Conférence romande des responsables de la protection de l'environnement

CREPE

État des lieux sur la valorisation des résidus provenant des processus d'incinération des déchets

Version	finale
Validé / contrôlé	MAC/GOU

Genève, le 20.06.2018

tbf partner Ingénieurs Conseils BG

Modifications

Version	Date	Description des modifications	Diffusion
Préliminaire	06.03.2018	Version préliminaire	M. Pralong
Finale	20.06.2018	Version finale	M.Pralong

1. Etat des techniques de traitement et de valorisation

1.1 Introduction

La valorisation aval des résidus solides provenant de l'incinération demeure l'un des enjeux majeurs de la gestion des déchets.

Dans cette perspective, la nouvelle Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (Ordonnance sur les déchets, OLED) du 4 décembre 2015 est venue tout autant accroître les exigences en la matière qu'ouvrir la voie à d'autres pistes d'élimination. Corrélée avec celle du renouvellement ou de l'adaptation à l'état de la technique du parc des UVTD, cette thématique est de « haute actualité ».

De nouveaux concepts très prisés de nos jours, tels que l'économie circulaire, « boucler les cycles des matières » ou encore le « urban mining » ont fait leur apparition, d'abord dans des projets pilotes et plus récemment à grande échelle.

Dès lors, les actions futures se concentrent, entre autres, sur la récupération des éléments contenus dans certains résidus solides, issus de la valorisation des ordures ménagères, tels que les métaux dans les mâchefers d'incinération ou dans les cendres volantes. La revalorisation de certains résidus qui n'étaient jusqu'à récemment pas considérés comme matériaux revalorisables est désormais envisagée.

Ainsi un état des lieux s'avère nécessaire. Cette étude s'est déroulée en 2 étapes :

- La première étape consiste en un état des techniques de traitement et de valorisation pour les 3 flux des sous-produits, soit les mâchefers, les cendres volantes et les résidus de l'épuration des fumées (voir Figure 1).

- La seconde étape est composée par l'envoi de questionnaires aux exploitants des UVTD de Suisse romande et l'analyse des résultats afin de pouvoir identifier les tendances et les synergies possibles pour le traitement des sous-produits.

Basé sur les acquis des 2 premières étapes, des scénarii ont été élaborés afin de mettre en avant les besoins à terme de traitement et les projets pertinents à poursuivre.

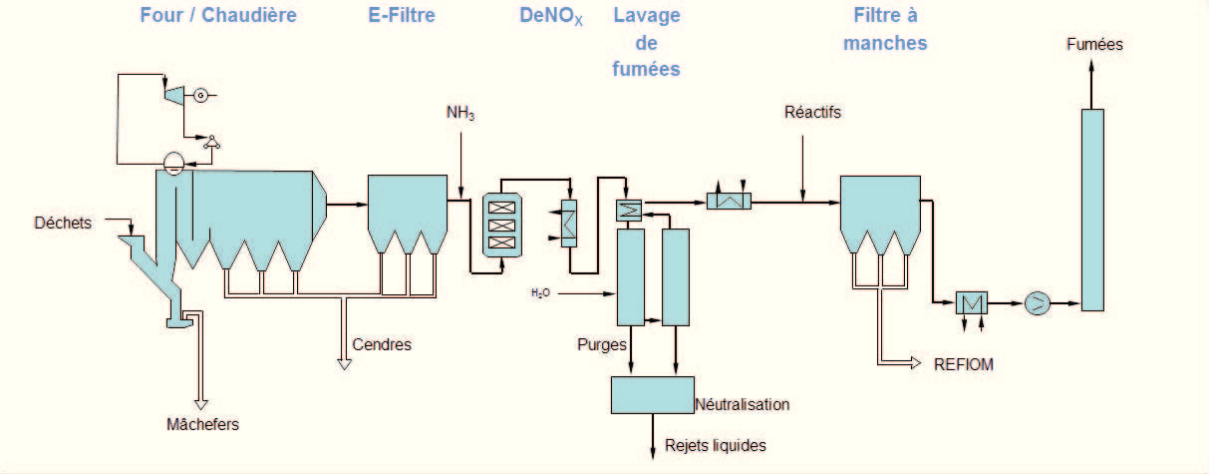

Figure 1: Flux typique de résidus au sein d'une UVTD (four à grille et ligne de traitement humide)

1.2 Mâchefers

Les mâchefers sont les résidus solides imbrûlés, issus de la combustion des déchets. A l'extrémité du four, les mâchefers tombent dans une goulotte et sont refroidis avant d'être envoyé dans un stockage temporaire. Des 4'000'000[1] tonnes de déchets incinérés annuellement en Suisse, un cinquième est récupéré sous formes de mâchefers. Ces résidus sont constitués d'une fraction de matériaux inertes et d'une fraction composée de matériaux valorisables, dont principalement du fer (Fe) mais également des métaux non ferreux tels que de l'aluminium (Al) et du cuivre (Cu), pouvant être recyclés pour obtenir de nouvelles matières premières, en étant revalorisés dans des procédés issus de l'industrie métallurgique.

Les nouvelles exigences de l'Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED), entrée en vigueur le 04.12.2015, spécifiant les critères autorisant l'élimination des mâchefers en décharge se sont encore durcies. A l'heure actuelle, il n'est pas autorisé d'utiliser les mâchefers provenant d'UVTD en tant que matériaux de construction, provenant d'installations d'incinération des déchets urbains, dans la construction de routes, de places ou de remblais (…), comme l'autorisait auparavant l'art. 13 de l'ancienne OTD (Ordonnance sur le traitement des déchets). En plus, la limite de concentration des métaux non ferreux, contenus dans les mâchefers, autorisant leur stockage en décharge de type D, va être ramenée de 1,5% à 1,0%, alors que cette concentration se situe normalement entre 2 et 3% dans les mâchefers bruts, selon la composition des déchets incinérés. Il faut donc prévoir un traitement avant l'entrepôt des mâchefers en décharge.

En Suisse, les exploitants des usines de valorisation thermiques des déchets (UVTD) exploitent deux technologies différentes pour l'extraction des mâchefers, issus de l'incinération des déchets. La première, l'extraction humide, est actuellement la méthode la plus répandue aussi bien en Suisse qu'en Europe. La deuxième méthode, l'extraction à sec, plus récente est, quant à elle, exploitée actuellement que par un nombre restreint d'UVTD. La Figure 2 ci-

[1] DÉCHETS 2016: QUANTITÉS PRODUITES ET RECYCLÉES, Office fédéral de l'environnement OFEV - Division Déchets et matières premières

dessous illustre la distribution de ces deux méthodes. Selon le procédé d'extraction exploité, différentes méthodes de valorisation des mâchefers existent, comme détaillé plus bas.

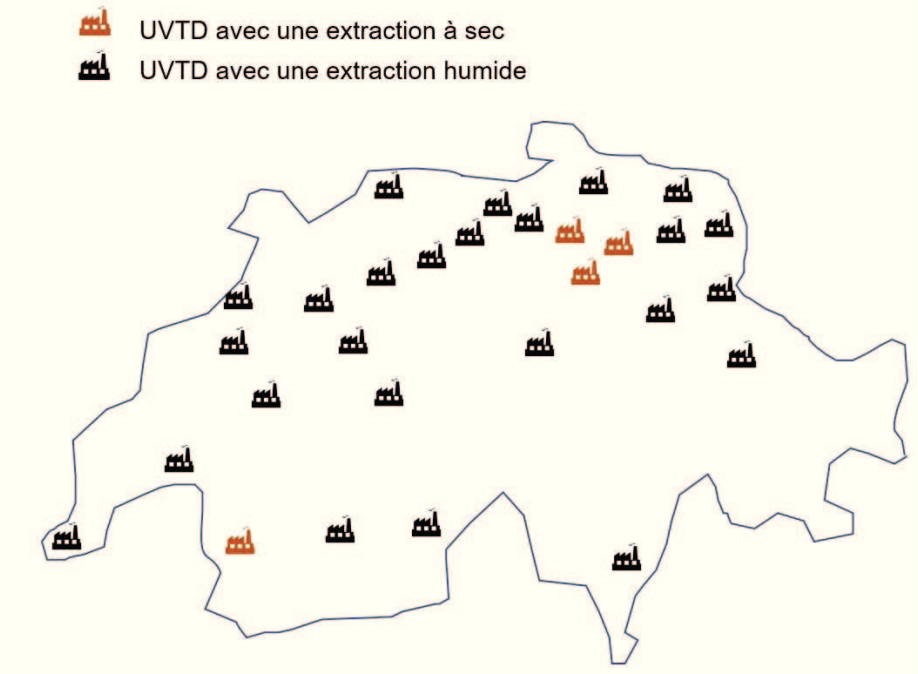

Figure 2: Distribution des types d'extractions opérées en Suisse (état 02.2018)

Les Figure 3 et Figure 4 ci-dessous représentent des mâchefers, obtenus avec les deux types d'extraction (extraction humide et extraction à sec). Alors que les mâchefers, issus de l'extraction humide se retrouvent sous la forme d'un seul amas de résidus, l'extraction à sec offre une meilleure dissociation des différents résidus, issus de la valorisation thermique des déchets.

Figure 3: mâchefers issus de l'extraction humide (souce : lien)

Figure 4: mâchefers issus de l'extraction à sec (source : lien)

Avant de détailler les méthodes d'extraction et de valorisation des mâchefers en Suisse, précisons que, selon l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), les matériaux potentiellement valorisables dans les mâchefers des UVTD suisses s'élèvent, annuellement, à 75 000 tonnes de fer, 17 000 tonnes d'aluminium, 6000 tonnes de cuivre et 300 kg d'or. Par ailleurs, une règle générale veut que, plus la valeur du métal est élevée, plus basse est sa concentration dans les mâchefers. Dès lors, seul un tri de qualité de ces différents métaux permet de tirer un profit de ces procédés de valorisation.

1.2.1 Extraction humide

Dans le cadre de ce procédé, les mâchefers, issus du processus de combustion, à la fin de la grille, chutent, via une goulotte, dans un extracteur à mâchefers. Ce dernier est un bain d'eau dans lequel les mâchefers sont refroidis. À l'extrémité de cette installation, un système permet d'extraire les résidus refroidis et de les acheminer, pour les étapes successives de stockage et valorisation (voir Figure 5).

