



Projet d'application N° 52

Noms des élèves :

BORRAS-FONT Pol

BOUAHOM Gabriel

CUQUENEL Matisse

GROUT Nicolas

SAN AUGUSTIN François

Commanditaire :

Eco-Emballages

Conseiller de projet :

FRIDRICI Vincent

Date du rapport :

12/04/2016

Etat des lieux du recyclage et de l'élimination des
mâchefers en France

Table des matières

Introduction	3
Partie 1	5
I. Le Mâchefer.....	5
II. Le Cycle des Déchets	6
1. Fonctionnement d'une usine d'incinération d'ordures ménagères (UIOM).....	6
2. La maturation	9
a. Plateforme de maturation	9
b. Processus chimique de la maturation	11
3. Protocole de détermination du potentiel polluant des mâchefers (10)	11
III. Contexte Législatif.....	12
Arrêté du 18 novembre 2011	12
a. Champ d'application de l'arrêté.....	13
b. Conditions de maturation imposées par l'arrêté	13
c. Traçabilité des installations de maturation et d'élaboration des mâchefers (IME)	16
IV. Traitement des déchets sur le continent européen.....	16
1. Incinération des déchets municipaux.....	16
2. Législation Européenne quant aux mâchefers	18
Partie 2	20
I. Résultats des entretiens avec les UIOM	20
II. Résultats des entretiens avec les plateformes de maturation	23
III. Valorisation des mâchefers	26
1. Valorisation en technique routière	26
2. Valorisation des métaux	28
IV. Synthèse et recommandations.....	32
Bibliographie	34
Annexes	36
Note sur le fonctionnement des machines utilisées pour le traitement des mâchefers..	36
Crible :.....	36
Overband :.....	37
Machine à Courant de Foucault :	38
Broyage du mâchefer, récupération des métaux et des graves de mâchefer.....	39

Introduction

Le projet d'application « Etat des lieux du recyclage et de l'élimination des mâchefers en France » a été commandité par Eco-Emballages, une entreprise privée à but non lucratif investie d'une mission d'intérêt général. Cette entreprise a été créée en 1992 suite à un décret d'avril de la même année imposant aux entreprises de contribuer à l'élimination des déchets d'emballages créés par l'achat et la consommation de leurs produits : on parle de responsabilité élargie du producteur. Ce décret autorise de plus ces dernières à déléguer cette tâche à un organisme géré par l'état. Eco-Emballages a donc pour rôle d'organiser le tri et le recyclage en France afin d'améliorer ces derniers et de réduire les emballages ménagers. Pour se faire, Eco-Emballages a mis en place le principe du pollueur payeur : Les entreprises ne pouvant pas assurer la gestion des déchets issus de leurs produits, délègue cette responsabilité à Eco-Emballages en leur versant une participation financière. L'argent collecté par l'entreprise est ensuite distribué aux collectivités locales et permet donc la mise en place de services, comme l'installation de poubelles jaunes, la mise en service de camions poubelle, et qui assurent ensuite le recyclage des déchets dans des centres de tri. Eco-Emballages est donc en charge du dispositif national de tri et de recyclage des emballages ménagers. La figure 1 représente le logo d'Eco-Emballages, dont on trouve le cercle contenant une flèche (partie de gauche) sur tous les emballages des entreprises en contact avec Eco-Emballages.



Figure 1 : Logo d'Eco-Emballages (www.global-et-local.eu)

Aujourd'hui, 99% des entreprises françaises produisant des biens pour les consommateurs sont sous contrat avec Eco-Emballages, donnant à l'entreprise un budget de 600 millions d'euros par ans, dont 99% sont reversés aux collectivités locales : les versements doivent couvrir 80% des dépenses des collectivités locales dans le cadre de la gestion des déchets. A ce jour, 5 millions de tonnes d'emballages sont produites en France et un des objectifs d'Eco-Emballages est que 75% soient recyclés (aujourd'hui, 60% sont recyclés). Pour se faire, une des politiques d'Eco-Emballages est la prévention des déchets en amont, en allégeant les bouteilles par exemples et en utilisant des matériaux plus recyclables. Outre la prévention, Eco-Emballages agit donc à plusieurs niveaux pour réaliser sa mission principale : l'entreprise réalise des campagnes pour inciter les consommateurs à trier ou à améliorer le tri des déchets, elle apporte une aide financière et technique aux collectivités locales pour la collecte des emballages et travaille aussi avec les industriels du recyclage notamment pour améliorer la communication entre les différents acteurs de la gestion des déchets.

Objectifs

Une partie des déchets sont incinérés et ces derniers contiennent des emballages ménagers en acier ou en aluminium non triés pas les consommateurs. On obtient donc, en sortie d'incinérateur, des cendres, mâchefers, contenant des métaux fondus qu'il faut récupérer pour les recycler ensuite. La figure 2 représente une photographie d'un élément de mâchefer en sortie d'un incinérateur où il est possible d'observer qu'il est composé de différents éléments comme le montrent les différentes couleurs qu'il contient. La publication en novembre 2011 d'un arrêté modifie la réglementation (établie en 1992) quant à l'usage des mâchefers en redéfinissant des normes notamment par rapport aux seuils de polluants autorisés. C'est la modification de la loi par cet arrêté qui est à l'origine de la demande d'Eco-Emballages pour la création de ce projet.



Figure 2 : Photographie de mâchefers d'incinération (futura-sciences.com)

Le but de ce projet d'application, fixé par Eco-Emballages, est donc d'obtenir un panorama exhaustif de la gestion des mâchefers en France ainsi qu'une vision de ce qui est pratiqué dans les pays européens frontaliers, la finalité du projet étant de soumettre des recommandations d'optimisation de la traçabilité. Pour répondre à cette problématique, différents objectifs ont été définis :

Dans un premier temps, la demande d'Eco-Emballages est d'identifier les différents circuits en sortie d'usine d'incinération.

Puis, il est demandé de faire une synthèse de la situation en Europe (tonnages, principaux modes de fonctionnement, réglementation) et d'identifier pour la France, de manière exhaustive, les acteurs et leurs caractéristiques principales au cours du circuit de valorisation ou d'élimination des mâchefers (cendres issues de l'incinération des ordures ménagères, contenant des métaux fondus) : il faut donc étudier le fonctionnements des plateformes de maturation des mâchefers, connaître les étapes d'extraction des métaux, puis de séparation du noyau métallique et de la gangue par broyage ainsi que les conditions d'élimination de la gangue.

Partie 1

I. Le Mâchefer

Comme décrit en introduction, les mâchefers sont les cendres issues de l'incinérateur après brûlage des déchets et qui contiennent des métaux fondus ainsi que certains métaux qui n'auraient pas été fondus, faute d'une température insuffisante dans l'incinérateur (on verra ultérieurement que cette quantité de métaux dits imbrulés sont quantifié lors des tests que les mâchefers subissent en sortie d'incinérateur). 1 tonne d'ordure ménagère génère 250 kilogrammes de résidu solide (225 kilogrammes de résidus inertes, 12-25 kilogrammes de ferreux et 1 à 2 kilogrammes de non ferreux) et 750 kilogrammes de gaz. Plus généralement, les mâchefers contiennent différents éléments tels que du verre, de la silice, de l'alumine, du calcaire, de la chaux, des métaux ferreux et non ferreux, des sels, de l'eau et des composés organiques. Une partie de ce que contiennent ces cendres issues de l'incinération peut être recyclé : Ainsi, après incinération, on extrait les métaux des ordures brûlées pour récupérer notamment l'acier et l'aluminium. Ces matériaux peuvent ensuite être recyclés en étant envoyés dans des entreprises de métallurgie. Cependant, il est nécessaire que ces métaux soient broyés : En effet, ces derniers sont recouverts de gangue, c'est-à-dire de cendre composée d'un minerais sans valeur. Afin d'extraire les métaux, on utilise des cribles (comparable à un tamis qui permet de laisser passer les matériaux de petites taille) des overbands qui sont des aimants attirant les métaux ferreux et des machines à courant de Foucault (ou séparateur à courant de Foucault) qui séparent les métaux ferreux des autres matériaux. On donne en figure 3 les schémas de fonctionnement d'un overband et d'une machine à courant de Foucault. Sur la partie gauche, on observe la séparation des matériaux ferreux et non ferreux et sur la partie droite, la séparation dans 3 compartiments des matériaux ferreux, non ferreux et des autres matériaux. Le fonctionnement de ces dispositifs est détaillé en annexe.

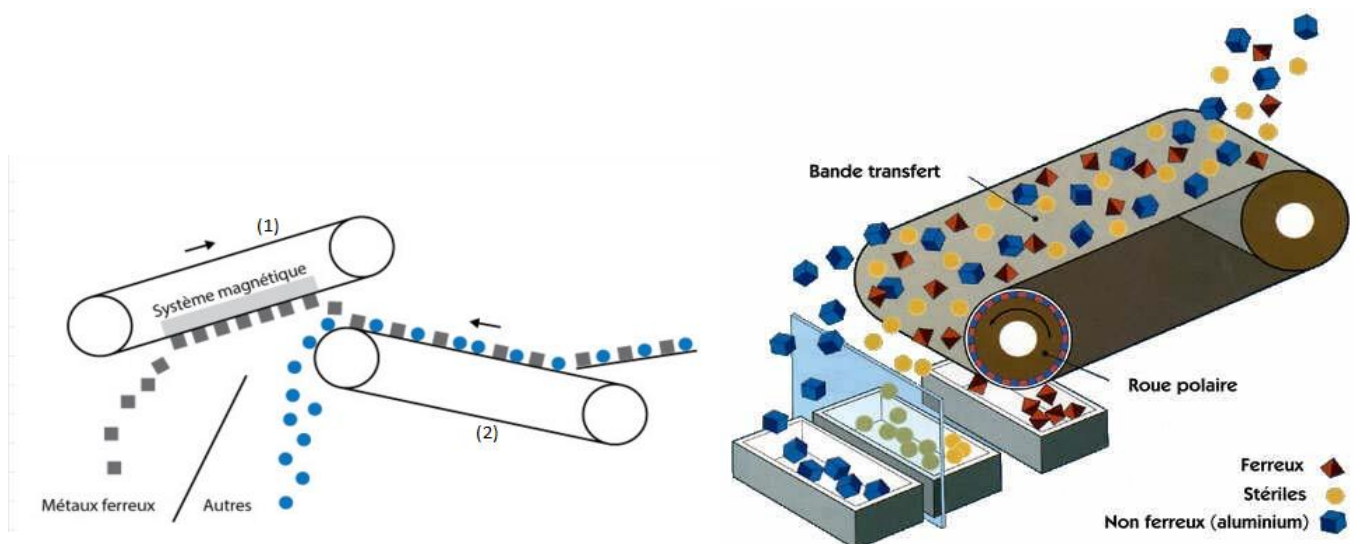


Figure 3 : Schéma de fonctionnement d'un overband et d'une machine à courant de Foucault

- (1) : Overband
- (2) : convoyeur

<http://www.blsmagnet.com/fr/secteur-activites/traitement-des-dechets-et-recyclage>
<http://ressources6.techno.free.fr/>

Il reste alors à s'intéresser au traitement des mâchefers auxquels on a retiré les métaux. Dans certain cas il est possible de faire de la maturation : les mâchefers sont stockés à l'air libre pendant plusieurs mois afin d'être dépollués. La maturation naturelle permet de les stabiliser et de réduire ainsi le potentiel polluant du mâchefer, une grande partie des polluants étant récupérée dans les lixiviats (le liquide résiduel qui provient du passage de liquide à travers les mâchefers). Une fois que les niveaux de pollution respectent les normes imposées par la loi, les mâchefers peuvent être entreposés ou utilisés en technique routière par exemple.

(1) (2)

II. Le Cycle des Déchets

1. Fonctionnement d'une usine d'incinération d'ordures ménagères (UIOM)

Fonctionnement usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM)

Description

Un incinérateur est un dispositif visant à détruire des objets par incinération, c'est-à-dire par une combustion aussi complète que possible. Dans le cas des incinérateurs de déchets, les objets sont les ordures ménagères. L'élément principal et avec lequel il est présenté est un four avec chaleur suffisante pour enflammer les matériaux ajoutés.

Les UIOM peuvent désormais être nommés « centre de valorisation thermique » où « usine de valorisation énergétique » selon leur intérêt.

Etapas et schéma de fonctionnement

1. Transfert et déchargement

Les ordures ménagères sont acheminées par camion, quand la ville qui les produit est proche, ou par train quand elle est éloignée. Le train est privilégié quand on veut éviter la pollution et des nuisances aux territoires.

A son entrée sur le site, chaque camion passe sur un pont-basculé. Un badge permet d'identifier son numéro d'immatriculation, sa provenance, son tonnage, le type de déchet, le jour et l'heure. Il accède ensuite au hall de déchargement. Au passage, un portail permet aussi de détecter si des déchets radioactifs (interdits sur le site) sont contenus dans les camions.

2. Broyage

Certains encombrants non recyclables mais incinérables (canapés, mobilier, matelas, etc) déposés en déchèterie sont broyés avant d'être incinérés.

3. Alimentation des fours et incinération

Une fois les bennes vidées dans la fosse, les déchets sont tout d'abord homogénéisés par un grappin pour obtenir un combustible homogène. Le grappin dépose régulièrement les déchets dans les trémies d'alimentation des deux fours. Pour assurer une bonne combustion, de l'air est injecté dans le four. La température peut atteindre alors 1000°C dans la chambre de combustion. Les déchets doivent être brûlés à 850° minimum.

Les mâchefers, qui ne brûlent pas, constituent les restes après incinération (environ 25% du poids entrant) et ils sont extraits en partie basse. Ces mâchefers sont déferrailés à l'aide d'un électro-aimant si ce déferrailage est réalisé à l'usine d'incinération, car n'est pas toujours le cas. Un courant de Foucault permet également la récupération des non ferreux, essentiellement de l'aluminium.

4. Récupération de la chaleur et fabrication de l'électricité

L'incinération ne constitue pas seulement une solution pour se débarrasser des déchets, elle est aussi génératrice d'énergie.

Deux types d'énergie sont produits dans une usine d'incinération : de la chaleur et de l'électricité. Chacune obéit à un mode de production propre et leurs rendements se relèvent inégaux.

Production de chaleur

Pour cela de l'eau, chauffée par la combustion des déchets suffit. Le rendement se révèle alors très bon : 70 à 80% de la chaleur de combustion sont récupérés après incinération, soit environ 1500 kilowatts/heure thermiques par tonne d'ordures. Il faut bien sûr lui trouver ensuite une dans les environs de l'usine.

Production d'électricité

La chaleur dégagée par l'incinération est aussi utilisée pour fabriquer de la vapeur à la plus haute pression possible (environ 385° et 40 bars), cette vapeur est ensuite injectée dans un turbo alternateur de 10.9 MW. Une partie de cette énergie fabriquée est utilisée pour le fonctionnement de l'usine et le reste est revendu à EDF. Le rendement énergétique est de l'ordre de 20 à 25% (300 à 400 kwh).

En suite la vapeur sort du turbo-alternateur pour se refroidir dans l'hydrocondenseur. Pour cette étape il faut de l'eau pompé, normalement provenant d'un fleuve, cette eau plus froide refroidit la vapeur qui se transforme en condensât. L'eau pompée n'a aucun contact ni avec les déchets, ni avec la fumée, elle absorbe juste de la chaleur. La température de sortie de cette eau est surveillée si elle est versée de nouveau au fleuve. En effet, un écart de température supérieur à 10°C ou un débit trop élevé pourrait changer la qualité de l'eau et ainsi bouleverser la faune et la flore qui vivent dans ce fleuve.

