIOM : Mâchefer d'Incineration des Ordures Ménagères

MS : Matière Sèche

NIMBY : Not In My Backyard ("pas dans mon arrière cour") : phénomène de rejet de la population locale des projets d'installations classées pour la protection de l'environnement

Nm³ : Normal mètre cube : unité de volume standard permettant de comparer entre elles les mesures effectuées dans des conditions de températures et de pressions différentes.

OM : Ordures Ménagères : déchets issus de l'activité domestique des ménages pris en compte par les collectes usuelles ou séparatives.

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur : représente la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de masse (1 kg) dans des conditions standardisées, l'eau étant à l'état de vapeur.

PeHD : Polyéthylène Haute Densité

REFIOM : Résidu d'Épuration des Fumées d'Incineration des Ordures Ménagères

RPT : Résidu de Procédés Thermiques (MIOM, REFIOM et autres résidus)

STEP : STation d'ÉPuration des eaux usées

TEP : Tonne Equivalent Pétrole

TGAP : Taxe Générale sur les Activités Polluantes

UIOM : Usine d'Incineration des Ordures Ménagères

UVE : Unité de Valorisation Énergétique

Annexe 2 : Liste des illustrations

Photo 1 : Panache en sortie de cheminée

Photo 2 : Grappin avec déchets

Photo 3 : Four à rouleaux

Photo 4 : Four à gradins

Photo 5 : Filtre à manche

Photo 6 : Gâteau de filtration brut

Photo 7 : Chaux hydratée et Spongiacal[®]/Captacal[®]

Photo 8 : Coulée de vitrifiat en sortie de four

Photo 9 : Four de filtration par creuset froid

Photo 10 : Pavé de vitrifiat

Photo 11 : MIOM en sortie de four

Photos 12 et 13 : Utilisation de MIOM en technique routière

Figure 1 : Procédé humide de traitement des fumées (double filtration)

Figure 2 : Procédé semi-humide de traitement des fumées (double filtration)

Figure 3 : Procédé semi-sec de traitement des fumées (double filtration)

Figure 4 : Procédé sec de traitement des fumées (double filtration)

Figure 5 : Procédé de vitrification des cendres volantes de procédé humide

Figure 6 : Principe de vitrification par creuset froid

Figure 7 : Principe de la valorisation des cendres volantes et PSR mélangés

Figure 8 : Principe de la valorisation des cendres volantes et PSR séparés

Figure 9 : Les différentes voies possibles pour les MIOM

Figure 10 : Bilan massique de l'incinération des ordures ménagères

Annexe 3 : Seuils réglementaires d'émissions applicables aux UIOM*(Nm³ : sur gaz sec, température de 0°C, pression de 1 bar, 11% de teneur en O₂, 9% de teneur en CO₂)*

| Paramètre | Unité | Législation du 25 janvier 1991 | Directive européenne du 28 décembre 2000 |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--|
| Poussières totales | mg/Nm ³ | 30 | 10 |
| Carbone organique total (COT) | mg/Nm ³ | 10 | 10 |
| Acide chlorhydrique (HCl) | mg/Nm ³ | 50 | 10 |
| Acide fluorhydrique (HF) | mg/Nm ³ | 2 | 1 |
| Dioxyde de soufre (SO ₂) | mg/Nm ³ | 300 | 50 |
| Oxydes d'azote (NOx) | mg/Nm ³ | Non imposé | 200 (>6t/h) 400 (<6t/h) |
| Mercure | mg/Nm ³ | 0,2 | 0,05 |
| Cadmium + Thallium (Cd + Th) | mg/Nm ³ | 0,2 | 0,05 |
| Pb + Cr + Cu + Hn | mg/Nm ³ | 5 | 0,5 |
| Ni + As | mg/Nm ³ | 1 | |
| Sb + Co + V + Sn et autres | mg/Nm ³ | Non imposé | |
| Dioxines / Furanes | ng/Nm ³ | Non imposé | 0,1 |