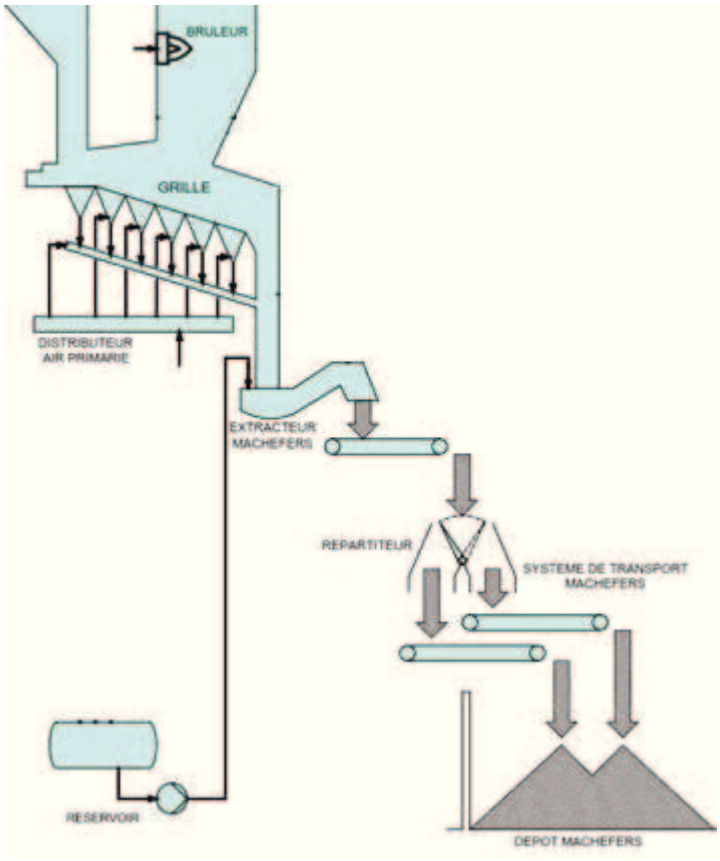

Figure 5: Schéma type de l'extraction humide des mâchefers

1.2.2 Traitement des mâchefers issus de l'extraction dite humide

En Suisse, le groupement dénommé IGENASS (Interessengemeinschaft Nassaustrag : communauté d'intérêt pour l'extraction humide des mâchefers, qui regroupe une vingtaine d'exploitants et des syndicats suisses qui s'occupent de l'incinération des déchets), anime activement les réflexions traitant de cette thématique, afin de garantir un suivi de cette alternative à l'état de la technique, aussi bien au bien niveau du procédé d'extraction, qu'au niveau des méthodes de revalorisations des mâchefers, issus de l'extraction humide.

La valorisation des mâchefers, issus de l'extraction humide est de nos jours le procédé de référence, le plus répandu et avec un plus grand retour d'expérience. Ce procédé est réalisé dans une installation externe à l'UVTD. Les étapes de ce processus sont illustrées par la Figure 6 et se décomposent comme suit (en fonction des besoins des usines, il se peut que certaines étapes ne soient pas appliquées) :

1. Séchage naturel/maturation (par évaporation) des mâchefers humides
2. Chargement des mâchefers dans l'installation à l'aide d'un engin mécanique (type engin de chantier)
3. Séparation des composés ferreux à l'aide d'un séparateur magnétique (si cela n'a pas déjà été réalisé à l'UVTD)
4. Triage manuel (sur site) des fractions métalliques non ferreuses de grosse taille (typiquement > 70 mm, par ex. monstres et bobines)
5. Broyage (typiquement < 50 mm)
6. Tamisage des différentes tailles de granulométrie
7. Séparation des métaux non ferreux à l'aide d'un séparateur à courant Foucault
8. Dépose des résidus en décharge

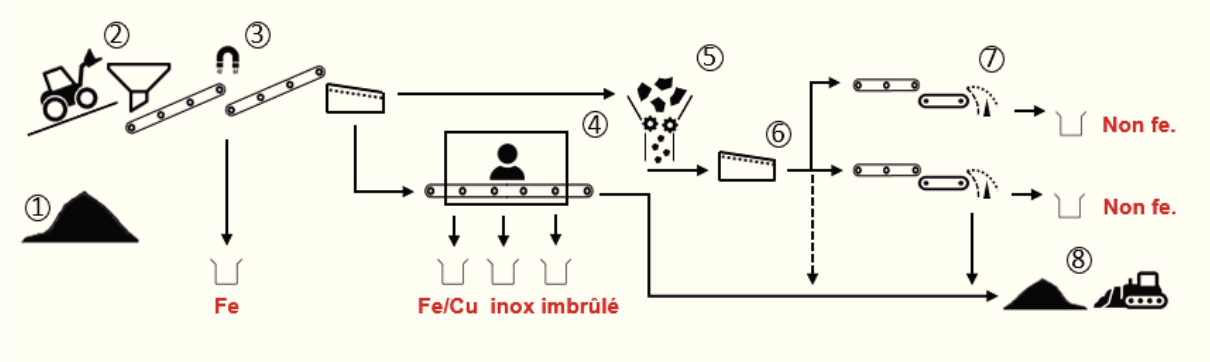

Figure 6: Valorisation de métaux dans les mâchefers extraits par voie humide

Un des inconvénients pénalisant l'extraction humide est que les mâchefers lors de l'extraction, présentent un taux de MS qui est autour de 80%, avec donc une teneur en eau significative qui pénalise les coûts de transport vers la plateforme de valorisation.

La séparation des éléments ferreux (étape 3) s'effectue par le biais de séparateurs magnétiques, auxquelles les éléments métalliques contenus dans les mâchefers adhèrent. Lors du triage manuel, ce sont uniquement les gros éléments des mâchefers qui sont triées, tels que les agglomérats fer-cuivre, l'acier inoxydable et les imbrûlés. L'étape 5 broie les agglomérats obtenus lors de l'extraction humide afin de diminuer leur taille. Cela permet une meilleure « mise à nu » des métaux, permettant ainsi de les séparer efficacement.

Ensuite, comparé au fer, la récupération des métaux non ferreux est plus complexe. Pour un fonctionnement optimal du séparateur à courant Foucault, les mâchefers doivent avoir une granulométrie aussi uniforme que possible et ils ne doivent pas être humides. Cette étape est celle qui requiert une certaine expérience pour être efficacement maitrisée. Cette étape est également déterminante lorsque l'efficacité du procédé global est évaluée.

En effet, dans ces fines fractions, la concentration des métaux lourds, tels que le cuivre, le zinc, le plomb et les métaux précieux est plus élevée. L'extraction humide rend néanmoins la séparation des grains fins plus complexe. C'est la raison pour laquelle les grains fins de l'extraction humide ont longtemps été considérés comme n'ayant aucune valeur. En effet, jusqu'à 40% de résidus inexploitables issus des mâchefers sont observés dans les fractions de non-métaux valorisés à la fin de la filière usuelle de traitement. Des améliorations ont été nécessaires pour que les fonderies puissent refondre ces métaux dans leurs fours. Des procédés améliorés et innovants ainsi que l'amélioration des composants des installations de ces dernières années ont permis la valorisation de ces petits composés. Il maintenant possible de récupérer les métaux non-ferreux, contenus dans les mâchefers, issus des extracteurs humides.

La fraction valorisable la plus importante est composée d'aluminium, mais une certaine concentration de cuivre, ainsi que de métaux précieux est également observée. Néanmoins, les procédés de fonte du cuivre et de l'aluminium étant différents, ce qui est considéré comme un déchet pour l'un peut être un produit valorisable pour l'autre. La séparation de l'aluminium et des métaux lourds non ferreux est l'objectif principal de l'étape de raffinage, qui permet de terminer la boucle du cycle de ces matériaux. La Figure 7 ci-dessous permet d'illustrer ce procédé.

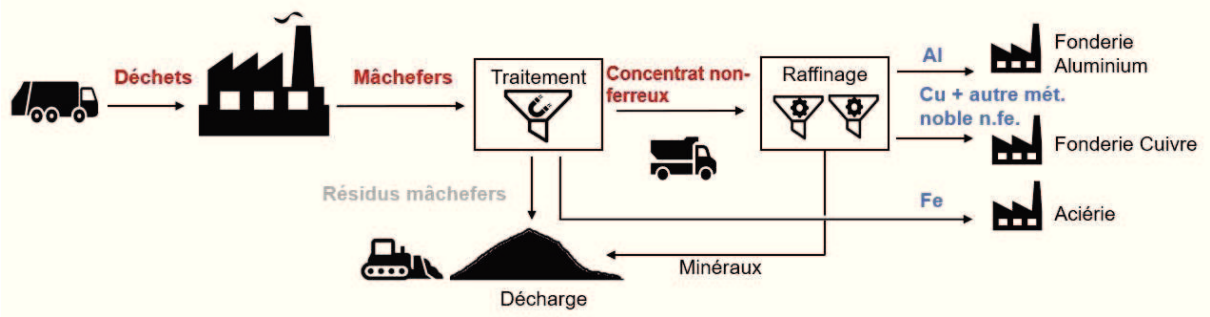

Figure 7: Séparation de l'aluminium des autres métaux lourds non ferreux.

Le raffinage nécessite des équipements spécifiques, ainsi qu'un volume de matières suffisamment élevé à traiter, pour être rentable. C'est pourquoi, cette étape de valorisation des mâchefers est souvent dissociée des autres étapes et réalisées par d'autres spécialistes, afin de pouvoir valoriser ces fractions non-ferreuses pour en faire un produit commercialisable.

La Figure 8 ci-dessous illustre les concentrations des métaux ferreux et non ferreux pouvant être typiquement revalorisés dans les mâchefers, issus de l'extraction humide. Les valeurs peuvent changer en fonction du type de déchet traité.

Métaux	Concentration observée dans les mâchefers [%]
Aluminium	1.65%
Non ferreux*	0.93%
Fer	7.33%
**Les Non ferreux regroupent le cuivre, l'acier inoxydable, le zinc, le plomb, l'or et l'argent*	

Figure 8: Distribution des métaux ferreux et non ferreux extraits des mâchefers de l'extraction humide (RECOVERY OF METALS FROM WASTE INCINERATOR BOTTOM ASH, Rainer Bunge, 04/2015)

Il convient d'ajouter que le taux de récupération de l'aluminium est péjoré par le fait que, lors de l'immersion des mâchefers dans le bain de refroidissement, les ions d'aluminium vont migrer dans la phase liquide, diminuant ainsi leur concentration résiduelle dans les mâchefers. Ainsi, les eaux issues de l'extracteur sont basiques et présentent une charge en aluminium, ainsi qu'en cuivre non négligeables.

En ce qui concerne l'entrepôt de la partie minérale, les tailles des décharges peuvent grandement varier. En Suisse, une décharge de taille moyenne traite en moyenne 50'000 tonnes de mâchefers par an (ce qui correspond à la capacité de trois UVTD de taille moyenne, ou d'une grosse UVTD). Il est cependant assez fréquent de rencontrer en Suisse des décharges de taille plus réduites encore (de l'ordre de 10'000 à 20'000 tonnes de mâchefers par année). Un tonnage de cette ampleur ne permet pas d'exploiter une installation fixe de valorisation des mâchefers de manière profitable. Dès lors, il existe en Suisse, des installations mobiles de traitement, pouvant être chargées sur des camions, et installées temporairement dans une décharge. Ces installations sont, d'un point de vue technique, très similaires aux installations fixes, à l'exception que les installations mobiles ne permettent pas de valoriser les mâchefers fins. En Suisse, l'installation fixe avec la plus grosse capacité est celle de DHZ AG, située à Lufingen.

Processus SELFRAG

Une alternative pour la valorisation des mâchefers, issus de l'extraction humide est étudiée en Suisse. Ce procédé en développement est proposé par l'entreprise SELFRAG, qui est active dans l'industrie minérale, qui utilise notamment des générateurs de décharges électriques à haute tension. Depuis avril 2016 une installation est en développement à l'usine de valorisation des ordures ménagères de Fribourg-Posieux. Ce projet utilise la fragmentation sous décharges électriques. Il s'agit de profiter des effets des décharges électriques à haute tension, à l'intérieur de la matière afin d'y fragiliser les liaisons inter-composantes et ainsi fragmenter sélectivement la masse initiale. Le produit développé dénommé SCORIA permet de fragmenter les mâchefers, résultant de la combustion des déchets, afin d'augmenter le niveau de récupération des métaux tels que le fer, des métaux lourds comme l'or, l'argent, le cuivre, l'aluminium, l'étain, le gravier, la brique et les matériaux minéraux.