5. Traitements des fumées

Elle est la partie la plus technique. Ces traitements sont de plus en plus nombreux et de plus en plus fins (à l'échelle du nanogramme). Ils représentent la moitié de l'usine en surface, c'est qui fait toute la différence entre les anciennes unités et les usines modernes. Les déchets ont évolué, nous avons plus de plastiques et plus de polluants, il faut les capter pour ne pas les rejeter dans l'atmosphère. De plus toutes les poussières sont récupérées dans un filtre à manches.

Les autres polluants (chlore, soufre et métaux lourds) sont ensuite captés dans des laveurs et transformés en poussières dans le réacteur. Un nouveau traitement a été mis en place en 2005 après une nouvelle législation afin de capter les dioxines et les stocker en décharge avec les poussières toxiques. Du charbon actif est injecté dans le réacteur, les dioxines sont captées et restent bloquées dans ce charbon qui est ensuite récupéré avec les autres poussières toxiques. Ces poussières sont appelées REFIO (Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères), elles représentent 2 à 3% des tonnages d'OM entrants. Les REFIO sont valorisés dans le comblement de galeries d'anciennes mines de sel. Chaque ligne de four a son système de traitement, cette autonomie permet de réparer un four ou de nettoyer le système de traitement sans arrêter toute l'usine.

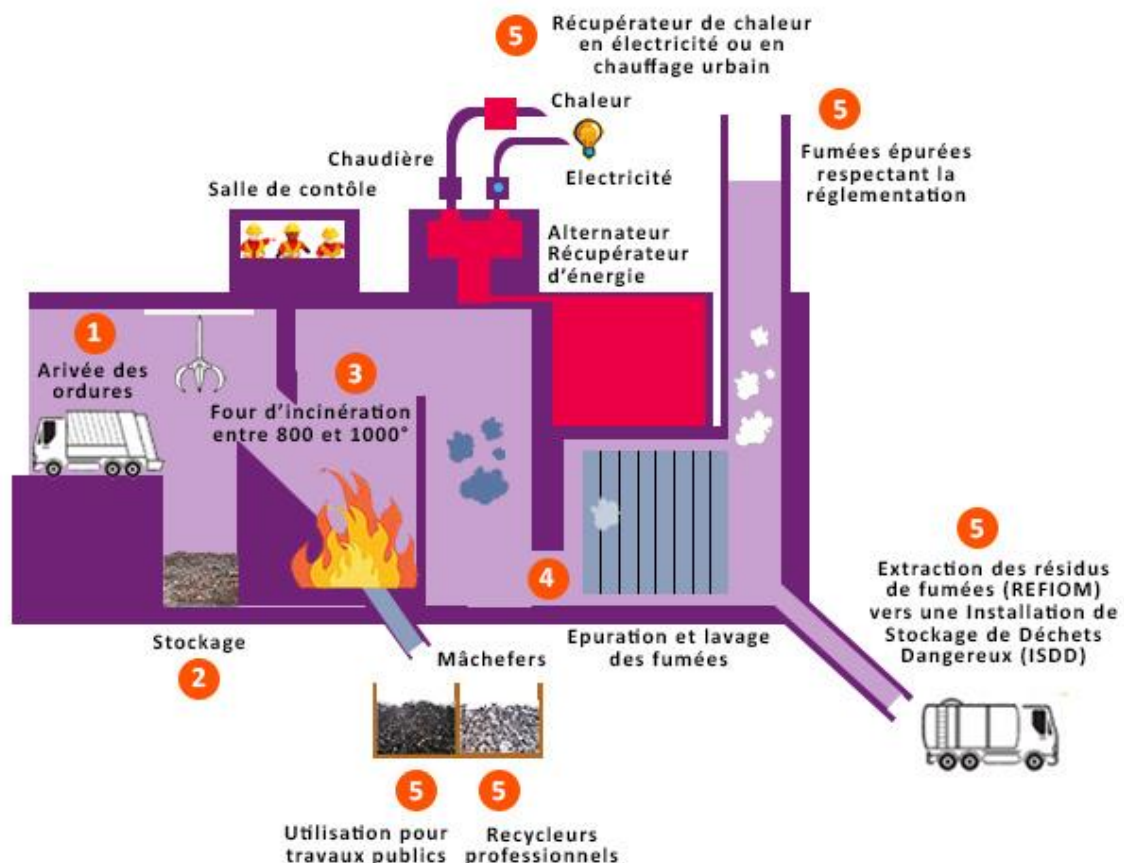


Figure 4 : Schéma fonctionnement UIOM. (<http://www.symeed29.finistere.fr/Gestion-des-dechets/Les-Unites-de-Valorisation-Energetique-des-Dechets>)

Récupération des métaux et non ferreux

Le procédé d'extraction des métaux et non ferreux est postérieur à celui de l'incinération et antérieur à la maturation des mâchefers. Il peut se réaliser dans les mêmes UIOM si ils ont l'équipement nécessaire, sinon les mâchefers résultants de l'incinération avec les métaux valorisables sont vendus ensemble à des entreprises extérieures. D'après la récupération à travers des électroaimants pour les métaux et des courants de Foucault pour le cas des non ferreux, nous obtenons des métaux impurs. L'étape à réaliser en suite est le broyage, dont nous obtiendrons de la gangue comme élément complémentaire. Cette partie composée des éléments minéraux sans valeur associée doit être traité avec des bonnes pratiques, et ce n'est pas toujours le cas.

Traitement des mâchefers

La qualité des mâchefers est analysée périodiquement afin de vérifier que le produit peut être valorisé en sous-couche routière, sans risque pour l'environnement.

Si ce n'est pas le cas, ces mâchefers doivent être traités pour des plateformes de maturation. Les plateformes font partie des UIOM ou elles appartiennent au même groupe pour un grand ensemble des cas.

Si après un traitement de plusieurs mois dans la plateforme de maturation les mâchefers ne sont pas encore valorisables, la procédure standard c'est l'effondrement.

(3) (4) (5)

2. La maturation

a. Plateforme de maturation

Description

Les plateformes de maturations sont des espaces de stockage qui récupèrent le mâchefer provenant des fours des usines d'incinérations, avant de le revendre ou de l'envoyer en centres d'enfouissements, aussi appelés ISDND (Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux).

On distingue principalement deux types de plateformes. Elles peuvent se trouver sur le site d'une UIOM, auquel cas la même société gère les deux activités. Aussi, elles peuvent être indépendantes des UIOM, appartenant alors à des collectivités locales ou encore à des entreprises de travaux publics.

Fonctionnement

Le schéma du fonctionnement propre à la plateforme SCORVALIA située à Plabennec, dont le schéma est disponible figure 5, illustre bien le principe de fonctionnement général d'une plateforme :

La plateforme reçoit des lots mensuels de mâchefer de la part de ses UIOM fournisseurs. Elle en extrait alors les métaux puis procède à un premier test de polluants pour savoir si elle pourra soumettre ce lot au processus de maturation. En effet, certains polluants n’y étant pas sensible, il est inutile de conserver ces lots car les teneurs non conformes ne vont pas s’améliorer.

Si en revanche le test est conforme si bien que le lot est envoyé en maturation, une deuxième série de tests est réalisé pour analyser les teneurs en matériaux sensibles à la lixiviation, réaction se produisant lors de la maturation. Cette réaction fait baisser les quantités de ces matériaux dont les seuils sont fixées par l’arrêté ministériel du 18 novembre 2011. Ces tests est renouvelé jusqu’à conformité de l’ensemble des paramètres du lot. La loi permet un stockage sur plateforme de un an maximum. Au-delà de ce délai, le lot doit être envoyé en ISDND.

En fonction des résultats des tests, le mâchefer valorisable sera classé de type 1 ou type 2 selon les quantités de polluant restantes, ce qui va permettre d’en réglementer l’usage que nous détaillerons dans la partie résultats.

Un fonctionnement plus détaillé est aussi proposé dans la partie résultats grâce à nos entretiens avec les plateformes.

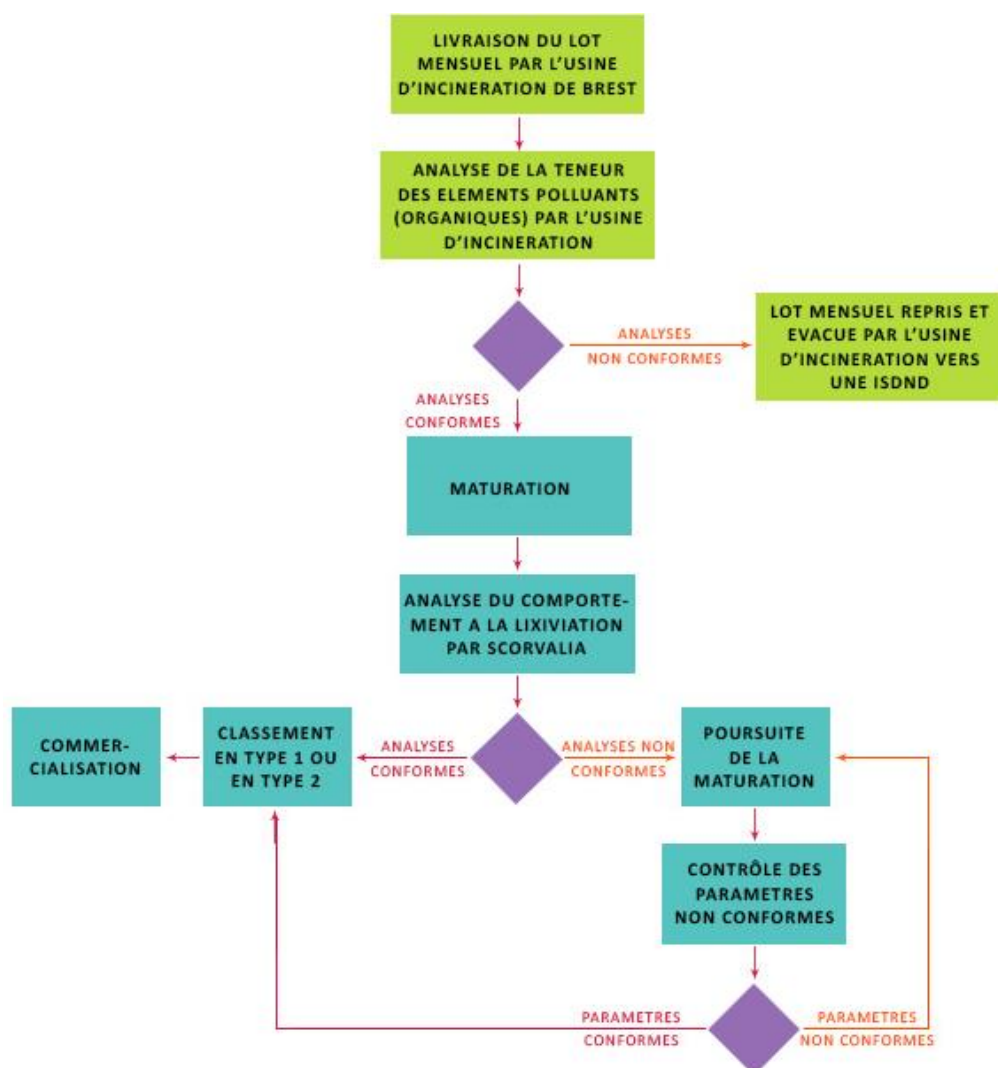


Figure 5 : Etape du processus de maturation d'une plateforme (<http://www.symeed29.finistere.fr>)

(6)

b. Processus chimique de la maturation

En sortie d'incinération, le mâchefer est thermodynamiquement instable et en contact avec l'air, ses propriétés physico-chimiques varient. La maturation consiste donc à laisser entreposer le mâchefer afin de laisser réduire son potentiel polluant. Ce processus consiste notamment en l'oxydation des ferrailles et des sulfures et l'hydratation d'une partie des métaux. Pendant la maturation, ont lieu principalement l'oxydation des ferrailles, la stabilisation des métaux lourds et la carbonatation, principalement de la chaux ($Ca(OH)_2$), qui consiste en une réaction entre le matériau et le dioxyde de carbone de l'air. Cette réaction forme principalement de la calcite et a pour conséquence une baisse du pH.

La maturation a donc pour effet sur le mâchefer de dissoudre certaines phases pour créer de la calcite, comme mentionné ci-dessus. On observe de plus la réduction des matières organiques. La maturation réduit le potentiel polluant des mâchefers en ce qu'elle permet de fixer les polluants c'est-à-dire qu'après maturation, les mâchefers ne laissent s'échapper que peu de métaux, on dit qu'ils relarguent peu de métaux. Ceci peut être expliqué par le fait que la baisse du pH décrite lors de la carbonatation fait que le lixiviat (liquide issu de la lixiviation qui est l'écoulement de liquide à travers des matériaux, ici de l'eau à travers le mâchefer) fait que le liquide se trouve à un état de pH ne permettant pas la dissolution de la plupart des métaux. Un autre mécanisme est en jeu pour la réduction du caractère polluant, la sorption : Les carbonates (comme la calcite) créés lors de la carbonatation peuvent piéger certaines traces de métaux comme le plomb, le zinc ou encore le cuivre.

Ainsi, le processus de maturation permet de réduire le potentiel polluant des mâchefers d'incinération, ce qui est primordial pour la valorisation future des mâchefers qui doivent respecter les normes énoncée dans la loi.

(7) (8) (9)

3. Protocole de détermination du potentiel polluant des mâchefers

(10)

Afin de connaître le potentiel polluant des mâchefers en sortie d'incinérateur, une série de test doit être effectuée sur des échantillons. Les résultats de ces tests permettront de savoir si les mâchefers pourront être utilisés ou bien s'il est nécessaire de passer par un processus de maturation.

Dans un premier temps, il faut prélever un échantillon de l'ordre du kilogramme, n'excédant pas la dizaine et dont la taille des éléments soit limitée à environs 10 centimètres.

La première étape, après réception de l'échantillon est une étape de séchage qui permettra notamment de déterminer le taux d'humidité des mâchefers en faisant le rapport de la différence de masse de l'échantillon avant et après séchage et de la masse initiale. Cette étape de séchage se fait à 105°C pendant une durée de 24 heures dans un réceptacle qui doit être choisi de façon à ne pas contaminer le mâchefer. Après séchage, il reste une étape de préparation avant de pouvoir réaliser les différents tests. L'échantillon doit subir une série de tamisages et de concassages afin d'obtenir un

mâchefer de granulométrie inférieur à 4 millimètre (c'est-à-dire constitué d'éléments de taille inférieure à 4 millimètres). On réalise alors 4 concassages différents qui ont pour but d'obtenir des éléments de 6, 4, 3 et enfin 1.5 millimètres. Entre chaque concassage, un tamisage est effectué afin de récolter les éléments inférieurs à 4 millimètres (tous les éléments n'ayant pas été suffisamment broyés pendant les concassages). Certains éléments dont la taille obtenue après chaque concassage n'est pas suffisamment petite sont considérés imbroyables et écartés pour les tests futurs : ce sont les refus de concassages. Ce refus de concassage ne sera pas testé ensuite mais il est requis d'observer visuellement les éléments qui le composent (donc de façon qualitative).

Une fois ces deux étapes réalisées, on procède à des lixiviations des mâchefers. Ce processus consiste à extraire les produits solubles de solides, dans ce cas de mâchefer, par un solvant. Le liquide obtenue est appelé lixiviat et c'est sur ce dernier que les différents tests de toxicité seront effectués. Dans le cas présent, le solvant utilisé est de l'eau déminéralisée qui doit être présente en quantité 10 fois supérieure à la quantité de mâchefers (100 grammes de mâchefers pour 1 litre d'eau). Le mâchefer et l'eau sont donc mis en contact et agité par un agitateur. On réalise donc plusieurs fois ce processus et à la fin de la dernière lixiviation, on filtre le liquide obtenu afin de ne conserver que le lixiviat. Une fois les étapes de lixiviations réalisées, il est possible d'analyser le lixiviat en vue d'obtenir un résultat quant à la toxicité des mâchefers étudiés.

