

# Valorisation énergétique des résidus de broyage des Véhicules Hors d'Usage

*Procédés et analyse technico-économique  
Situation en France et en Europe*



C4H5O2\_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000/1392.000 1  
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**VALORISATION ENERGETIQUE DES RESIDUS DE BROYAGE  
DES VEHICULES HORS D'USAGE, PROCEDES ET ANALYSE  
TECHNICO-ECONOMIQUE**

**SITUATION EN FRANCE ET EN EUROPE**

**RAPPORT FINAL**

avril 2014

C. DELAVELLE - AJI-EUROPE



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

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

Avertissement :

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

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

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :  
**RECORD**, Valorisation énergétique des résidus de broyage des Véhicules Hors d'Usage, procédés et analyse technico-économique. Situation en France et en Europe, 2014, 123 p, n°12-0235/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 2014

## Sommaire

<b>1</b>	<b>OBJECTIFS DE L'ETUDE .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>METHODOLOGIE.....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>INVENTAIRE ET CARACTERISATION DES GISEMENTS DE RB DISPONIBLES EN FRANCE.....</b>	<b>8</b>
3.1	Situation actuelle .....	8
3.2	Analyse prospective (situation 2015 et au-delà).....	15
<b>4</b>	<b>PRINCIPALES VOIES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES VHU.....</b>	<b>17</b>
4.1	Typologie des procédés / technologies .....	17
4.2	Technologies matures .....	18
4.3	Technologies en développement .....	23
<b>5</b>	<b>ETAT DE L'ART DE LA VALORISATION ENERGETIQUE DES VHU EN EUROPE ..</b>	<b>27</b>
5.1	Situation par pays .....	27
5.2	Panorama des performances comparées en matière de valorisation des VHU.....	33
5.3	Principales causes des disparités observées.....	38
<b>6</b>	<b>CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET THERMOCHIMIQUES DES FLUX ISSUS DU TRI DES BROYATS.....</b>	<b>45</b>
6.1	Situation actuelle .....	45
6.2	Analyse prospective (évolution 2015 et au-delà) .....	54
6.3	Répartition des matériaux selon les fractions issues du sur-tri.....	59
<b>7</b>	<b>ANALYSE DES PROCEDES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES RB : CONTRAINTES ET OPPORTUNITES.....</b>	<b>64</b>
	Fiche T1 : Incinération dans les UIOM .....	65
	Fiche T2 : Co-combustion du RBA dans des fours industriels .....	66
	Fiche T3 : Co-combustion en cimenterie.....	67
	Fiche T4 : Utilisation du RB dans des hauts-fourneaux .....	69
	Fiche T5 : Utilisation du RB dans des fours électriques (acier) .....	71
	Fiche T6 : Gazéification.....	72
	Fiche T7 : Pyrolyse et dépolymérisation thermique.....	74

<b>8</b>	<b>SYNTHESE TECHNICO-ECONOMIQUE : SITUATION ACTUELLE, ENJEUX ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>76</b>
8.1	Situation actuelle .....	76
8.2	Analyse prospective (2015 et au-delà) .....	77
8.3	Bilan économique .....	84
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</b> .....	<b>86</b>
9.1	Conclusions .....	86
9.2	Recommandations pour favoriser le développement de la valorisation énergétique des VHU .....	91
9.3	Conclusion .....	95
	<b>ANNEXE 1 : FICHES PROCEDES « TRAITEMENT DU RESIDU DE BROYAGE »</b> .....	<b>97</b>
	Procédé Galloo Plastics .....	97
	Procédé SiCon .....	99
	Procédé Scholtz.....	100
	<b>ANNEXE 2 : FICHES PROCEDES « VALORISATION ENERGETIQUE DES RESIDUS DE BROYAGE »</b> .....	<b>102</b>
	Procédés d'incinération.....	102
	Procédés de gazéification .....	104
	Procédés de pyrolyse .....	111
	Procédés de dépolymérisation thermique et catalytique .....	112
	<b>ANNEXE 3 : CONTRAINTES SPECIFIQUES A L'INCINERATION DES RB</b> .....	<b>113</b>
	<b>ANNEXE 4 : INCORPORATION DU RB DANS DES FOURS DE FUSION / AFFINAGE DE METAUX NON-FERREUX (PYROMETALLURGIE)</b> .....	<b>118</b>
	<b>ANNEXE 5 : LISTE DES ENTRETIENS REALISES</b> .....	<b>121</b>
	<b>ANNEXE 6 : BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>122</b>

## Résumé

Les objectifs fixés par la directive européenne 2000/53/CE sur les VHU à l'horizon du 1<sup>er</sup> janvier 2015 sont de 85 % pour la réutilisation + recyclage et de 95 % pour la réutilisation + valorisation. Par comparaison, les taux effectivement atteints en France en 2011 étaient respectivement de 80,8 % pour la réutilisation + recyclage et de 84,8 % pour la réutilisation + valorisation. La valorisation énergétique actuelle du RBA en France est donc estimée à seulement 4 % du tonnage des VHU traités.

Le tonnage potentiellement valorisable énergétiquement à moyen-terme est estimé entre 9,5 % et 14,2 % du tonnage de VHU, soit environ 140 à 210 kt/an. Même dans l'hypothèse où toutes les fractions combustibles potentiellement recyclables contenues dans le RBA seraient effectivement recyclées à l'horizon 2015, il resterait par conséquent un tonnage suffisant de résidu de broyage pour atteindre le taux de 10 % de valorisation énergétique des VHU. A l'horizon 2015, l'incinération dans les UIOM constitue une piste sérieuse pour valoriser énergétiquement les 150 kt de RBA correspondant à l'atteinte du taux de 10 % de valorisation énergétique des VHU. La co-combustion du RB dans les précalcinateurs de cimenteries constitue également une piste intéressante, mais ne permettrait pas de traiter la totalité du RBA résiduel. La gazéification et la pyrolyse constituent des pistes prometteuses à moyen-terme pour valoriser le RBA.

Deux scénarii sont envisageables : 1/ : l'extension de la stratégie actuelle basée sur l'utilisation d'installations préexistantes (UIOM et cimenteries principalement) ; 2/ : le développement d'une filière spécifique de valorisation énergétique du RBA, s'appuyant sur la construction d'unités de traitement spécialisées.

Mots clés : VHU, valorisation énergétique, résidus de broyage, RB, résidu de broyage automobile (RBA).

## Summary

The « End-of-life vehicles » (ELV) European directive 2000/53/CE defines the following targets for January 1<sup>st</sup>, 2015: the re-use + recycling rate should reach at least 85 % and the re-use + recovery rate at least 95 %. In France, the corresponding rates for the year 2011 were 80.8 % for re-use + recycling and 84.8 % for re-use + recovery. Currently, the energy recovery of automotive shredder residue (ASR) reaches only 4 % of the ELV weight.

The best estimate is that 9.5 % to 14.2 % of the ELV weight will be available for energy recovery in the medium term (140 to 210 kt/year). It means that even if all fractions potentially recyclable in the ASR are actually recycled in 2015 and beyond, the remaining quantities of ASR potentially available for energy recovery would be sufficient to reach the target of 10 % for ELV energy recovery. The energy recovery of ASR in household waste incineration plants is a very credible option for 2015. Co-combustion of ASR in cement plants precalcinator is also a credible option, but would not allow to treat all ASR flows. Gasification and pyrolysis and thermal are promising issues for the medium-term.

Two scenarii can be envisaged: 1/: the extension of the current strategy based on the use of existing plants, mainly household waste incinerators and cement plants; 2/: the development of a specific route for ASR energy recovery, requiring to build specialized ASR treatment plants.

Key words: ELV, energy recovery, shredder residue, automotive shredder residue (ASR).

## Glossaire

ABS : Acrylonitrile-Butadiène-Styrène  
CFC : Chlorofluorocarbones  
CSR : Combustible solide de récupération  
DEEE : Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques  
GEM : Gros électro-ménager  
ICPE : Installations classées pour la protection de l'environnement  
MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie  
NF Mix : Fraction riche en métaux non-ferreux obtenue après tri magnétique des RB lourds  
OM : Ordures ménagères  
OMR : Ordures ménagères résiduelles  
PA : Polyamides  
PAM : Petits appareils en mélange  
PCI : Pouvoir calorifique inférieur  
PE : Polyéthylène  
POP : Polluants organiques persistants  
PP : Polypropylène  
PS : Polystyrène  
PST : Post Shredder Technology (Technologie post-broyage)  
PU : Polyuréthane  
RB : Résidus de broyage  
RBA : Résidus de broyage automobile. Broyat obtenu à l'issue des opérations suivantes sur les VHU : dépollution, démontage de certaines pièces, broyage des carcasses et élimination des métaux contenus dans le broyat.  
RBE : Résidus de broyage des DEEE  
RB léger (ou « fluff ») : Fraction légère post-broyage, après récupération magnétique du fer et de l'acier  
RB lourds : Fractions lourdes post-broyage, après récupération magnétique des ferreux  
REP : Responsabilité élargie du producteur  
RFB : Résidus fins de broyage  
ROB : Résidus organiques de broyage  
STEP : Stations d'épuration  
TGAP : Taxe générale sur les activités polluantes  
UIOM : Unité d'incinération d'ordures ménagères  
VHU : Véhicules hors d'usage  
XRT : Rayons X par transmission  
Zorba : Fraction riche en métaux non ferreux issue du tri par courant de Foucault sur les RB lourds

# 1 Objectifs de l'étude

Les objectifs fixés par la directive européenne 2000/53/CE sur les VHU à l'horizon du 1<sup>er</sup> janvier 2015 sont de 85 % pour la réutilisation + recyclage et de 95 % pour la réutilisation + valorisation.

Par comparaison, les taux effectivement atteints en France en 2010 étaient respectivement de 80,8 % pour la réutilisation + recyclage et de 84,8 % pour la réutilisation + valorisation. Si l'objectif de réutilisation et recyclage semble pouvoir être atteint sans trop de difficultés, le taux de valorisation (intégrant la valorisation énergétique) semble plus difficile à atteindre, compte tenu des modes opératoires actuels de l'ensemble de la filière.

Dans ce contexte de renforcement des objectifs de valorisation, les auteurs ont réalisé pour l'association RECORD une étude dont les objectifs sont les suivants :

- effectuer un état de l'art de la valorisation énergétique des résidus de broyage en Europe, en expliquant les disparités de situations, en mettant en particulier en évidence les parts respectives des procédés traditionnels et des procédés en développement
- décrire la nature des gisements de VHU et de résidus de broyage disponibles en France (en tonnage et en répartition géographique)
- analyser les caractéristiques physiques et thermochimiques des résidus de broyage potentiellement disponibles pour une valorisation énergétique
- dresser un état de l'art technico-économique détaillé des différents procédés envisageables pour la valorisation énergétique des résidus de broyage, leurs atouts et contraintes respectifs, leurs performances technico-économiques et les verrous à lever
- effectuer une analyse prospective (2015 et au-delà) de la filière, du gisement jusqu'à la valorisation, sachant que les prochains développements (par exemple les évolutions dans le domaine du tri) vont faire évoluer certains paramètres comme les gisements de résidus de broyage, en quantité et en composition.

Ces résultats permettent d'identifier les contraintes de toutes natures (techniques, économiques, environnementales) susceptibles d'entraver le développement des procédés couverts par l'étude et les leviers d'amélioration envisageables pour favoriser leur développement.



## 2 Méthodologie

L'état de l'art portant sur la valorisation énergétique en Europe des VHU et des résidus de broyage a été réalisé au moyen :

- d'une analyse bibliographique détaillée au plan international, puis de l'exploitation des documents identifiés.
- d'une vingtaine d'entretiens avec des experts français et étrangers.

La liste détaillée des acteurs interrogés est fournie en annexe 5.

La liste des documents analysés est présentée en Annexe 6.

Neuf pays ont été sélectionnés pour la comparaison internationale (chapitre 5), en accord avec le comité de pilotage : Allemagne, Autriche, Belgique, Espagne, France, Grande-Bretagne, Pays-Bas, Suède et Suisse. Ces pays ont été choisis car ils reflètent la diversité des situations rencontrées en Europe en matière de valorisation des RB :

- l'Allemagne, l'Autriche, l'Espagne, la Suède et la Suisse ont des taux de valorisation énergétique des RB relativement élevés, tout en ayant fait des choix technologiques très contrastés
- un éclairage a été effectué sur la situation en Belgique, qui privilégie le recyclage mécanique et se retrouve avec des refus de tri de RB en quantités importantes
- en Grande-Bretagne, le contexte réglementaire est en profonde évolution
- aux Pays-Bas, depuis cinq ans, le développement de la filière de valorisation des RB est soumis aux fluctuations du contexte réglementaire.

En outre, ces pays présentent l'avantage de fournir des statistiques généralement considérées comme fiables.

### 3 Inventaire et caractérisation des gisements de RB disponibles en France

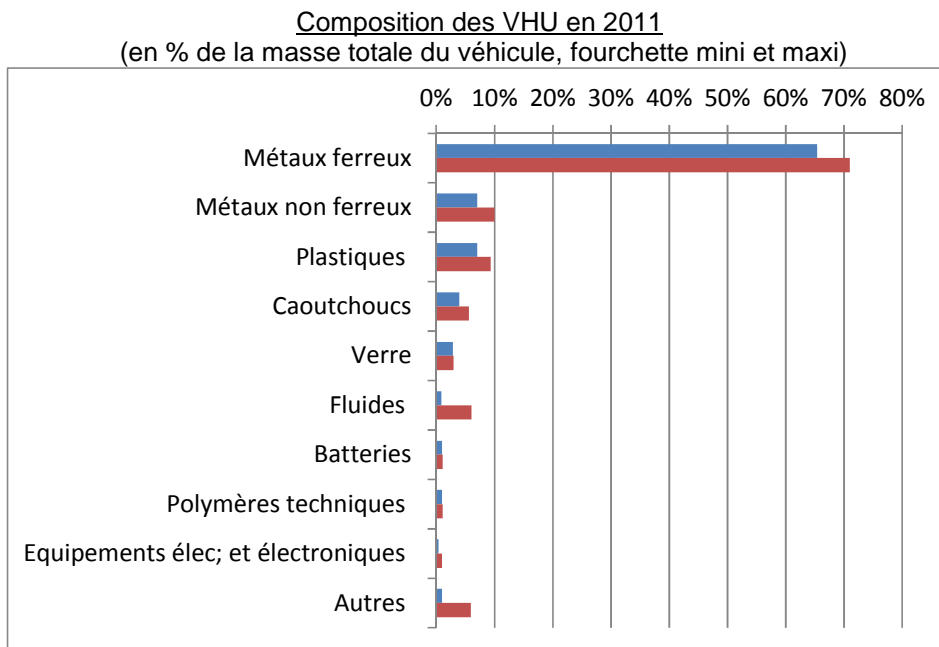
Le présent chapitre décrit les caractéristiques actuelles des principaux gisements de résidus de broyage en France, ainsi que leurs perspectives d'évolution.