La méthode développée est composée de trois principales étapes, comme illustré sur la Figure 9. La première est un tri initial qui traite les mâchefers grossiers pour en extraire les pièces plus grandes que 40 mm et les imbrûlés, après avoir séparé les ferreux des non ferreux. La deuxième étape, appelée fragmentation, consiste à séparer les particules inférieures à 2 mm et à laisser le flux de matières se soumettre aux décharges électriques à haute tension dans le système. Pour cela, les particules sont immergées dans un bain d'eau à travers duquel une décharge électrique d'environ 200'000 Volts à une fréquence pouvant aller jusqu'à 20 Hz, crée un canal de plasma suivi d'une onde de choc. Le résultat est la rupture des liaisons dans les mâchefers. Enfin, la dernière étape est un tri final où l'on sépare les matériaux ferreux, les non-ferreux, les matériaux inertes et les mâchefers restants n'ayant pas pu être classés parce que leur composition est indéterminée.

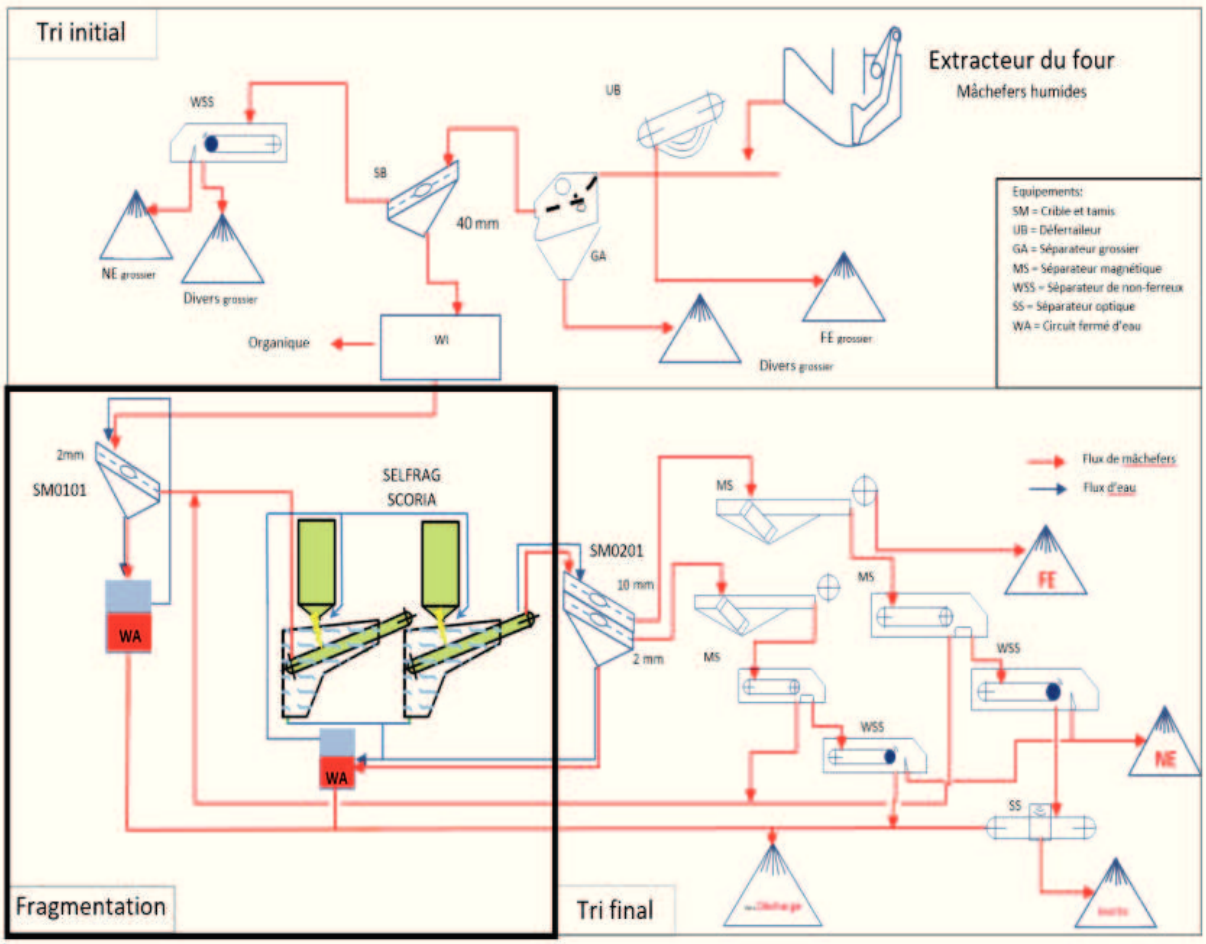

Figure 9: Schéma de principe de l'installation complète de fragmentation sous décharges électriques à haute tension des mâchefers, source SELFRAG AG

Les résultats de ce projet pilote ont permis de récupérer 3.8% de métaux non-ferreux (surtout aluminium, cuivre et zinc) issus des mâchefers de l'UVTD de SAIDEF. En outre, les exploitants pensent pouvoir encore améliorer la capacité de récupération de cette installation et atteindre un volume récupéré de métaux non-ferreux pur de l'ordre de 4.0 à 4.3%. Des améliorations sont également en cours de développement, afin de pouvoir obtenir des résidus pouvant être éliminés dans des décharges de classe moins restrictive qu'actuellement (type D actuellement). Enfin, certaines contraintes doivent encore être résolues, et de manière

générale, il semblerait que cette méthode soit une méthode qui nécessite d'être appliquée aux résidus directement sur le site des UVTD. En effet, le phénomène de maturation est préjudiciable au process, le compactage des mâchefers rend la circulation du courant électrique plus difficile dans les métaux. De plus, l'électricité requise pour cette installation peut être produite directement par l'UVTD. Dès lors, une synergie avec un projet commun aux différentes UVTD exploitant cette méthode ne semble, pour l'heure, pas être une alternative envisageable.

Il est important de préciser que cette usine est toujours exploitée par SELFRAG et non par SAIDEF, il y a donc des incertitudes sur la précision de ces valeurs.

Procédé de récupération des métaux dans les grains fins

Un autre projet qu'il convient de mentionner, est l'installation exploitée à l'UVTD de Linth, à Niederurnen. L'entreprise LAB-Geodur a développé un procédé spécifique se concentrant sur la récupération des métaux dans les grains fins (0-2 mm) des mâchefers. En effet, les installations conventionnelles ne peuvent actuellement pas exploiter efficacement ces particules, et finissent donc très souvent dans les décharges. Le processus fonctionne de la façon suivante : immédiatement après les extracteurs, les mâchefers encore chauds sont acheminés dans un tamis pour un nettoyage humide. Les particules de moins de deux millimètres sont séparées et dirigées dans le nouveau procédé LAB-Geodur. Les particules de plus de 2 mm sont traitées par les procédés conventionnels, tels que précédemment décrit.

Les particules de moins de 2 mm sont immergées dans un bain d'eau afin de pouvoir être pompées dans les centrifugeuses de séparation des métaux. Le principe est similaire à ceux utilisés pour purifier l'or. Avec le mouvement de rotation continue, les particules métalliques, plus lourdes, s'accumulent au fond du récipient. Dans la centrifugeuse, la fraction minérale, plus légère, est écartée, alors que les particules de métal, plus lourdes, sont récupérées. Un des défis de cette méthode est le traitement des eaux de procédé, utilisées en circuit fermé. Cette installation est en phase de test depuis 2016. Des améliorations sont constamment apportées, mais à l'heure actuelle, aucun résultat n'est disponible.

Etat de la situation européenne

Si l'on s'intéresse aux réflexions actuellement en cours hors de nos frontières, et plus particulièrement au niveau européen, plusieurs applications sont connues surtout dans des pays comme la France, la Hollande, la Belgique ou le Danemark, soit pour la récupération des métaux des mâchefers, soit pour leur valorisation dans la technique routière (matériau de remplissage constituant les sous-couches). Par exemple, l'Allemagne les valorise dans les mines pour remplir et stabiliser ces dernières. Il semblerait également que la Hollande ait utilisé des mâchefers comme matériau de remplissage dans le cadre de projets de construction de barrages.

D'autres projets sont également en cours de réalisation. SUEZ a annoncé au début de cette année 2018, via un communiqué de presse, qu'ils avaient développé un procédé dénommé « Valomet ». Ce projet pilote a démarré en 2015 à Gand (Belgique), avant que SUEZ ne décide au début de cette année, de construire une nouvelle entité industrielle, dont la capacité de traitement sera de 12'000 tonnes de mâchefers (issus de l'extraction humide) par année. Selon

les informations présentées, ce procédé semble très similaire au procédé tel que présenté ci-dessus dans les Figure 6 et Figure 7.

Comme déjà mentionné ci-dessus, l'entreprise LAB (LAB-Geodur) propose également une technologie dénommée « RecuLAB NF » ainsi qu'une technologie portant le nom de « RecuLAB HNF » qui permettrait de récupérer les métaux précieux dans les mâchefers issus de l'extraction humide.

Enfin, il convient de mentionner que les danois sont également très actifs pour optimiser la filière de revalorisation des mâchefers issus de l'extraction humide. Ils ont développé une méthode en deux étapes permettant d'améliorer les rendements de valorisation. Ce procédé est parfois qualifié de « maturation des mâchefers ». Une fois le potentiel de récupération des mâchefers épuisé, ils sont ensuite utilisés dans des processus de construction de routes.

Rappelons qu'en Suisse, une fois les mâchefers valorisés et épurés de tous les métaux lourds, les constituants doivent être stockés dans des décharges de type D, contrairement aux autres pays européens où il est possible de les récupérer dans la technique routière ou ferroviaire tel que mentionné auparavant.

1.2.3 Extraction à sec

L'extraction à sec des mâchefers est une technologie encore peu répandue en Suisse. Exploitée depuis 2007, cette alternative est pour l'heure principalement opérée dans trois usines de la région zurichoise (Zürich, Horgen et Hinwil) ainsi qu'à l'usine de Monthey (SATOM). Contrairement à l'extraction humide, les mâchefers ne sont pas immergés dans un bain d'eau à la fin de la grille de combustion, mais sont refroidis à l'aide d'un flux d'air. En effet, les mâchefers récoltés sont acheminés sur des convoyeurs traversés par de l'air qui peut servir au four en tant qu'air secondaire (voir Figure 10). Cela présente l'avantage d'éviter des agglomérations trop importantes et ainsi, la séparation ultérieure des métaux et des minéraux composant les mâchefers est plus facilement réalisable. Cependant, un des principaux inconvénients de cette méthode est la grande quantité de poussière émise. Cela nécessite des mesures d'isolation des équipements de l'extraction très performantes, pour pallier à ce point critique. Un autre point lié à cette problématique est le transport de ces résidus extrêmement poussiéreux, toutefois, ils ne contiennent pas d'eau.

Le dernier point est le retour d'expérience qui est encore limité.