Il convient d'effectuer différents tests sur le liquide obtenu afin de déterminer son pH grâce à un pH-mètre, la teneur en plomb et en calcium, la quantité d'arsenic, de mercure, de chrome des sulfates et de carbone organique. Ces quantités sont déterminées par des dosages. Enfin, afin de connaître le taux de matière non brûlée, taux d'imbrulés, un test est effectué sur les mâchefers secs. Pour se faire, on utilise la méthode de la perte au feu : elle consiste à prélever deux échantillons de mâchefers de masse comprise entre 50 et 100 grammes que l'on chauffe dans un four à 500°C pendant 4 heures. On pèse ensuite les échantillons et on détermine leurs taux d'imbrulés qui n'est autre que le rapport de la différence de masse de l'échantillon avant et après chauffage par la masse avant chauffage. Le taux d'imbrulé retenu est la moyenne réalisée sur les deux échantillons.

III. Contexte Législatif

Le commanditaire Eco-Emballages du projet d'application industrielle a effectué cette demande d'analyse de la situation et de la traçabilité des mâchefers en France suite à une mise à jour des lois encadrant le traitement et le stockage de ces derniers. En effet, les usines d'incinération et les plateformes de maturation doivent, suite à cette décision administrative, suivre les directives concernant entre autres la toxicité des mâchefers.

Arrêté du 18 novembre 2011

a. Champ d'application de l'arrêté

Le cadre juridique permettant la valorisation des Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND) en technique routière est entré en vigueur le 1er juillet 2012. Il abroge la circulaire de 1994. Le décret du 28 juin 2011 et l'arrêté du 25 juillet 2011 définissent les paramètres d'analyse et les seuils de valorisation des MIDND.

L'arrêté du 18 novembre 2011^[11] relatif au recyclage en technique routière des MIDND précise les conditions de leur valorisation et les critères de recyclage à respecter par ces matériaux pour des usages déterminés. Cet arrêté fait suite à une transposition dans la loi française de la directive 2010/75/UE du Parlement européen relative aux émissions industrielles.

L'article 1 de l'arrêté du 18 novembre 2011 stipule la chose suivante :

« Les dispositions du présent arrêté s'appliquent aux installations relevant des rubriques 2716, 2771 et 2791 de la nomenclature des installations classées et visent à définir les conditions de recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux. »

Cet arrêté concerne donc les plateformes et installations qui nous intéressent, notamment celles des rubriques 2716^[12], 2771^[13] et 2791^[14] de la nomenclature de l'ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement). Ces rubriques correspondent aux installations de mâchefers connexes à une UIOM, aux plateformes de maturations isolées, et celles des repreneurs.

b. Conditions de maturation imposées par l'arrêté

L'arrêté impose de nouveaux critères à respecter sur les teneurs en éléments polluants dans les mâchefers qui influencent les conditions de stockage et de maturation des mâchefers avant leur utilisation pour le BTP et les ouvrages routiers, entre autres.

Les procédures techniques encadrant la mise en œuvre de l'arrêté font l'objet d'un guide d'application publié par le SETRA^[15] en octobre 2012.

Un premier critère impose une valeur limite à respecter pour les métaux lourds exprimé en mg/kg de matière sèche, cela correspond au comportement du mâchefer à la lixiviation (voir *figure 11*). Cette valeur varie selon si le mâchefer est destiné à un usage en technique routière de type 1 (*figure 6*) ou de type 2 (*figure 7*):

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

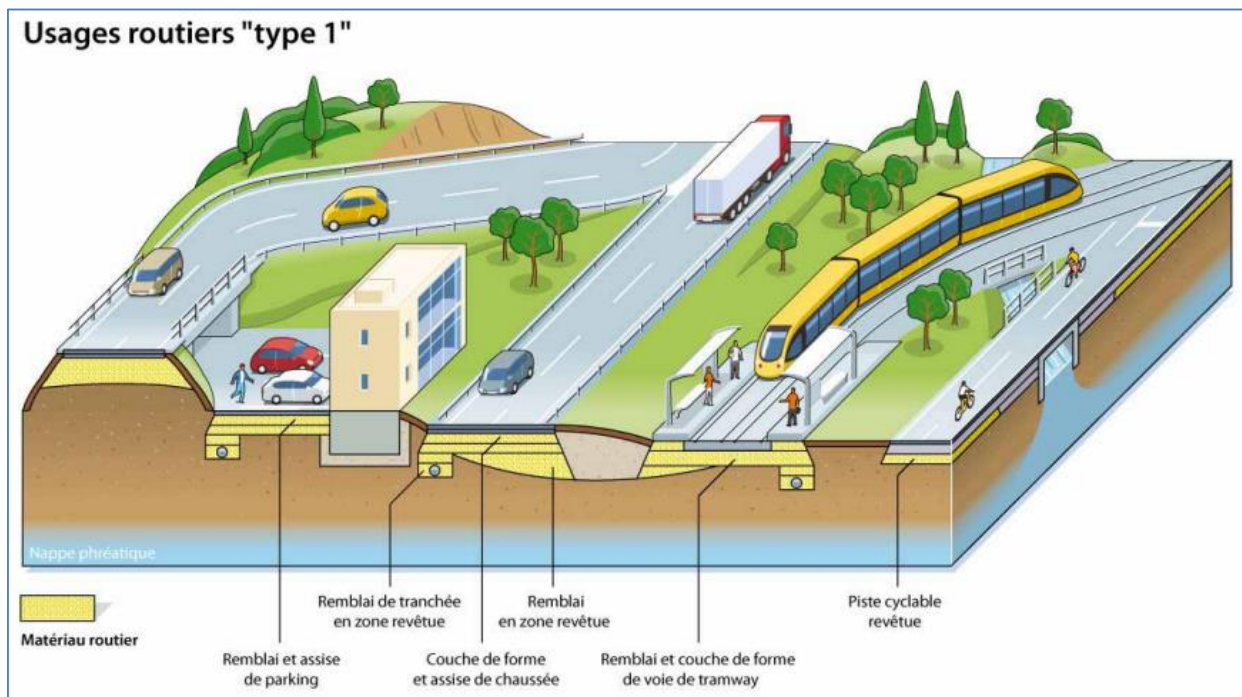


Figure 6 : Usage routier de type 1 (syvalom.fr)

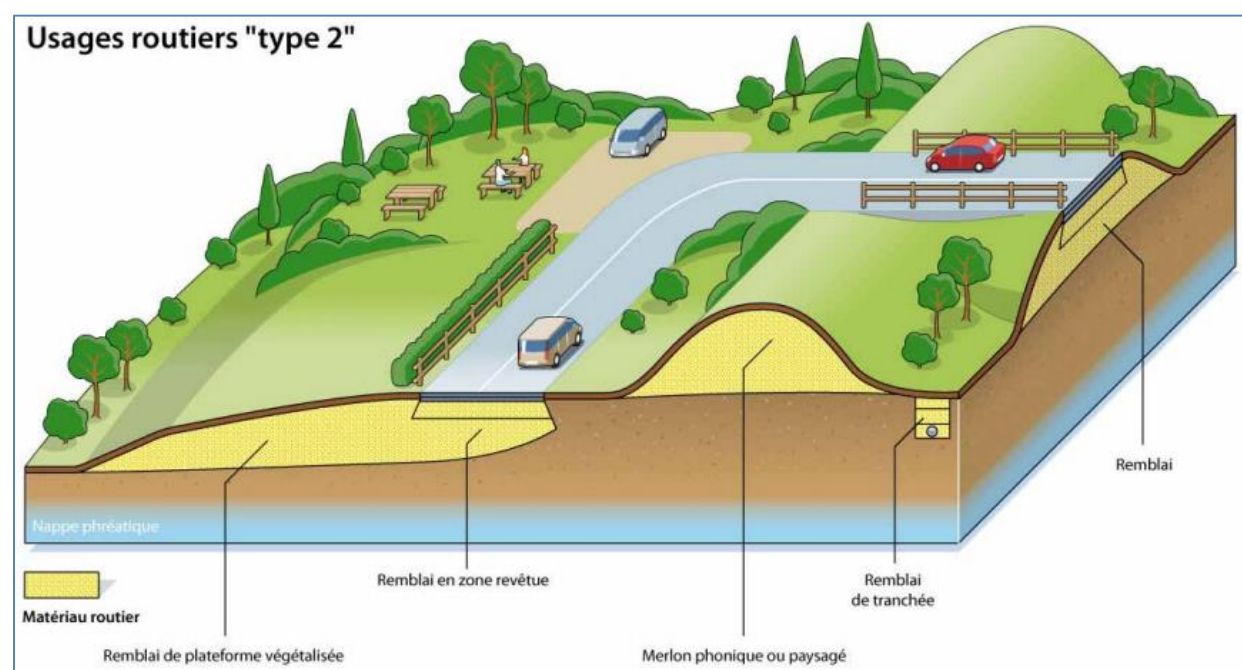


Figure 7 : Usage routier de type 2 (syvalom.fr)

Les mesures effectuées sur les mâchefer quant à leur comportement à la lixiviation se font conformément à la norme NF EN 12457-2^[16].

Un second critère impose une valeur limite en contenu total de composants organiques, par étude d'un échantillon du mâchefer défini par l'article 8^[17] (voir figure 9).

PARAMÈTRE	VALEUR LIMITE À RESPECTER pour les usages de type 1 exprimée en mg/ kg de matière sèche	VALEUR LIMITE À RESPECTER pour les usages de type 2 exprimée en mg/ kg de matière sèche
As	0,6	0,6
Ba	56	28
Cd	0,05	0,05
Cr total	2	1
Cu	50	50
Hg	0,01	0,01
Mo	5,6	2,8
Ni	0,5	0,5
Pb	1,6	1
Sb	0,7	0,6
Se	0,1	0,1
Zn	50	50
Fluorure	60	30
Chlorure (*)	10 000	5 000
Sulfate (*)	10 000	5 000
Fraction soluble (*)	20 000	10 000

(*) Concernant les chlorures, les sulfates et la fraction soluble, il convient, pour être jugé conforme, de respecter soit les valeurs associées aux chlorures et aux sulfates, soit de respecter les valeurs associées à la fraction soluble.

Figure 8 : Tableau des critères à respecter concernant les métaux dans les mâchefers

PARAMÈTRE	VALEUR LIMITE À RESPECTER
COT (carbone organique total)	30 g/ kg de matière sèche
BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes)	6 mg/ kg de matière sèche
PCB (polychlorobiphényles 7 congénères)	1 mg/ kg de matière sèche
Hydrocarbures (C10 à C40)	500 mg/ kg de matière sèche
HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques)	50 mg/ kg de matière sèche
Dioxines et furannes	10 ng I-TEQOMS, 2005/ kg de matière sèche

Figure 9 : Tableau des critères à respecter concernant les éléments organiques

La circulaire indique quelles sont les possibilités de valorisation ou d'utilisation selon les cas :

- Les mâchefers à faible teneur lixiviable peuvent être utilisés en techniques routières
- Les mâchefers intermédiaires sont stockés temporairement (maximum un an) dans une installation de stockage afin de suivre une carbonatation naturelle ou un prétraitement. Passé

cette durée, un second test est réalisé. Si les caractéristiques ne permettent pas une valorisation routière, ils sont éliminés en centre de stockage de déchets non dangereux

- Les mâchefers à forte teneur lixiviable sont immédiatement enfouis en centres de stockage de déchets non dangereux

c. Traçabilité des installations de maturation et d'élaboration des mâchefers (IME)

La traçabilité des mâchefers est renforcée par les nouvelles directives et permet d'assurer le suivi du matériau de sa production à sa mise en œuvre sur les chantiers dans le BTP.

Afin d'assurer une totale traçabilité des mâchefers, plusieurs documents sont à produire par l'exploitant de l'IME:

- Un registre de sortie complété par l'exploitant éventuellement sous format informatique comprenant les informations relatives aux différents acteurs qui feront usage du mâchefer dans les chantiers (maître d'ouvrage, entreprise exécutant les travaux, lot de mâchefer concerné). Ce registre doit être conservé au moins 10 ans, à disposition des inspecteurs des installations classées
- Une fiche de données environnementales indiquant les usages routiers autorisés selon les matériaux présents, les limitations d'usage potentielles liées à l'environnement immédiat de l'ouvrage routier et les résultats des tests de lixiviation en teneur en éléments polluants. Cette fiche sera remise à l'exécutant des travaux routiers.

IV. Traitement des déchets sur le continent européen

1. Incinération des déchets municipaux

Sur le continent Européen, le traitement des déchets municipaux se font selon 4 principales méthodes (les autres méthodes sont négligeables et/ou ne sont pas communiquées) qui sont l'enfouissement, l'incinération, le recyclage et le compostage.

Sur la *figure 10*, nous pouvons observer les proportions des méthodes de traitement des déchets selon les pays selon un rapport d'Eurostat sur l'année 2014^[18].

Sur la *figure 11*, les quantités de déchets municipaux selon leur méthode de traitement, en kg/habitant selon ce même rapport.

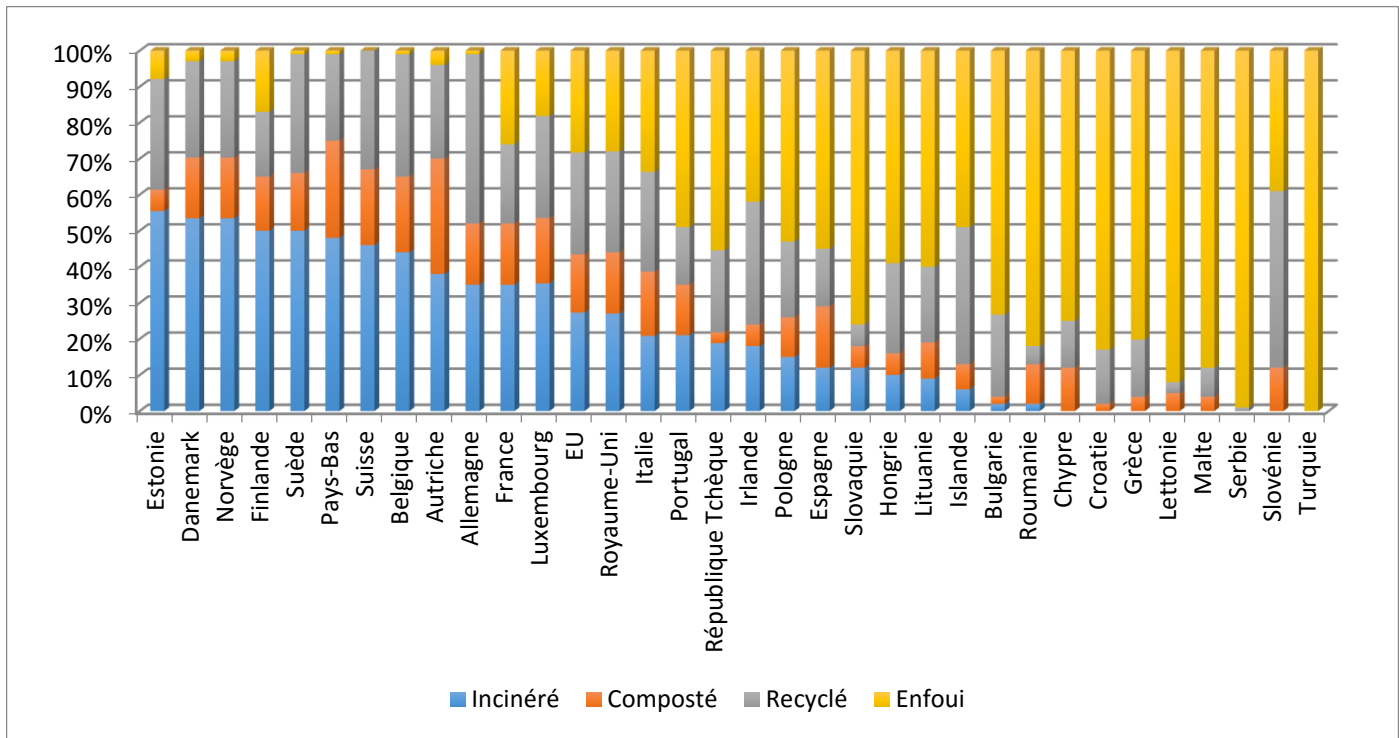


Figure 10 : Méthode de traitement des déchets municipaux en Europe (proportion en %)