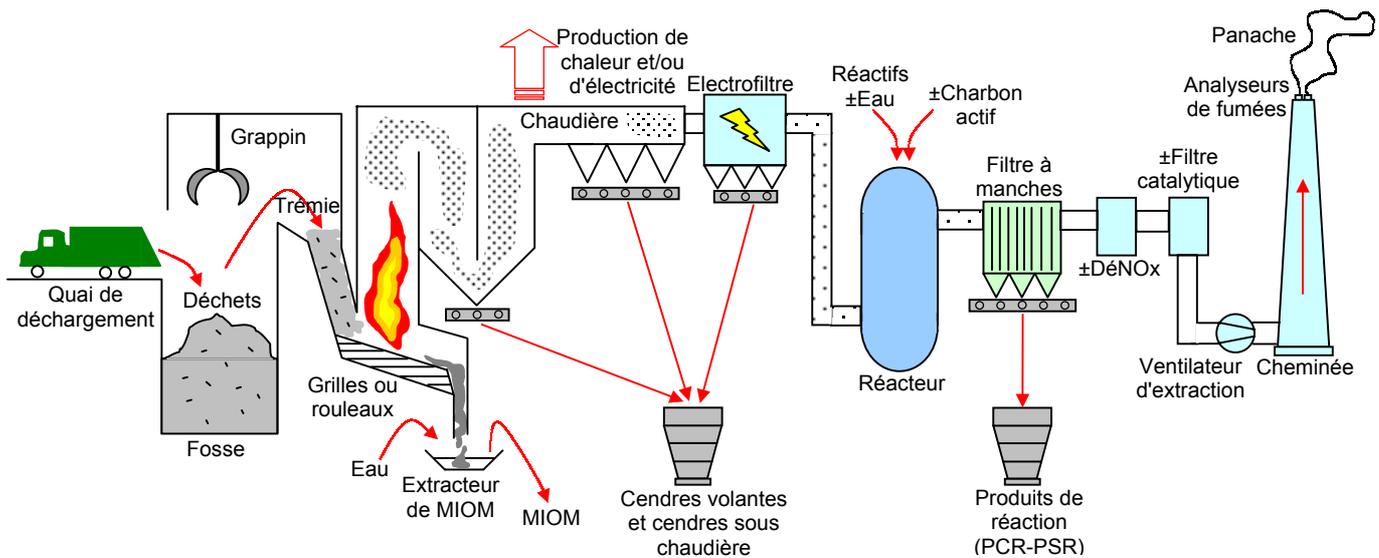
Les valeurs obtenues doivent être sommées sur 24 heures et respecter les normes ci-dessus.

La directive européenne incinération (JO des communautés européennes du 28 décembre 2000) exige des seuils limites d'émissions donnés dans le tableau précédent. Elle s'applique immédiatement pour les usines neuves et en 2007 pour les usines existantes (les valeurs actuelles sont donc celles du 25 janvier 1991). Le projet d'arrêté de transposition auquel travaille le Ministère de l'Environnement serait plus exigeant au niveau bruit et rejets aqueux (problème pour les UIOM utilisant le procédé humide). Cette directive qui concerne l'incinération de tous les déchets devra être transcrite en droit français avant le 28 décembre 2002. Elle confirme les instructions de la circulaire de février 1997 pour l'incinération des déchets ménagers et ajoute des valeurs limites sur les oxydes d'azote. Elle précise aussi les conditions de mise en conformité des anciennes usines d'incinération.

Annexe 4 : Seuils réglementaires définissant les catégories de MIOM*(résultats de lixiviation des MIOM selon la norme X 31-210)*

| Paramètre | Unité | MIOM classé "V" | MIOM classé "M" | MIOM classé "S" | Intervalles courants |
|------------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| Fraction soluble | % | <5 | 5 à 10 | >10 | 1,5 à 5 |
| Imbrûlés | % | <5 | <5 | >5 | 2 à 5 |
| Sulfates | mg/kg | <10.000 | 1.000 à 15.000 | >15.000 | 1.400 à 12.000 |
| COT | mg/kg | <1.500 | 1.500 à 2.000 | >2.000 | 30 à 1.800 |
| Mercure | mg/kg | <0,2 | 0,2 à 0,4 | >0,4 | <0,03 |
| Plomb | mg/kg | <10 | 10 à 50 | >50 | 10 à 50 |
| Cadmium | mg/kg | <1 | 1 à 2 | >2 | <0,03 à 0,6 |
| Arsenic | mg/kg | <2 | 2 à 4 | >4 | <0,15 à 0,3 |
| Chrome VI | mg/kg | <1,5 | 1 à 2 | >2 | <0,15 |

Annexe 5 : Schéma d'une UIOM



Les procédés semi-humide, semi-sec et sec sont représentés par cette configuration. Le procédé humide ne comporte pas de filtre à manches, le réacteur est remplacé par une tour de lavage des fumées et les effluents liquides issus de ce lavage sont traités afin d'obtenir un gâteau de filtration. Les signes "±" correspondent aux variantes (selon le procédé de neutralisation des gaz acides, la technologie et le taux de dépollution désiré).

