

Tri et valorisation de mâchefers¹ d'incinération d'ordures ménagères, l'installation de Pierrefeu

D'après la conférence de Hervé ANTONSANTI

Hervé Antonsanti, Chef de service, Directeur de la branche Valorisation, traitement des déchets, entreprise Pizzorno (Figure 1).

Introduction

On réduit souvent les besoins en matériaux pour la transition énergétique aux batteries pour moteurs électriques, aux pales pour éoliennes et aux panneaux photovoltaïques. Mais il y a un grand gisement de matériaux que l'on oublie trop souvent : ce sont les matériaux que l'on utilise tous les jours et que l'on met dans nos poubelles. La société Pizzorno, une entreprise multidisciplinaire

qui travaille notamment sur la récolte d'ordures et de déchets ménagers de la région PACA, va corriger notre point de vue en nous parlant du recyclage des mâchefers utilisés principalement pour les travaux publics, en particulier pour les travaux routiers.

1 Présentation de la société Pizzorno

Les ordures ménagères, comme chacun sait, sont les déchets que l'on produit en tant que citoyen. Leur gestion relève de la compétence des collectivités locales, qui, soit

1. Résidu de la combustion des ordures ménagères dans les centres spécialisés.



Figure 1

Place de l'entreprise Pizzorno (Photo CZanieri).

s'en occupent elles-mêmes (on dit qu'elles travaillent *en régie*), soit les confient à des opérateurs extérieurs. Le groupe Pizzorno fait partie de ces opérateurs, au niveau national, qui répondent aux collectivités afin de leur fournir ces services. Pizzorno est une société familiale, basée dans le Sud de la France, faisant partie des dix plus gros opérateurs du secteur des déchets.

Pour une valorisation des mâchefers d'incinération

- ✔ **C'est quoi un mâchefer ?**
 Résidu du traitement des déchets non dangereux d'une Unité de Valorisation Énergétique (UVE)
- ✔ **Constat en Région Sud**
 Faible valorisation des mâchefers
 Nécessité de trouver de nouvelles voies de valorisation.
- ✔ **But**
 Valoriser les métaux.
 Production d'un matériau alternatif ALTER-GRAVE®

Les qualités et caractéristiques sont comparables à celles des matières premières naturelles.

Figure 2

Présentation du mâchefer et de sa valorisation (Photos : CZanieri-Pizzorno Environnement).

2 Présentation du mâchefer et du site de revalorisation de Pierrefeu-du-Var

2.1. Le mâchefer

Qu'est-ce qu'un mâchefer d'ordures ménagères ? C'est le résidu qui provient de leur combustion dans ce que l'on appelle des « unités de valorisation énergétique des ordures ménagères ». Il s'agit du produit restant sur la grille du four lors du processus de combustion. Le mâchefer est récupéré dans des fosses situées derrière les fours après qu'ils aient été arrosés pour stopper toute combustion. Le mâchefer ressemble à la matrice présentée (Figure 2, en bas).

Il s'agit donc d'un déchet qu'il va falloir revaloriser. Le constat réalisé dans les années 2010 montrait que les mâchefers étaient en majorité acheminés dans des centres de stockage de déchets, alors même qu'ils ont un potentiel de revalorisation.

Le but de la revalorisation des mâchefers est double : on peut en extraire des métaux réutilisables ou les utiliser comme « grave²» que l'on appelle au sein de Pizzorno « ALTER-GRAVE® », qui pourront entrer dans des circuits de revalorisation du secteur des travaux publics, par exemple comme matériaux de support des routes. Ces matériaux, qui ont pour vocation de remplacer des matériaux de carrière, devront donc posséder des propriétés qui leur seront comparables.

2. Produit issu d'une gravure (élimination sélective de certaines couches d'un matériau).

2.2. Le site de valorisation de Pierrefeu-du-Var

La **Figure 3** présente deux photos de l'installation de maturation et d'élaboration des mâchefers (IME) de Pierrefeu-du-Var exploitée par l'entreprise Pizzorno. Cette installation existe depuis 2009 : la planification régionale de la valorisation des déchets ménagers, venant de la déclinaison de réglementations européennes et nationales, prévoyait la construction d'IME dès 2004. Nous en sommes aujourd'hui au troisième process de valorisation des mâchefers.