#### 3.1 Situation actuelle

##### 3.1.1 Les VHU

###### 3.1.1.1 Le gisement

Plus de 1,5 million de VHU ont été pris en charge par la filière agréée en 2011, soit un tonnage de 1,5 Mt. Ce chiffre est proche du nombre théorique de VHU qui est de l'ordre de 1,5 à 1,7 million d'unités.



Source: I.Vermeulen,etal.,Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from ELVs and its recycling, energy or chemicals' valorisation, J.Hazard.Mater. (2011), doi:10.1016/j.jhazmat. 2011.02.088

###### 3.1.1.2 La dépollution

La qualité des opérations de dépollution laisse encore à désirer dans de nombreux centres de traitement. Par voie de conséquence, le RB léger contient des composés susceptibles de polluer lors de la valorisation énergétique. Ils contiennent des huiles usagées, des batteries au plomb, des CFC dans les systèmes de climatisation, des retardateurs de flamme dans certaines pièces plastiques, du mercure dans certains équipements électriques, etc....

La réglementation interdit l'usage du mercure, sauf dans les lampes à décharge. Depuis 2003, l'usage du mercure dans les véhicules est totalement proscrit. Officiellement, il ne devrait donc plus y avoir de mercure dans les véhicules, mais en pratique on en trouve encore dans certaines lampes à décharge et dans les lampes de rétro-éclairage.

Si la dépollution des véhicules n'est pas réalisée conformément aux règles en vigueur, on risque dans les années à venir d'être confronté au basculement du RBA de la catégorie « déchets non dangereux » vers la catégorie « déchets dangereux ».

### 3.1.1.3 Le démontage des VHU

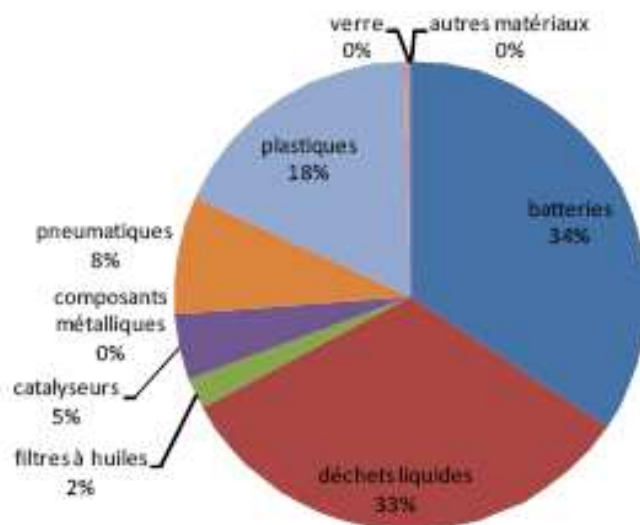
Le décret n°2011 – 153 (article R.543 – 158 – 1) impose à chaque constructeur automobile de reprendre gratuitement puis de traiter les pneumatiques usagés que leur remettent les centres VHU agréés.

D'autre part, depuis juillet 2013, les gestionnaires de centres de démontage de VHU ont l'obligation de démonter au minimum 5 % de matières non métalliques (hors déchets issus de la phase de dépollution) par rapport à la masse totale des VHU traités. Sachant que les pneus représentent environ 3 %, cela signifie qu'il restera environ 2 % d'autres matières à démonter.

Une faible proportion des moteurs est démontée avant broyage. Il s'agit des moteurs qui contiennent une proportion significative d'aluminium (moteurs avec culasses en aluminium).

Le graphique ci-après montre la répartition des quantités extraites ou démontées des VHU en 2010, par type de composant. Les déchets liquides, les batteries et les plastiques représentent 85 % du poids total démonté. Le réemploi est prépondérant.

Contribution de chaque composant démonté au démontage des VHU avant broyage



Source : ADEME (Observatoire de la filière VHU – Rapport annuel) - Situation en 2010 - Septembre 2011

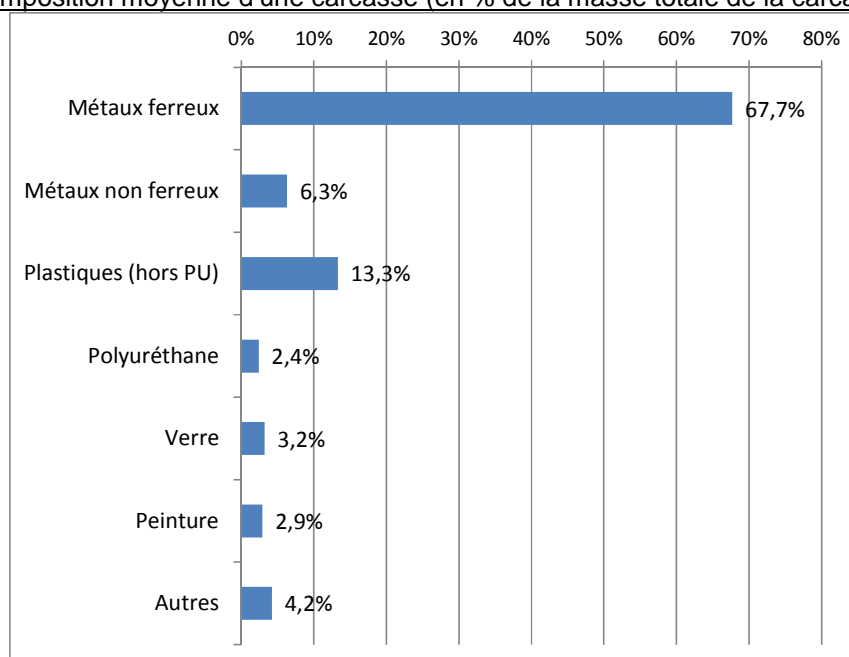
### 3.1.1.4 Les carcasses

En 2011, plus de 1,1 million de carcasses de VHU ont été confiées aux broyeurs agréés français par les centres VHU. La différence avec les prises en charge des centres VHU agréés s'explique notamment par l'export de certaines carcasses vers des installations d'autres États membres de l'Union européenne (principalement la Belgique et l'Espagne) et par l'existence de stocks de VHU chez les centres VHU.

### VHU pris en charge par la filière (année 2011)

	Centres VHU et broyeurs		
	Nombre	Tonnage	Tonnage unitaire moyen (t)
TOTAL VHU pris en charge	1 515 432	1 501 859	0,99
Voitures particulières	1 425 589	1 400 453	0,98
Véhicules utilitaires	88 411	101 028	1,14
Cyclomoteurs à 3 roues	1 432	378	0,26

### Composition moyenne d'une carcasse (en % de la masse totale de la carcasse)



Source: Galloo Plastics (adapté de "Environmental Improvement of Passenger Cars" - Joint Research Centre - Commission européenne – 2008)

#### 3.1.1.5 Le broyage

La dernière étape du processus est le broyage des carcasses dans de gros broyeurs industriels.

Le résidu de broyage (RBA) obtenu est défini<sup>1</sup> comme le broyat obtenu à l'issue des opérations suivantes sur les VHU : dépollution, démontage de certaines pièces, broyage des carcasses et élimination des métaux contenus dans le broyat. Cette fraction représente 15 à 25 % du poids initial du VHU.

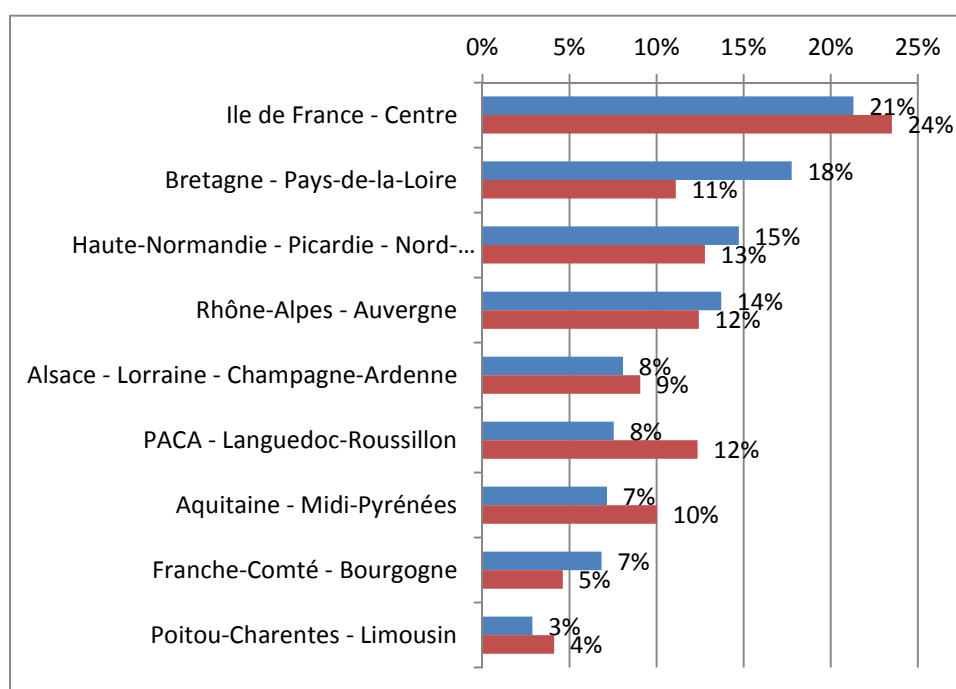
<sup>1</sup> Dans certaines sources, le RBA est défini comme la fraction résiduelle issue du broyage, mais avant l'élimination des métaux (soit environ 75% du poids initial du VHU). Cette définition n'a pas été retenue dans le présent rapport.

### 3.1.1.6 Répartition géographique de la production de RBA

On observe des différences assez sensibles entre la répartition régionale des tonnages de carcasses traités par les broyeurs et la répartition démographique régionale. Les zones « Ile-de-France – Centre » et « PACA – Languedoc Roussillon » présentent un déficit en nombre de carcasses traitées.

Les casses non-agrées constituent le principal facteur explicatif des écarts entre les tonnages de VHU traités et les populations par zones géographiques. Les actions du MEDDE devraient conduire en 2015 à rééquilibrer la situation, en particulier en PACA et en Languedoc-Roussillon.

Répartition régionale des tonnages de carcasses traités par les broyeurs  
Comparaison avec la démographie régionale



	% des tonnages de carcasses traitées
	% de la population nationale

Source : Estimation réalisée par l'ADEME dans le cadre de la présente étude pour évaluer les gisements de résidus de broyage de VHU par groupements régionaux. Pour des raisons de confidentialité, les chiffres sont ventilés selon 9 inter-régions.

### 3.1.2 Les gisements de RB autres que les VHU

La plupart des broyeurs traitent simultanément des VHU et d'autres déchets ménagers (GEM hors froid, jouets, emballages...) ou industriels (déchets de la construction / démolition...).

Selon FEDEREC, les 12 Mt de ferrailles collectées<sup>2</sup> en France se décomposent en:

- ¼ de VHU
- ¼ de chutes neuves
- ¼ de ferrailles de démolition
- ¼ de ferrailles légères provenant des encombrants et de DEEE. Ce gisement, issu principalement des récupérateurs, contient environ 30 % de poussières.

<sup>2</sup> Source : FEDEREC, à travers un entretien avec le cabinet BIO-IS, en charge de l'étude en cours de réalisation pour OCAD-3E sur les gisements de DEEE.

### 3.1.2.1 Les DEEE

Les DEEE contenus dans les ferrailles légères<sup>3</sup> destinées aux gros broyeurs sont estimés à 10 % du flux de ferrailles légères, soit environ 300 kt<sup>4</sup>. Il s'agit presque exclusivement de GEM froid<sup>5</sup>.

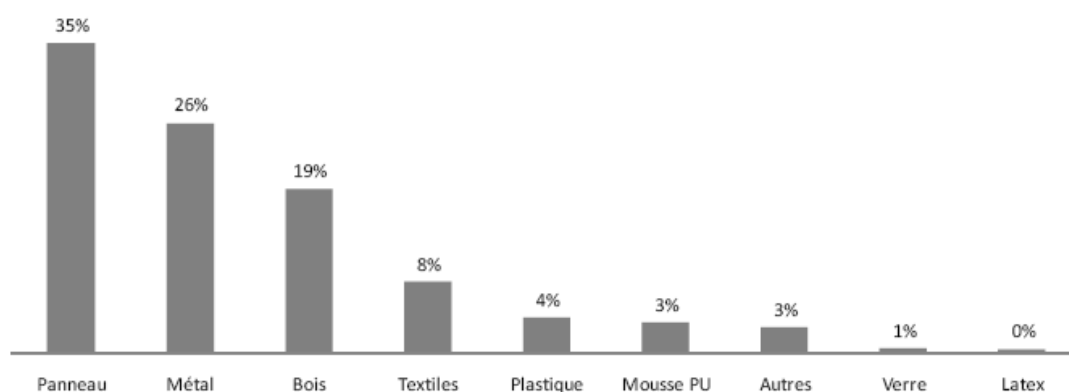
Pour les opérateurs de gros broyeurs<sup>6</sup>, il est techniquement important d'ajouter des DEEE aux flux de carcasses à broyer, afin d'éviter le risque de coincement des marteaux. Ils n'utilisent que du GEM HF, car ces équipements en fin de vie ne contiennent ni polluants ni retardateurs de flamme bromés<sup>7</sup>. Par contre, ils n'utilisent pas de GEM froid<sup>8</sup> (qui suit une filière de dépollution séparée et contient quelques RF bromés), ni de PAM et équipements de bureautique (qui ne sont pas correctement broyés dans les gros broyeurs à marteaux).