Annexe 6 : Données complémentaires sur l'incinération des ordures ménagères.

- **Energie** : En 1999, 1 million de Tonnes Equivalent Pétrole (TEP) ont été produites par les unités de valorisation énergétique. En moyenne, une tonne d'ordure ménagère produit 500 kWh d'énergie électrique, soit l'équivalent de 200 litres de fuel. Le potentiel de la valorisation énergétique est estimé à 3 millions de TEP.
- **Emissions** : En 2002, une famille française moyenne produira par l'utilisation de son véhicule (1 véhicule) 600 fois plus de CO, 200 fois plus de CO₂, 15 fois plus de NO_x et 10 fois plus de poussières que le gaz produit par une UIOM pour éliminer les déchets qu'elle produit. En ce qui concerne le HCl et le SO₂, les UIOM représentent approximativement 1 à 3 % des émissions totales, chiffre amené encore à diminuer.
- **Evolution** : Il est important de constater que les UIOM, malgré leur courte durée de vie de 25 ans, sont des outils évolutifs capables de s'adapter à la progression constante des exigences environnementales.
- **Risque relatif de développer un cancer** : Le risque est majoré de 40 % pour une personne exposée à des doses de dioxines supérieures à 10 fois les doses moyennes rencontrées dans la population. Pour comparer, ce risque est majoré de 800 % pour un fumeur par rapport à un non-fumeur (le non-fumeur est quand même soumis aux émissions des fumeurs voisins). Il existe donc plus de risque de contracter un cancer parce qu'une personne fume que parce qu'elle habite près d'une UIOM hors norme.

Annexe 7 : Composition moyenne des MIOM et REFIOM

(Source : POLDEN 1998)

| Paramètre | Unité | Composition typique des MIOM | Composition typique des Cendres Volantes | Composition typique des REFIOM sec | Composition typique des REFIOM semi-humide | Composition typique des gâteaux de filtration |
|---------------------|-----------|------------------------------|--|------------------------------------|--|---|
| Imbrûlés | % sur sec | 2,5 | 3,9 | 3,6 | 3,2 | 15 |
| Silice | % sur sec | 49 | | | | |
| Calcium | % sur sec | 11 | | | | |
| Fer | % sur sec | 7,6 | | | | |
| Aluminium | % sur sec | 5,8 | | | | |
| Sodium | % sur sec | 4,1 | | | | |
| Magnésium | % sur sec | 1,6 | | | | |
| Sulfates | % sur sec | 1,0 | 9,2 | | | 3,2 |
| Potassium | % sur sec | 0,75 | | | | |
| Titane | % sur sec | 0,57 | | | | |
| Phosphore | % sur sec | 0,51 | | | | |
| Chlorures | % sur sec | 0,3 | 11 | 18 | 18 | 6,5 |
| COT | % sur sec | | 1,9 | 0,9 | 0,45 | 3,1 |
| Zinc | mg/kg MS | 2195 | 20 385 | 13 285 | 11 879 | 18 750 |
| Plomb | mg/kg MS | 1731 | 6626 | 3872 | 3008 | 9039 |
| Cuivre | mg/kg MS | 1423 | 1002 | 541 | 2426 | 1145 |
| Manganèse | mg/kg MS | 944 | 475 | | 417 | 1411 |
| Chrome | mg/kg MS | 433 | 263 | 73 | 115 | 344 |
| Etain | mg/kg MS | 173 | 592 | | | 1140 |
| Nickel | mg/kg MS | 126 | 64 | 51 | 63 | 142 |
| Cadmium | mg/kg MS | 15 | 317 | 239 | 205 | 425 |
| Arsenic | mg/kg MS | 10 | 20 | 12 | 13 | 29 |
| Mercuré | mg/kg MS | 13 | 28 | 36 | 12 | 1119 |
| Dioxines et furanes | ng/kg MS | 9,2 | 4301 | 1165 | 700 | 17769 |
| Valeurs retenues | | Moyennes | Moyennes | Moyennes | Moyennes | Moyennes |