L'installation de Pierrefeu-du-Var est classée dans le cadre de la protection de l'environnement, c'est-à-dire que son implantation, sa conception et son exploitation sont agréées par des autorisations préfectorales. Une fois le besoin d'une installation de ce type décidé, il faut élaborer et déposer aux autorités des dossiers qui comportent des présentations techniques et administratives,

ainsi qu'une étude d'impact et de danger. Les pièces du dossier sont ensuite étudiées et donnent lieu (ou non) à un arrêté préfectoral d'autorisation d'exploitation et de construction. Cette procédure d'instruction explique ses délais de construction importants, en l'occurrence de cinq ans.

Sur l'installation de Pierrefeu-du-Var, la partie présentée en **Figure 3** fait environ deux hectares et il faut pratiquement deux hectares supplémentaires pour stocker les matériaux finis. L'installation comporte des modules de « stockage amont » : elle reçoit des déchets provenant de l'usine de valorisation énergétique de Toulon, ou de celle de Nice-Ariane (dans le département des Alpes-Maritimes).

La conception du stock amont est pensée avec précision, puisqu'elle sert au stockage, pendant un à deux mois, des mâchefers produits four par four, mois par mois, dans les usines de valorisation

Des solutions de valorisation

IME de Pierrefeu-du-Var – En quelques chiffres

200 000 t/an provenant de la Région Sud, départements limitrophes et Principauté de Monaco

Étapes du traitement

Séparation de toutes les parties non minérales (non brûlées de toutes natures) qui sont recyclées et/ou stockées (déchets ultimes)

- Captation de la fraction métallique ferreuse/non ferreuse (aluminium, zinc, fer...) qui fait l'objet d'une valorisation matières en France et en Europe
- Production des matériaux alternatifs ALTER-GRAVE[®], qui sont valorisés en techniques routières ou en sous-couche de plateformes industrielles

Le procédé s'appuie sur des technologies maîtrisées, permettant un haut niveau de pureté des matériaux produits.



Figure 3

Mission et présentation des installations de Pierrefeu-du-Var de Pizzorno Environnement (Photos : Pizzorno Environnement).

énergétique avant qu'ils ne soient intégrés dans le process. Le but des opérations est alors de retirer les imbrûlés (des pneus, des morceaux de troncs d'arbres...) qui seront recyclés ou stockés dans l'installation de stockage continu. Ensuite, sont retirées les parties ferreuses et non ferreuses (je vais y revenir ensuite). Enfin, il faut obtenir une grave qui soit de qualité suffisante pour qu'elle puisse être utilisée dans différentes applications.

3 Le processus de valorisation du mâchefer

La *Figure 4* montre le synoptique³ du process : les mâchefers bruts sont acheminés au moyen d'engins chargeurs sur une grille effectuant un premier tri qui permet d'éliminer les particules de taille supérieure à 250 mm, qui sont principalement des déchets métalliques et des imbrûlés. Ensuite, un trommel⁴ séparant les particules de taille supérieure à 40 mm et celles de taille inférieure à 40 mm est alimenté.

Les particules de plus de 40 mm seront triées par des opérateurs. Lors de cette étape, d'autres imbrûlés et des bobines (pouvant servir dans des moteurs électriques) vont être éliminés. En théorie, ces matériaux n'ont rien à faire là, puisque le système de collecte des déchets en France permet de jeter séparément les produits électroniques et électriques en fin de vie.

3. Vue d'ensemble.

4. Cylindre rotatif dont les parois sont un crible.

Pourtant on en récupère des montagnes. Ces bobines nous sont rachetées à environ 500 € la tonne.

L'étape suivante subie par ces particules est leur passage dans un broyeur couplé à un électroaimant⁵ afin d'en retirer les métaux ferreux. Lors de cette étape, un résidu est récupéré et ramené à un autre niveau de l'installation afin d'en réaliser un sur-tri (je ne détaillerai pas cette partie du processus).