### 3.1.2.2 Les meubles usagés

Le gisement de mobilier usagé est estimé entre 2,2 et 3,2 Mt/an en 2009, dont 2,1 Mt de mobilier ménager et assimilé et environ 575 kt de mobilier professionnel.

Le tonnage des matériaux combustibles (bois, panneaux, plastiques, mousses PU, latex, textiles) atteint presque 70 % du gisement total, soit 1,8Mt.

Figure 11 : Répartition par matériau des tonnages de mobilier usagé



Source : ADEME : « Dimensionnement et cadrage de filières pour la gestion des mobiliers ménagers et professionnels usagés » - Rapport Final - Novembre 2010.

Nous n'avons pas identifié de source décrivant la répartition des flux de meubles usagés par voies de valorisation / élimination en France (réemploi, recyclage, enfouissement). Toutefois, il est certain qu'une part importante est réemployée ou mise en décharge. D'autre part, certains centres de tri traitent des meubles usagés à fort contenu en bois issus des déchetteries, en vue de la préparation de CSR.

Le recoupement des informations obtenues auprès des broyeurs montre que les meubles usagés représentent actuellement 5 à 10 % des entrées des broyeurs.

<sup>3</sup> Parfois appelé « Platin ».

<sup>4</sup> Source : FEDEREC, à travers un entretien avec le cabinet BIO-IS, en charge de l'étude en cours de réalisation pour OCAD-3E sur les gisements de DEEE.

<sup>5</sup> Les autres exutoires des DEEE sont la collecte sélective (en 2010, 552kt de DEEE (ménagers et professionnels) ont été traitées dans le cadre de la filière REP), les exportations légales vers l'UE pour recyclage sous contrat et les exportations non déclarées, en particulier vers l'Asie. Les exportations totales (légales et non déclarées) sont estimées à 140 kt de DEEE.

<sup>6</sup> Source : Entretien avec Pellenc ST – Septembre 2013.

<sup>7</sup> A l'exception de certains panneaux avant de fours à micro-ondes.

<sup>8</sup> Le GEM froid (appareils de réfrigération) contient des CFC dans les mousses d'isolation et doivent être traités séparément dans des installations de broyage dédiées permettant la récupération des CFC. Pour les PAM et les téléviseurs on utilise des petits broyeurs.

### 3.1.2.3 Chutes neuves

Les chutes neuves sont généralement envoyées directement vers les aciéries électriques ou font l'objet d'un cisailage préalable. Ces déchets sont composés en quasi-totalité de métaux.

### 3.1.2.4 Ferrailles de démolition, gisements divers

Ces autres gisements sont composés principalement de déchets de construction / démolition, des ferrailles issues de déchets industriels et commerciaux (rails,...), d'encombrants ménagers (vélos,...) et des déchets issus des refus de tri de la collecte sélective des emballages métalliques.

Selon leur qualité, ils peuvent contenir entre 5 et 40 % de matières résiduelles non métalliques<sup>9</sup>. La composition et les tonnages de ces ferrailles d'origines diverses sont très mal connus. Il est toutefois certain que la proportion des métaux dans ces flux est très prépondérante.

## 3.1.3 Synthèse des tonnages traités par les gros broyeurs de VHU

Bien qu'aucune donnée précise ne soit disponible sur le sujet, il semble d'après les recoupements que les flux de ferrailles dirigées vers les gros broyeurs représentent entre 3 et 4 Mt/an.

Estimation des flux envoyés vers les gros broyeurs ( kt)

Gisements	Tonnage	Destinations	Tonnage traité dans les gros broyeurs en France	Répartition en %	Principaux matériaux contenus
VHU	1500	Broyeurs en France Export	1100	≈ 30 %	Acier Plastiques Mousses Elastomères
Chutes neuves	3000	Broyeurs en France Cisailage en France Export	1000	≈ 25 %	Acier
Ferrailles de démolition	3000	Broyeurs en France Cisailage en France Export	1000 à 1500	25 à 35 %	Acier
Ferrailles légères (GEM hors froid, meubles usagés...)	3000	Gros broyeurs Autres broyeurs Export Traitement direct en aciérie	500, dont 250 à 300 de GEM HF	≈ 15 %	Acier Plastiques
Total			3000 à 4100		

<sup>9</sup> Thèse de P.F Bareel- « La valorisation des résidus de broyage de déchets métalliques » -- Université de Liège – 2009/2010.

### 3.1.4 Principales caractéristiques du RB

En moyenne, le RB est constitué de 50 % de plastiques, 18 % de mousses, 8,5 % de caoutchoucs, 19 % de bois et de fines. Le tableau ci-dessous illustre les principales caractéristiques physiques du RB observées dans différents pays. Il a été établi en compilant diverses données issues de la littérature<sup>10</sup>. Ces fourchettes sont intéressantes pour notre analyse car, en l'absence de données individuelles précises sur le périmètre français, elles permettent de se faire une idée de la variabilité des caractéristiques du RB. Il convient de considérer ces données comme des ordres de grandeur, les sources utilisées pouvant couvrir des champs différents et porter sur des années différentes.

#### Caractéristiques des RB intéressantes en vue de la valorisation énergétique (hors métaux ferreux et non-ferreux).

*(fourchettes de variation des principales caractéristiques du RB, issues de la compilation de données issues de la littérature)*

Critère		Unité	Fourchettes de variation selon le RB considéré
PCI		MJ/kg	18 à 25
Teneur en cendres		%	18 à 69
Taux d'humidité		%	2 à 24
Teneur en chlore		%	0,5 à 3,7
Teneur en soufre		%	0,02 à 0,55
Teneurs en métaux	Cuivre	ppm	5000 à 35000
	Chrome	ppm	30 à 500
	Plomb	ppm	70 à 2700
	Cadmium	ppm	10 à 155
	Zinc	ppm	7000 à 17000
	Mercur	ppm	0,1 à 1,7

<sup>10</sup> La plupart des données résultent d'une compilation de: "Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from ELVs and its recycling, energy or chemicals' valorisation » - Journal of Hazardous Materials – 2011.



## 3.2 Analyse prospective (situation 2015 et au-delà)

### 3.2.1 Facteurs d'évolution du résidu de broyage

Le tableau ci-dessous résume les principaux facteurs d'évolution des RB en France à moyen terme.

**Facteurs d'évolution des RB à l'horizon 2015 et au-delà**

Facteurs d'évolution des flux de RB	Tendance 2015-2020	Impact sur :	
		le tonnage de RB	Le tonnage des fractions combustibles
Nombre de VHU broyés	Gisement des VHU : tendance stable en nombre de véhicules et ralentissement de l'accroissement des tonnages. Le marché automobile étant arrivé à maturité depuis plusieurs années, le nombre de VHU ne devrait plus augmenter de manière significative.	⇒	⇒
Proportion des VHU traités en France	Cette proportion risque de diminuer si la fuite des VHU vers l'étranger se développe avec une intensité analogue à celle que l'on observe depuis quelques années dans plusieurs pays voisins de la France.	Risque ⇩	Risque ⇩
Proportion des pièces plastiques démontées avant broyage	<p>La directive 2000/53/EC recommande de faciliter le démontage, la réutilisation et le recyclage des VHU.</p> <p>Deux scénarios extrêmes sont envisageables en fonction du niveau de démontage des VHU avant broyage :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Scénario « démontage minimal »</u>. La plupart des pièces restent sur la carcasse qui est ensuite broyée. Plastique, mousse, caoutchouc, textile, verre se retrouvent donc dans les résidus de broyage (RBA).</li> <li>- <u>Scénario « démontage sélectif poussé »</u> : La plupart des pièces sont déposées (sièges et banquettes, pare-brise et vitre, pare-chocs, tableau de bord, textiles, ...). Plastiques, mousse, caoutchouc, textile, verre sont donc majoritairement séparés, les pièces sont entières et peu salies.</li> </ul> <p>En l'absence d'éléments tangibles pour définir l'évolution prévisible à moyen terme, nous faisons l'hypothèse que la proportion des pièces démontées restera au même niveau qu'actuellement.</p>	Hypothèse moyenne ⇒	Hypothèse moyenne ⇒
Diminution de la proportion des DEEE dans le RB	<p>Une part croissante des DEEE (y compris le gisement des DEEE professionnels) sera dirigée vers des broyeurs spécialisés, au fur et à mesure de la montée en puissance de la filière REP. Actuellement, la filière traite environ 15 % du gisement de DEEE (soit 6 à 7 kg/habitant) et ce taux devrait grimper à terme jusqu'à environ 65 %. Deux conséquences principales au niveau des caractéristiques du RB :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- une diminution progressive de la proportion de plastiques contenant des retardateurs de flamme dans les RB (à terme, ces plastiques subsisteront uniquement dans certains faisceaux) ;</li> <li>- une diminution de la proportion des styréniques dans le RB.</li> </ul>	⇩	⇩
Diminution de la proportion des meubles usagés	<p>Le décret du 6 janvier 2012 n°012-22 a officialisé la mise en place d'une filière REP pour l'ameublement usagé (ménager et professionnel). Deux éco-organismes ont été certifiés fin 2012 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- « Valdelia » pour les meubles</li> </ul>	⇩	⇩

	<p>professionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- « Eco-mobilier » pour les meubles ménagers.</li> </ul> <p>D'ici 3 à 5 ans, une partie des meubles usagés traités actuellement par les broyeurs devrait être progressivement détournée vers les filières de valorisation spécialisées, entraînant une diminution sensible de la proportion de meubles usagés dans le RB.</p>		
Diminution du poids d'acier dans les VHU	<p>Le tonnage moyen d'acier dans un véhicule à moteur à combustion interne devrait passer de 770kg en 2000 à 432kg en 2020 (recherche de l'allègement des véhicules dans le but de réduire la consommation de carburant). En 2010, le tonnage moyen d'acier était de 625kg dans les véhicules hybrides et de 380kg dans les véhicules électriques<sup>11</sup>.</p> <p>Cela explique la tendance très nette à la réduction du poids des véhicules. Le pic de poids a eu lieu vers 2006. Les véhicules d'aujourd'hui pèsent 100 à 150kg de moins que les véhicules remplacés.</p>	↓	
Augmentation du poids des métaux non-ferreux dans les VHU	<p>Le tonnage moyen de métaux non-ferreux (aluminium principalement) dans un véhicule à moteur à combustion interne devrait passer de 139kg en 2000 à 223kg en 2020</p>	↑	
Augmentation du poids des plastiques dans les VHU	<p>L'augmentation de la proportion des plastiques dans les véhicules devrait concerner en priorité les thermoplastiques.</p> <p>Augmentation de la proportion des plastiques chargés.</p>		↑
Diminution du poids du verre dans le RB	<p>Les pare-brise, vitres arrière et vitres latérales seront de plus en plus souvent démontés avant broyage.</p>	↓	
Diminution du poids des caoutchoucs dans le RB	<p>Les pneus seront tous démontés avant broyage.</p> <p>Augmentation de la proportion des caoutchoucs TPE, plus difficiles à recycler.</p>		↓

### 3.2.2 Evolution du résidu de broyage à moyen-terme

La proportion des VHU dans le flux total traité par les unités de broyage<sup>12</sup> devrait augmenter sensiblement à moyen-terme, sous l'effet de la montée en puissance de la filière REP DEEE (qui prendra en charge des flux croissants de GEM non-froid) et de la filière « Meubles usagés ». D'autre part, les gisements de chutes neuves et de ferrailles de démolition contiennent une proportion élevée de métaux.

Compte tenu de ces deux facteurs, on estime qu'une grande majorité du tonnage des résidus de broyage (hors métaux) proviendront des VHU à moyen-terme. De ce fait, la question de savoir s'il serait souhaitable de séparer le RBA des autres RB va progressivement perdre de son intensité.

En outre, on assistera à une diminution de la proportion de métaux ferreux, de verre et de caoutchoucs et à une augmentation des proportions de métaux non-ferreux et de plastiques dans le RB.

<sup>11</sup> Source : "Exploring recycling challenges along the automotive value chain" – Project "S\_Life" - ARN - Gert van der Have - ARN Advisory - Mulhouse - 12th November 2012.

<sup>12</sup> Cette proportion varie actuellement selon le pays et selon le broyeur, dans une fourchette comprise entre 27% et 85%, la moyenne européenne se situant autour de 55%.

## 4 Principales voies de valorisation énergétique des VHU

### 4.1 Typologie des procédés / technologies

#### Technologies matures

Les procédés de valorisation énergétique les plus utilisés au plan industriel en Europe pour les RB et en particulier les RBA sont<sup>13</sup> :

- l'incinération dans des UIOM
- la co-combustion dans des cimenteries

L'utilisation du résidu de broyage comme agent réducteur dans des hauts-fourneaux est limitée à un nombre très restreint d'industriels.

#### Technologies en développement

Les procédés thermochimiques (gazéification, pyrolyse et dépolymérisation thermique)<sup>14</sup>, qui permettent de convertir le RB en combustibles liquides ou gazeux, n'ont pas encore dépassé le stade du pilote ou du démonstrateur pré-industriel et leur degré de développement actuel rend difficilement envisageable leur contribution à la valorisation énergétique des RB en 2015 en France. Ils sont toutefois analysés dans la présente étude, dans une perspective de moyen terme (2020).