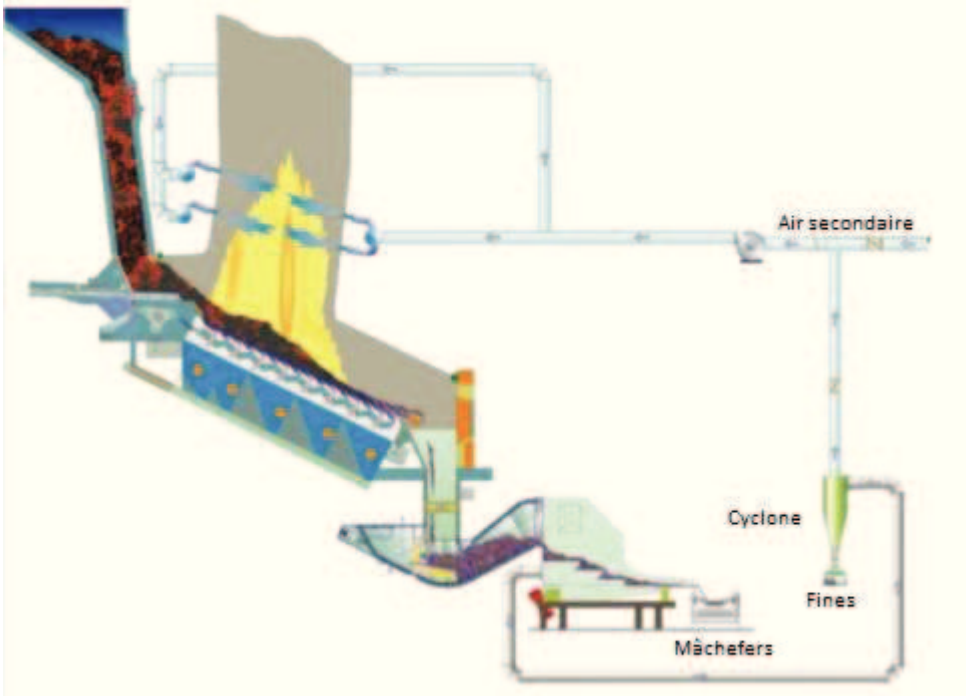

Figure 10: Exemple de schéma de principe de l'extraction à sec des mâchefers

1.2.4 Traitement des mâchefers secs

Les mâchefers, produits dans toutes les UVTD mentionnées ci-dessus sont centralisés dans un centre de traitement des mâchefers et de récupération des métaux, implanté à Hinwil (ZH) et qui est en exercice depuis octobre 2016. Ce centre a une capacité de traitement globale d'environ 200'000 t/an, mais durant l'année 2017, environ 120'000 tonnes ont été traitée, car le nombre d'UVTD pouvant livrer des mâchefers est actuellement limité.

La Figure 11 ci-dessous illustre le schéma bloc du procédé développé et exploité par l'entreprise ZAV Recycling AG pour valoriser les mâchefers. Après réception des mâchefers contenus dans des containeurs spéciaux, grâce à un système entièrement automatisé, les éléments ferreux sont séparés avec un système magnétique.

La séparation des éléments non ferreux est effectuée grâce à un séparateur à induction. Afin d'avoir une efficacité aussi élevée que possible lors de la séparation, il est indispensable que les particules aient une surface exempte de particules minérales.

Cette installation dont l'objectif est d'avoir une séparation aussi performante que possible a plusieurs particularités. Les deux plus marquantes sont, d'une part l'utilisation en série de la même machine, comme cela est illustré pour les particules de moins de 12 mm, et d'autre part la recirculation des particules (comme illustré pour les particules de plus de 12 mm). Ces deux spécificités permettent de garantir que la majorité des particules valorisables dans les mâchefers est extraite et donc de pouvoir garantir une efficacité de ce procédé, aussi élevée possible.

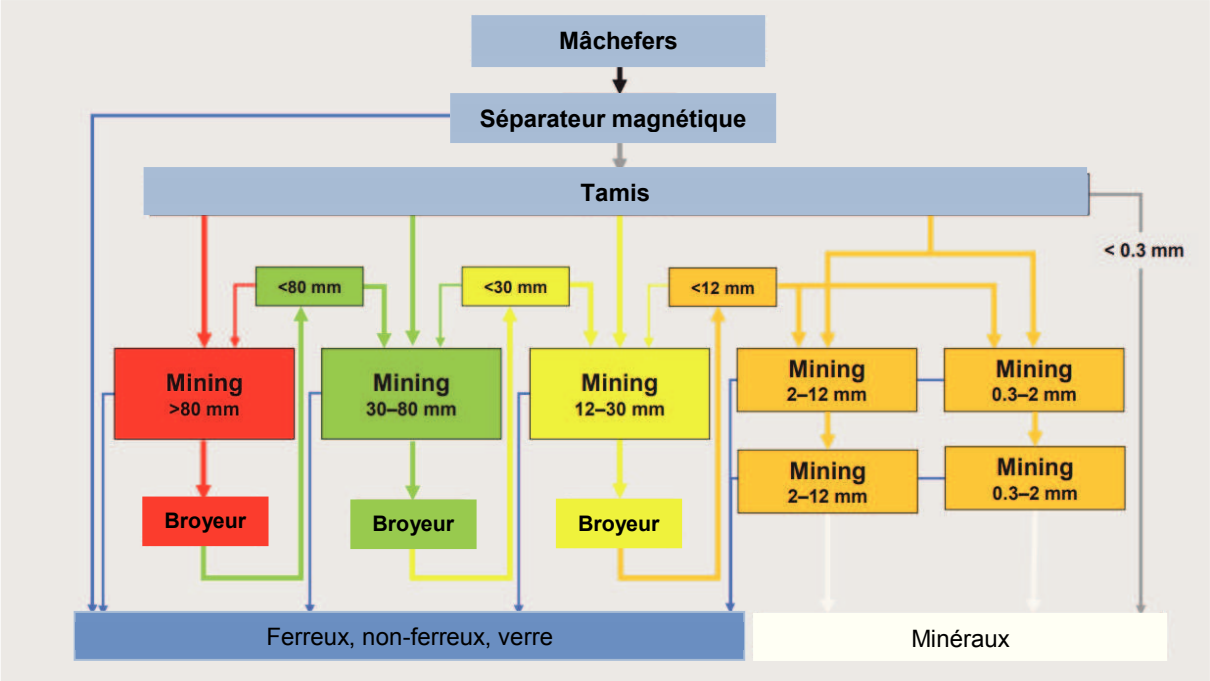

Figure 11: Schéma bloc de procédé de la préparation des mâchefers de ZAV Recycling AG (Hinwil)

Dans la Figure 12 la distribution des métaux non ferreux et métaux nobles non ferreux, obtenus par la valorisation des mâchefers, grâce à la méthode ci-dessus ont été analysées. Comme précédemment, ces valeurs peuvent varier en fonction du type de déchet traité.

Métaux	**Concentration observée dans les mâchefers [%]**
Aluminium	~1.5%
Non ferreux*	~2.6%
Nobles non ferreux	~0.47%
Fer	9.9%
**Les Non ferreux regroupent le cuivre, l'acier inoxydable, le zinc, le plomb.*	

Figure 12: Distribution des métaux non ferreux et nobles non ferreux (Statusbericht vom 31. Juli 2017,Leistungsfähigkeit und Potentiale der Schlacke-Aufbereitungsanlage der ZAV Recycling AG, Daniel Böni)

Les résultats présentés, représentant 6 mois d'opération à l'échelle industrielle, sont assez prometteurs. Globalement, la qualité des métaux extrait est élevée. La valorisation des particules plus fines potentiellement plus riches en métaux ferreux et non ferreux semble performante. Cependant, les exploitants de cette méthode de revalorisation plus complexe observent un potentiel d'amélioration non négligeable au niveau de la fraction restante de métaux non ferreux, encore trop élevée dans les fractions magnétiques. Des informations plus

complètes sont attendues prochainement lors de la publication du rapport annuel de l'année 2017. Enfin, il convient de mentionner que la rentabilité de cette filière doit encore être validée. Les composantes de l'usine de traitement des mâchefers extraits à sec, telles que les coûts des extracteurs à sec (y compris le système de dépoussiérage), le gain financier réalisé avec la revente des matériaux extraits (prix dépendant de la pureté) ainsi que les coûts liés au transport et à l'entreposage des résidus traités doivent être considérés avec attention. Toutefois, les résidus inertes (soit environ 80%) reviennent à l'usine et doivent être stockés en décharge au frais de l'exploitant.

Les résidus de cette valorisation sont finalement stockés dans des décharges de type D, de manière similaire aux résidus, issus de la construction (tels que le béton ou le gravier).

Pour conclure, les prochaines pistes d'optimisation de cette méthode visent à répondre à des critères suffisamment exigeants pour pouvoir entreposer ces résidus dans des décharges de catégories moins spécifiques et dont les prix d'entreposage sont moins élevés.

Etat de la situation européenne

Hors de nos frontières, il existe un nombre extrêmement restreint d'UVTD utilisant l'extraction à sec des mâchefers. En effet, selon le dernier recensement, seule deux usines en Italie utilisent ce procédé, alors qu'une troisième est en cours de construction en Suède. Dès lors aucune expérience extra-helvétique n'est recensée et la Suisse est sans conteste la pionnière dans ce domaine.

1.2.5 Cas particulier du Japon : Traitement des mâchefers par vitrification

Au Japon, pour le traitement des mâchefers, la technologie utilisée dans une quarantaine d'usine est la vitrification. La vitrification est un procédé à très haute température (entre 1100 et 1400°C) dans lequel les mâchefers subissent une fusion. Ce niveau de température assure une viscosité suffisante pour permettre l'écoulement du vitrifiat, ce qui se traduit par une valeur de 25 Pa s (la viscosité dépend toutefois de la composition des mâchefers).

Ensuite, les mâchefers sont refroidis selon 2 variantes :

- Refroidissement lent : le matériau vitrifié est amorphe, similaire à un caillou, et est récolté sous la forme d'un lingot ;
- Refroidissement rapide : le résidu est plongé dans un bac d'eau et le vitrifiat est de type granulaire ou techno-sable.

Ainsi, ce procédé transforme les mâchefers, matériau de nature hétérogène, en un matériau vitreux, inerte, utilisables dans d'autres applications comme dans les techniques routières.

Deux types de procédés de vitrification existent. Le premier consiste en un procédé intégré à l'UVTD alors que le second constitue un post-traitement séparé.

Dans le cas des procédés intégrés, les mâchefers produits sont directement vitrifiés. Ils ne subissent donc pas de refroidissement intermédiaire. Les projets intégrés sont, en règle

générale, utilisés en synergie dans des UVTD qui appliquent le process de gazéification avec donc une température compatible avec la vitrificaiton

Dans le cas des procédés de post-traitement, l'unité de vitrification est indépendante de l'incinération et peut donc être implanter sur des sites externes. Dans ce cas, les mâchefers vitrifiés présentent une densité supérieure.