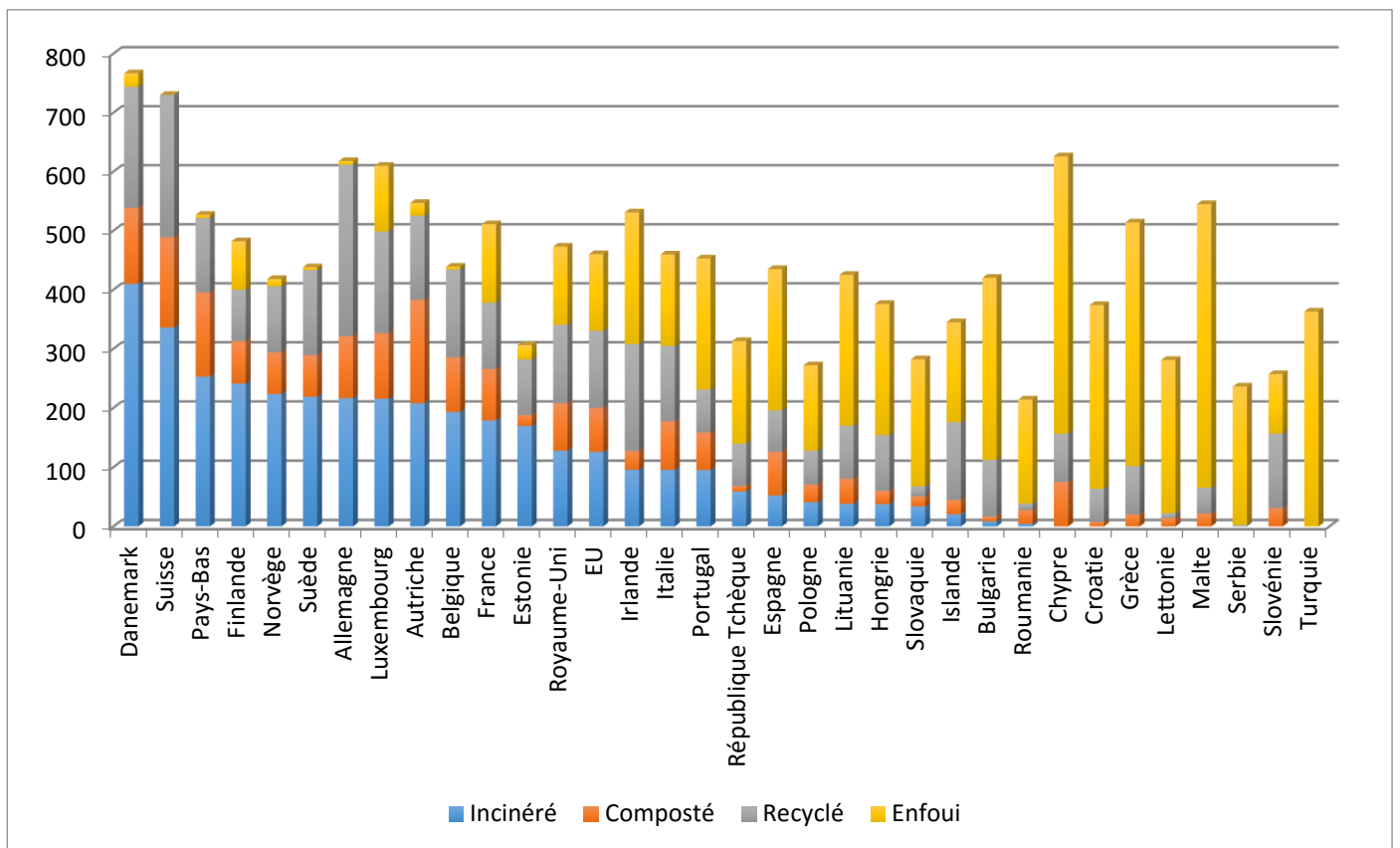


Figure 11 : Méthode de traitement des déchets municipaux en Europe (volume en kg/hab.)

Les pays tels que la Belgique, le Luxembourg, l'Allemagne, l'Italie ou le Royaume-Uni ont une proportion d'incinération des déchets municipaux similaires à celle de la France. Parmi les pays frontaliers à la France, seule l'Espagne présente un taux d'incinération faible tandis que l'enfouissement y est encore très présent.

On observe, d'après la *figure 12*, depuis quelques décennies, dans l'Union Européenne, une diminution de l'enfouissement, au profit du recyclage, du compostage et de l'incinération permettant de valoriser énergétiquement les déchets, selon un rapport de Eurostat datant de 2014^[19].

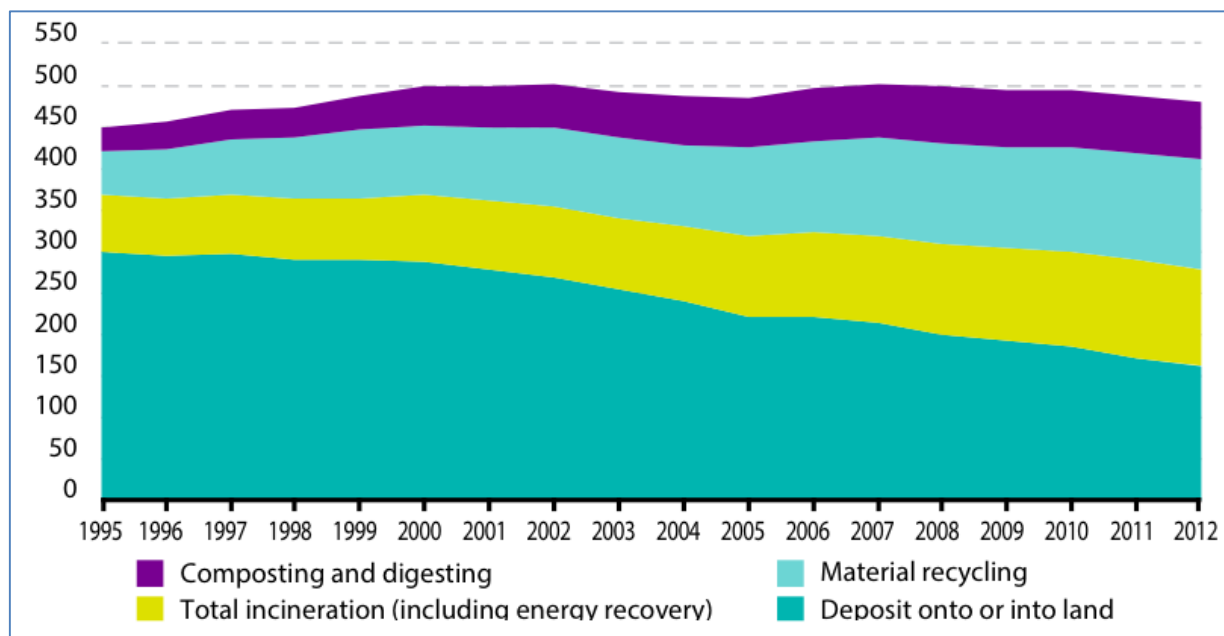


Figure 12 : Traitement des déchets municipaux dans l'UE27 (kg/habitant)
(<http://ec.europa.eu/eurostat/documents/4031688/5932212/KS-01-13-750-EN.PDF>)

L'incinération gardant une part non négligeable dans le traitement des déchets en Europe, il fut nécessaire d'imposer des lois encadrant les installations d'incinération, en particulier concernant les mâchefers, autrefois considérés comme de simples « déchets » tel que défini dans la directive 91/156/CEE^[20] du Conseil de la Communauté Économique Européenne : « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ».

2. Législation Européenne quant aux mâchefers

La législation des mâchefers en Europe subissent tout d'abord la directive 2008/98/CE^[21] du Parlement européen et du Conseil de l'Union Européenne. Ainsi, l'article 6 du chapitre I met fin au statut de « déchet » des mâchefers car ils présentent un intérêt mercantile et sont utilisés à des fins spécifiques. Toutefois ils doivent remplir des exigences techniques, des normes et des critères. Les critères comprennent des valeurs limites pour les polluants, si nécessaire, et tiennent compte de tout effet environnemental préjudiciable éventuel de la substance ou de l'objet.

a. Critères sur les éléments polluants

La directive 2010/75/UE^[22] du Parlement européen et du Conseil de l'Union Européenne va ainsi définir des critères précis et quantifiés pour les éléments polluants pour les différentes installations, dont les mâchefers.

Concernant le carbone organique total (COT), la directive stipule la chose suivante : « Les installations d'incinération des déchets sont exploitées de manière à atteindre un niveau d'incinération tel que la teneur en carbone organique total des cendres et mâchefers soit inférieure à 3 % du poids sec de ces matériaux ou que leur perte au feu soit inférieure à 5 % de ce poids sec ».

Concernant les métaux lourds et matériaux polluants, les critères à respecter sont exprimés en mg/L sur la figure 13.

Substance polluante	Valeurs limites d'émission pour des échantillons non filtrés (mg/l sauf dans le cas des dioxines et furannes)	
	(95 %)	(100 %)
1. Total des solides en suspension tels que définis à l'annexe I de la directive 91/271/CEE	30	45
2. Mercure et ses composés, exprimés en mercure (Hg)		0,03
3. Cadmium et ses composés, exprimés en cadmium (Cd)		0,05
4. Thallium et ses composés, exprimés en thallium (Tl)		0,05
5. Arsenic et ses composés, exprimés en arsenic (As)		0,15
6. Plomb et ses composés, exprimés en plomb (Pb)		0,2
7. Chrome et ses composés, exprimés en chrome (Cr)		0,5
8. Cuivre et ses composés, exprimés en cuivre (Cu)		0,5
9. Nickel et ses composés, exprimés en nickel (Ni)		0,5
10. Zinc et ses composés, exprimés en zinc (Zn)		1,5
11. Dioxines et furannes		0,3 ng/l

Figure 13 : Valeurs limites d'émission dans l'eau pour les installations dont mâchefers

b. Traçabilité des installations

L'article 17 du chapitre III de la directive 2008/98/CE demande également un effort de traçabilité des installations pour les pays européens :

« Les États membres prennent les mesures nécessaires afin que la production, la collecte et le transport des déchets dangereux, ainsi que leur stockage et leur traitement, soient réalisés dans des conditions de protection de l'environnement et de la santé humaine [...], y compris des mesures visant à assurer la traçabilité des déchets dangereux depuis le stade de la production jusqu'à la destination finale ainsi que leur contrôle [...]».

Partie 2

I. Résultats des entretiens avec les UIOM

Démarche :

Afin de vérifier la base de données d'Eco-Emballages concernant les données d'incinérations de l'année 2014, nous avons été amenés à contacter par téléphone les UIOM. Il s'agit notamment de récupérer les tonnages d'OM, de mâchefers, et éventuellement de métaux ferreux et non ferreux traités par chacune d'entre elles, ainsi que les noms d'entreprises liées à leur activité, que ce soit pour la récupération des matières recyclées ou non. Pour cela, nous avons établi au préalable un questionnaire nous permettant de mener l'entretien de manière à récolter un maximum d'informations. Vous trouverez ce questionnaire en annexe.

Déroulement de cette phase d'appels :

Au cours de cette première phase du projet, nous avons eu beaucoup de difficultés à rassembler les données recherchées. En effet, les entreprises se sont souvent montrées réticentes à communiquer des données chiffrées qu'elles avaient déjà renseignées auparavant par le logiciel d'éco-incinération. De plus, il fut la plupart du temps impossible de concilier nos disponibilités avec celles des interlocuteurs compétents pour nous répondre, compte tenu du nombre de cas à traiter. Ce sont les principales raisons qui expliquent notre faible taux de réponse.

Fiche détaillée de chaque UIOM contactée :

Concernant les UIOM pour lesquelles nous n'avons pas pu recueillir d'information, nous avons mis à jour les adresses dans la base de données. Vous trouverez ci-dessous les fiches des UIOM avec lesquelles nous avons pu nous entretenir : voir le document « Fiches_UIOM ».

Analyse :

Adresse et contacts :

Les adresses et listes de contacts ont été complétés ou mises à jour via les entretiens téléphonique ou le [site](#) d'information du SVDU (Syndicat national du traitement et de la Valorisation des Déchets Urbains et assimilés) qui recense l'ensemble des acteurs de l'incinération en France. Vous trouverez nos modifications sur la page « Adresse MàJ » de la base de données.

Dans le fichier d'origine, on recense 118 UIOM. Or, en combinant les données présentes sur le [site du SVDU](#) et sur www.france-incineration.org géré par Zero Waste France, il semble qu'il y ait 8 UIOM de

plus encore en activité non référencées sur la base. Ces usines sont mises en valeur par des surlignés jaunes sur la page modifiée du fichier. Cependant, à la lecture des codes de référencement des usines qui sautent des lettres, il se peut que ces usines fissent partie de la base de données dans le passé mais n'y figurent plus, pour des raisons que nous ignorons mais qu'Eco-Emballages connaît probablement. Par exemple, dans le département du Nord, il y a trois usines : 59IA, 59IC et 59IJ. Notre étude en recense deux de plus qui sont peut-être les anciennes 59IB et 59ID.

Tonnages :

Les informations sur les tonnages récoltées ont été directement ajoutées sur la page « TONNES UIOM » de la base de données. Nos données ont été mises en vert. Si les données de la base de données ne correspondent pas, nous les avons fait apparaître en rouge, sans pour autant être en capacité d'affirmer que celles-ci sont fausses, compte tenu des données approximatives parfois communiquées par nos interlocuteurs et de la relative imprécision de ce que signifie « Tonnage OM » par exemple.

De plus, ressentant un agacement de nos interlocuteurs lorsqu'il s'agissait de détailler toutes les données pour chaque trimestre, nous avons pris la décision de ne demander les quantités que sur la totalité de l'année 2014. Si il n'y avait pas correspondance avec la base de données, nous tentions alors de rappeler la personne pour avoir un détail plus précis des quantités afin d'essayer de comprendre cet écart.

Les OM :

Lorsque nous avons demandé à nos interlocuteurs quelle quantité d'ordures ménagères ils avaient traité, nous nous sommes très souvent retrouvés avec un tonnage inférieur à celui présent dans la base de données. Cet écart s'explique la plupart du temps par la prise en compte des déchets industriels banals (DIB) ou autres déchets spécifiques tels que les déchets médicaux. Cet écart peut être minime dans certains cas avec par exemple un taux de DIB inférieur à 1% pour l'UIOM de Pontivy, mais totalement non négligeable dans d'autres cas, comme l'UIOM de Tronville-en-Barrois qui affiche un écart de 39% du total.