Il n'est pas possible de définir clairement si les procédés du type « Waste to oil » ou « Waste to fuel » doivent être (ou non) considérés ou non comme de la valorisation énergétique. Ils appartiennent en effet à une « zone grise » dans la mesure où les législations nationales ne sont pas toujours en phase. Les choix qui seront faits par le législateur auront « in fine » un impact significatif sur les possibilités d'atteinte du taux de 10 % de valorisation énergétique des VHU.

L'introduction de RBA dans des fours électriques en sidérurgie n'est pas pratiquée aujourd'hui. Elle fait toutefois l'objet de réflexions et pourrait s'avérer intéressante dans le futur.

Chaque procédé / technologie est décrit ci-après à travers les rubriques suivantes<sup>15</sup> :

- Description du procédé
- Références au plan mondial (pilotes, démonstrateurs, unités industrielles).

#### Nota :

- 1- La possibilité d'incorporer du RBA dans des fours de fusion de métaux non-ferreux (plomb, cuivre) est analysée en annexe 4. Dans le cas des fours de fusion de cuivre, les tests ont démontré que l'utilisation de déchets présente un intérêt économique dès lors que leur teneur en cuivre est supérieure à 5 %, ce qui n'est pas le cas du RBA. Cette application a donc été écartée.
- 2- L'emploi de RB dans des incinérateurs industriels reste extrêmement limité (une installation identifiée). Cette application est décrite dans le présent chapitre.

---

<sup>13</sup> Les procédés de recyclage chimique sont exclus du champ de l'étude car ils ne consistent pas en une valorisation énergétique des déchets (bien que certains procédés de recyclage chimique se déroulent à des températures pouvant dépasser 200°C).

<sup>14</sup> Ces procédés entrent dans le cadre de la « valorisation thermique » au sens de la Directive européenne (cf. directive déchets, article 3).

<sup>15</sup> Certaines filières sont traitées de façon plus succincte du fait des enjeux plus faibles qu'elles représentent.

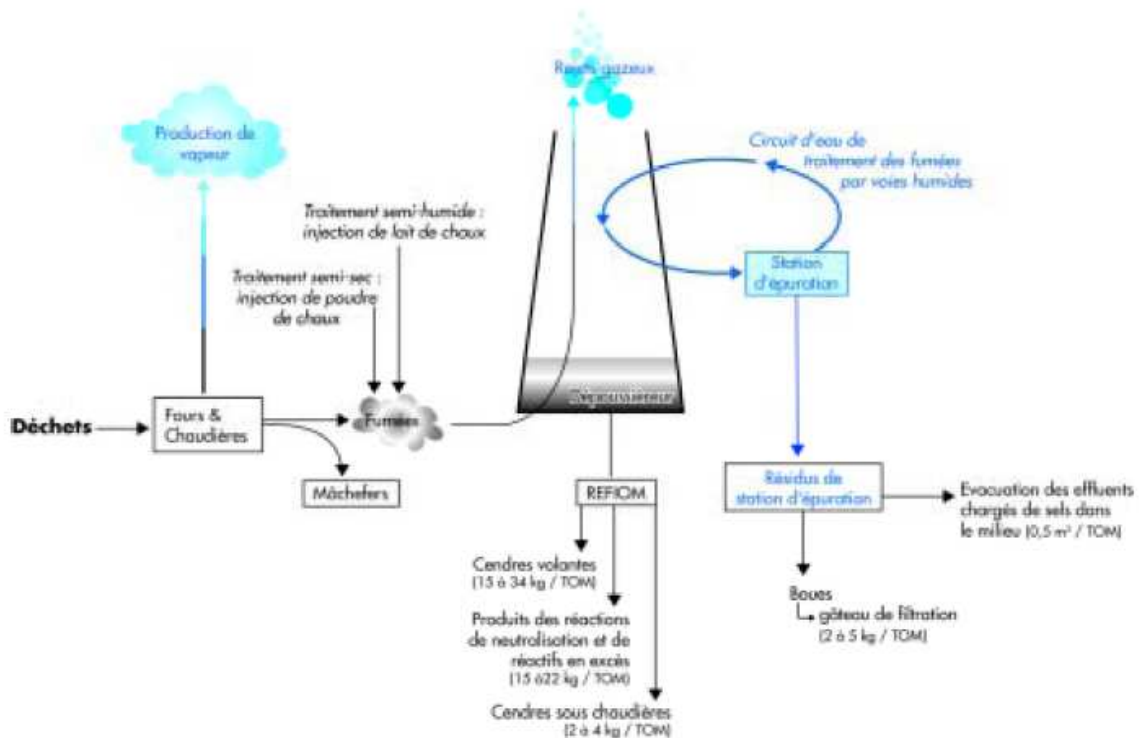
## 4.2 Technologies matures

### 4.2.1 Co-incinération dans des UIOM

#### 4.2.1.1 Description du procédé

L'incinération dans une UIOM consiste à mélanger le RB avec d'autres déchets (ordures ménagères, boues de STEP....). Ceci permet d'éviter un apport calorifique trop brutal qui résulterait de l'introduction d'un déchet à PCI élevé et pourrait nuire aux conditions de combustion.

Elle peut être effectuée dans les différents types de fours (fours à grille, à plateaux ou à lit fluidisé).



Source : L'incinération des déchets en Île-de-France : Considérations environnementales et sanitaires – Décembre 2005 – IAURIF / ORS Ile-de-France.

#### 4.2.1.2 Expérience industrielle

##### Démonstrateurs et tests industriels

Localisation / exploitant / procédé	Description
UIOM de Würzburg (All.)	<p>Tests industriels effectués en 2006 avec du RBE par MHKW, avec le soutien de PlasticsEurope.</p> <p>Les tests menés sur un four à grille ont montré qu'il est possible de d'incinérer sans difficulté jusqu'à 26 % de RB issu de DEEE (téléviseurs, circuits imprimés, mousses d'isolation) ou 7 à 10 % de RBA (en poids) avec des OM, avec un taux de fonctionnement de 90 %.</p> <p>Granulométrie: Copeaux d'environ 2 cm.</p>

Suisse	Des tests approfondis d'incinération du RB avec des OM ont été réalisés dans les incinérateurs de Horgen et Bazenhaid avec jusqu'à 10 % de RB, sans dépasser les limites d'émission réglementaires.
Allemagne, Espagne, Suède.	Des tests d'incinération de RBA et d'OM ont été réalisés dans ces pays au début des années 2000, avec des taux de RBA jusqu'à 20 % en poids <sup>16</sup> .  En Suède, le combustible RB léger envoyé dans les UIOM est composé d'un mélange de RB et d'autres déchets industriels (papiers, plastiques.....). La proportion de RB dans le silo de stockage d'entrée ne dépasse jamais 10 %.
Sleco (Belgique)	Tests effectués en 2011 sur l'incinérateur à lit fluidisé SLECO de la société Indaver (Anvers) en incinérant une charge 25 % <b>RBA lourd</b> , 25 % RDF et 50 % boues de STEP. Four à lit fluidisé (voir détails en Annexe 2).
Scandinavie	Les opérateurs scandinaves d'UIOM cherchent activement des sources alternatives de déchets pour compenser la baisse tendancielle des tonnages d'OMR disponibles. Cinq d'entre eux ont réalisé des tests qui ont montré que l'on peut atteindre jusqu'à 12 % en poids de RBA léger sans nuire à la stabilité de la combustion, à la qualité des émissions gazeuses et à la corrosion des installations (source : entretiens réalisés par les auteurs en juillet 2013 avec 5 opérateurs d'UIOM scandinaves).

### Unités industrielles

Localisation / exploitant / procédé	Description
Suisse	<p>Le tonnage de RB incinéré dans des UIOM en Suisse a atteint 63 kt en 2011, dont 20 kt de RBA. La charge introduite dans les incinérateurs est composée d'un mélange de RB provenant de VHU et d'autres déchets (y compris des produits blancs).</p> <p>Sur les 30 UIOM exploités en Suisse, 11 traitent du RB (+ 3 en Allemagne et 1 en France). La capacité de traitement de ces 30 incinérateurs est de 3,5 Mt de déchets/an.</p> <p>Le RB incinéré dans les UIOM ne fait l'objet d'aucune préparation spécifique. La seule contrainte à respecter est de limiter à 5 % la teneur maximale en RBA dans la charge.</p>
Allemagne	<p>Actuellement, tout le RB non recyclé est incinéré dans des incinérateurs municipaux ou industriels, les prix de cession des déchets étant très bas du fait de la forte surcapacité d'incinération.</p> <p>La proportion de RB léger traitée dans les incinérateurs ne dépasse pas 10 %. Ceci s'explique principalement par la crainte des opérateurs d'une déstabilisation de la combustion, des émissions gazeuses et de la production de résidus, du fait en particulier de la présence de déchets chlorés.</p>
Procédé ZAR (Suisse)	<p>Le procédé Thermo-Ré est utilisé en Suisse pour récupérer les fines de métaux (non-ferreux, précieux) dans les mâchefers d'incinération. Il présente en outre l'avantage de réduire sensiblement le volume de déchets ultimes mis en décharge.</p> <p>Procédé utilisé dans deux des trois lignes de l'incinérateur de Hinwil (Canton de Zürich).</p> <p>Voir détails en Annexe 2.</p>

<sup>16</sup> Voir par exemple:

- P. Ferrão, P. Nazareth, J. Amaral, Strategies for meeting EU end-of-life vehicle reuse/recovery targets, J. Ind. Ecol. 10 (2006) 77–93.

- L. Aae Redin, M. Hjelt, S. Marklund, Co-combustion of shredder residues and municipal solid waste in a Swedish municipal solid waste incinerator, Waste Manage. Res. 19 (2001) 518–525.

## 4.2.2 Incinération du RBA dans des incinérateurs industriels

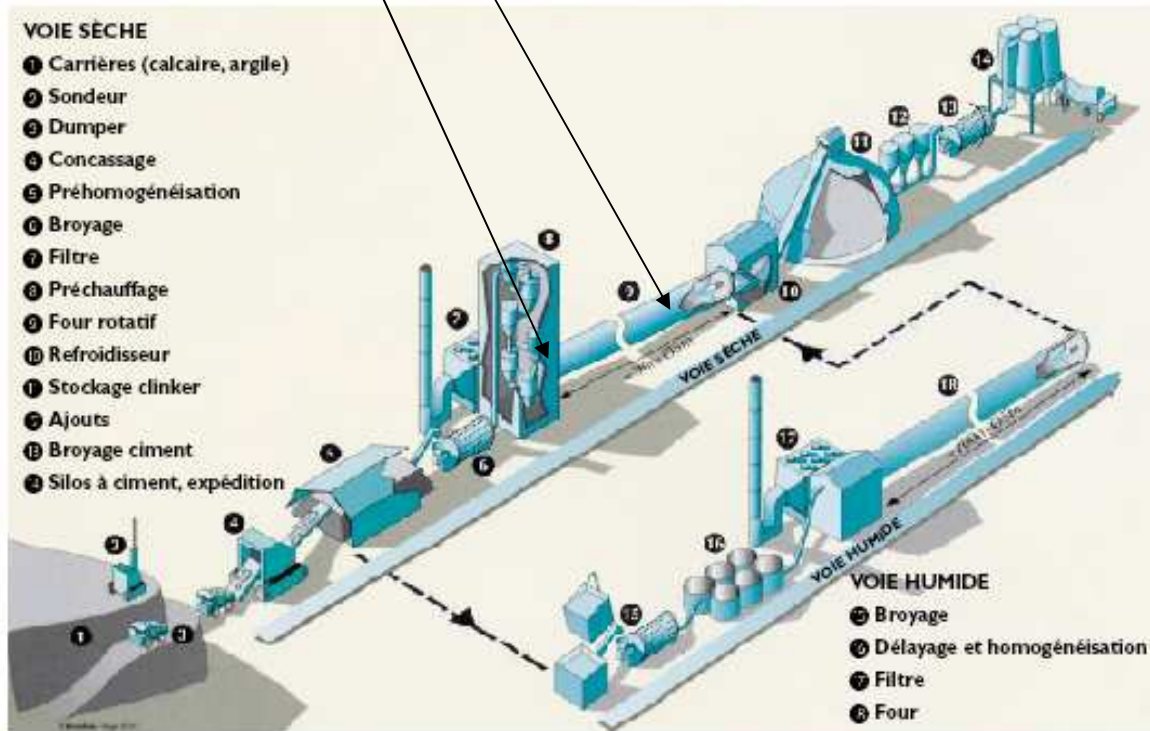
Au Japon, Nissan Motor a démarré en 2005 un incinérateur dans son usine automobile d'Oppama, après l'avoir adapté pour le traitement d'un mélange de RBA et de déchets de production. L'unité traite 5000 t/an. La vapeur produite est utilisée dans l'usine pour les ateliers de peinture. Cette utilisation du RBA est peu répandue.

## 4.2.3 Co-combustion en cimenterie

### 4.2.3.1 Description du procédé

L'injection du RB peut théoriquement être effectuée à deux niveaux :

- en tuyère, dans le four rotatif.
- dans la tour de pré-calcination (préchauffage), en amont du four à ciment



Source : SFIC

### 4.2.3.2 Expérience industrielle

Localisation / exploitant / procédé	Description
Espagne	Le RB utilisé par les cimentiers est utilisé exclusivement dans les précalcinateurs, les contraintes de granulométrie étant trop fortes pour les tuyères du four. La teneur en chlore ne pose pas de problèmes à condition que le taux de substitution reste raisonnable. On n'observe pas d'impact significatif sur le colmatage dans la zone de pré-calcination, ni sur les émissions atmosphériques.
Suède	Le RB léger consommé par une cimenterie du pays fait l'objet d'une préparation préalable consistant à éliminer le PVC et le cuivre par flottation. La teneur maximale en chlore du produit envoyé dans le précalcinateur est de 0,7 %.