Les avantages de la vitrification sont :

- Le produit est bien plus homogène que les mâchefers bruts
- Les matériaux ferreux et non-ferreux, grâce à leurs propriétés physico-chimiques différentes, sont facilement séparés après la vitrification
- Les dioxines et les furannes sont détruits grâce à la haute température

Toutefois, ce procédé possède également des inconvénients qui sont listés ci-dessous :

- Les composés chlorés et soufrés ne sont pas bloqués
- Certains matériaux (comme le plomb, le zinc, le mercure et le cadmium) peuvent se volatiliser à haute température
- Le coût énergétique du procédé est très élevé (surtout en cas de post-traitement)
- Cette technologie est complexe

1.2.6 Autre type d'extraction des mâchefers

Un projet pilote réalisé, en partenariat entre une usine de valorisation de déchets suisse alémanique et un constructeur d'installation, est en cours. Le produit, proposé par l'entreprise Hitachi Zosen Inova AG, dénommé InovaRe, est composé d'un nouveau système d'extraction des mâchefers, présentant une combinaison d'extraction humide et sèche. La fraction fine est soit réinjectée dans la chambre de combustion, soit extraite dans la dernière section du four, par l'intermédiaire d'une zone de la grille différente (dernier zone) avant que les mâchefers grossiers ne tombent dans l'extracteur par voie humide.

Le principal objectif de ce projet reste la même, qui voudrait que les particules fines aient une concentration en métaux non ferreux et métaux nobles plus élevées que les particules de taille supérieure. Séparer ces dernières avant que les particules fines s'agglomèrent dans le bain d'eau de refroidissement de l'extracteur des mâchefers qui rend l'extraction de ces métaux précités beaucoup plus complexe, est la ligne directrice de ce projet.

1.2.7 Conclusion sur les mâchefers

Il existe deux méthodes d'extraction des mâchefers, l'une dite humide, l'autre sec. Selon la méthode d'extraction opérée, la structure des résidus obtenus diffère (voir Figure 3 & Figure

4). De ces mâchefers, et indépendamment de la méthode d'extraction choisie, des composés sont revalorisés. Les métaux ferreux et les métaux non ferreux sont les matériaux dont le potentiel de revalorisation est le plus élevé. Pour revaloriser ces matériaux, différentes méthodes existent. Les méthodes diffèrent selon la nature des mâchefers en entrée (mâchefers extraits par la méthode humide ou à sec). Parallèlement à ces deux axes principaux de revalorisation, le projet en cours à Fribourg-Posieux avec la technologie SELFRAG pour la valorisation des mâchefers produits par extraction humide pourrait représenter une alternative intéressante.

Dans tous les cas, seule une fraction limitée de la masse totale des mâchefers est récupérable. En fonction du type de déchets valorisés par l'incinération, une fraction en masse d'environ 85% de la MS sortant de l'usine sous forme de mâchefers doit être entreposée en décharge. En général, l'évolution des technologies de valorisation des mâchefers vise au déclassement de la fraction minérale afin d'assouplir leur stockage final ou leur recyclage.

D'un point de vue financier, en Suisse l'entreposage coûte aux environs de 100 à 150 CHF par tonne de mâchefers, transport exclus.

Hors de nos frontières, les mâchefers sont soit revalorisés comme matériaux de remplissage dans la technique routière soit comme matériaux de remplissage pour la stabilisation d'anciennes mines.

La vitrification intégrée n'est pas compatible avec le traitement thermique des déchets utilisé en Suisse dans les UVTD (incinération dans four à grille), notamment à cause de la température élevée requise. L'implantation d'une unité de vitrification en Suisse en post-traitement nécessiterait la mise en place d'un process industriel compliqué avec une consommation énergétique très élevée.

1.3 Cendres volantes

Dans le processus de valorisation thermique des déchets, des fumées chargées en éléments solides, des cendres, sont générées. Ces fumées sont traitées par une ligne d'épuration avant le rejet dans l'atmosphère. Des rejets solides sont produits par le processus de traitement, comme par exemple, les cendres volantes qui représentent environ le 2 à 3% du poids des déchets incinérés.

En Suisse, les nouvelles exigences de l'OLED s'appliquent. L'art. 32, al. 2, let. g stipule que : *« Les détenteurs d'installations doivent les exploiter de sorte que, s'il s'agit d'installations où sont incinérés des déchets urbains ou des déchets de composition analogue, les métaux contenus dans les cendres volantes soient récupérés. ».* L'article 54, al. 3 encadre les mesures transitoires jusqu'à l'entrée en vigueur prévue le 01.01.2021 de l'art. 32 précité ci-dessus.

Le métal majoritairement présent dans les cendres volantes est le zinc, à hauteur d'environ 4%, suivi par l'aluminium (3%), le fer (2%) et le titane (1%). Des traces de plomb, de cuivre, de cadmium et autres métaux peuvent aussi être perçus.

Depuis plusieurs années, le lavage neutre des cendres était considéré comme la technologie de référence et ce, jusqu'au développement du lavage acide des cendres, dont la première usine fût équipée en 1995. La Figure 13 ci-dessous illustre les différentes usines exploitantes :

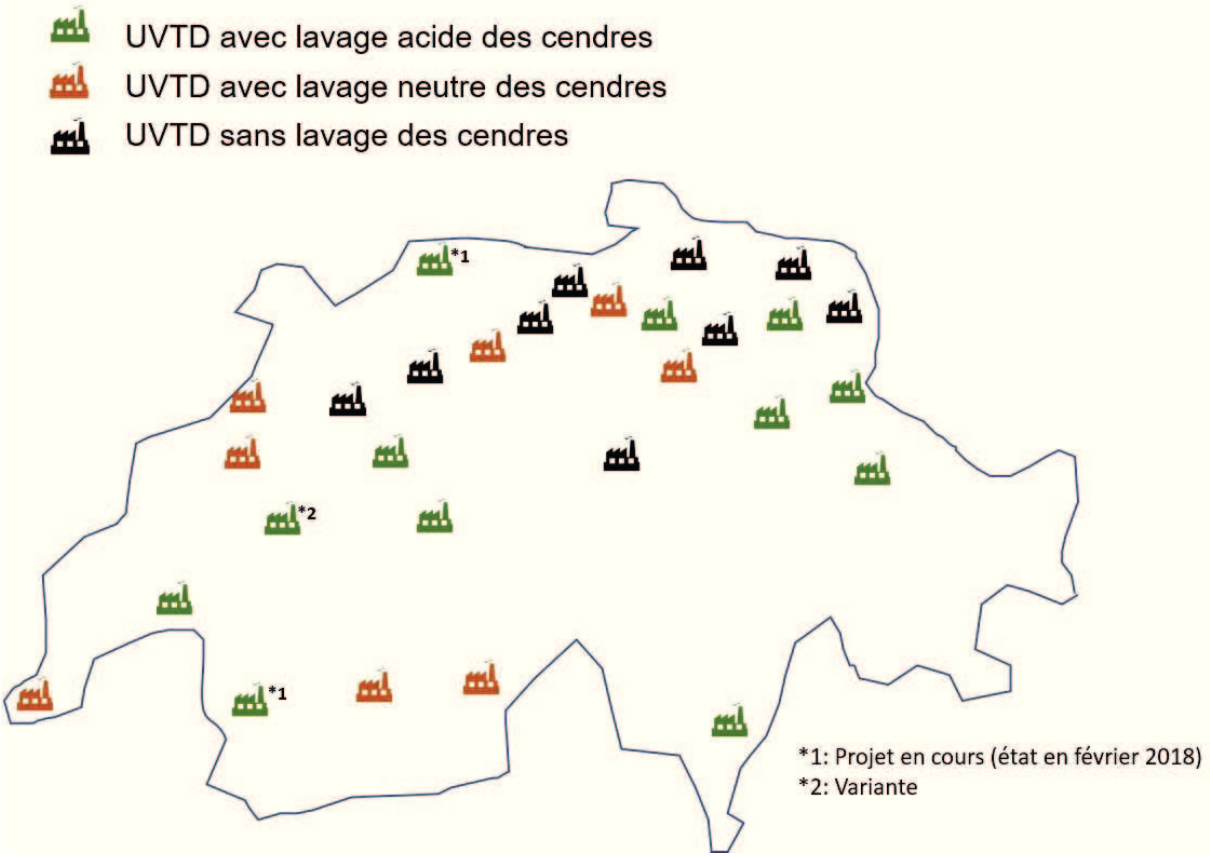

Figure 13: Type de lavage des cendres volantes exploité dans les UVTD Suisses

Lavage acide des cendres

La principale technologie permettant d'extraire les métaux des cendres volantes est le procédé de séparation chimique par source acide proposé par les entreprises BSH (process « FLUWA ») ou Envirochemie. Ce type d'installation n'est en général installé que dans les UVTD opérant un traitement des fumées de type humide. En effet, ce type de filière de traitement rejette des purges acides, qui présentent l'avantage de pouvoir être utilisé dans le procédé de traitement. De plus, ces purges ont de toute façon besoin d'un traitement d'épuration. Après avoir éliminé le mercure ainsi que les particules en suspension contenues dans ces purges, elles sont stockées pour être utilisées. Si l'usine exploite un traitement des fumées dit sec (donc les purges acides ne sont pas présentes), alors il est également possible d'utiliser de l'acide chlorhydrique industriel livré de source externe.

La première étape consiste à mélanger cette solution acide avec les cendres dans une cascade d'extracteurs. Le produit de cette extraction est ensuite acheminé sur un filtre à bande pour pouvoir séparer les gâteaux de filtration composés de cendres lavées, du filtrat riche en métaux dissouts. Les gâteaux de filtrations composés par des cendres lavées sont chargés dans des containeurs pour être déposés dans des décharges de type D.

Le filtrat est lui, d'abord neutralisé. Ce changement de pH a comme conséquence une précipitation. Ce précipité sera filtré pour obtenir d'un côté des boues hydroxydes et de l'autre côté un filtrat. La dernière étape concernant le filtrat est de le prétraiter de sorte à pouvoir remplir les exigences imposées pour son déversement dans les eaux ou dans les égouts publics. Ci-dessous, la Figure 14 illustre en détail toutes les étapes du procédé d'extraction acide des cendres volantes ainsi que le traitement des eaux résiduaires, tel que détaillé plus haut.