De plus, l'UIOM de Chavanod (74IC) a répondu à nos sollicitations en nous envoyant leur rapport d'activité accompagné de leurs déclarations trimestrielles éco-incinération disponibles dans le dossier : «Declaration_74IC_2014-T1», «Declaration_74IC_2014-T2», «Declaration_74IC_2014-T3 », « Declaration_74IC_2014-T4 ». Nous notons qu'en effet, il existe une case permettant à l'UIOM de préciser la part « non OM » de ses déchets incinérés. Cependant, si l'on se réfère au trimestre 1, la valeur présente dans la base de données correspond au tonnage total incinéré par l'usine. La soustraction pour se limiter à l'OM n'est donc pas effectuée dans la base de données, ce qui peut expliquer l'écart que nous avons aussi relevé avec les autres usines. En revanche, nous ne parvenons pas à expliquer l'écart des trois autres trimestres.

Les métaux :

Dans la quasi-totalité des cas où des données précises nous ont été communiquées, il y a correspondance entre ce que nous avons recueilli et la base de données. Il semble donc que les informations concernant les tonnages de métaux soient fiables.

En revanche, la prise en compte des DIB dans la colonne « Tonnes OM » de la base de données peut poser un problème de traçabilité. En effet, si le but est de savoir quelle quantité de métaux provient des ordures ménagères au sens strict, l'information est erronée. Par exemple, si l'on revient au cas de l'UIOM de Chavanod, les tonnages de métaux présents dans la base de données sont les tonnages totaux présents en bas de la page, c'est-à-dire qu'ils comportent les métaux provenant des déchets « non OM ». Lors d'une conversation avec Nicolas GRIS, ce dernier nous a alors expliqué que pour déterminer la quantité de métaux provenant seulement des ordures ménagères, le pourcentage de déchets « non OM » était calculé grâce aux données présentes sur la déclaration, et que ce pourcentage était retiré à la quantité totale de métaux pour en déduire la part d'acier provenant uniquement des OM. Les formules présentes dans les cases Excel de la déclaration trimestrielle confirme ce mode de calcul.

Si l'objectif est de savoir quelle quantité de métaux se trouve dans la totalité des mâchefers, alors les valeurs saisies dans la base de données sont bonnes, mais nous ne comprenons donc pas pourquoi d'un point de vue traçabilité on s'intéresse seulement au tonnage d'OM strict et non au tonnage total incinéré comme il semble être saisi dans la BdD. Si en revanche l'objectif est de n'identifier que les métaux provenant des OM, alors il faut rectifier les valeurs en soustrayant la part de métaux issue des déchets non ménagers ainsi que les DIB pour les OM.

Concernant les résultats dans leur ensemble, nous avons relevé qu'aucune usine ne faisant pas de maturation sur place n'est équipée de machine à courant de Foucault pour récupérer les métaux non ferreux. En revanche, la plupart des usines possèdent au moins un Overband en sortie de four qui leur permet de récupérer une partie des métaux ferreux qui ne représente pas la totalité de ce qui est présent dans les mâchefers. Malgré la non-exhaustivité de notre étude, nous estimons que cela caractérise assez bien la tendance générale concernant l'équipement d'extraction des UIOM.

Le broyage des métaux :

Parmi notre échantillon de réponses, aucune usine ne pratique le broyage des métaux. Les métaux semblent être vendus en l'état et le nettoyage de ceux-ci à la charge de récupérateur. Nous n'avons donc recueilli aucune information pertinente quant au traitement de la gangue lors de nos entretiens avec les UIOM.

Le mâchefer résiduel :

En sortie de four, le tonnage de mâchefers représente entre 20% et 25% du tonnage de déchets incinérés. A plusieurs reprises, la valeur 21% nous a été rétorquée lorsque nous demandions le tonnage de mâchefers. Cette valeur semble donc être une sorte de norme implicite quant à la quantité de mâchefers produite en fonction de la quantité de déchets brûlée.

De plus, le processus de traitement des mâchefers nécessitant leur stockage afin de permettre les analyses dont le délai de réponse est d'environ un mois, il est nécessaire pour les usines de les envoyer sur des plateformes pouvant les recevoir. Les usines peuvent être équipées d'installations de stockage

auquel cas elles font de la maturation sur place, ou elles peuvent envoyer leurs mâchefers à des plateformes de maturation, aussi appelées Installations de Maturation et d'Elaboration (IME). A travers notre étude, nous avons trouvé les deux cas de figures dans des proportions assez comparables. Etant donné le nombre relativement faible d'entretiens obtenus, nous ne pouvons donc pas dire si l'un domine significativement ou non.

Nous avons aussi relevé deux usines qui procèdent à l'enfouissement du mâchefer produit sans réaliser d'analyse préalable.

Enfin, les informations recueillies à propos de l'UIOM de Pontivy soulèvent quelques questions. En effet, ils déclarent ne pas faire de maturation ni d'extraction d'aluminium, et de vendre leurs mâchefers à des entreprises de travaux publics. Dès lors, sans capacité de stockage, nous nous demandons si l'usine respecte la procédure d'analyse requise dans le cadre de la nouvelle réglementation. Nous n'avons malheureusement pas pu recontacter l'usine pour répondre à cette interrogation.

II. Résultats des entretiens avec les plateformes de maturation

Après s'être intéressé aux UIOM avec un faible taux de réussite, nous nous sommes concentrés sur les plateformes de maturations, qui sont le deuxième intervenant majeur en ce qui concerne le cycle des mâchefers. Cette partie de l'étude s'est déroulée de début janvier à mi-mars.

Nos objectifs étaient de comprendre un peu plus en détail le fonctionnement de ces IME, en identifiant notamment leurs fournisseurs, leurs clients et en essayant de comprendre leur rôle dans le processus de maturation des mâchefers. Nous avons aussi essayé de récupérer quelques données chiffrées concernant les flux de matériaux liés à leur activité, ainsi que de comprendre selon quels critères les mâchefers sont évacués de leurs installations.

Pour cela, nous avons continué à solliciter par téléphone les sociétés gestionnaires de ces plateformes. Les activités des IME étant plus variées que celles des UIOM et l'obtention de données chiffrées précise moins essentielle à l'enquête, il fut un petit peu plus facile de mener une discussion constructive avec nos interlocuteurs.

Les plateformes :

La base de données référence 13 plateformes qui correspondent en fait physiquement 10 sites. En effet, celles qui comportent le même numéro INSEE sont représentées sur la même IME. D'après les noms donnés à ces plateformes, le référencement multiple selon le code Eco-Emballages vient du fait que ces IME traitent les flux de plusieurs UIOM. Par exemple, la plateforme MOULIN située à Bourgoin-Jallieu est divisée en « 01PA : PLATEFORME MOULIN FLUX LYON SUD » et « 01PB : PLATEFORME MOULIN FLUX LYON NORD » car elle récupère des mâchefers en provenance de l'UIOM situé à Gerland (Lyon Sud) et de Rilleux-

la-Pape (Lyon Nord). Il en est de même pour la plateforme PERRIER de Saint-Priest et la plateforme YPREMA de Lagny-sur-Marne. Parmi ces 10 IME, nous avons pu nous entretenir avec 4 d'entre elles, 3 n'ont pas donné suite à notre requête, 2 sont resté injoignables et une, celle de Bonneuil-sur-Marne, n'exerce plus d'activité de maturation. Vous pouvez en consulter les résultats des entretiens sur le fichier Fiches PF. Les mails et numéros de téléphones obtenus des autres plateformes sont disponibles sur la base de données.

Selon le [site internet de l'ORDIF](#) (Observatoire Régional des Déchets d'Ile-de-France), il existe 3 autres plateformes en Ile-de-France. Deux sont gérées par CLAMENS et se trouvent à Argenteuil et à Vert-le-Grand. La dernière est gérée par EUROVIA et se trouve à Massy. Ceci fait une liste exhaustive de 8 plateformes de maturation pour la région Ile-de-France. Grâce au [site internet de SINDRA](#) (Système d'Informations des Déchets Ménagers en Rhône-Alpes) qui est l'observatoire des déchets dans la région Rhône-Alpes, nous sommes aussi en mesure d'affirmer qu'il y a un total de 10 plateformes dans cette région. Nous avons de plus trouvé 3 plateformes en Bretagne.

Qui sont les gérants de ces plateformes ?

Comme nous l'avons vu dans la partie consacrée aux résultats des UIOM, les plateformes de maturations sont souvent situées sur le même site que les incinérateurs. Les deux entités sont alors gérées par le même exploitant. C'est le cas des 5 plateformes référencées par le code d'UIOM sur le fichier Fiches PF. Ces exploitants peuvent être des sociétés privées ou des collectivités.

Concernant les IME sans incinérateurs, elles sont gérées par entreprises privées du secteur du recyclage comme YPREMA, TIRFER ou CLAMENS, mais aussi du secteur du BTP, comme MOULIN TP, PERRIER TP ou EUROVIA qui est une filiale de VINCI.

Gestion des arrivages :

Les arrivages de mâchefers dans les plateformes proviennent essentiellement des UIOM à proximité géographique. Souvent, les UIOM qui font la maturation sur place ne s'occupent que du mâchefer provenant de leurs fours mais elle peut aussi recevoir occasionnellement ou non des mâchefers provenant d'autres incinérateurs, comme c'est le cas pour l'UIOM de Rennes qui reçoit du mâchefer de Briec. De manière plus générale, les plateformes se fournissent en mâchefer dans plusieurs UIOM. On peut noter que les usines n'envoient pas toujours l'intégralité de leur mâchefer à une seule plateforme.

Lorsque les mâchefers arrivent sur site, les lots sont séparés en fonction du mois d'arrivée, mais ils peuvent aussi l'être en fonction de l'UIOM fournisseur lorsque ceux-ci sont multiples. Par exemple, la plateforme de Lagny-sur-Marne fonctionne selon ce principe. Cela a pour but de permettre la traçabilité des mâchefers et des métaux provenant de ces lots, afin de respecter les contrats entre plateformes et usines.

Ces lots peuvent avoir déjà subi une première extraction de métaux dans les UIOM (seulement les ferreux dans la majorité des cas) ou arriver bruts, c'est-à-dire tels que sortis des fours. La majorité des plateformes pratiquent alors le criblage afin d'obtenir une granulométrie de mâchefer permettant sa valorisation en technique routière. Cependant, toutes les usines ne procèdent pas à cette étape.

C'est ensuite que les métaux sont extraits, via des Overband ou des machines à courants de Foucault.

Revente des métaux :

Au cours de nos entretiens avec les plateformes nous avons pu identifier différents types de contrats qui les lient aux UIOM. Dans tous les cas, les plateformes vendent leur prestation de stockage des mâchefers mais c'est sur la commercialisation des métaux recyclés que l'on peut trouver des différences.

La plateforme peut être payée seulement pour l'extraction des métaux, ceux-ci restant la propriété de l'UIOM qui se charge de leur commercialisation. Elle peut aussi devenir propriétaire du mâchefer reçu, et ainsi se charger de la commercialisation des métaux extraits.

Nous avons aussi relevé un cas intermédiaire qui concerne le mâchefer traité sur la plateforme de Lagny-sur-Marne en provenance des UIOM de Saint-Thibault-des-Vignes et de Montereau-Fault-Yonne. La recette liée à la revente des métaux est divisée en trois entre la plateforme, l'UIOM et le syndicat.

Dans tous les cas, lorsqu'on s'intéresse à la traçabilité de ces métaux, il ne faut pas cumuler les quantités extraites par l'UIOM et celles extraites par la plateforme car la plateforme communique aux fournisseurs de mâchefers les quantités de métaux extraites de leurs lots. Les UIOM en tiendront donc compte en faisant apparaître ces quantités dans leurs déclarations trimestrielles.

Traitement des mâchefers résiduels :

Une fois les métaux extraits d'un lot, celui-ci est soumis à des analyses pour déterminer s'il est conforme aux normes imposées par l'arrêté du 18 novembre 2011 qui encadre l'utilisation des mâchefers. Les résultats parviennent aux plateformes dans un délai d'environ 1 mois.

Si les résultats sont conformes, le mâchefer résiduel est classé en type 1 ou 2 en fonction des paramètres analysés et peut être valorisé en technique routière. Sinon, plusieurs options sont possibles. Soit le mâchefer analysé comporte des valeurs trop élevés de certains constituants qui sont sensibles à la lixiviation, auquel cas on peut poursuivre la maturation afin qu'ils rentrent dans les normes, soit l'analyse révèle des valeurs qui ne peuvent pas être améliorées par une poursuite de la maturation. Dans ce cas, soit le mâchefer est renvoyé à l'UIOM, car de tels résultats peuvent s'expliquer par une mauvaise combustion des ordures, soit il est envoyé en ISDND pour enfouissement, ce qui reste tout de même globalement marginal en terme de quantités pour les plateformes de maturation. A travers la plateforme de maturation de Chambéry, nous avons aussi relevé un cas de figure où des mâchefers valorisables sont enfouis faute de chantier repreneur.

Dans le cas d'une maturation prolongé, la durée de stockage ne peut excéder un an, auquel cas le mâchefer doit être envoyé en enfouissement. Certaines plateformes comme celle de Bourgoin-Jallieu semblent limiter ce délai à un an.

Broyage et gangue :

Comme pour les UIOM, nous avons eu peu de réponses concernant le broyage des métaux, car cette étape semble encore être repoussée et confiée aux repreneurs de métaux, ou les plateformes ne veulent pas communiquer là-dessus. Seule la plateforme de Saint-Priest nous a affirmé effectuer le broyage sur place. La gangue résultante de cette étape est alors réintroduite dans les mâchefers résiduels avant analyse.

III. Valorisation des mâchefers

Le processus d'incinération des ordures ménagères crée des mâchefers, aussi appelés MIDND (Mâchefers d'Incinération des Déchets Non Dangereux). Afin de réduire les coûts des collectivités et des entreprises qui gèrent la collecte et le traitement des ordures ménagères et dans une approche de recyclage et de réutilisation des matières premières, les mâchefers vont être revalorisés, quand cela est possible. A ce jour, il existe deux revalorisations principales des mâchefers. En premier lieu, les métaux ferreux et non-ferreux vont être récupérés et revendus à des repreneurs comme des aciéries, et, ensuite, ils peuvent éventuellement être revalorisés en technique routière.

1. Valorisation en technique routière

De par leurs caractéristiques géotechniques (c'est-à-dire leur taille, leur forme, leurs caractéristiques mécaniques, leur résistance aux éléments extérieurs), les mâchefers peuvent être utilisés comme grave et ainsi se substituer aux granulats naturels tel que le sable concassé. En effet, les caractéristiques géotechniques des MIDND sont les suivantes :

- Ils présentent un volume stable pour les différentes conditions auxquelles ils peuvent être confrontés, sauf dans le cas où tout l'aluminium n'a pas été retiré. Il apparaît alors de l'hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$, qui cause un gonflement des mâchefers et donc une déformation de la route.
- Ils ont de bonnes propriétés de compactage.
- La portance générée est suffisante.
- Le gel impacte peu leurs propriétés, ce qui est très important en hiver.
- Ils ont en revanche de faibles propriétés de contact : ils sont peu résistants aux chocs, à l'abrasion et à l'usure.

Les mâchefers pourraient être utilisés sans modifications, mais afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et environnementales, ils subissent généralement des processus physico-chimiques.