## 4.2.4 Utilisation du RB dans des hauts-fourneaux

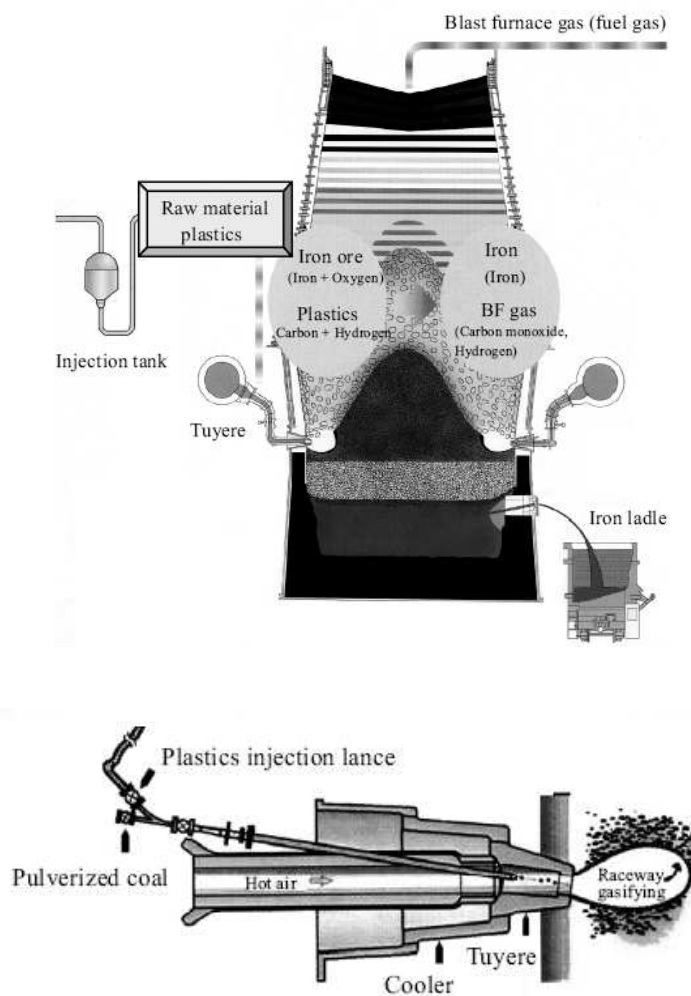
### 4.2.4.1 Description du procédé

La charge, dont la granulométrie a été préalablement ajustée par broyage à 2mm, est introduite dans la tuyère d'injection du haut-fourneau au moyen d'un flux d'air sous pression, puis injectée dans le haut-fourneau. Elle est instantanément transformée en mélange CO + H<sub>2</sub> (la température à l'intérieur du haut-fourneau étant >2000°C).

Une autre solution consiste à fondre ou à pré-dégrader thermiquement la charge (par extrusion dégradante, pyrolyse ou hydrogénation) afin de détruire complètement les matières organiques et de dissoudre les éléments des cendres dans la fonte et dans le laitier.

Voest Alpine a montré que 40 % de la charge est de l'apport « recyclage » et que 60 % est de l'apport énergétique.

Schéma de principe du haut-fourneau et de la tuyère d'injection (source : NKK (Japon))



#### 4.2.4.2 Expérience industrielle

Localisation / exploitant / procédé	Degré de développement
Stahlwerke Bremen (Allemagne)	<p>L'aciérie ArcelorMittal de Brême (anciennement « Stahlwerke Bremen ») a utilisée des déchets plastiques prétraités dans un vieux haut-fourneau pendant quelques années. Elle a interrompu l'utilisation de ces déchets en 2006 pour des raisons à la fois techniques et économiques (au début, l'entreprise se faisait payer pour traiter les déchets, puis elle a été obligée de payer lorsque la demande de RDF s'est développée).</p> <p>Selon Stena Metall<sup>17</sup>, il y a des doutes sur la réalité des quantités de RB léger revendiquées par les media professionnels allemands concernant un usage dans des hauts-fourneaux. Les sidérurgistes semblent très réticents à utiliser les fractions issues des procédés Sicon (ou similaires), car « ils ont beaucoup plus à perdre (qualité de l'acier produit) qu'à gagner ». La valeur marchande des matériaux traités est en effet sans commune mesure avec le potentiel d'économies sur le coût du combustible.</p>
Voest Alpine (Autriche)	Des tonnages de RB léger sont utilisés par le sidérurgiste autrichien, après préparation par le procédé SiCon, mais jamais en tant que source principale.

<sup>17</sup> Entretien avec Christen Forsgren - Environmental & Technical Director R&D Department – Stena Metall AB – 12 décembre 2012.



## 4.3 Technologies en développement

### 4.3.1 Procédés de gazéification

#### 4.3.1.1 Description des procédés

La gazéification est un processus thermique opérant dans une plage de température généralement supérieure à 700-800°C, à pression élevée, qui permet de traiter des déchets contenant une fraction combustible en présence d'une quantité réduite d'oxygène. La quantité d'air est généralement de 30 % à 40 % de la quantité totale d'air nécessaire pour la combustion complète de la fraction organique de la charge.

Les produits de sortie sont principalement :

- un gaz de synthèse constitué majoritairement d'un mélange CO + H<sub>2</sub>, plus ou moins chargé en goudrons ainsi qu'en autres polluants selon la composition des déchets traités. Le gaz peut être débarrassé des goudrons soit par craquage thermique grâce à une torche à plasma<sup>18</sup> soit par lavage. Le gaz ainsi épuré des goudrons peut être soit brûlé sur site pour produire de la chaleur ou de l'électricité, soit utilisé dans un procédé tiers en substitution du gaz naturel ou d'autres combustibles, soit utilisé comme produit de départ pour la synthèse de carburants (diesel, essence, éthanol et autres alcools) par synthèse Fischer et Tropsch, pour la synthèse du naphta ou pour la fabrication de méthanol de synthèse ;
- un résidu solide composé principalement d'un résidu carboné, de cendres et de métaux. Ce résidu, après séparation des métaux, est susceptible d'être valorisé sous certaines conditions.

#### 4.3.1.2 Expérience industrielle

A l'exception du Japon, les procédés de gazéification du RBA en sont encore au stade pilote. On observe toutefois un intérêt croissant pour l'utilisation de ce type de déchets. Les développements les plus prometteurs portent sur l'utilisation du RBA en mélange avec d'autres déchets comme les OMR, les pneus usagés ou les déchets de biomasse.

Localisation / exploitant / procédé	Description
Ebara (procédé TwinRec), Japon	Environ 20 unités sont en opération au Japon (fabrication d'électricité) dont certaines utilisent du RB.
Wiederkehr Recycling AG (Suisse)	<p>Ce projet consistait à fabriquer un gaz combustible par gazéification de RBA pour alimenter la cimenterie de la société Jura Ciment à Wildegg (Suisse).</p> <p>Les tests effectués ont montré que la teneur en métaux lourds dans le gaz de synthèse était &lt; 0,002 %, en conformité avec les limites imposées par la réglementation suisse (Bafu).</p> <p><u>Le projet a été abandonné</u> en 2010 car jugé non rentable. L'efficacité énergétique globale de la filière ne dépasserait pas 35 %. D'autre part, les spécifications techniques requises pour le gaz produit ne pouvaient être atteintes dans des conditions économiques acceptables.</p>
Thermoselect (Japon)	Le procédé développé par Thermoselect est basé sur une pyrolyse suivie d'une gazéification à température élevée (jusqu'à 2000°C). Il produit du gaz de synthèse,

<sup>18</sup> Une torche à plasma est un dispositif qui consiste à provoquer un arc électrique entre une anode et une cathode et y injecter de l'air ou un autre gaz afin d'obtenir un plasma (gaz ionisé). La température au sein du plasma est supérieure à 1500°C.

	<p>du soufre, des métaux et des minéraux. Sept lignes sont en opération au Japon. La seule ligne exploitée en Europe (Karsruhe, Allemagne) a été fermée du fait de problèmes techniques récurrents.</p>
Innovative Environmental Solutions (IES) – Grande-Bretagne <sup>19</sup>	<p>L'installation prévue comprend 4 modules de gazéification basés sur le procédé RODECS breveté par la société Chinook Sciences Ltd (GB), filiale de Chinook Sciences LLC (USA).</p> <p>Capacité : 350 000 t/an de RBA et de RBE (produits blancs)</p> <p>Production : 40 MW d'électricité et 190 000 tonnes de matériaux recyclés (plastiques, verre, agrégats pour la construction et métaux).</p> <p><u>L'unité est en cours de construction</u> dans les West-Midlands. Aucune information sur le degré réel d'avancement du projet n'a pu être obtenue.</p> <p>(Voir détails en Annexe 2).</p>
Ecoloop	<p>Démonstrateur de 32 MW en construction.</p> <p>(Voir détails en Annexe 2).</p>
Energem (procédé Biosyn)	<p>Pilote (depuis 2003) sur lequel ont été testés des RBA</p> <p>Démonstrateur (depuis 2009)</p> <p>Unité industrielle, mais pas destinée à traiter du RBA (en construction)</p> <p>(Voir détails en Annexe 2).</p>
Alter-NRG	<p>Gazéification à contre-courant alimentée par des torches à plasma.</p> <p>Deux unités industrielles fonctionnent au Japon sur des déchets ménagers, boues de STEP, RBA, pour la fabrication d'éthanol ou de chaleur + électricité.</p> <p>(Voir détails en Annexe 2).</p>
Advanced Plasma Power (Grande Bretagne)	<p>Tests effectués sur un pilote de 1,8 t/jour, avec des déchets municipaux, DIB, RBA, RDF, déchets dangereux, boues de STEP.</p> <p>La vitrification des résidus au moyen d'une torche à plasma constitue une spécificité du procédé.</p> <p>(Voir détails en Annexe 2).</p>

<sup>19</sup> Association entre European Metal Recycling (EMR, USA) et Chinook Sciences Ltd (GB)

## 4.3.2 Procédés de pyrolyse et de dépolymérisation thermique

### 4.3.2.1 Description des procédés

**La pyrolyse** est un processus thermique opérant dans la plage de 350 à 800°C, qui permet de traiter des déchets en l'absence d'oxygène. Elle conduit à la production :

- d'une fraction combustible (huile) pouvant être valorisée énergétiquement sur le site de production, ou valorisée (matière ou énergie) dans un autre procédé ;
- d'un gaz pauvre qui est le plus souvent brûlé sur site pour fournir l'énergie nécessaire aux réactions de pyrolyse et au séchage éventuel de la charge entrante ;
- d'un sous-produit solide (coke de pyrolyse, souvent appelé « char ») constitué de carbone fixe<sup>20</sup> et de la fraction incombustible du déchet traité.

Les rendements respectifs des trois catégories de produits dépendent de la composition de la charge, de la température, du PCI de la charge et du temps de résidence du RB dans le réacteur.

On distingue :

- la pyrolyse conventionnelle, menée à des températures de 350 à 600°C, à pression atmosphérique. Le temps de séjour élevé des gaz dans le réacteur favorise la production de gaz,
- la pyrolyse rapide, effectuée sous vide, qui favorise la production de liquides, dont une proportion élevée d'huiles lourdes.

La **dépolymérisation thermique** permet de transformer des polymères (plastiques, élastomères) en monomères ou oligomères par apport de chaleur, sans qu'un réactif chimique n'intervienne dans les réactions de coupure des chaînes. Les déchets sont chauffés progressivement jusqu'à environ 400 - 450°C. Au cours de la dépolymérisation, les chaînes longues carbonées sont transformées en chaînes plus courtes, principalement dans la plage C8 à C20.

### 4.3.2.2 Expérience industrielle

#### Pilotes et démonstrateurs

Localisation / exploitant / procédé	Description
PKA (Allemagne), Pyromelt, TRW (Japon), PyroArc (Suède).....	<p>De nombreux procédés ont été développés dans le passé pour traiter des RBA et d'autres charges variées par pyrolyse (PKA<sup>21</sup> (Pyrolyse Kraftanlagen), Pyromelt (Lurgi) permettant d'obtenir un résidu vitrifié [155], TWR (Siemens; Schwel-Brenn; TWR/Mitsui).</p> <p>Ces procédés sont basés sur l'utilisation de RBA en mélange avec d'autres déchets (OM, déchets de biomasse) afin de réguler l'apport calorique et d'amortir les fluctuations des propriétés physiques de la charge.</p> <p>Le procédé PyroArc a été développé par ScanArc Plasma Technologies AB (Suède). Il comprend une pyrolyse suivie d'une vitrification des produits minéraux. Un pilote est en opération depuis 1986.</p> <p>Aucun de ces procédés n'a émergé au niveau industriel pour le traitement du RB.</p>
Stena Metall (Suède, Finlande)	<p>Deux unités pilotes sont opérationnelles, à Gothenburg et à Hengstat. Elles sont basées sur un procédé de pyrolyse micro-onde (dépolymérisation thermique).</p> <p>Des tests sont effectués pour évaluer la faisabilité d'utiliser le gaz de synthèse pour des « metal smelters », une unité de méthanol ou comme combustible de remplacement du</p>

<sup>20</sup> Le carbone fixe désigne la part de carbone qui ne se dévolatilise pas sous le seul effet de la température (par exemple, pour le bois, il s'agit du charbon de bois).