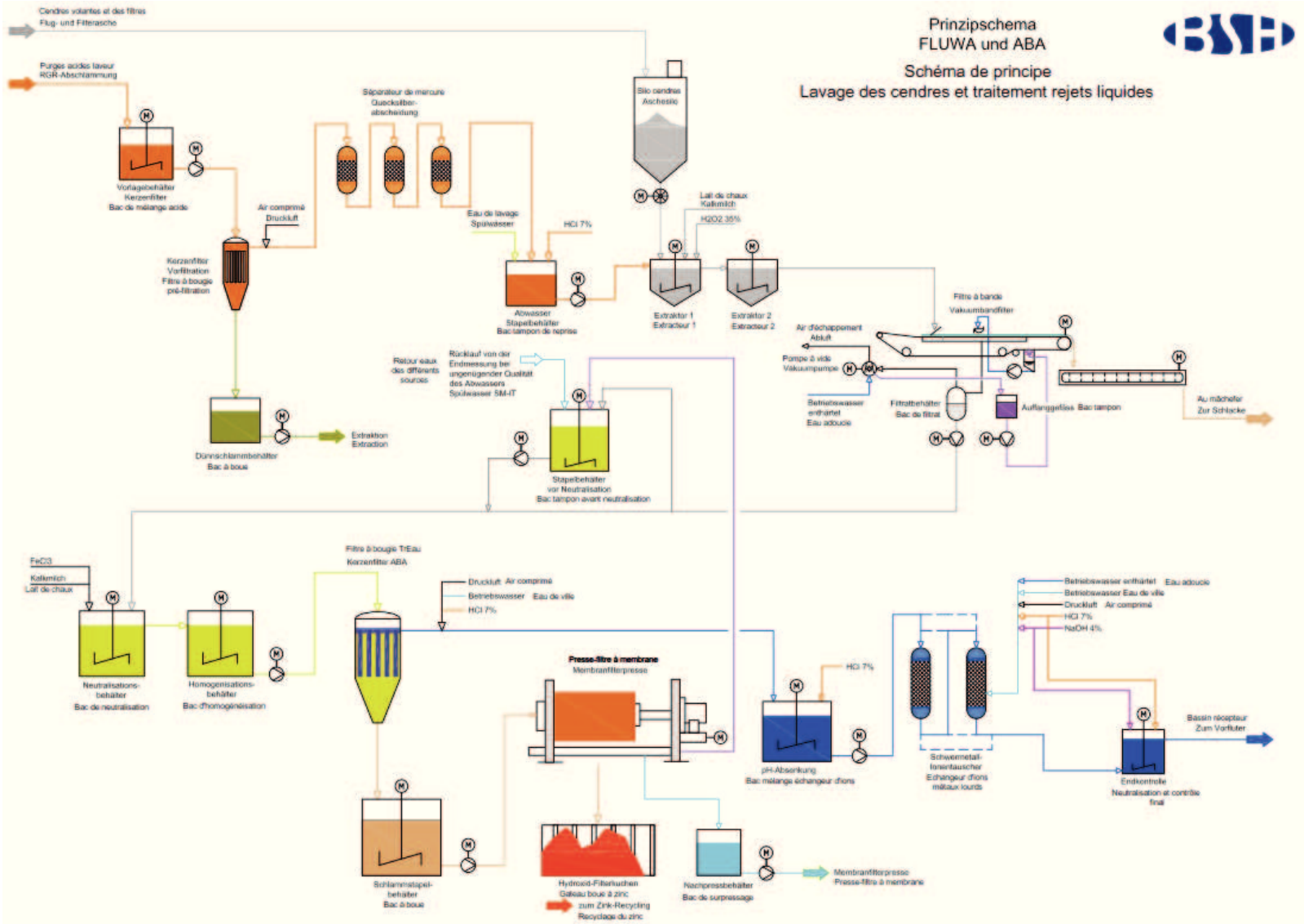

Figure 14: Schéma de principe d'une installation de traitement acide des cendres et de traitement des eaux, source : BSH Umweltservice AG

La Figure 15 ci-dessous détaille les différents flux de matières impliqués dans un procédé de lavage acide des cendres. Les débits massiques sont des ordres de grandeur et varient pour chaque UVTD.

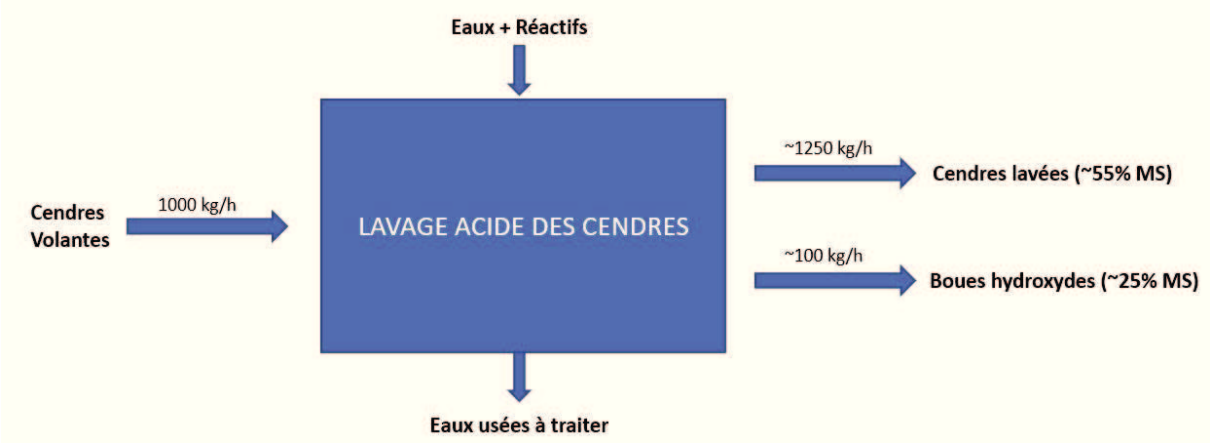

Figure 15: Bilan de matière typique du lavage acide des cendres

Les boues hydroxydes, riches en métaux, sont collectées (parfois séchées, selon la volonté de l'exploitant, basé principalement sur le fait que le transport de boues avec une teneur en eau plus élevée coûte plus cher) et chargées dans des containeurs pour être acheminées dans des usines spécialisées, en vue de leur valorisation. Elles sont généralement livrées à l'industrie métallurgique, exploitant principalement le procédé « Waelz ». D'ordinaire, les boues sont mélangées au minerai, duquel le zinc est extrait.

Technologie FLUREC proposée par BSH Umweltservice AG

Plus récemment, un nouveau procédé dénommé FLUREC a été développé. Des boues hydroxydes obtenues par le procédé FLUWA, un prétraitement est effectué et permet d'obtenir par voie réductive un mélange métallique (composé de Pb, Cu et Cd) qui est valorisé dans des fonderies. Le zinc, se trouvant dans le filtrat de ce prétraitement, est séparé par électrolyse (typiquement grâce à l'énergie électrique produite sur le site de l'UVTD). Ceci permet d'obtenir des plaques de zinc d'une pureté approchant les 100%. Le procédé est illustré par la Figure 16 ci-dessous.

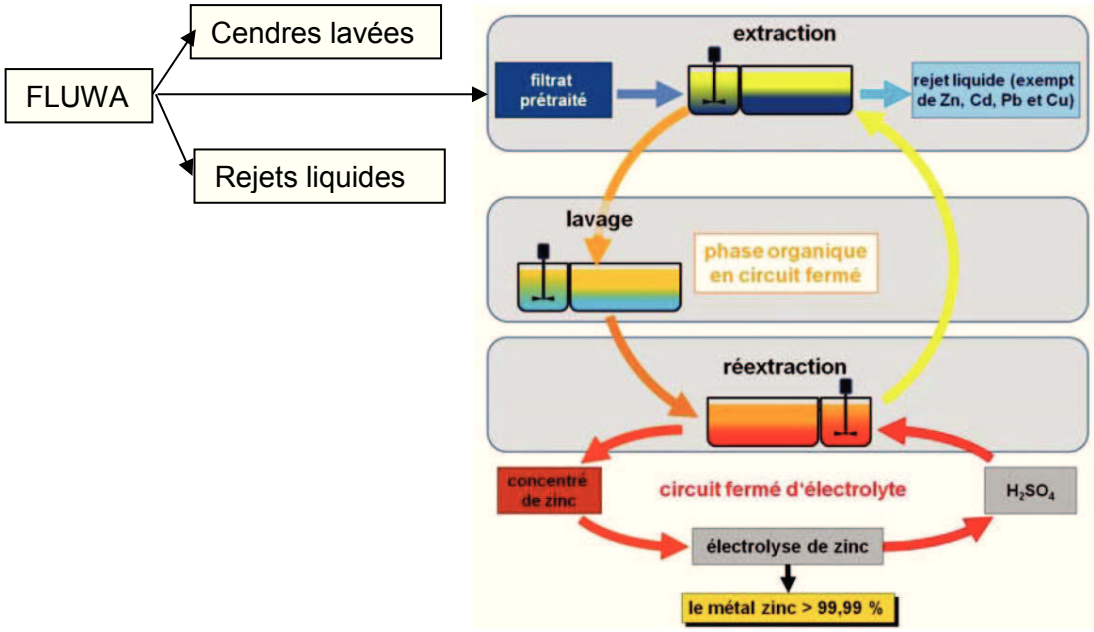

Figure 16: schéma du procédé FLUREC (Source : document BSH)

La Figure 17 ci-dessous propose un détail des différents flux de matières impliquées dans un processus FLUREC, tel que décrit ci-dessus.

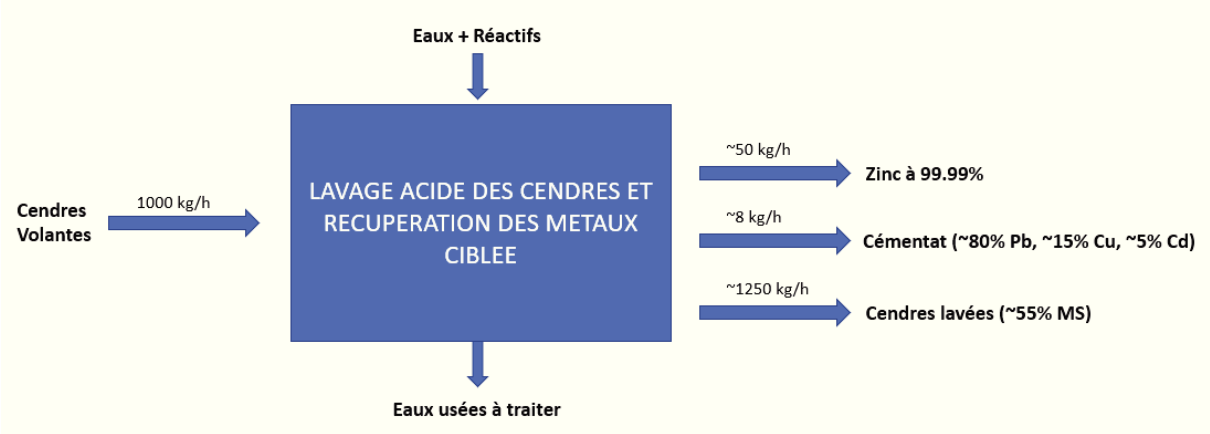

Figure 17: Bilan de matière typique du lavage acide des cendres suivit d'une récupération ciblée des métaux (procédé FLUREC), source : internet, figure simplifiée

Comme mentionné ci-dessus, les boues hydroxydes sont, à une exception près, exportées à l'étranger pour réaliser la dernière opération du traitement d'extraction du zinc. Le procédé FLUREC est exploité dans l'usine KEBAG de Soleure.

En effet, la dernière étape de ce procédé, est difficilement viable économiquement à l'intérieur de nos frontières, sauf éventuellement si elle est opérée à (très) grande échelle industrielle, comme proposé dans le cadre du projet SwissZinc (procédé basé sur le procédé FLUREC). SwissZinc est un projet mandaté par un groupement de plusieurs exploitants pour la réalisation d'une installation de traitement des boues d'hydroxyde à Soleure. Ce projet souhaite un projet commun du zinc en Suisse. Cela permettrait d'assurer une certaine autonomie à la Suisse,

quant à l'approvisionnement du zinc, ainsi qu'une meilleure transparence concernant les coûts de ce métal.