L'opération la plus courante est la stabilisation par liants hydrauliques. Cela consiste à mélanger les mâchefers avec des poudres anhydriques constituées de sels minéraux qui vont réagir en présence d'eau pour créer une matrice solide et poreuse. Le liant le plus utilisé est le ciment de Portland, composé principalement de calcaire et d'argile. Il est possible d'ajouter à ce ciment certains additifs en fonction des propriétés recherchées. Cette opération a de nombreux avantages. La dureté est améliorée. La résistance au gel et à la charge sont aussi meilleures. Cela permet aussi de diminuer la lixiviation. Des liaisons chimiques vont se créer avec certains polluants se trouvant dans les mâchefers et ainsi vont les lier plus fortement au matériau. Il est aussi possible d'appliquer aux MIDND une stabilisation par liants bitumineux

mais ce procédé est beaucoup plus cher et donc beaucoup moins courant.

Un tamisage et un lavage à l'eau peuvent aussi être appliqués aux mâchefers. Le tamisage permet d'éliminer les éléments les plus fins, qui sont aussi les plus polluants (plus de 50% du potentiel polluant se trouve concentré dans la fraction granulométrique inférieure à 2 mm), et les éléments de diamètre supérieur à 50 mm afin de faciliter le compactage et l'application sur le sol. Le lavage à l'eau permet d'éliminer une forte proportion des chlorures et une partie des sulfates, ce qui améliore la qualité chimique du matériau

Comme les mâchefers présentent de très bonnes caractéristiques géotechniques de résistance mais sont trop sensibles aux contacts et aux frottements, ils sont utilisés en tant que remblai ou dans les couches de base ou de fondation de la route, c'est-à-dire dans les couches inférieures, les plus proches du sol. Cependant, leur utilisation est soumise à des restrictions légales dues à leur possible impact sur leur environnement. Les MIDND vont passer des tests qui détermineront leur toxicité pour l'environnement et seront classés en plusieurs catégories. Les mâchefers utilisables immédiatement en technique routière seront divisés en deux catégories aux emplois différents.

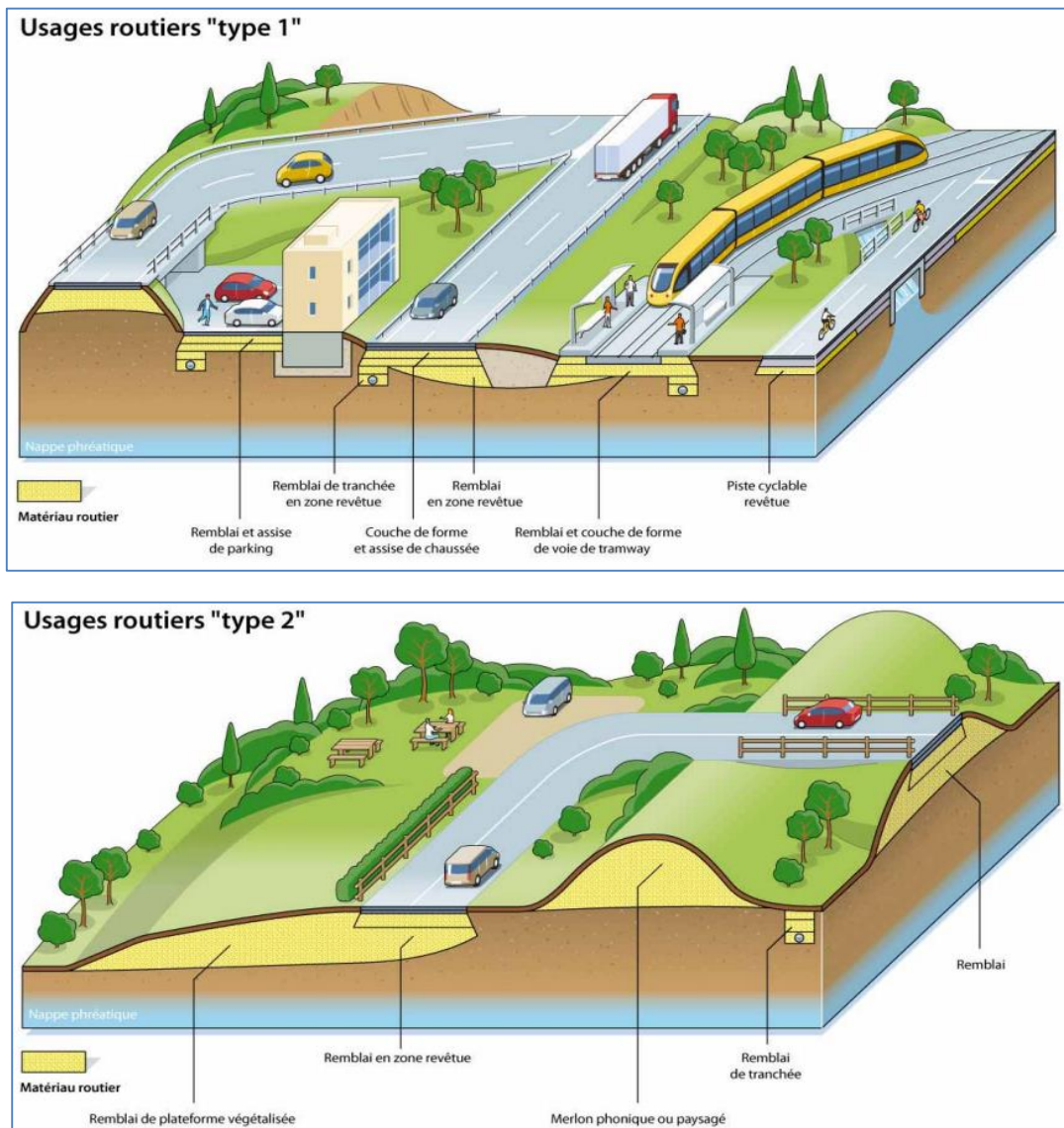


Figure 14 : Utilisations possibles des mâchefers (http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2015-02/n165_developpement_durable_n5_2015-02-09_11-11-23_138.pdf)

Pour rappel, la figure 14 illustre l'utilisation des mâchefers en technique routière.

L'ANGM (Association Nationale des Graves de Mâchefers) regroupe divers intervenants dans le domaine des MIDND, qui conteste la qualification de ces mâchefers comme « déchets » et non comme « produits » par l'arrêté de novembre 2011, qui est selon eux un obstacle à leur utilisation.

S'ils ne contestent pas le durcissement des normes environnementales relatives aux analyses qui selon eux est gage de qualité de ces MIDND, ils dénoncent en revanche le terme d'utilisation en « technique routière » qui peut rebuter certains clients potentiels pensant que cette matière est seulement destinée à la route, or elle a d'autres utilisations possibles comme vu précédemment.

De plus, l'association explique que la valorisation de ces mâchefers permet de substantielles économies pour les collectivités qui évitent la mise en décharge dont le coût est de 28,77€ par tonne en moyenne.

C'est pourquoi l'ANGM souhaite à court terme obtenir le statut de « produit » pour ces MIDND et à plus long terme, promouvoir leur utilisation en travaux publics et accompagner les collectivités dans la mise en œuvre de bonnes pratiques.



Figure 15 : Logo de l'ANGM

2. Valorisation des métaux

A la sortie des incinérateurs, les mâchefers contiennent encore des résidus de métaux ferreux (principalement de l'acier) et non-ferreux (généralement regroupés sous l'appellation « aluminium »). Ces résidus proviennent des déchets qui ont échappés au tri réalisé en amont. Par exemple, une canette en aluminium qui a été jetée dans la poubelle des déchets ménagers et non dans la poubelle des déchets recyclables.

Les résidus métalliques vont être extraits des mâchefers à la sortie des incinérateurs ou après être passés par des plateformes de maturation grâce à des overbands pour les ferreux et des machines à courants de Foucault pour les non-ferreux.

Ils sont ensuite vendus à des repreneurs qui les utiliseront comme matière première. Les repreneurs sont principalement des aciéries, des fonderies ou des négociants en matière première. Leur taille est très variable, allant du groupe mondial comme ArcelorMittal à des PME de moins de 10 employés.

A partir des données fournies par Eco-Emballages sur les ventes de métaux entre unités d'incinération et repreneurs, nous avons cartographié les flux d'achats et de ventes afin de mieux comprendre le fonctionnement de ce secteur.

Le logiciel utilisé est QGIS, un logiciel sous licence libre spécialisé dans la création de cartes. Les extensions RT Qspider et Arrows ont été installées et utilisées pour la création des flèches indiquant les flux.

La première étape a été de placer sur la carte les UVE. Pour cela, il faut fournir au logiciel un fichier csv comportant un identifiant géographique des lieux à ajouter à la carte et éventuellement leur nom. Un fichier csv est un fichier texte qui se comporte comme un tableur : chaque renvoi à la ligne correspond à une nouvelle ligne du tableur et sur une ligne, le changement de colonne est délimité par un caractère spécial (dans notre cas, la virgule). Il a été choisi comme identifiant géographique le couple de coordonnées longitude-latitude. Les UVE sont représentés par des carrés verts.

Comme Eco-Emballages nous a fourni l'adresse des UVE, il a suffi de convertir ces adresses en coordonnées avec l'aide du site internet « www.coordonnees-gps.fr/ ». Dans le cas de quelques UVE, leur adresse n'était pas fournie et il n'a pas été possible de la trouver. En effet, seul leur code était connu (numéro de département-I-lettre de A à J) et nous n'avons pas réussi à récupérer l'index national qui fait correspondre les UVE et leur code. C'est le cas des UVE dont le code est 59IE, 59IF et 62IA.

Il a fallu ensuite de la même manière placer les repreneurs sur la carte. Cependant, l'adresse des repreneurs n'étaient pas connues. Seul le nom des entreprises figurent dans le fichier des ventes de métaux des UVE pendant l'année 2014 que nous a fourni Eco-Emballages. Pour tous les repreneurs cités dans ce fichier, nous avons cherché l'adresse de l'entreprise, ou au moins la ville où elle est située, puis nous l'avons convertie en coordonnées géographiques.

Cependant, nous avons été confrontés à plusieurs difficultés. Certaines entreprises n'existaient pas, plus, avaient changé de nom ou leur nom était mal orthographié ou abrégé en initiales. Une recherche plus avancée était alors nécessaire pour déterminer quel était effectivement le repreneur et il n'a pas été toujours possible d'avoir un résultat fiable.

D'autres difficultés ont été rencontrées dans le cas de grands groupes possédant de nombreuses filiales et sites. Lorsque le nom du groupe mère est mentionné comme repreneur, il faut déterminer quelles sont ses filiales (ce qui n'est pas toujours évident lorsqu'il y a une forte ramification de l'entreprise), quelles sont celles susceptibles d'acheter des métaux et quels sont les sites appartenant à ces filiales qui peuvent recevoir les métaux. Il reste alors dans certains cas de nombreuses possibilités. Il est probable que certains de ces sites n'achètent aucuns métaux mais, en l'absence de preuves du contraire, ils ont été ajoutés à la carte des repreneurs (cercles rouges).

Enfin, les flux de métaux entre UVE et repreneurs ont été représentés par des flèches. Pour cela, il faut aussi créer un fichier csv dont les lignes sont composées des identifiants géographiques des points de départ et d'arrivée et du nombre de tonnes qui ont été vendues. Le fichier est ensuite traité par l'extension RT QSpider.

Les flux des métaux ferreux et non-ferreux ont été représentés de deux couleurs différentes : gris pour les ferreux et orange pour les non-ferreux. Nous avons fait le choix de ne représenter ces flux que pour le dernier trimestre de l'année 2014 car ils sont globalement stables entre les différents trimestres.

Les problèmes rencontrés précédemment ont aussi impactés les flux. Tous ceux qui ont pour origine une UVE non localisée et tous ceux dont le destinataire est une entreprise possédant plusieurs sites et que celui-ci n'a pas été précisé n'ont pu être représentés. C'est notamment le cas pour ArcelorMittal, Derichebourg et Sita.

Pour chaque type de métaux, nous avons réalisé une carte où les flux sont traités de manière égale quelque soit le nombre de tonnes échangées et une carte où la largeur des flèches est proportionnelle à ce nombre de tonnes (cette dernière est réalisée grâce à l'extension Arrows).

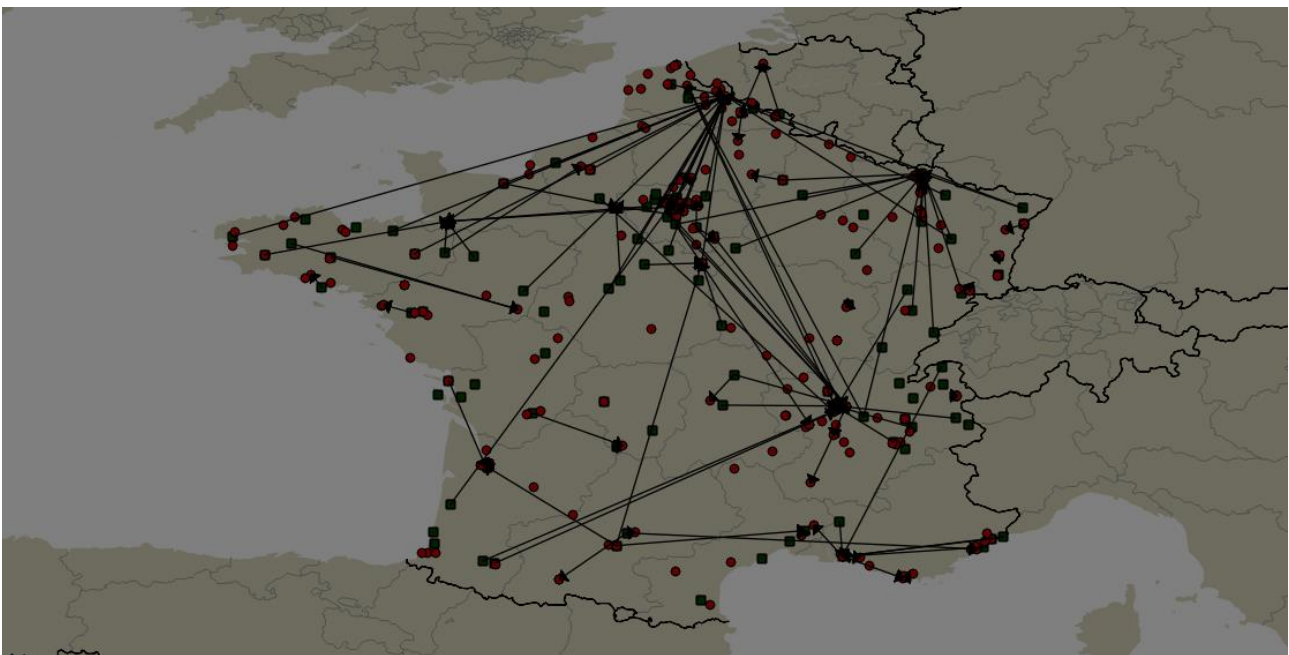


Figure 17 : Ventes de métaux ferreux des UVE au quatrième trimestre 2014, flèches non-proportionnelles