MS : matière sèche après évaporation à 105°C

Annexe 8 : Composition moyenne des lixiviats de MIOM et REFIOM

(Source : POLDEN 1998)

| Paramètre | Unité | Composition typique des lixiviats de MIOM | Composition typique des lixiviats de Cendres Volantes | Composition typique des lixiviats de REFIOM sec | Composition typique des lixiviats de REFIOM semi-humide | Composition typique des lixiviats de gâteaux de filtration |
|------------------|-----------|---|---|---|---|--|
| Fraction soluble | % sur sec | 2,8 | 27 | 48 | 44 | 28 |
| pH | | 11 | 11 | 12 | | 8,6 |
| Sulfates | mg/kg MS | 2439 | 27 993 | 21 | | 55 063 |
| Chlorures | mg/kg MS | 3506 | 104 520 | 190 | 176 000 | 61 633 |
| Fluorures | mg/kg MS | 10 | | | | |
| COT | mg/kg MS | 872 | 121 | 145 | 104 | 297 |
| Chrome VI | mg/kg MS | <0,6 | 13 | 7,8 | | 1,3 |
| Zinc | mg/kg MS | 2,7 | 16 | 85 | 96 | 2,0 |
| Plomb | mg/kg MS | 16 | 55 | 1023 | 921 | 7,5 |
| Cuivre | mg/kg MS | 11 | 0,33 | 3,7 | | 0,28 |
| Chrome | mg/kg MS | 0,6 | 12 | | | 1,3 |
| Mercuré | mg/kg MS | 0,06 | 0,07 | 0,31 | 0,14 | 7,1 |
| Cadmium | mg/kg MS | 0,05 | 0,66 | 0,8 | 0,73 | 1,4 |
| Nickel | mg/kg MS | 007 | 0,37 | 2,3 | | 0,12 |
| Arsenic | mg/kg MS | 0,49 | 1,5 | 2,0 | 2,6 | 0,83 |
| Valeurs retenues | | Moyennes | Moyennes | Moyennes | Moyennes | Moyennes |

MS : matière sèche après évaporation de l'eau à 105°C

NB : Ces résultats d'analyse portent sur des lixiviats préparés selon les conditions normalisées du test AFNOR X 31-210. L'interprétation de tels résultats n'est concevable *a priori* que dans l'objectif d'orienter ces sous-produits dans les différentes voies réglementaires de gestion et d'élimination des déchets. Ils ne permettent en aucun cas d'évaluer le transfert des polluants contenus dans ces sous-produits vers le milieu aquatique d'une manière générale. La présentation de ce type d'information permet toutefois de comparer par polluant et par sous-produit, les quantités *potentiellement mobilisables dans les conditions équivalentes* des polluants contenus dans les sous-produits de l'incinération

Annexe 9 : Eléments de coût pour les UIOM

(Sofres Conseil - Analyse des coûts de gestion des déchets municipaux, avril 1998)

| Capacité nominale (t/an) | 18700 | 37500 | 37500 | 75000 | 150000 |
|--------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---|
| Nombre de lignes | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Traitement des fumées | sec | sec | sec | Semi-humide | humide |
| Valorisation énergétique | électricité | électricité | chaleur | électricité | Cogénération avec maximum d'électricité |
| Investissement (€HT/t) | 54,9 à 62,5 | 41,9 à 48,8 | 40,4 à 50,3 | 38,9 à 45,7 | 41,9 à 51,8 |
| Recettes | 10,7 à 12,2 | 10,7 à 12,2 | 19,1 | 10,7 à 12,2 | 22,9 à 23,6 |
| Coût net total (€HT/an) | 118,9 à 131,1 | 92,2 à 102,1 | 86,1 à 102,1 | 92,2 à 102,1 | 66,3 à 80 |

Ces coûts sont donnés à capacité nominale de l'installation.