Technologie « LAB »

Une autre technologie est proposée par l'entreprise LAB. Les rejets liquides d'un traitement des fumées humides sont également mélangés aux cendres volantes, issues de la chaudière et de l'électrofiltre. La première étape est de mélanger ces rejets liquides avec du lait de chaux pour pouvoir éliminer le gypse par précipitation. Puis, après une décantation primaire, les rejets sont traités avec une addition de produits chimiques pour la précipitation, la floculation et la décantation finale, des métaux lourds. Les produits de la décantation primaire et finale sont acheminés dans des bacs à boues. De ces bacs, les boues sont mélangées aux cendres volantes. Ainsi, les sels solubles dans les cendres sont dissous dans l'eau. Après un passage sur un filtre à bande sous vide, les gâteaux sont collectés et éliminés. Le filtrat est traité, puis les eaux épurées sont déversées dans les eaux ou les égouts publics. Ce procédé est, par exemple, actuellement exploité par l'UVTD de SAIDEF, à Posieux.

D'autres technologies proposées par diverses entreprises proposent des procédés similaires, mais un nombre très restreint d'installations sont en fonctionnement.

Etat de la situation européenne

En Europe, un nombre très restreint d'usines traitant des cendres par voie acide (hors de la Suisse) sont connues. Celle d'Ingolstadt (2000) en Allemagne est la plus connue. L'essor du procédé FLUWA précédemment décrit est principalement observé en Suisse et s'explique par les contraintes législatives ailleurs en Europe. Une des raisons de son faible développement hors de nos frontières est liée aux aspects financiers, puisqu'il ne permet pas d'un point de vue purement économique, de tirer des profits suffisamment intéressants.

En Allemagne les cendres volantes sont déposées sans aucun traitement particulier dans des anciennes mines de sel. En effet, elles sont considérées comme matière valorisable pour stabiliser ces mines. Les coûts d'enfouissement étant très bas, cela ne permet pas à un procédé de revalorisation d'être compétitif (selon les situations, le coût d'enfouissement peut être jusqu'à quatre fois moins élevé que celui engendré par un procédé de revalorisation, tel que précédemment détaillé). L'Allemagne, stocke également la majorité des cendres générées en France, en Autriche et en Italie.

Conclusion sur les cendres volantes

Comme détaillé ci-dessus, la seule méthode actuellement exploitée est le lavage acide des cendres. Ce procédé est déjà exploité par plus d'une dizaine d'UVTD en Suisse et deux projets sont en cours. Cela permet d'obtenir des cendres lavées des boues hydroxydes. De ces boues, du zinc avec une pureté proche de 100% peut être extrait. Cependant, cette dernière étape de revalorisation est, à une exception près, pas exploité en Suisse à l'heure actuelle. Le projet, SwissZinc est en cours d'étude, la contrainte principale étant pour le moment le financement de l'investissement avec un coût estimé à 45 millions CHF. Hors de nos frontières, les cendres volantes, similairement aux mâchefers sont revalorisées comme matériaux de remplissage pour la stabilisation d'anciennes mines.

1.4 Résidus de l'épuration des fumées

1.4.1 Épuration des fumées par voie humide

Historiquement, le traitement des fumées s'effectue par voie humide, aussi bien en Suisse qu'en Europe. Les eaux usées résultant de ces procédés de traitement doivent être traitées, avant de pouvoir être déversées dans les eaux ou dans les égouts publics, selon les valeurs limites fixées dans la OEaux, Annexe 3.2 chiffre 3 alinéa 36, ainsi que selon les limites fixées par l'autorisation de déversement propre à chaque UVTD.

Des traces de mercures sont généralement observées dans les purges des laveurs des usines, opérant un traitement des fumées humide. Si celles-ci sont présentes, une des premières étapes est l'élimination de ce mercure, grâce à des colonnes contenant une résine adaptée. Les étapes suivantes comprennent notamment la floculation et la décantation. Des boues résultant du procédé de traitement des eaux usées, générées sur le site doivent aussi être éliminées en décharge. Après une filière de traitement des eaux, une étape de vérification fait office de contrôle final ; les eaux usées conformes peuvent être déversées dans les eaux ou dans les égouts publics.

1.4.2 Épuration des fumées par voie sèche

Au niveau suisse, le sujet de l'évacuation des résidus, issus par un traitement des fumées par voie sèche est apparu au cours de ces dernières années. Le fait qu'historiquement les lignes de traitement des fumées dans les UVTD suisses soient plutôt basées sur un traitement humide (tours de lavage) et donc sans génération de résidus solides a rendu ce sujet jusqu'à récemment, peu étudié.

Par contre, avec la mise en service au cours de ces dernières années de l'UVTD de Perlen-Renergia à Lucerne (2015) et de la nouvelle ligne de traitement des fumées à Hinwil, exploitant les deux un traitement par voie sèche, le sujet de l'évacuation de ces résidus est devenu d'actualité pour les UVTD suisses. Un troisième projet situé dans la région lémanique, la nouvelle UVTD de Cheneviers IV à Genève (horizon 2023), intègrera lui aussi des lignes de traitement à sec avec, entre autres, un dosage de bicarbonate de sodium.

Similairement à une ligne de traitement des fumées humides, le type de traitement à sec est également encadré par des ordonnances. L'annexe 5, chiffre 3.1, al. a, la OLED stipule que les résidus de l'épuration des fumées provenant d'installations où sont incinérés des déchets urbains ou des déchets de composition analogue peuvent être admis dans les décharges de type C , à condition que les métaux aient été récupérés au préalable conformément à l'art. 32, al. 2, let. g.

Les UVTD suisses ayant opté pour cette filière de traitement doivent actuellement s'adresser à l'entreprise Solvay, un des leaders du marché des absorbants qui, en parallèle de la commercialisation de son produit de traitement des fumées SOLVair® (produits à base de bicarbonate de sodium), propose également solution de recyclage Resolest® en France et

Solval® en Italie, qui traite les résidus solides issus du traitement des fumées au bicarbonate de sodium, pour revaloriser les résidus et donc respecter les directives fixées par l'OLED.

Ce procédé de traitement des résidus de l'épuration des fumées est composé de plusieurs étapes, comme détaillé sur la Figure 18. La première consiste à mélanger les résidus avec de l'eau, afin de dissoudre les sels et pour ajouter des additifs qui permettent de neutraliser les impuretés. Puis, par le biais d'un filtre presse, la partie solide, stabilisée, est stockée en décharge, tandis que la partie liquide, constituée d'eau saturée en sel ou saumure valorisable, continue le processus. Le traitement de cette saumure suit 3 étapes d'épuration. La première est constituée d'un filtre à sables (pour retenir les matières en suspension encore présentes), puis d'un filtre à charbon actif qui capte les éventuelles matières organiques et finalement de résines échangeuses d'ions éliminant les dernières traces de métaux lourds. La saumure complètement épurée peut être valorisée dans la fabrication de carbonate de soude (composé utilisé pour l'industrie verrière). Cela permet de substituer une partie des matières premières naturelles extraites du sous-sol par les matières issues de ce procédé de fabrication.

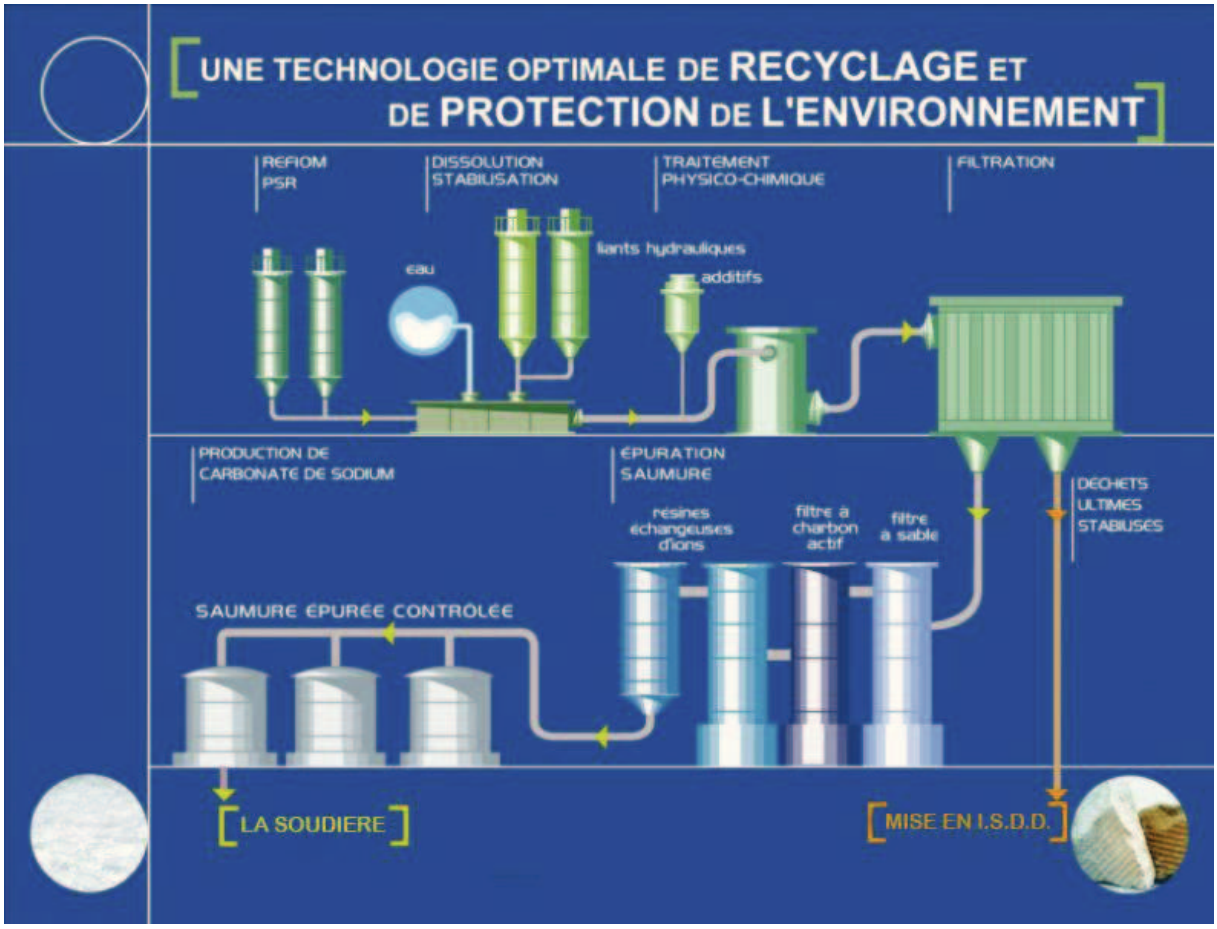

Figure 18: Schéma de principe du procédé de valorisation des résidus de l'épuration des fumées proposé par l'entreprise RESOLEST®, source internet

La plus grosse des deux usines actuellement recensée pour traitement du bicarbonate est localisée en France à Rosières-aux-Salines (54).

Le schéma présenté sur la Figure 19 ci-dessous propose un bilan de matière du procédé.