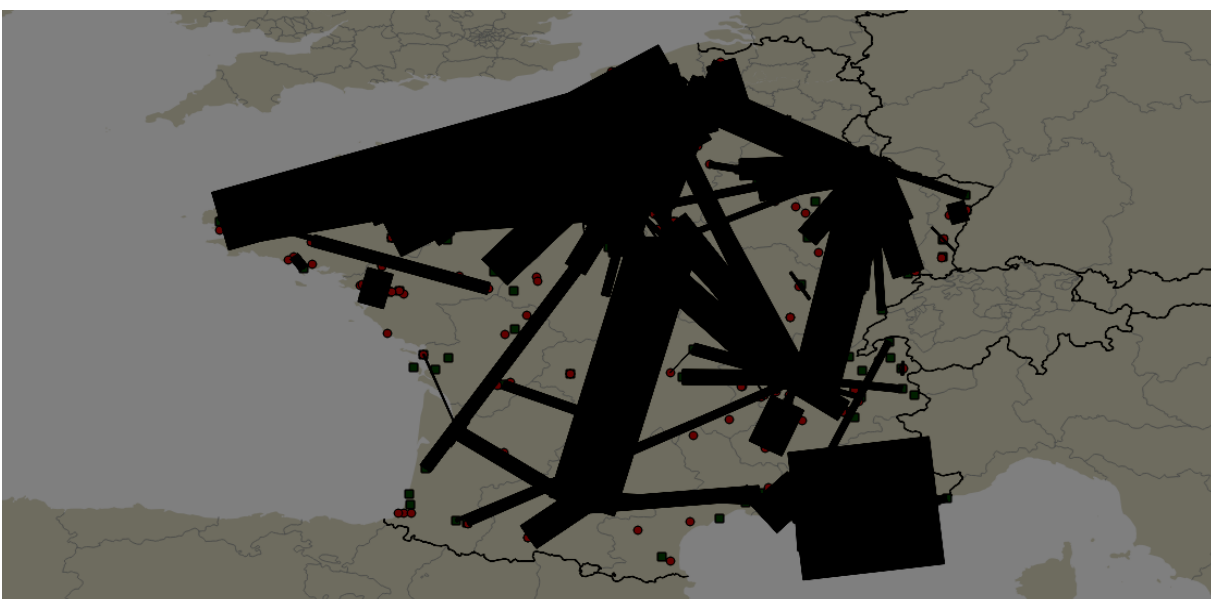


Figure 16 : Ventes de métaux ferreux des UVE au quatrième trimestre 2014, flèches proportionnelles

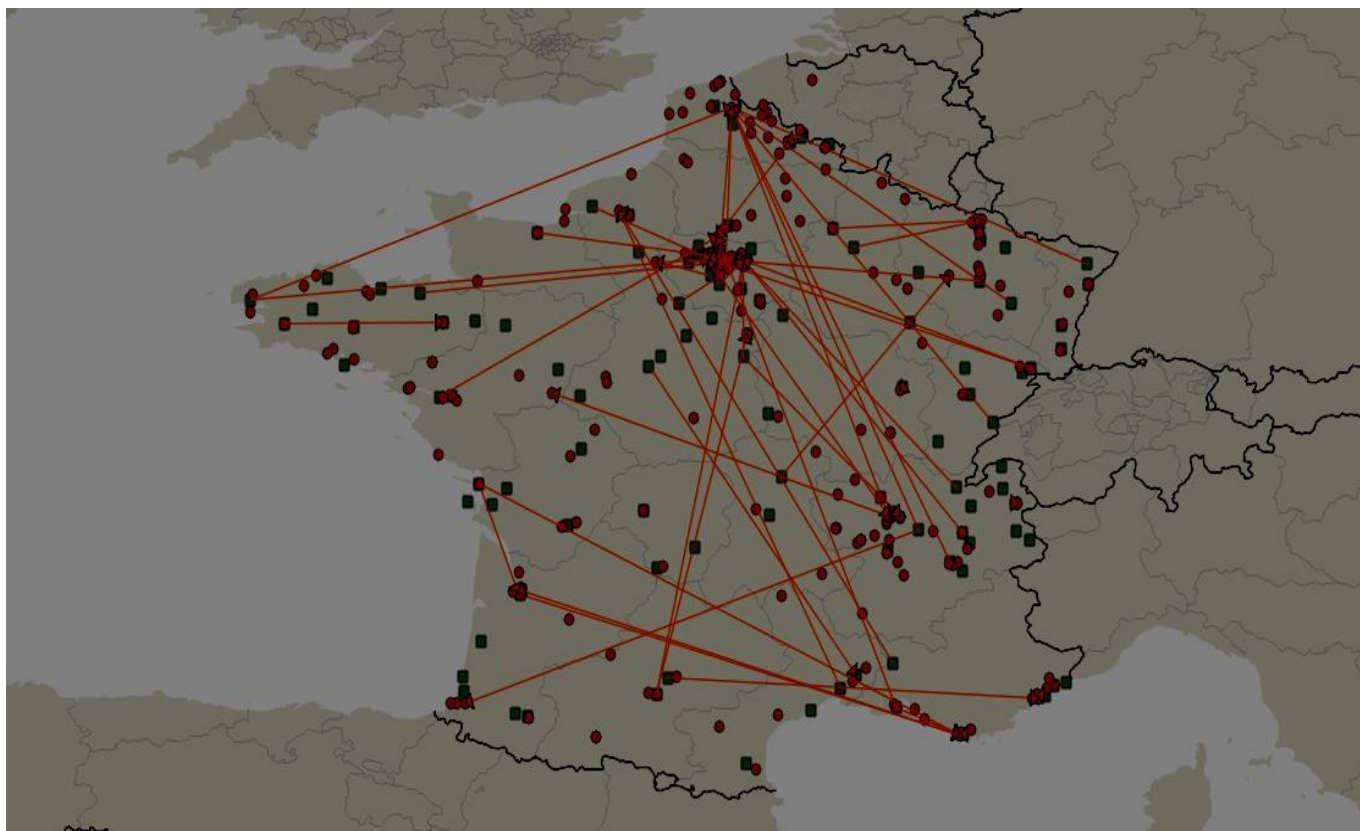


Figure 18 : Ventes de métaux non-ferreux des UVE au quatrième trimestre 2014, flèches non-proportionnelles

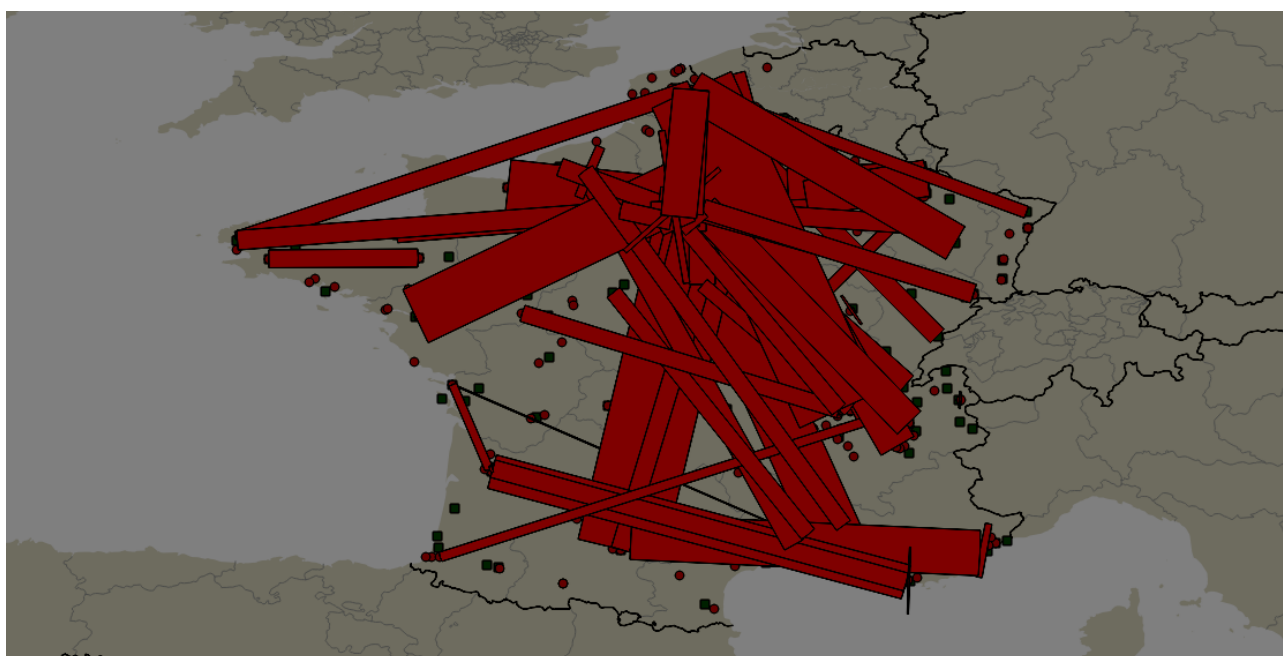


Figure 19 : Ventes de métaux non ferreux des UVE au quatrième trimestre 2014, flèches proportionnelles

IV. Synthèse et recommandations

Si nous sommes conscients que la non-exhaustivité de notre étude ne permet pas d'effectuer un bilan complet de la situation des mâchefers en France, nous pensons tout de même en avoir dégagé les pratiques essentielles. En sortie d'UIOM, un fort taux de MIDND est envoyé en plateforme de maturation qui peut être sur place ou délocalisée, mais une part non négligeable est aussi enfouie sans maturation ou plus étonnant, utilisé directement en technique routière.

Concernant les IME, elles stockent les lots généralement de un mois à un an, afin de prendre le temps nécessaire pour que le processus de maturation permette au mâchefer d'atteindre les seuils de polluants exigés en vue d'être valorisable. La grande majorité du mâchefer peut ainsi être utilisé en technique routière.

Pour avoir des informations plus précises sur les répartitions des filières d'évacuation des MIDND, nous vous partageons les résultats d'une étude menée par le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) disponible au format PDF dans le dossier, s'intéressant à la gestion des MIDND suite à l'application de l'arrêté du 18 novembre 2011. Le taux de réponse bien supérieur qu'il a obtenu permet d'en ressortir des conclusions plus représentatives. Voici un de leurs graphiques de synthèse :

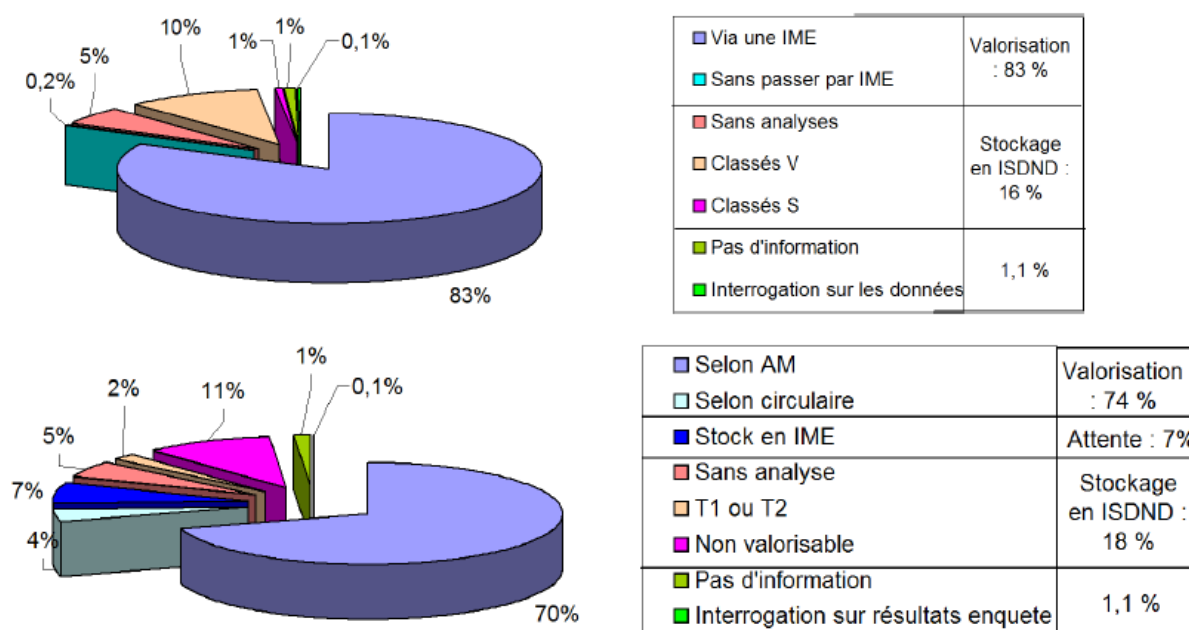


Figure 20 : Graphique de synthèse sur la gestion des MIDND

Ces deux graphiques illustrent les répartitions des filières finales des MIDND. Le graphique supérieur concerne les mâchefers traités selon l'ancienne législation, soit la circulaire de 1994. Le graphique inférieur concerne les mâchefers traités sous la nouvelle législation, à savoir l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011.

On constate une légère augmentation des quantités stockées en ISDND causée par une multiplication par dix de la proportion de mâchefer non valorisable. Cette explosion est la conséquence directe du durcissement des seuils tolérés de polluants apporté par l'arrêté. En revanche, on relève une division par cinq de la quantité de mâchefer valorisable enfouis, ce qui témoigne d'une amélioration notable dans le domaine de l'utilisation de MIDND en technique routière, qui semble donc aller dans le sens de ce que réclame l'ANGM.

Recommandations :

Ayant constaté par notre étude que des mâchefers valorisés T1 ou T2 étaient encore enfouis faute de clients, ce qui est confirmé par l'étude du CEREMA, nous ne pouvons qu'approuver la demande de l'ANGM qui souhaite améliorer la communication autour de ce matériau afin d'en élargir les utilisations. Etant donné les coûts élevés de l'enfouissement, cela serait une source supplémentaire d'économies d'argent pour les collectivités.

Concernant la gestion de la base de données, nous avons relevé une ambiguïté en ce qui concerne la traçabilité des métaux provenant des mâchefers. En effet, si l'objectif est de recenser l'ensemble des métaux provenant de l'ensemble des mâchefers, alors le remplissage des données est correct. Si en revanche on ne s'intéresse qu'au circuit des ordures ménagères, alors il faut retirer les DIB des tonnages d'OM et retirer la part d'acier correspondante. D'un point de vue traçabilité, nous ne comprendrions pas que l'on s'intéresse aux OM seules tout en prenant en compte la totalité des métaux. Heureusement, toutes les données nécessaires à cette clarification sont présentes dans les déclarations trimestrielles des UIOM.

Aussi, nous estimons que le mode de calcul de la part d'acier relative aux DIB se basant sur le pourcentage initial en DIB n'est qu'une approximation, dont nous ignorons de notre point de vue l'exactitude. En effet, nous pouvons penser que les déchets, même banals, produits par certaines industries spécialisées aient un contenu sensiblement différent du foyer moyen. Dès lors, la pourcentage de métaux provenant de ces DIB peut être différent de ceux des ordures ménagères. Nous sommes conscients qu'au regard de la relative faible part de DIB dans les tonnages incinérés, cette estimation puisse être totalement satisfaisante mais en toute rigueur, il est possible d'être encore plus précis dans l'identification de la provenance des métaux. Cependant, si l'incinérateur mélange tout dans les fours, nous admettons qu'établir cette distinction est impossible.