Les particules de moins de 40 mm, quant à elles, sont à nouveau séparées en trois fractions grâce à un crible à étages : une fraction de particules de moins de 4 mm, une de particules de 4 à 10 mm et une dernière constituée de particules de plus de 10 mm. Chaque fraction est alors récupérée et passée sur des machines à courant de Foucault⁶. Ces machines servent à trier les matériaux non ferreux présents dans les fractions. Le courant de Foucault est induit au moyen d'une roue polaire⁷ tournant à une vitesse déterminée. Le champ magnétique ainsi créé permet de séparer les matériaux non ferreux, qui vont « sauter » vers une goulotte. Le reste du déchet tombe dans une autre goulotte, assurant ainsi la séparation. Le fait de séparer le mâchefer en trois fractions permet d'optimiser les procédés d'extraction.

5. Aimant de très forte capacité d'attraction.

6. Courant électrique créé par un conducteur en mouvement plongé dans un champ magnétique.

7. Composant circulaire permettant la création d'un champ magnétique à partir d'un courant électrique.

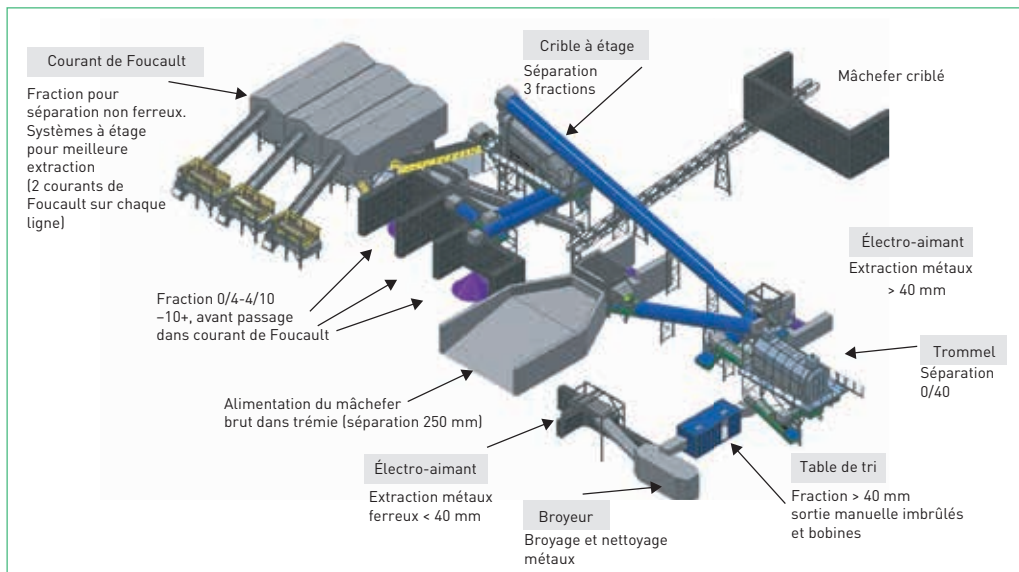


Figure 4

Schéma de fonctionnement de l'IME de Pierrefeu-du-Var (Copyright CZanieri-Pizzorno Environnement).

4 L'utilisation des matériaux sortant de l'IME de Pierrefeu-du-Var

4.1. L'utilisation des matériaux autres que l'ALTER-GRAVE®

En bout de processus, trois fractions ont été séparées (Figure 5). La première contient les métaux ferreux, qui alimentent des aciéries (principalement en France, en Allemagne et en Italie).

La deuxième est composée des métaux non ferreux (des nodules⁸ issus des fractions de 0 à 40 mm). Dans le cadre de notre partenariat avec le groupe néerlandais Heiling, nous allons en extraire de l'aluminium (à plus de 60 %), du cuivre, du laiton et du plomb. Ce processus illustre que nous ne pouvons pas tout

faire tout seuls : la séparation et l'extraction des métaux sont réalisées par un partenaire industriel à qui nous envoyons nos matières.