Annexe 10 : Exemple d'abattement de pollution par le traitement des fumées

Le tableau suivant présente un exemple d'abattement de pollution après traitement des fumées. Il s'agit de l'UIOM de Lagny-sur-Marne (Seine-et-Marne) qui utilise la technique d'épuration des fumées par voie humide et incinère à un rythme de 20 t/h, dimensionnée pour un débit gazeux de 120 000 Nm³/h. Un traitement au charbon actif a été instauré pour éliminer les dioxines et furanes. Ces données sont variables en fonction des usines d'incinération et des systèmes de traitement des fumées. Cette UIOM changera de procédé fin 2002 pour adopter le traitement des fumées par voie sèche utilisant le bicarbonate de sodium.

| Polluants | Unités | Entrée du traitement des fumées | Sortie du traitement des fumées |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Poussières | mg/Nm ^{3**} | 30 | 5 |
| HCl | mg/Nm ³ | 900 | 8 |
| HF | mg/Nm ³ | 9 | 0.5 |
| SO₂ | mg/Nm ³ | 250 | 40 |
| Hg | mg/Nm ³ | 1 | 0.05 |
| Cd + Tl | mg/Nm ³ | 2 | 0.05 |
| Métaux lourds | mg/Nm ³ | 60 | 0.5 |
| Dioxines et furanes* | ngTEQ/Nm ^{3***} | 5 | 0.1 |

* traitement par charbon actif (0.16 mg/Nm³)

** Nm³ correspond à un mètre cube normalisé pour l'analyse du constituant étudié

*** TEQ "Toxicité Equivalente totale" mesure rapportée en fonction de la toxicité des dioxines/furanes selon un barème précis

Annexe 11 : Techniques des lits fluidisés

Cette annexe reprend en détail les trois formes de lits fluidisés.

Dans la technique du four à lit fluidisé dense, les particules minérales et l'air sont injectées à la base du four. Le mélange avec les déchets (granulométrie de 150 mm), est concentré en partie inférieure. Les déchets sont portés à 700°C et la combustion est très bonne. Il s'agit de la technologie la plus simple techniquement, adaptée à des installations de petites capacités (2 à 10 t/h), et à une large gamme de déchets (après broyage), avec une plage de PCI comprise entre 1500 kcal/kg et 6000 kcal/kg.

Le principe du four à lit fluidisé rotatif est le même que dans le cas précédent, avec deux modifications. D'une part, à la différence du procédé classique où l'air suit un mouvement ascendant, le lit fluidisé rotatif opère avec des injections d'air latérales réparties sur la hauteur du four. L'écart de densité du lit entre la zone centrale et les zones extérieures crée des mouvements rotatifs. D'autre part, la géométrie du four présente une sorte de goulot d'étranglement en son milieu qui accélère la circulation du lit. Ces deux modifications permettent d'avoir un meilleur brassage et, par conséquent, une meilleure combustion. La température de combustion est d'ailleurs un peu plus faible que dans le four classique, de l'ordre de 650 à 700°C. Cette technique est spécialement adaptée aux déchets. Tous les types de déchets peuvent être traités (ordures ménagères, déchets industriels banals, boues, pneumatiques...). Le déferraillage et le broyage sont moins exigeants (préparation ramenée à une granulométrie de 300 mm). En revanche, les performances concernant les gaz polluants sont moins bonnes, et l'économie sur le pré-traitement des déchets est compensée par une dépense plus importante sur le traitement des gaz.

Le troisième procédé, le four à lit fluidisé circulant, dit aussi lit ascendant, présente deux caractéristiques. D'une part, l'injection d'air à la base du four se fait à une vitesse supérieure, de façon à ce que les particules soient en suspension sur l'ensemble de la hauteur du four. D'autre part, les particules de sable (auxquelles est ajoutée une injection de carbonate de calcium afin de traiter en même temps le SO₂ et le HCl) qui sont évacuées avec les gaz de combustion en partie haute du four, sont récupérées dans un cyclone, puis réinjectées dans le foyer de combustion jusqu'à ce que tous les déchets soient brûlés. Cette technologie nécessite un déferraillage et un broyage fin (50 à 100 mm), ainsi qu'une extraction du verre (pour limiter l'érosion) et une température élevée (850°C). Elle est adaptée aux installations d'assez forte capacité (10 à 15 t/h). Le rendement est cependant élevé avec une bonne production d'électricité, et il y a peu de mâchefers (10 %) et d'imbrûlés (3 %).