<sup>21</sup> T. Malkow, Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal, Waste Manage. 24 (2004) 53–79.

	gaz naturel.
Comet Traitement (Belgique)	<p>Le projet PHOENIX vise à développer un procédé de dépolymérisation thermique pour traiter :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- des déchets ultimes issus du RB léger, composés principalement de mousses, de textiles et de bois (c'est-à-dire ce qui reste quand on a retiré les métaux, les plastiques recyclables et les minéraux du RB léger)</li> <li>- des fractions non recyclables issues du RB lourd. Pour ce type de déchet, la proportion en halogénés ne doit pas dépasser 7 à 8 %. La teneur en PCB, en fluor et en métaux volatils doit également être limitée, ce qui conduit souvent à des opérations de préparation des déchets avant traitement énergétique.</li> </ul> <p>Ce procédé semble prometteur pour plusieurs raisons :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Il s'appuie sur une technologie originale de dépolymérisation thermique et catalytique (réacteurs de pyrolyse à 300 à 350°C, en absence totale d'oxygène). Le procédé a été validé sur petit pilote jusqu'en 2012. Un pilote de 100kg/h va démarrer au 1<sup>er</sup> trimestre 2013.</li> <li>- Les travaux en cours semblent sérieux. La valorisation des VHU constitue le cœur de métier de la société Comet Traitement, qui conçoit ce procédé exclusivement pour une application « RB », alors que la plupart des autres procédés existants revendiquent la possibilité de faire de la dépolymérisation thermique de déchets plastiques de toutes natures.</li> </ul>

### 4.3.3 Utilisation du RB dans des fours électriques (acier)<sup>22</sup>

En Europe, malgré de multiples tests industriels, aucun aciériste ne s'est lancé dans cette voie.

Cette application reste pourtant d'actualité (voir détails au chapitre 7).

<sup>22</sup> Les entretiens effectués confirment qu'aucun essai n'a été réalisé concernant l'introduction directe de carcasses de VHU dans des fours électriques au Japon.

## 5 Etat de l'art de la valorisation énergétique des VHU en Europe

Ce chapitre dresse un panorama de la situation en Europe sous deux angles :

- situation de la valorisation énergétique des VHU dans neuf pays européens<sup>23</sup> représentatifs de la diversité des situations rencontrées en Europe
- comparaison des performances observées et identification des principales causes des disparités entre ces pays.

### 5.1 Situation par pays

#### 5.1.1 Des situations très contrastées

Les situations de la valorisation énergétique des RB dans les différents pays étudiés sont très contrastées. Ceci résulte principalement de trois facteurs :

- d'une part, il existe des différences structurelles au niveau des filières de traitement post-broyage. Ces différences conduisent à la production de fractions non recyclables dont les volumes et les caractéristiques sont très différentes d'un pays à l'autre (par exemple, les broyeurs belges sont à la pointe de la technologie en termes de recyclage matière, ce qui fait que les fractions disponibles pour la valorisation énergétique ne représentent que de faibles quantités de résidus ultimes
- d'autre part, certains secteurs industriels potentiellement consommateurs de RB ont fait preuve d'un fort degré de volontarisme en matière de valorisation énergétique du RB (secteur cimentier en Espagne, secteur sidérurgique en Autriche)
- enfin, il existe des différences significatives au niveau des contextes réglementaires et économiques des pays étudiés, en particulier au niveau de la réglementation relative à la mise en décharge, des coûts de mise en décharge et de la reconnaissance de l'incinération des RB comme de valorisation énergétique à part entière.

La situation de chaque pays est décrite dans les paragraphes ci-après.

#### 5.1.2 Allemagne

Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : n.d
Taux de réutilisation + valorisation : 108,2 %
Taux de réutilisation + recyclage : 93,4 %
Taux de valorisation énergétique : 14,8 %

Source : Eurostat

Nota : Le taux de réutilisation + recyclage doit être relativisé dans la mesure où l'Allemagne considère comme du recyclage matière les quantités importantes de RB mises en enfouissement dans d'anciennes mines de sel.

L'incinération dans des incinérateurs municipaux est la principale voie de valorisation énergétique des RB. Le parc des UIOM en Allemagne est en situation de forte surcapacité (le prix moyen de cession des OMR est de l'ordre de 30€/tonne). Les quantités de RB traitées restent toutefois limitées à 10 % de la charge des incinérateurs. La valorisation énergétique du RB contribue au chauffage urbain puisque 15 à 25 % des logements (variable selon le Land considéré) sont connectés à un réseau de ce type.

<sup>23</sup> Les raisons du choix des pays analysés sont explicitées au chapitre 2.

La combustion en cimenterie est peu développée. Les standards de qualité des combustibles de substitution définis par l'industrie cimentière supposeraient en effet un prétraitement coûteux du RB, rendant cette solution non compétitive par rapport à l'incinération dans des UIOM.

La co-combustion dans les centrales thermiques est également pratiquée mais elle se limite aux centrales au lignite ou au charbon les plus anciennes, les chaudières Benson des centrales modernes ne pouvant pas accepter de RB pour des raisons technologiques.

L'environnement réglementaire est très strict puisque la mise en décharge est interdite, sauf pour les déchets ayant subi un prétraitement (moins de 5 % de carbone organique et PCI inférieur à une valeur plafond) ainsi que pour les déchets inertes<sup>24</sup>.

En outre, l'Allemagne dispose d'un tissu très étoffé d'entreprises innovantes dans les technologies de préparation et de tri des déchets (Ti-Tech, Steinert...). C'est un atout pour le secteur du broyage du RB, qui peut bénéficier en priorité des innovations technologiques.

### 5.1.3 Autriche

#### Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : 13 200 t
Taux de réutilisation + valorisation : 97,6 %
Taux de réutilisation + recyclage : 82,8 %
Taux de valorisation énergétique : 14,8 %

Source : Eurostat

Le taux élevé de valorisation énergétique du RBA<sup>25</sup> s'explique par le choix du sidérurgiste autrichien Voest Alpine d'alimenter plusieurs de ses hauts-fourneaux en RB.

Le RB est séparé en 4 fractions :

- Métaux → recyclage
- Fluff → mélangé à des boues de STEP pour réduire leur teneur en eau, puis incinéré dans des UIOM.
- Granulés (composés principalement de plastiques) → utilisés comme agent réducteur dans des hauts fourneaux.
- Sable : → construction de routes.

### 5.1.4 Belgique

#### Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : 19 700 t
Taux de réutilisation + valorisation : 90,6 %
Taux de réutilisation + recyclage : 88,2 %
Taux de valorisation énergétique : 2,4 %

Source : Eurostat

La Belgique a opté pour une stratégie privilégiant le recyclage mécanique des fractions recyclables issues d'installations de broyage de RB de grande capacité.

<sup>24</sup> On notera toutefois que l'Allemagne affiche une limite à 5% de carbone organique mais demande une dérogation à la Commission pour pouvoir continuer à stocker du 17% de carbone organique contenus dans ses stabilisants.

<sup>25</sup> D'après les statistiques Eurostat, 24% du RB léger est mis en décharge. En pratique, ce pourcentage correspond à des tonnages incinérés dans des UIOM dont le taux de récupération d'énergie est trop faible pour que le tonnage soit comptabilisé en valorisation énergétique. Seul 2 à 3% va réellement en décharge.

La valorisation énergétique reste à un faible niveau. Outre une faible consommation par un incinérateur en Flandres, une partie du RBA est utilisée en cimenterie. Malgré la légère surcapacité d'UIOM en Belgique, le RB n'est pas incinéré en UIOM car les prix demandés par les gestionnaires d'incinérateurs sont très élevés.

Une part importante du RB non recyclable est mise en décharge, malgré le niveau élevé de la taxe (60 à 90 EUR/t).

### 5.1.5 Espagne

#### Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : 135 800 t
Taux de réutilisation + valorisation : 87,4 %
Taux de réutilisation + recyclage : 82,9 %
Taux de valorisation énergétique : 4,5 %

Source : Eurostat

La combustion des RB en cimenterie s'est développée en Espagne. L'industrie cimentière espagnole a commencé à utiliser du RB dès 1998. Le RB est préalablement préparé par les broyeurs au moyen d'un sur-tri des métaux résiduels par courant de Foucaud et par séparation magnétique.

Le RB est utilisé exclusivement dans les précalcinateurs. La teneur en chlore ne pose pas de problème à condition que le taux de substitution reste raisonnable (on n'observe pas d'impact significatif sur le colmatage de la zone de pré-calcination, ni sur les émissions atmosphériques).

En novembre 2012, les industriels du secteur cimentier et l'industrie du broyage ont conclu un accord pour porter la part du RB léger de 10 % actuellement à environ 50 % des combustibles de substitution utilisés par les cimenteries en 2015.

### 5.1.6 France

#### Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : 286 800 t
Taux de réutilisation + valorisation : 84,8 %
Taux de réutilisation + recyclage : 80,8 %
Taux de valorisation énergétique : 4,0 %

Source : Eurostat

Il y a environ 130 unités d'incinération de déchets non dangereux en France. L'usine de la société Citron (aujourd'hui fermée) prenait des RBA en valorisation énergétique. Tredi à Salaise (38) reçoit des RBA de Suisse. Pour ce qui est des autres UIOM françaises, il semble que certaines en prennent un peu (mais pas en grandes quantités).

D'autre part, plusieurs cimenteries françaises valorisent des RBA depuis de nombreuses années, par exemple la cimenterie de Montalieu-Vercieu (38).

Le dispositif mis en place par les pouvoirs publics depuis 2010 prévoit une augmentation de la taxe sur la mise en décharge, qui augmentera par paliers de 15 EUR/tonne de déchets en 2009 à 40 EUR/tonne en 2015.

Enfin, les décisions du Grenelle de l'environnement risquent de brider toute augmentation des capacités des UIOM.

### 5.1.7 Grande-Bretagne

#### Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : ns
Taux de réutilisation + valorisation : 85,6 %
Taux de réutilisation + recyclage : 83,4 %
Taux de valorisation énergétique : 2,2 %

Source : Eurostat

Environ 700 à 800 kt de RBA sont mis en décharge chaque année.

L'incinération des RB est très peu développée, pour plusieurs raisons :

- il y a peu de capacités d'incinération disponibles
- les opérateurs d'UIOM sont réticents à traiter du RB à cause du PCI élevé (chaque tonne de RB traitée empêche l'incinération de plus d'une tonne d'OM)
- les opérateurs d'UIOM sont en attente de clarifications sur l'application de la formule R1.

La combustion en cimenterie est pratiquée à petite échelle.

Dans ce contexte, les industriels du broyage et du recyclage cherchent à développer en priorité la séparation des plastiques recyclables et du verre contenus dans le RB, le reste étant mis en décharge. Ainsi, la société Norton a développé un procédé de préparation du RBA, en coopération avec la société Axion, conduisant aux fractions suivantes :

- 60 % de déchets aptes au recyclage mécanique
- 40 % de déchets mélangés, dont 20 % sont traités en cimenterie et 20 % sont mis en décharge.

Au plan réglementaire, les négociations entre le BMRA et le DEFRA ont abouti en 2012 à l'élaboration d'un projet de « guidances » qui précise la transposition de l'Annexe II de la directive européenne 2008/98/CE et qui fixe un cadre pour la valorisation énergétique des déchets industriels et commerciaux, au même titre que ce qui existe déjà avec la formule R1 pour les déchets ménagers<sup>26</sup>. Le BMRA a obtenu que le traitement du RBA et des déchets industriels et commerciaux traités dans les installations thermiques de traitement des déchets soit reconnu comme de la valorisation énergétique et non pas comme de l'élimination. Ce document devrait devenir officiel prochainement.

Ces guidelines seront probablement révisées au cours des 2 ou 3 prochaines années, au fur et à mesure de l'affinage des données concernant l'efficacité énergétique des différents procédés thermiques (incinération, gazéification, pyrolyse...).

La stratégie de la filière de traitement des VHU à l'horizon 2015 consiste à tirer parti au maximum des progrès technologiques récents en matière de séparation et de recyclage des plastiques d'une part et de valorisation énergétique d'autre part :

- Les sociétés SIMS et EMR (qui représentent à elles deux 60 % du marché du broyage) investissent dans de nouvelles installations de valorisation énergétique, ce qui leur permettra de se rapprocher du taux de 10 %
- Norton (10 % du marché) atteindra 95 % recyclage matière, 5 % de valorisation énergétique et 5 % de mise en décharge
- Les 10/12 autres broyeurs (qui se répartissent les 30 % restant du marché) n'ont pas encore choisi s'ils privilégient le recyclage matière ou la valorisation énergétique.

<sup>26</sup> Ces « guidances » s'appuient sur la hiérarchie des voies de valorisation des déchets de l'Annexe II de la directive, et adaptent l'approche méthodologique au cas de la combustion du RB. Les installations se situant au-dessus du seuil de 0,6 (sur la base de la formule R1) sont déclarées comme étant des installations de valorisation énergétique.



On constate un intérêt très vif des grands groupes intégrés de broyage / recyclage pour développer leurs propres voies de valorisation énergétique des RB. Longtemps en attente d'un cadre clair sur les exigences nécessaires pour atteindre le niveau R1 dans un procédé thermique, deux compagnies ont engagé récemment des projets de construction d'usines spécialisées dans le traitement du RBA:

- European Metal Recycling (EMR) a démarré la construction d'une unité de dépolymérisation thermique dédiée au RB ;
- SIMS a plusieurs projets à court terme.

### 5.1.8 Pays-Bas

#### Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : 31 600 t
Taux de réutilisation + valorisation : 96,2 %
Taux de réutilisation + recyclage : 83,1 %
Taux de valorisation énergétique : 13,1 % (beaucoup plus faible en 2012)

Source : Eurostat

Depuis cinq ans, le développement de la filière de valorisation des RB aux Pays-Bas a varié selon les fluctuations du contexte réglementaire. La taxe sur la mise en décharge des déchets a été portée à 107,5€/tonne en janvier 2010, provoquant une quasi-disparition de la mise en décharge des RB au profit de l'incinération. Puis cette taxe a été annulée au début de 2012 et remplacée par une interdiction de mise en décharge de tous les déchets, à l'exception des déchets ultimes dont la valorisation ne conduit à aucune application possible sur le marché. Depuis cette date, les broyeurs remettent en décharge les fractions non recyclées. En pratique, les tonnages traités par valorisation énergétique en 2012 sont certainement très inférieurs à ceux de 2010.