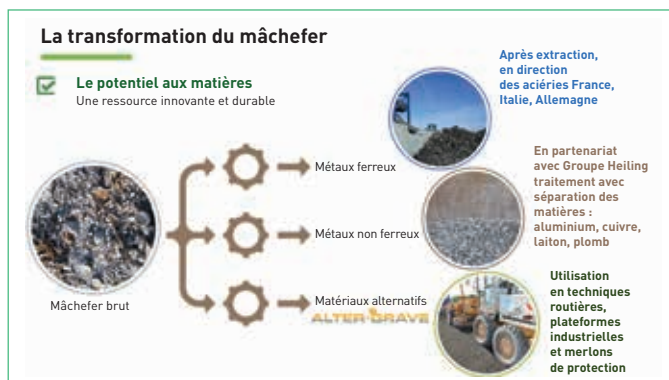


Figure 5

Applications des différentes fractions de matériaux récupérées lors du recyclage du mâchefer (Copyright illustrations CZanieri - Photos CZanieri).

8. Petites particules de taille et de forme irrégulières.

4.2. La revalorisation de l'ALTER-GRAVE® : une voie de recyclage encadrée

La troisième fraction, l'ALTER-GRAVE®, est composée des matériaux alternatifs et doit avoir les mêmes caractéristiques qu'une grave naturelle. Le processus de maturation conduit à une réaction de carbonatation⁹ entre la chaux contenue dans la grave et le dioxyde de carbone atmosphérique. Ainsi, le pH de la fraction est modifié, ce qui a pour effet d'empêcher les métaux lourds d'être éliminés de cette matrice par lixiviation et de rendre le produit du processus adapté aux différents usages que l'on va considérer maintenant.

Dans notre installation, 100 % des matières sont réutilisées pour les applications présentées en jaune dans la **Figure 6**. Il y en a deux types : les graves

de type 1 peuvent être introduites sous des parkings ou des aménagements routiers, tandis que les graves de type 2 sont utilisées à des fins d'aménagements plus visuels.

Pour ce dernier cas particulier, il faut obtenir une autorisation : nous ne pouvons pas utiliser des remblais de grave de plus de trois mètres d'épaisseur et nous devons garantir une pente constante. Dans les deux cas, le principe général de l'usage des mâchefers est de les protéger des eaux météoriques¹⁰. Les graves de type 1 sont revêtues d'aménagements étanches (par exemple de l'asphalte ou des enrobés de voirie), alors que les graves de type 2 sont recouvertes. Les normes pour les graves de type 2 sont légèrement différentes : il est possible d'utiliser des épaisseurs de déchets pouvant aller jusqu'à cinq mètres et avoir une pente

9. Dissolution du dioxyde de carbone de l'air ambiant dans un liquide. Cette dissolution a pour conséquence d'acidifier le liquide en question.

10. Eau issue des précipitations n'ayant pas encore rencontré de surface (n'ayant pas terminé leur chute).



Figure 6

Usages actuels des mâchefers recyclés. Une réglementation exigeante.
Source ADEME – Illustrations CZanieri-Pizzorno Environnement

de 5 %. Ainsi, de la terre suffit à les recouvrir. Comme vous pouvez le deviner, les graves de type 2 doivent être de meilleure qualité que les graves de type 1.

Tout cela est extrêmement encadré et nous revenons aux délais que j'évoquais précédemment. Ils reposent sur des notes techniques, par exemple du BRGM¹¹, ce qui veut dire que les acteurs de la recherche et les scientifiques sont intervenus. Ensuite, se pose la réflexion sur l'application professionnelle et industrielle de la gestion des déchets non dangereux. Ce qui en est tiré est mis en application ; les guides du SETRA¹² qui déterminent l'acceptabilité en termes de qualité datent de 2011.

Ainsi, ces processus évoluent, et demandent en premier lieu que des scientifiques déterminent l'acceptabilité des matières.