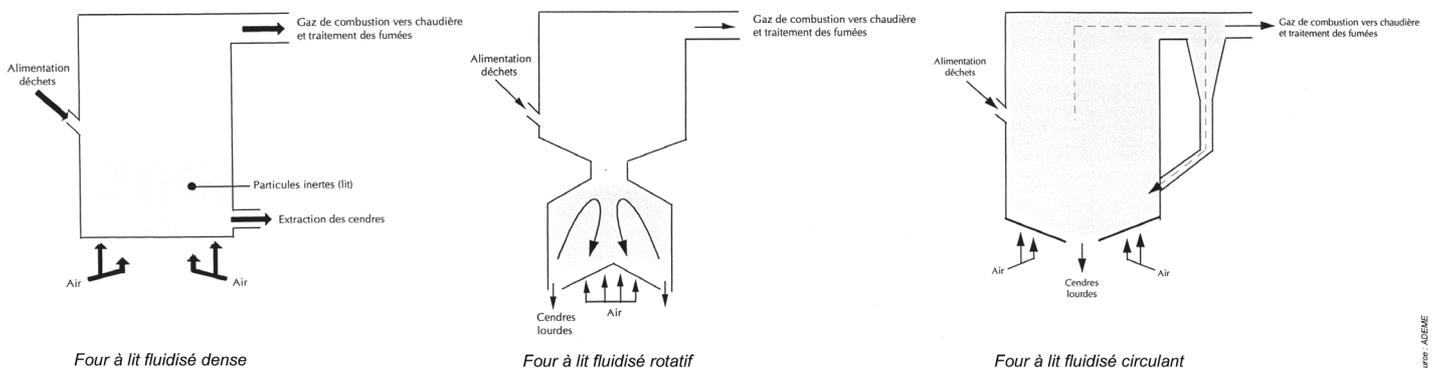


Schéma des différents fours à lit fluidisé (Source : ADEME)

Annexe 12 : Technique de la thermolyse / pyrolyse

La thermolyse produit : un gaz combustible (20 à 30% en masse des OM entrant constitué d'un mélange complexe d'hydrogène, de méthane et d'hydrocarbures), le "coke" ou "charbon" (15 à 35%), parfois des hydrocarbures ou goudrons (4 à 20%), des résidus ultimes à mettre en CSDU de classe 1 (environ 10%) et des inertes (20% de verres, ferrailles et gravats). Le gaz est souvent brûlé pour fournir l'énergie thermique suffisante pour l'ensemble du procédé. En cas d'excès (collecte sélective ou mélange avec des déchets industriels banals qui augmentent le pouvoir calorifique interne des déchets) le gaz est valorisé sous forme de chaleur et/ou d'électricité. Le "coke", après purification généralement intégrée au procédé, est brûlé sur place, en cimenterie ou en sidérurgie. Son pouvoir calorifique est fort.