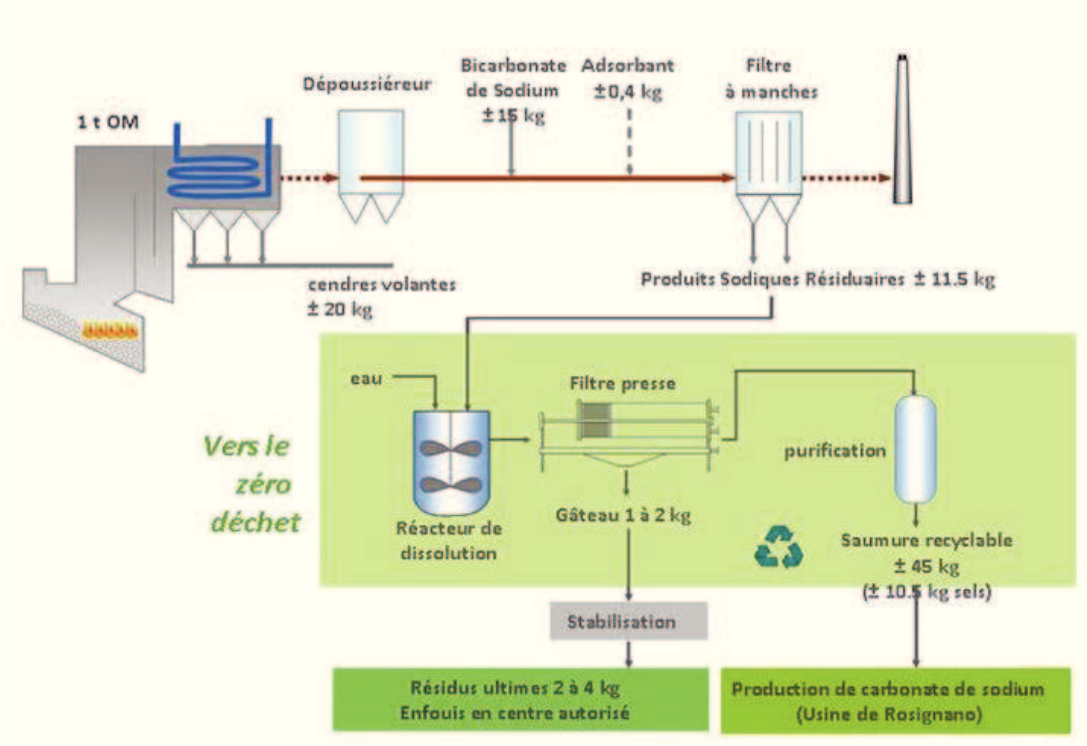

Figure 19: Bilan de matière de la solution développée par SOLVAir® pour le recyclage des résidus issus de l'épuration des fumées, source internet[2]

Dans le cas d'injection de chaux, en ce qui concerne les résidus calciques, produits par le dosage de la chaux, aucune technologie de traitement n'est connue à ce jour. Ils doivent donc être éliminés directement en décharge.

Concernant les adsorbants (charbon actif), s'ils sont injectés dans les fumées sous formes solides, ils sont récoltés avec les cendres volantes et suivront la même filière de traitement et d'élimination que les cendres volantes. La situation est similaire pour les mélanges composés de charbon actif et de chaux éteinte $Ca(OH)_2$ (comme par exemple le Sorbalite®). Un des points négatifs est que ces composés, qui se retrouvent dans les cendres, peuvent entrainer une surconsommation des réactifs nécessaires, au traitement acide des cendres.

Il convient de mentionner que techniquement, il est possible d'isoler chacun des réactifs, utilisés pour le traitement des fumées, pour les éliminer de manière individuelle. Néanmoins une telle installation ne serait économiquement pas supportable, aussi bien au niveau des coûts d'investissements que des coûts d'exploitation.

Etat de la situation européenne

De manière analogue aux cendres volantes, ces résidus, produits par les UVTD externes à la Suisse (Allemagne, France, Autriche, Italie), sont majoritairement entreposés sans traitement dans des mines allemandes, même s'il semblerait qu'une partie soit aussi retraitée par l'usine mentionnée ci-dessus. Une des problématiques actuelles est qu'à l'heure actuelle un seul

[2] Il s'agit d'un bilan de matière mis à disposition par le constructeur, le processus industriel est donc interne

prestataire peut proposer de retraiter le bicarbonate. Une telle situation de monopole ne permet pas d'obtenir des prix concurrentiels, comparés à ceux pratiqués pour l'entreposage dans les mines de sel.

Hors de nos frontières, en Allemagne principalement, les usines exploitant un procédé de traitement des fumées sec sont plutôt rares, et les usines exploitant ce procédé peuvent à nouveau entreposer les résidus de bicarbonate saturés dans des mines afin de les stabiliser ou les évacuer vers les installations de régénération.

1.4.3 Conclusion résidus de l'épuration des fumées

Comme détaillé ci-dessus, le traitement humide des fumées génère des eaux usées qui doivent être traitées, en produisant des gâteaux de filtration qui sont ensuite évacués en décharge ou envoyés à la récupération dans le cas du lavage acide des cendres (boues d'hydroxyde). A contrario, le traitement à sec des fumées génère des résidus devant être directement traités. Les seuls résidus, issus du traitement des fumées à sec, pouvant actuellement être traités sont ceux produits à la suite du dosage du bicarbonate de sodium, qui sont envoyés vers une installation de régénération qui les recycle pour les réutiliser dans l'industrie verrière.

D'un point de vue financier, en Suisse, l'exportation de résidus de l'épuration des fumées devant être traités coute aux alentours de 150 à 250 CHF par tonne, transport exclus.

Hors de nos frontières, les résidus de l'épuration des fumées, sont, encore une fois, majoritairement revalorisés comme matériaux de remplissage pour la stabilisation d'anciennes mines ou évacués vers les installations de régénération.

1.5 Conclusions globales

En Suisse, il existe deux technologies différentes pour l'extraction des mâchefers, issus de l'incinération des déchets. La première, l'extraction humide, est actuellement la méthode la plus répandue aussi bien en Suisse qu'en Europe. La deuxième méthode, l'extraction à sec, plus récente est, quant à elle, exploitée actuellement par un nombre restreint d'UVTD.

Selon la méthode exploitée, les filières de valorisation des mâchefers sont différentes. Le traitement des mâchefers issus de l'extraction humide est décomposé en plusieurs étapes de broyage, de tamisage et de séparations magnétiques et de séparations par le biais de l'utilisation de courant Foucault pour récupérer les métaux ferreux et non-ferreux. Un des désavantages de cette méthode est lié au refroidissement rapide des mâchefers par immersion dans un bain d'eau. Les mâchefers à valoriser présentent donc un faible taux de MS (20%) avec des coûts de transport élevés.

En Suisse, le groupement dénommé IGENASS a été créé pour suivre et développer la filière de valorisation des mâchefers extraits par voie humide.

Une autre technologie est en cours de développement pour la valorisation des mâchefers issus de l'extraction humide. La méthode de fragmentation sous décharges électriques développée par SELFRAG mérite d'être suivie de près. Elle nécessite encore des perfectionnements mais annonce des résultats prometteurs. Pour le moment, ce process n'assure pas le déclassement de la fraction minérale pour le stockage en décharge moins contraignante par rapport à la classe D.

L'autre type de valorisation est, comme mentionné ci-dessus, appliquée à des mâchefers issus de l'extraction à sec. La principale différence est que le système de refroidissement des mâchefers est effectué avec de l'air au lieu de l'eau. Cela a une influence sur la taille des particules extraites de l'extracteur à mâchefers du four de l'UVTD. Une fois les mâchefers refroidis, ils sont chargés dans des containeurs spéciaux pour être acheminés au centre de traitement des mâchefers et de récupération des métaux, implanté à Hinwil (ZH). Il s'agit pour le moment de la seule usine de valorisation existant actuellement en Suisse. Les traitements appliqués pour la valorisation des mâchefers secs sont similaires à ceux appliqués aux mâchefers extraits par voie humide. Ce centre de traitement étant assez récent, il n'existe, pour l'instant, pas de résultat représentant une année complète d'exploitation. Cependant, les chiffres provisoires sont prometteurs. A ce jour, il existe quatre usines en Suisse et seulement deux usines hors de Suisse exploitant une extraction à sec des mâchefers. Cependant, sur les projets en cours pour les futures usines d'incinération, l'extraction à sec pourrait être considérée comme une méthode pouvant potentiellement être exploitée.

Parallèlement à ces deux axes principaux de revalorisation, plusieurs projets sont en cours pour explorer de nouvelles pistes potentielles. Dans tous les cas, seule une fraction de la masse totale des mâchefers est récupérable et plus de 80% de la masse initiale doit être, après traitement, entreposée en décharge de type D avec un possible déclassement, qui reste à valider par le développement de la technologie de traitement. En effet, une des principales pistes d'optimisation est de pouvoir répondre à des critères suffisamment exigeants pour avoir l'autorisation d'entreposer ces résidus dans des décharges de catégories moins spécifiques et dont les prix d'entreposage sont moins élevés.

Hors de nos frontières, des projets similaires à ce qui se fait en Suisse se développent, mais la majeure partie des mâchefers est soit stockée dans des mines de sel allemandes sans traitement préalable, soit valorisées dans la technique routière (matériau de remplissage constituant les sous-couches, technique interdite en Suisse). La vitrification, notamment utilisée au Japon, n'est pas une option viable pour la Suisse.

Concernant la revalorisation des cendres volantes, plusieurs technologies différentes existent sur le marché. Cependant, le lavage des cendres propose des résultats satisfaisants dans plusieurs usines, principalement en Suisse et qui satisfait les UVTD, ayant choisi d'exploiter cette technologie. Cette méthode permet, après plusieurs étapes de traitement, d'obtenir des boues hydroxydes, desquelles, du zinc, avec une pureté proche de 100% peut être extrait. Cette dernière étape est actuellement principalement réalisée hors de nos frontières, même si le projet SwissZinc souhaite développer un projet commun du zinc et effectuer cette dernière étape en Suisse.

Le traitement des cendres volantes est financièrement intéressant s'il est couplé à une UVTD exploitant un traitement humide des fumées. En effet, ce type de filière de traitement rejette des purges acides, qui présentent l'avantage de pouvoir être utilisées dans le lavage acide des cendres.

D'autres technologies proposées par diverses entreprises proposent des procédés similaires au procédé FLUWA, mais un nombre très restreint d'installations sont en fonctionnement.

Hors de nos frontières, les cendres volantes sont, majoritairement revalorisées comme matériaux de remplissage pour la stabilisation d'anciennes mines.

Concernant la valorisation de résidus issus du traitement des fumées, seuls les résidus issus des systèmes de traitement qui envisage l'injection du bicarbonate de sodium peuvent être récupérés et envoyés à une installation de régénération basée en France. Cela permet de valoriser ces résidus dans la fabrication de carbonate de soude qui est un réactif utilisé dans l'industrie verrière.

D'une manière globale, pour tous les résidus mentionnés ci-dessus, la législation Suisse, très exigeante en matière de récupération, est sans conteste un des principaux moteurs du développement, de toutes les méthodes et de tous les projets de revalorisation présentés. Tant que la législation des pays limitrophes à la Suisse n'obligera pas de revaloriser les différents résidus, l'essor des différentes technologies ci-dessus ne sera que très modéré. En effet, la principale raison est le coût très faible lié à l'entreposage de ces résidus soit dans d'anciennes mines de sel allemandes soit dans la revalorisation pour l'industrie routière. Des coûts si faibles ne peuvent être concurrencés par aucune des alternatives mentionnées ci-dessus, hormis si la conscience écologique prenait le dessus sur les réflexions financières et des aides ou subventions étaient octroyées.