11. Bureau de recherches géologiques et minières.

12. Guides méthodologiques Service d'Études techniques des routes et autoroutes.

Puis, les industriels développent les processus correspondants. Il existe donc des procédures de traçabilité très exigeantes des produits utilisés. Parmi elles, sont présentes des analyses dès la sortie d'usine (dites *analyses des valeurs intrinsèques des matières*) qui vont permettre de déterminer si les matières peuvent être utilisées ou non selon l'usage souhaité. Des analyses ont lieu ensuite après maturation (des tests de lixiviation) afin de s'assurer que l'on ne lixivie pas des matériaux dangereux pour l'environnement. Enfin, sont appliquées des restrictions d'usage. Par exemple, les graves ne peuvent être introduites à moins de 30 m d'un cours d'eau, ni dans une zone de protection faune-flore-habitat ou encore dans un périmètre de captage d'eau potable. Ainsi, tout le processus est cadré par des normes et textes officiels.

Un tel matériau bénéficie des mêmes interventions techniques que les matériaux naturels (*Figure 7*). Cela signifie



Des fiches techniques produits

Une fiche technique produit est également élaborée avec une analyse de caractéristiques géotechniques par un laboratoire indépendant Géotechnique et béton.

- Analyse granulométrique**
Selon norme NF EN ISO 17892-4
- Analyse géotechnique**
Essai Proctor avec détermination de la teneur en eau,
Selon norme NF P 94-093
- Courbes de contrainte de cisaillement**
Selon norme NF P 94-071

Figure 7

Analyses à effectuer pour s'assurer de la qualité des graves utilisées (Copyright Pizzorno Environnement).

que les matériaux issus de notre production sont soumis aux mêmes normes qu'un matériau équivalent qui serait naturel.

5 Les performances du site de Pierrefeu-du-Var

Pour évaluer notre installation, comparons nos performances réalisées avec nos attentes (*Figure 8*). Dans notre usine, les refus de tri et les imbrûlés représentent entre 1 % et 5 % des mâchefers. Pour les métaux ferreux, la littérature donne un ordre de présence d'environ 10 %. Sur site nous arrivons à une présence de 4 % à 7 %. Cela est dû au fait que l'on a utilisé des techniques qui viennent enlever une partie de la gangue qui entoure les métaux ferreux (on ne l'a donc pas dans la masse prise en compte pour ces chiffres) : le site affiche donc, en l'occurrence, des performances de qualité légèrement supérieures à la moyenne nationale.

Concernant les non ferreux, avoir divisé en trois fractions les mâchefers selon leur granulométrie, nous permet d'atteindre une présence de métaux non ferreux de 3 %, ce qui est très au-dessus de la moyenne nationale (qui est de l'ordre de 1 %). Les métaux non ferreux ont un cours actuel de l'ordre de 1 100 €¹³ par tonne lorsqu'ils proviennent d'industries comme la nôtre. Les métaux ferreux, eux, se vendent à environ 30 € par tonne aujourd'hui (pour le cas de ferrailles issues d'incinération).

6 Les limites de la revalorisation des mâchefers : état des lieux et perspectives

Le bilan actuel montre que **nous avons réussi à améliorer les rendements du tri et de la valorisation en extrayant un maximum de métaux. Nous avons également réussi à valoriser les graves de mâchefer : nous avons toujours réussi à écouler nos graves de mâchefer, pour différents usages.** Cependant, selon les régions ciblées, elles peuvent rester difficiles à évacuer : dans la partie sud de la France, nous avons beaucoup de carrières et donc une grande production de matériaux naturels. Ainsi, les matériaux issus du recyclage sont en compétition avec les naturels. Ces derniers étant présents en grande quantité, ils ne sont pas chers. C'est pourquoi, fréquemment, nous donnons nos graves de mâchefer et parfois même contribuons au financement de leur transport