Deux unités de recyclage de grande capacité sont en activité :

- une unité basée sur le procédé SiCon, démarrée en mai 2011 et complétée par un procédé de traitement des plastiques de la société Galloo Plastics. L'usine traite 30 000 t/an de RB, qui est séparé en trois fractions principales : minéraux (sable...), fibres et plastiques. Une partie des plastiques est ensuite séparée en plusieurs étapes en fractions PP, PE, ABS etc. en vue du recyclage ;
- une unité basée sur le procédé Comirec, dont les performances sont moindres que celles du procédé SiCon en matière de séparation.

La capacité totale de ces deux unités est actuellement de 100 kt/an, ce qui ne suffit pas pour traiter les 160 kt de matières broyées chaque année en Hollande (32 kt provenant des VHU). Il est prévu de porter la capacité de l'unité SiCon à 100 000 t/an.

A l'horizon 2015, il est prévu que seuls les déchets ultimes à fort contenu en PVC seront encore mis en décharge.

### 5.1.9 Suède

#### Données clés (année 2011)

Gisement de RBA (tonnes) : ns
Taux de réutilisation + valorisation : 90,8 %
Taux de réutilisation + recyclage : 84,4 %
Taux de valorisation énergétique : 6,4 %

Source : Eurostat

Deux voies de valorisation énergétique sont utilisées pour les RB légers :

- la combustion en cimenterie (précalcinateur). Le RBA fait l'objet d'une préparation préalable consistant à éliminer le PVC par flottation ainsi que le cuivre (teneur de 0,7 % en chlore).

- L'incinération dans des UIOM (en situation de surcapacité), sachant que la proportion de RB dans la charge ne dépasse jamais 10 %.

Les RB lourds sont envoyés en décharge.

Deux unités pilotes de gazéification sont opérationnelles (à Gothenburg et à Hengstat) basées sur un procédé de pyrolyse micro-onde (dépolymérisation thermique). Différents tests ont été effectués pour évaluer la faisabilité d'utiliser le gaz de synthèse pour des fours de fusion de déchets métalliques, pour une unité de méthanol ou comme combustible de remplacement du gaz naturel. Ces deux projets devraient permettre d'accroître le taux de valorisation énergétique à l'horizon 2015.

Une unité de recyclage des plastiques issus du RBA est également en projet (démarrage prévu en 2013). D'autres unités devraient suivre.

### 5.1.10 Suisse

#### Données clés (année 2010)

Gisement de RBA (tonnes) : ns Taux de réutilisation + valorisation : 100 % Taux de réutilisation + recyclage : 0 % Taux de valorisation énergétique : 100 %
--

Source : Eurostat

La Suisse a été le premier pays au monde à traiter tous ses RB par l'incinération dans des UIOM (dans 11 incinérateurs en Suisse, 3 en Allemagne et un incinérateur en France). Aucune préparation complémentaire de la charge n'est effectuée en aval du tri magnétique et du tri par courant de Foucaud.

Ce choix relève d'une politique publique qui donne la préférence à l'incinération plutôt qu'au recyclage mécanique, qui aurait obligé à mettre en décharge une fraction de résidus ultimes de l'ordre de 10 à 20 %, impossible à valoriser (même en cimenterie) du fait de sa teneur très élevée en métaux lourds et en chlorés.

La qualité du RB produit par les broyeurs suisses est réputée élevée. L'autodiscipline observée en matière de d'élimination des fluides de transmission, de fluides réfrigérants et de carburant par les 70 démonteurs opérant dans le pays contribue fortement à ce résultat.

Les efforts se portent maintenant vers la valorisation des résidus ultimes d'incinération, afin de réduire leur volume et de valoriser les métaux qu'ils contiennent (voir détails sur le procédé Thermo-Ré en Annexe 2).

Les enseignements de la politique suisse en matière de valorisation des RB doivent toutefois être considérés avec prudence :

- d'une part, la Suisse n'est pas soumise à la limite de 10 % de valorisation énergétique imposée par la directive européenne à l'horizon 2015 ;
- d'autre part, les VHU font l'objet d'une dépollution très stricte (lubrifiants...) qui conduit à un RBA dont la qualité est supérieure à celle du gisement de RBA disponible en France.

## 5.2 Panorama des performances comparées en matière de valorisation des VHU

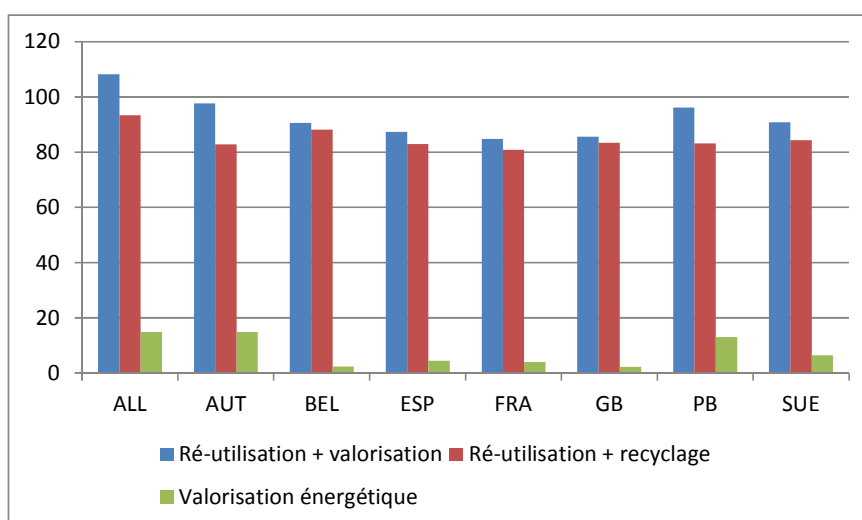
### 5.2.1 Taux de valorisation des VHU

En 2011, pour les pays analysés (hors Suisse) :

- le taux de réutilisation + valorisation se situait entre 84,8 % (France) et 100 % (Allemagne)
- le taux de réutilisation + recyclage se situait entre 80,8 % (France) et 93,4 % (Allemagne)
- le taux de valorisation énergétique se situait entre 2,2 % (Grande-Bretagne) et 14,8 % (Allemagne et Autriche).

La Suisse constitue un cas à part puisqu'elle incinère 100 % de son RB, mais n'est pas soumise à l'objectif de 85 % de taux de réutilisation + recyclage en 2015 fixé par l'Union européenne. Le taux de valorisation énergétique des VHU dans ce pays est probablement de l'ordre de 20 %.

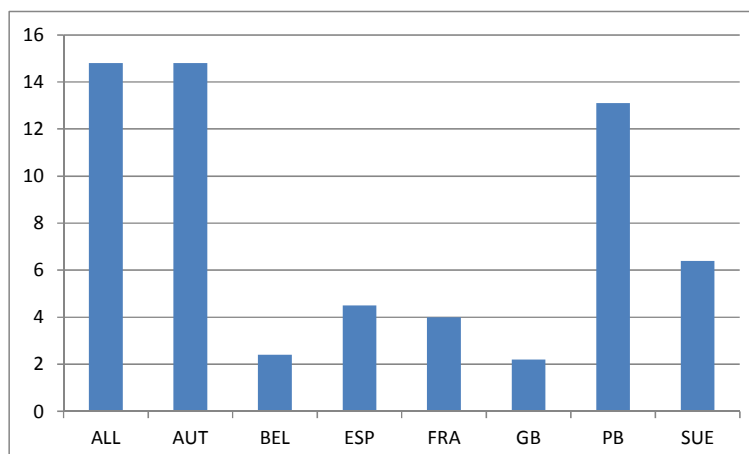
Taux de recyclage, de valorisation énergétique et de valorisation totale des VHU (année 2011, en %)



Source : Eurostat

En 2011, les pays les plus avancés au plan de la valorisation énergétique des VHU étaient l'Allemagne, les Pays-Bas, l'Autriche et la Suède.

Focus sur le taux de valorisation énergétique des VHU (année 2011, en %)



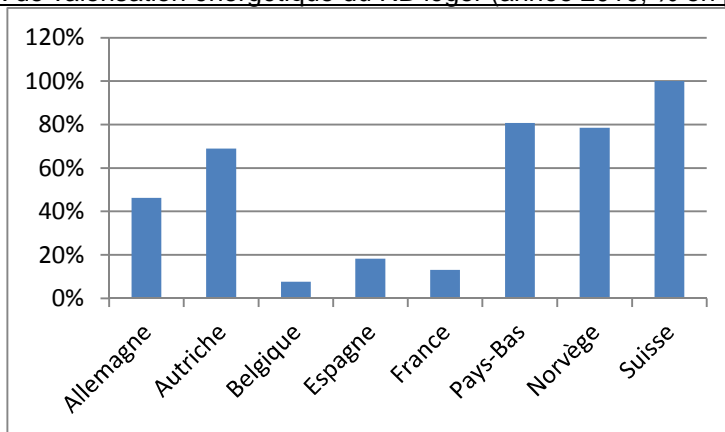
Source : Eurostat

## 5.2.2 Valorisation énergétique du RB léger

Pour mémoire, le RB léger (ou « fluff ») est composé principalement de films plastiques, de mousses, de métaux non ferreux, de tissus et de fines (bois, poussières...) <sup>27</sup>.

En Allemagne, Autriche, Pays-Bas, Suisse et Suède les taux de valorisation énergétique du RB léger sont supérieurs à 30 %. La Belgique, l'Espagne et la France ont des taux inférieurs à 10 %.

Taux de valorisation énergétique du RB léger (année 2010, % en poids)



Source : Eurostat. Les données relatives à la Suède et à la Suisse (non renseignées par Eurostat) sont basées sur des dires d'experts.

Nota : L'Allemagne ne déclare qu'un seul flux global, imputé dans la rubrique « RB léger ».

On ne dispose de statistiques d'évolution sur la période 2006-2011 que pour quatre pays. L'Allemagne, et l'Autriche ont enregistré des accroissements très significatifs de leurs taux de valorisation énergétique du RB léger, tandis que la Belgique a peu progressé et que les tonnages traités en France ont diminué de moitié.

Evolution 2006-2011 du taux de valorisation énergétique du RB léger

	2006	2011
Allemagne	11,8 %	46,0 %
Autriche	23,1 %	69,0 %
Belgique	2,7 %	8,0 %
France	26,5 %	13,0 %

Source : Eurostat

Nota : Pour l'Allemagne, il s'agit du RB total.

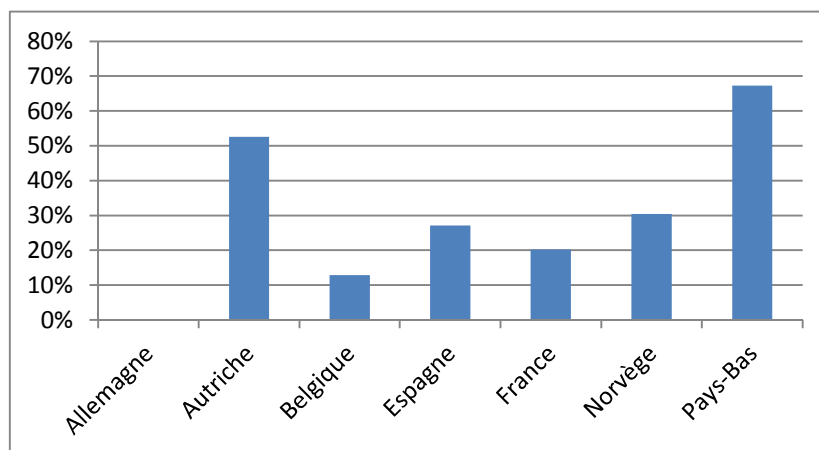
<sup>27</sup> Fractions correspondant aux codes 191003 (fluff-light fraction and dust containing dangerous substances) et 191004 (fluff-light fraction and dust other than those mentioned in 19 10 03) du Catalogue européen des déchets (C (2000) 1147).

### 5.2.3 Valorisation énergétique des RB lourds

Pour mémoire, les RB lourds constituent la fraction lourde combustible issue du broyage et contient principalement des élastomères, des plastiques et du verre<sup>28</sup>.

En 2010, l'Autriche et les Pays-Bas avaient des taux de valorisation énergétique des RB lourds supérieurs à 50 %. Aux Pays-Bas, ce taux a fortement diminué en 2012 suite à l'évolution de la réglementation relative à la mise en décharge des déchets.

Taux de valorisation énergétique des RB lourds (année 2010, % en poids)



Source : Eurostat (fraction «Other materials arising from shredding»). Le taux de recyclage en GB et en Suède n'est pas publié. L'Allemagne déclare un tonnage nul (tout est déclaré en « RB léger »).

<sup>28</sup> Fractions correspondant aux codes 191005 (« other fractions containing dangerous Substances ») et 191006 (« other fractions other than those mentioned in 19 10 05 ») du Catalogue européen des déchets (C (2000) 1147).  
Etude RECORD n° 12-0235/1A

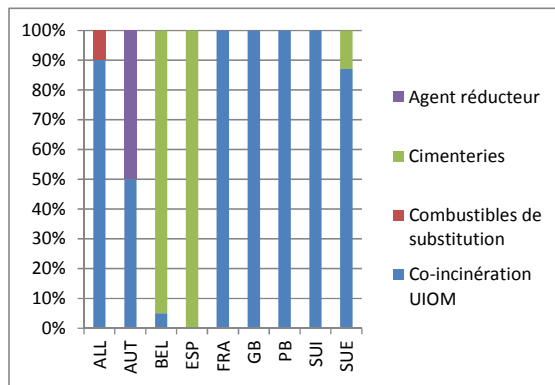
## 5.2.4 Voies de valorisation énergétique utilisées

### RB léger

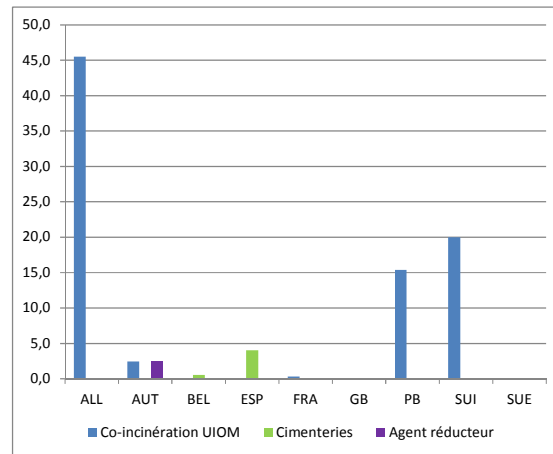
Les graphiques ci-après montrent la répartition en % et en tonnage du RB traité dans les différents pays, par grandes voies de valorisation énergétique. On constate que les tonnages de RB léger valorisés énergétiquement sont très faibles dans tous les pays étudiés à l'exception de l'Allemagne, des Pays-Bas et de la Suisse. On observe également une grande disparité des modes de valorisation. En ce qui concerne les Pays-Bas, il est fort probable que les tonnages incinérés ont beaucoup diminué depuis 2010.