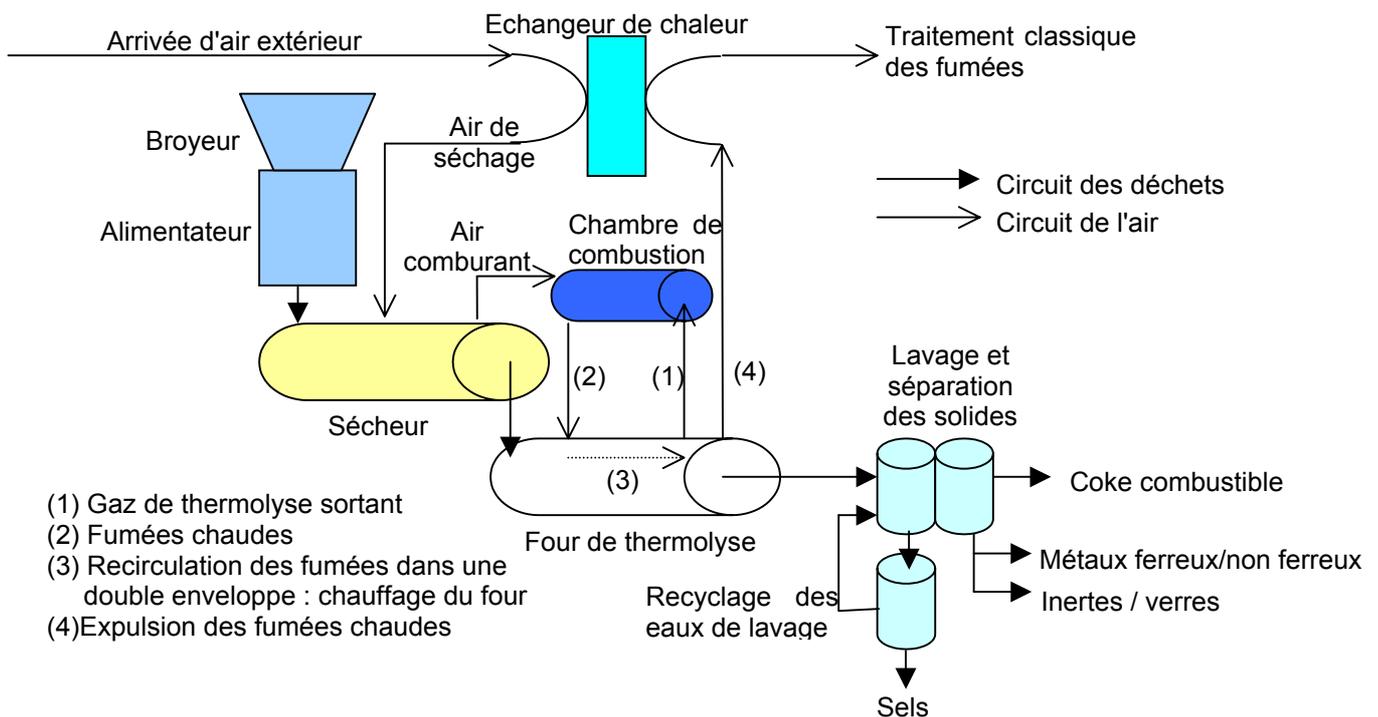


Schéma de principe du procédé de thermolyse (Source : Thide)

Les intérêts de la thermolyse sont nombreux :

- pas de production de MIOM mais production d'un combustible de substitution stockable et transportable facilement grâce à sa granulométrie constante ;
- limitation de la formation d'oxydes d'azote (NOx), de dioxines et de furanes due à l'absence d'oxygène lors de la combustion ;
- récupération des métaux ferreux et non ferreux facilitée dans le "coke" ;
- l'acide chlorhydrique est capté par les matières basiques contenues dans le solide sans apport supplémentaire d'agent neutralisant ;
- la thermolyse est polyvalente et peut s'adapter facilement à une grande diversité de déchets (variation saisonnière).

Le coût approximatif de la thermolyse est compris entre 70 et 80 €/t mais cette fourchette de prix est à utiliser avec précaution étant donné la faible étendue du procédé.

La thermolyse est souvent concurrente de l'incinération classique, malgré ce coût, la haute qualification requise des employés et les gaz explosifs générés. Mais l'avantage majeur de la thermolyse réside dans l'image négative véhiculée par l'incinération (critère "quantité et débit des fumées").

Résumé

L'incinération est un mode de traitement ancien des déchets mais en perpétuelle évolution. Les techniques changent, l'épuration s'affine mais le principe reste le même : éliminer ce qui ne sert plus sans transférer la pollution à l'atmosphère. L'incinération des ordures ménagères produit deux types de déchets solides : les Mâchefers d'Incinération des Ordures Ménagères (MIOM) assimilés aux cendres lourdes et les Résidus d'Épuration des Fumées de l'Incinération des Ordures ménagères (REFIOM) issues des différents traitements des fumées. Les techniques les plus performantes actuellement permettent de valoriser ces déchets. Ce rapport, après une présentation des techniques d'incinération et de traitement des fumées présente le devenir MIOM et REFIOM.

Abstract

Incineration is an old method of waste treatment but in perpetual evolution. The techniques change, purification becomes more precise but the principle stays the same : eliminate what has become useless without transmitting pollution into the atmosphere. Household rubbish incineration produces two sorts of solid waste : ashes or heavy cinders and residues from the gas treatment. The most efficient technologies can valorise this waste. This report, after a presentation of incineration and gas treatment technologies treats of the transformation of this solid waste.