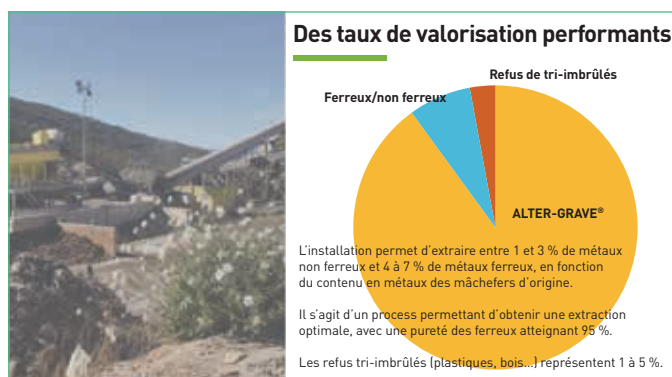


Figure 8

Taux de revalorisation des matériaux lors du processus (Photo CZanieri).

pour les acheminer suffisamment loin afin de pouvoir les écouler.

Pour éviter cela, nous avons recherché d'**autres solutions de valorisation** (Figure 9). Une première solution a été engagée en partenariat avec le bureau d'étude Néo-Eco, spécialisé dans l'éco-conception des matériaux basé dans le Nord de la France (ce qui nous a rapproché de l'IMT Lille-Douai Nord Europe). En 2019, nous avons étudié des pavés préparés à partir de mâchefer sur lesquels ils ont effectué des tests de résistance et de lessivage (comme on l'aurait fait avec des pavés en béton créés à partir de matériaux naturels). Certains résultats ont été obtenus, mais

malheureusement la pandémie de Covid-19 a interrompu cet échange. Cette opération a été réalisée dans le cadre de financement de l'ADEME¹⁴ et de la région Sud par l'intermédiaire des dossiers spécialisés qui permettent la recherche, l'innovation et le financement d'évolutions progressives.

Aujourd'hui, nous sommes en discussion pour renouveler ce partenariat avec l'ADEME et la région Sud afin de produire des monoblocs en béton (similaires à des Lego) grandement présents sur les installations industrielles ou pour protéger les rues contre les actes délictueux.

14. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Conclusion : une valorisation exemplaire

Les déchets minéraux issus des opérations minières sont souvent présentés comme des nuisances absolues. Ils correspondent à des masses et des volumes qui représentent de véritables charges pour l'environnement.

Les techniques définies et mises en œuvre sous l'impulsion des préoccupations de protection de l'environnement depuis une dizaine d'années ont donné, dans le cas des mâchefers, des résultats remarquables. Les dommages à l'environnement sont largement évités, l'économie de matériaux de plusieurs secteurs utilisant les produits des traitements de ces déchets s'en trouve sensiblement améliorée. Et les possibilités techniques ne sont pas épuisées

(voir les innovations possibles sur la **Figure 9**). L'espoir, qui paraissait naguère naïf et trop optimiste de voir les déchets (vilain mot) devenir des ressources, s'en trouve complètement validé et peut-être entraînera une dynamique pour d'autres secteurs industriels. Au-delà des travaux routiers, l'utilisation actuellement majoritaire, d'autres secteurs des travaux publics sont envisagés (substitution du béton pour certaines applications).



Des perspectives d'avenir innovantes

Des matériaux alternatifs au cœur de l'économie circulaire
Pour une utilisation en pavés de voirie...

Étude menée avec l'IMT Douai
NEO-ECO-BE spécialisé dans l'éco-conception de matériaux,
Financée par l'ADEME & la Région Sud

Des résultats prometteurs

Possibilité d'intégrer les mâchefer dans le pavé mixte formulé comme **inerte**.

Les analyses environnementales classent le pavé mixte formulé comme **inerte**.

Aucun impact sur les propriétés physiques avec maintien des performances mécaniques.

Une contribution régionale pour **préserver les ressources naturelles**.

Nous redonnons leur potentiel aux matières

Fabrication de monobloc en béton, dans une démarche d'économie circulaire par la réalisation d'éco-matériaux, en cours de réalisation.

Figure 9

Revalorisations du mâchefer alternatives aux pavés routiers (Photo CZanieri).



Déchets d'aujourd'hui
Ressources de demain

Merci

Hervé ANTONSANTI
Directeur de Branche
Valorisation, Traitement des déchets

PIZZORNO

Figure 10

Transparent conclusif de la conférence (Photo CZanieri).