Bibliographie

1. Agence Sycotm. Valorisation des déchets. *Agence métropolitaine des déchets ménagers*. [En ligne] 2015. <http://www.sycotm-paris.fr/edi/traiter/trait/recycl/mache.html>.
2. Symeed. Les plateformes de maturation de mâchefer. *Symeed29*. [En ligne] <http://www.symeed29.finistere.fr/Gestion-des-dechets/Les-plateformes-de-maturation-de-machefers>.
3. Incinérateur de déchets. *Wikipedia*. [En ligne] <http://www.sidefage.fr/les-etapes-de-l-incineration>.
4. Symeed. Les Unités de Valorisation Énergétique des Déchets. *Symeed29*. [En ligne] <http://www.symeed29.finistere.fr/Gestion-des-dechets/Les-Unites-de-Valorisation-Energetique-des-Dechets>.
5. Total. L'incinération : le pouvoir calorifique des ordures. *Planete énergie*. [En ligne] <http://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-incineration-le-pouvoir-calorifique-des-ordures>.
6. Leca, Christel. *Au fil du recyclage. Territoire : Mâchefer : ça coince en Bretagne*. [PDF disponible à : <https://christelleca.files.wordpress.com/2014/10/recymag29-machefers.pdf>] 2014.
8. [En ligne] <http://blog.yprema.fr/graves-de-machefers-des-entreprises-et-des-collectivites-se-mobilisent-et-creent-langm/>.
7. Gwénaëlle Brôns-Laot, *Évaluation environnementale de la valorisation de mâchefer d'incinération d'ordures ménagères en remplissage de carrière*, Thèse en sciences et Technique du déchet, sous la direction de R. Barna, Lyon, INSA, 2002
8. Sonia KAIBOUCHI, *Mâchefer d'Incinération d'Ordures Ménagères: contribution à l'étude des mécanismes de stabilisation par carbonatation et influence de la collecte sélective*, Thèse en science et techniques du déchet, sous la direction de P. Germain, Lyon, Ecole de chimie de Lyon, 2004.
9. Site d'ORDIF [en ligne]. ORDIF, 2013. *Centres de traitement et de valorisation des mâchefer d'incinération*. Disponible sur <http://www.ordif.com/public/fiche/centres-de-traitement-et-de-valorisation-des-machefers-d%E2%80%99incineration.html?rub=14350&id=9441>
10. SVDU. *Protocole technique pour la détermination du potentiel polluant des mâchefer d'incinération d'ordures ménagères*. Paris. 2000.
11. Arrêté du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefer d'incinération de déchets non dangereux <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024873229>
12. Rubrique 2716
Installation de transit, regroupement ou tri de déchets non dangereux non inertes
<http://www.environnance.fr/pages/nomenclature-icpe/2--activites/2.7--dechets/2716.php>
13. Rubrique 2771
Installation de traitement thermique de déchets non dangereux
<http://www.environnance.fr/pages/nomenclature-icpe/2--activites/2.7--dechets/2771.php>
14. Rubrique 2791
Installation de traitement de déchets non dangereux
<http://www.environnance.fr/pages/nomenclature-icpe/2--activites/2.7--dechets/2791.php>
15. Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière
Guide d'application de l'arrêté du 18 novembre 2011 publié par le SETRA (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements) en octobre 2012
<http://dtrf.setra.fr/notice.html?id=Dtrf-0006530>
16. Norme NF EN 12457-2
Norme encadrant les tests de lixiviations pour des quantités relarguées à un ratio Liquide/Solide = 10L/kg

http://tice.insa-lyon.fr/lixiviation/content/LO/lo_56/main.html

17. Article 8 relatif à l'élaboration d'un échantillon caractéristique

https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=AF30C5801DFA6193A2BA4BBDC61A09CE.tpdila18v_2?idArticle=LEGIARTI000024878268&cidTexte=LEGITEXT000024878253&dateTexte=20160301

18. Rapport Eurostat sur les déchets générés et traités en Europe en 2014

Rapport publié le 22 Mars 2016

<http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7214320/8-22032016-AP-EN.pdf/eea3c8df-ce89-41e0-a958-5cc7290825c3>

19. Rapport Eurostat « Environmental statistics and account in Europe »

Rapport publié en 2014

<http://ec.europa.eu/eurostat/documents/4031688/5932212/KS-01-13-750-EN.PDF>

20. Directive 91/156/CEE du Conseil du 18 mars 1991 relative aux déchets

Publié sur le journal officiel de la Communauté Économique Européenne

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31991L0156:FR:HTML>

21. Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives

Publié sur le journal officiel de l'Union Européenne

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:FR:PDF>

22. Directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles

Publié sur le journal officiel de l'Union Européenne

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:fr:PDF>

23. Valorisation des Mâchefers des Ordures Ménagères en technique routière: bilan et évolution des technologies du traitement, étude bibliographique par El Maataoui Omar et Chennouk Hicham, élèves aux Mines de Douai, 2012

24. Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères: contribution à l'étude des mécanismes de stabilisation par carbonatation et influence de la collecte sélective, thèse par Sonia Kaibouchi, INSA de Lyon, 2004

25. Blog Yprema. Disponible à

<http://blog.yprema.fr/graves-de-machefers-des-entreprises-et-des-collectivites-se-mobilisent-et-creent-langm/>

26. Jean MENGAWAKU, Etude d'un crible à balourd assujéti à des sollicitations de vibrations torsionnelles, Mémoire de fin d'étude en génie mécanique, sous la direction de Marcel Tshaona Tshimbadi, Kinshasa, Institut supérieur de techniques appliquées, 2013.

27. Site de FELMAMG, FELMAMNG, *Séparateur overband électromagnétique type SF1-RC. Disponible sur* <http://www.felemamg.com/productos.php?idioma=3&id=17>

28. Site Futura science. Futura environnement. *Séparateur à courants de Foucault. Disponible sur* <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/developpement-durable-separateur-courant-foucault-7329/>

29. Guide technique pour l'utilisation des matériaux alternatifs de Bourgogne, disponible en ligne sur :

<http://www.idrrim.com/ressources/publications/1/1171,1043,Guide-technique-Graves-de-MIDN.pdf>

Annexes

Note sur le fonctionnement des machines utilisées pour le traitement des mâchefers

Crible :

Le criblage est une opération consistant à séparer des éléments, de mâchefer dans le cas présent, selon leur granulométrie, c'est-à-dire leur taille. Ainsi il s'agit de trier les grains de mâchefers de différentes tailles afin de faciliter leur traitement ultérieur (par exemple la collecte des métaux). Un crible est donc constituées ta différentes tables de criblages avec des mailles de plus en plus fines. Elles sont superposées, ainsi les mâchefers qui y sont acheminés peuvent subir les différents criblages : Arrivé sur une table, si le grain de mâchefer est suffisamment petit pour passer à travers la grille, il chute sur la grille suivante, sinon, il est évacué en bout de table. On récupère alors des mâchefers triés par granulométries différentes, par exemple une fraction fine (de dimension 0-40 millimètres) et une fraction grossière (de dimension 40-200 millimètres).

Afin de réaliser ce criblages, les cribles sont donc dotés de tables superposées de maillage dégressif mais aussi d'un système permettant aux mâchefers d'avancer sur ces dernières afin d'être récoltés en bout de grille. Ainsi, dans le cas des cribles vibrant qui sont majoritairement utilisés, cette avance est réalisée par le fait que les tables, en plus d'être superposées, sont inclinées et vibrent suite à une sollicitation périodique réalisant ainsi plusieurs opérations :

- L'avance les mâchefers jusqu'à l'extrémité de la table
- La dispersion des éléments afin de les amener au-dessus des vides du maillage
- Empêcher le bouchage des mailles.

Les cribles sont composés de 4 éléments principaux :

- une caisse supportant les tables (ou tamis) qui est constituée de tôles en aciers
- une mécanique d'excitation, constituée notamment d'un moteur
- une suspension pour supporter et amortir la structure, comme des ressorts ou des coussins en caoutchoucs
- une ou des garnitures de tamisage (les tables trouées) qui sont des grilles métalliques ou des tôles perforées.

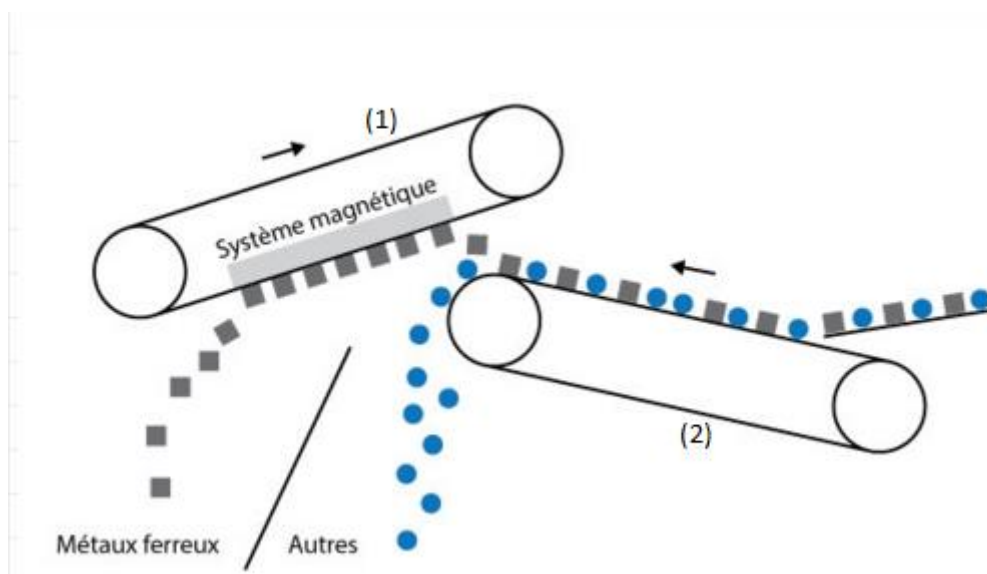


Figure 21 : Photographie d'un crible vibrant (vibrationsieve.fr)

La figure 17 permet d'observer un crible, on peut y voir les différentes grilles superposées et inclinées.

Overband :

Un overband est un dispositif électromagnétique permettant la séparation des métaux ferreux des autres matériaux. Il est placé au-dessus d'un convoyeur, c'est-à-dire sur une bande qui déplace les matériaux et attire les métaux ferreux. L'overband est composé d'une bobine autour d'un pôle et entourée par un pôle opposé. En faisant alors passer un courant dans la bobine, un champ magnétique se crée (on a un électroaimant). Les métaux ferreux défilant sur le convoyeur sont alors attirés par l'overband et ainsi séparé des autres matériaux. A titre pratique, on note que ce dispositif peut être placé de façon transversal au convoyeur, envoyant alors les métaux ferreux sur un coté de ce dernier ou de façon longitudinale en fin de convoyeur. La figure 19 représente le schéma de fonctionnement d'un overband en position longitudinale. On y observe alors la séparation entre les métaux ferreux et les autres matériaux.



- (1) : Overband
- (2) : convoyeur

Machine à Courant de Foucault :

Les machines à courant de Foucault, ou séparateur à courant de Foucault, sont des dispositifs permettant de séparer les métaux non ferreux des autres matériaux. Comme son nom l'indique, ces machines se servent des courants de Foucault qui sont des courants induit par la mise en mouvement d'une masse conductrice au sein d'un champ magnétique constant, soit par la variation d'un champ magnétique dans lequel se trouve la masse conductrice. Un séparateur à courant de Foucault génère donc un champ magnétique puissant en bout de ligne, par le biais d'un électroaimant ou par mise en rotation d'un rotor magnétique. Les métaux non ferreux entrant dans ce champ sont repoussés du convoyeur tandis que les matériaux non métalliques tombent en bout de convoyeur (sous l'effet de la gravité). On remarque de plus que si des métaux ferreux sont présents, ces derniers étant attirés par l'aimant créé en bout de ligne, ils restent attachés à la ligne et peuvent être récupéré dans un bac disposé sous le convoyeur en bout de ligne. La figure 20 représente le fonctionnement d'une machine à courant de Foucault et ainsi montre la séparation des différents matériaux.

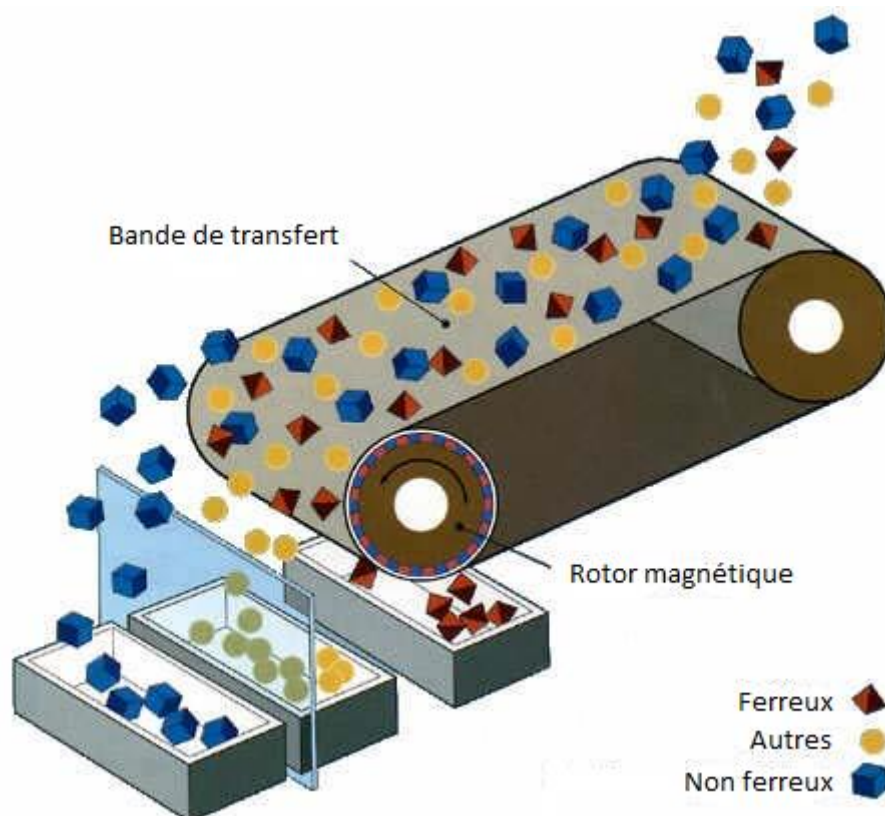


Figure 23 : Schéma de fonctionnement d'une machine à courant de Foucault (<http://ressources6.techno.free.fr/>)

(26), (27), (28)

Broyage du mâchefer, récupération des métaux et des graves de mâchefer

Après l'incinération, on récupère à partir du mâchefer :

- les graves qui sont destinées aux techniques routières
- les métaux qui pourront être revendus aux ferrailleurs

L'acier représente 3 à 4% du gisement total des ordures ménagères. A la sortie de l'incinérateur, sa concentration s'élève à 10% présents dans les mâchefers. L'acier issu des mâchefers a besoin de plusieurs opérations supplémentaires (broyage, criblage) pour être utilisé par l'aciériste.

Chaque étape se résume en générale de la façon suivante :

- Le refroidissement ou extinction : cette étape qui se situe à la sortie du four est généralement réalisée dans un siphon hydraulique. Le mâchefer frais présente ainsi une forte teneur en eau.
- Le scalpage : cette étape permet d'enlever tous les éléments grossiers. Elle est assurée par une grille d'une coupure moyenne de 250 à 200 mm. Ces éléments grossiers sont parfois broyés puis remis dans le circuit d'élaboration.
- Le criblage : cette étape permet de calibrer les mâchefers (entre 20 et 31,5 mm) afin de répondre aux exigences des utilisateurs des graves de mâchefers en technique routière. L'unité de criblage est soit représentée par des cribles rotatifs, soit par des cribles plans (vibrants ou non), soit par des cribles à étoiles (plus rares). Certaines installations peuvent ne pas disposer de crible, mais d'un système de concassage permettant d'obtenir la granulométrie recherchée.
- La séparation des imbrûlés légers : cette étape se fait par tri aéraulique avec des techniques de soufflage ou d'aspiration. Les imbrûlés légers ainsi séparés sont généralement retournés vers l'usine pour y être incinérés.
- Le déferraillage : les ferreux sont extraits des flux grâce à des unités électromagnétiques ou munis d'aimants (overbands). Les métaux tels que l'aluminium et le cuivre sont extraits par des séparateurs à courants de Foucault.

L'enlèvement des métaux non magnétiques a deux intérêts : d'une part l'enlèvement de l'aluminium contribue à l'amélioration géotechnique des graves de mâchefers par limitation des risques de gonflements et, d'autre part, le recyclage des métaux permet de profiter d'une valeur marchande non négligeable. La diversité des procédés d'élaboration des graves de mâchefers dépend de la taille de l'installation. Une fois séparées, les graves de mâchefers sont entreposées en zone de maturation.

(29)