#### Principales voies de valorisation énergétique du RB léger (année 2010)

Répartition en %



Répartition en tonnage ( kt)



Source ( pour les deux graphiques ) : Estimations sur dires d'experts.

## **Incinération dans des UIOM**

Plusieurs facteurs permettent d'expliquer la faiblesse des tonnages de RB léger incinérés dans la plupart des pays étudiés :

- des conditions économiques souvent défavorables par rapport à la mise en décharge
- une sous-capacité structurelle des UIOM dans certains pays
- la réglementation stricte depuis 2005<sup>29</sup> concernant la construction de nouvelles unités d'incinération
- les réticences des gestionnaires d'UIOM à traiter du RBA à cause de son PCI élevé et du fait qu'il contient parfois des traces de lubrifiants.

Ainsi, en Grande-Bretagne, malgré la forte surcapacité de traitement des incinérateurs, les gestionnaires d'UIOM acceptent rarement de traiter du RB, pour des raisons à la fois économiques (il est plus rentable pour eux de traiter des OMR venant de GB, d'Italie ou d'Irlande), techniques (les OMR ne posent pas de problème de PCI et contiennent très peu de métaux lourds) et réglementaires (les UIOM appartiennent à la catégorie R1 (recovery status) qui leur permet d'importer des OMR de l'étranger). Certains UIOM ont accepté de co-incinérer du RB, mais ces initiatives se sont révélées sans suite.

En Espagne, aucun flux n'est dirigé vers les UIOM car ces derniers ont été construits avec des fonds publics. En outre, les UIOM sont peu nombreuses et il y a une forte sous-capacité de traitement.

### **Co-combustion en cimenteries<sup>30</sup>**

La combustion en cimenteries s'est développée en Espagne, qui a opté pour l'utilisation du RB léger dans les précalcinateurs.

### **Agent réducteur en sidérurgie (hauts-fourneaux)**

Le sidérurgiste Voest Alpine consomme de faibles quantités.

### *RB lourds*

L'Espagne et dans une moindre mesure la Belgique sont les pays qui traitent les plus gros tonnages de RB lourd par valorisation en cimenteries. On notera toutefois que les tonnages concernés restent modestes (10 kt en Espagne, 1 kt en Belgique).

Les cimentiers espagnols consomment des tonnages significatifs.

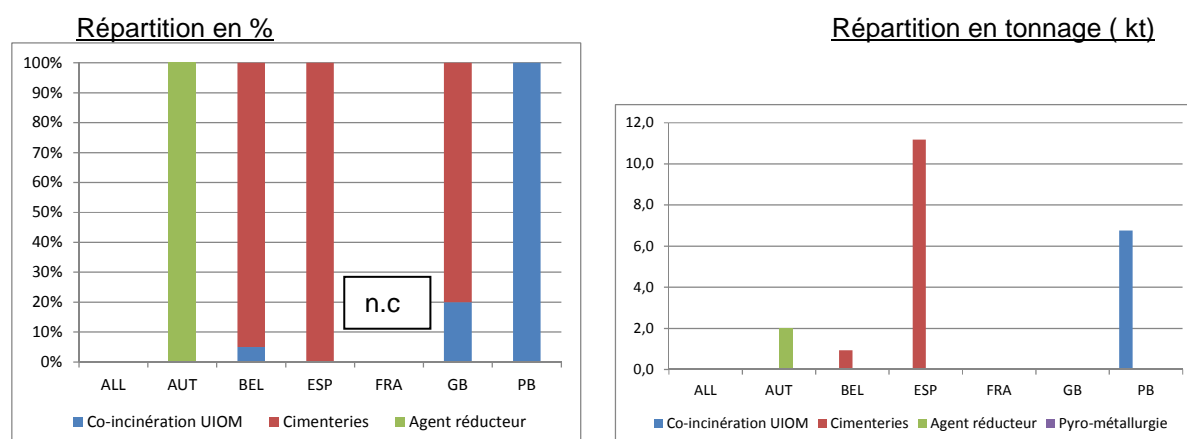
Seul le sidérurgiste autrichien Voest Alpine continue, semble-t-il, à utiliser de faibles quantités de RB lourd dans ses hauts-fourneaux.

---

<sup>29</sup> L'incinération est règlementée depuis 2005 par la Directive cadre sur l'incinération (2000/76/CE) ainsi que par la directive cadre sur les déchets 2008/98/CE.

<sup>30</sup> On ne dispose pas de données récentes au plan européen sur les tonnages de combustibles issus de déchets non dangereux consommés par les cimenteries en Europe. Les données 2005/2006 de Erfo montraient que l'Allemagne était le pays où le taux de substitution était le plus élevé (1,5 Mt). La Belgique (100 kt), l'Autriche (150 kt), l'Italie et la Grande-Bretagne (100 kt), avaient également des taux de substitution non négligeables.

## Principales voies de valorisation énergétique des RBA lourds (année 2010)



Source : Estimations sur dires d'experts.

Nota : Pour la Grande-Bretagne et la France, le tonnage n'est pas connu. L'Allemagne déclare toutes ses quantités dans la rubrique « RB léger ».

### 5.3 Principales causes des disparités observées

Les causes des disparités observées en matière de valorisation énergétique des RB sont nombreuses. Elles sont analysées ci-après dans l'ordre suivant :

- Absence de fiabilité des données déclarées par certains Etats Membres à la Commission européenne
- Proportion du gisement de VHU effectivement traité dans le pays
- Nature et intensité des opérations de dépollution et de démontage des VHU avant broyage
- Broyage commun (ou séparé) des flux de produits en fin de vie
- Degré de développement du recyclage matière des fractions combustibles contenues dans le RB
- Contextes réglementaires et fiscaux en matière de valorisation énergétique et de mise en décharge des déchets.

#### 5.3.1 Absence de fiabilité des données déclarées par certains états membres à la Commission européenne

Les taux de recyclage et de valorisation des VHU notifiés par les états membres ne sont pas toujours comparables. Plusieurs travaux ont montré que certains pays ont tendance à les surestimer. Les facteurs suivants sont susceptibles de provoquer des biais :

##### Des méthodologies de calcul parfois discutables

Le bilan fait par EUROSTAT et la Commission européenne sur l'année 2010 montre des difficultés de calcul chez une majorité des Etats membres, avec des doutes sérieux quant à la qualité des résultats présentés par certains d'entre eux, par exemple :

- en Pologne, le système de reporting ne semble pas avoir atteint sa maturité. Il est légitime de se demander si les données qui en sont issues sont suffisamment robustes, ou établies sur des bases estimatives ;
- en Italie, le suivi des données reste peu précis car les déclarations sont globales et non spécifiques aux VHU. L'utilisation de taux forfaitaires pourrait surestimer le taux de valorisation en comparaison d'autres démarches plus spécifiques et plus précises.

D'autres facteurs peuvent être source de distorsion. Par exemple, la réponse à la question de savoir à quel moment un véhicule cesse d'être un produit pour devenir un VHU selon la directive 2008/98/EC n'est pas la même dans tous les états membres.



### Les différences de classification des voies de valorisation

La hiérarchie environnementale des opérations de valorisation fait parfois l'objet d'interprétations nationales différentes. Ainsi :

- certains pays considèrent l'utilisation de déchets plastiques dans les hauts fourneaux comme du recyclage à 100 %, tandis que d'autres le répartissent entre recyclage (agent réducteur) et valorisation énergétique (apport calorique) ;
- l'incinération de déchets riches en fibres issus du résidu de broyage avec des boues de STEP est comptabilisée soit comme de la valorisation énergétique, soit comme du recyclage (dans la mesure où les déchets se substituent à des produits de séchage des boues avant leur incinération).

### La composition des VHU

Par convention, les données de valorisation déclarées par les états membres sont basées sur l'hypothèse d'une teneur moyenne en métaux de 75 % dans les VHU. Comme ce taux remonte à plusieurs années, il sera susceptible d'être ajusté à la baisse dans les prochaines années, du fait de la proportion croissante de plastiques dans les véhicules. Une diminution de ce taux se traduirait mécaniquement par une augmentation de l'assiette des fractions non métalliques en tonnage et donc par une dégradation des taux de recyclage et de valorisation.

Pour mémoire, la composition matière des véhicules évolue dans le temps. Les véhicules construits au cours de la période 1960 à 1975 contenaient environ 78 % d'acier et 2,3 % de fibres. Sur la période 1996 à 2000, la part de l'acier a diminué à 58 % tandis que la part des fibres augmentait à 7,3 %. (Reinhardt et al, 2004)<sup>31</sup>.

**Les données déclarées par les états-membres doivent être considérées comme des ordres de grandeur. On notera toutefois que les pays analysés dans le cadre de la présente étude sont généralement réputés « fiables » en termes de qualité des données statistiques.**

**Concernant le manque évident de fiabilité des données EUROSTAT relatives à la gestion des VHU pour certains pays de l'UE, la France commence à mettre en oeuvre une politique plus « proactive » vis-à-vis de ses partenaires, visant à remédier à ce problème.**

### 5.3.2 Proportion du gisement de VHU effectivement traité dans le pays

La quantité de VHU disponible dans un pays donné pour y être traitée est fonction de plusieurs facteurs qui sont détaillés ci-après.

#### Écarts entre le nombre de véhicules dé-immatriculés et le nombre de VHU traités dans le pays

Le volume des VHU dans l'UE-25 était estimé à 14 millions en 2010<sup>32</sup>. Ce chiffre diffère fortement des 6,2 millions de VHU traités en 2008 publié par Eurostat, qui repose sur les données notifiées par les États membres.

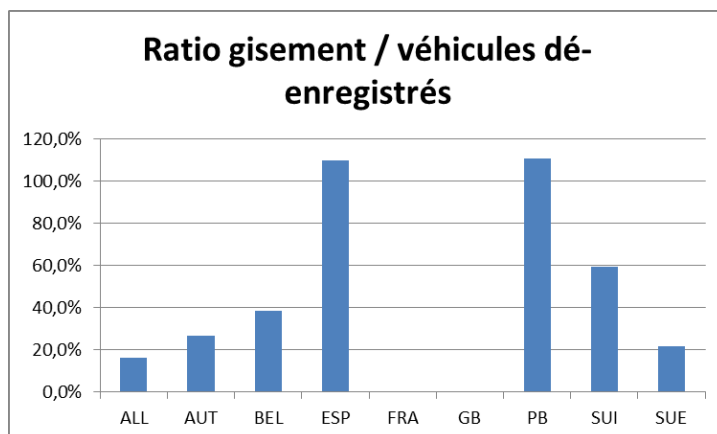
Dans de nombreux États membres, on constate des écarts extrêmement importants entre le gisement de VHU et le nombre de véhicules radiés officiellement des registres d'immatriculations. Ainsi, dans le cas de l'Allemagne, de l'Autriche et de la Suède, seule une faible proportion des VHU générés chaque année dans le pays est dé-enregistrée.

L'Allemagne est exemple illustratif de cette situation puisqu'on estime que plus de 1,8 million de véhicules usagés ont été exportés en 2011. Une prime à la casse avait été instaurée en 2009, conduisant à un quasi triplement des tonnages de VHU traités dans le pays, mais les quantités de VHU sont revenues à leur niveau initial dès que la prime a cessé.

<sup>31</sup> Source: "An Economic Solution for Recycling Fluff from Shredder Light Fraction". Andreas Bartl, Vienna University of Technology.

<sup>32</sup> Source : Agence européenne pour l'environnement.

## Ratio « Enregistrements de véhicules / véhicules dé-enregistrés



Source : Eurostat

En outre, un nombre considérable de véhicules radiés et destinés à devenir des VHU sont exportés illégalement, principalement vers l'Afrique, les pays du Proche-Orient et les pays d'Europe de l'est, afin d'y être réutilisés comme véhicules d'occasion<sup>33</sup>. Selon la base de données COMEXT, quelque 893 000 véhicules usagés ont été exportés en 2008 en dehors de l'Union européenne.

A ceci vient s'ajouter l'élimination illégale dans le pays et le fait que de nombreux véhicules sont conservés dans des garages dans le pays de la radiation d'immatriculation.

Le cumul de ces différents facteurs fait que l'on assiste dans de nombreux pays à une « fuite » des VHU vers l'étranger, qui est très préjudiciable dans la mesure où c'est toute une partie du gisement de ferrailles qui n'est plus disponible pour les aciéristes nationaux.

### 5.3.3 Nature et intensité des opérations de dépollution et de démontage des VHU avant broyage

Selon l'Annexe I de la directive 2000/53/CE (article 6, paragraphes 1 et 3) les exigences techniques minimales en matière de traitement visant à promouvoir le recyclage des VHU sont les suivantes :

- retrait des catalyseurs,
- retrait des composants métalliques contenant du cuivre, de l'aluminium et du magnésium si ces métaux ne sont pas séparés au cours du broyage,
- retrait des pneumatiques et des composants volumineux en matière plastique (pare-chocs, tableau de bord, récipients de fluides, etc.), si ces matériaux ne sont pas séparés lors du broyage de manière à pouvoir réellement être recyclés en tant que matériaux,
- retrait du verre.

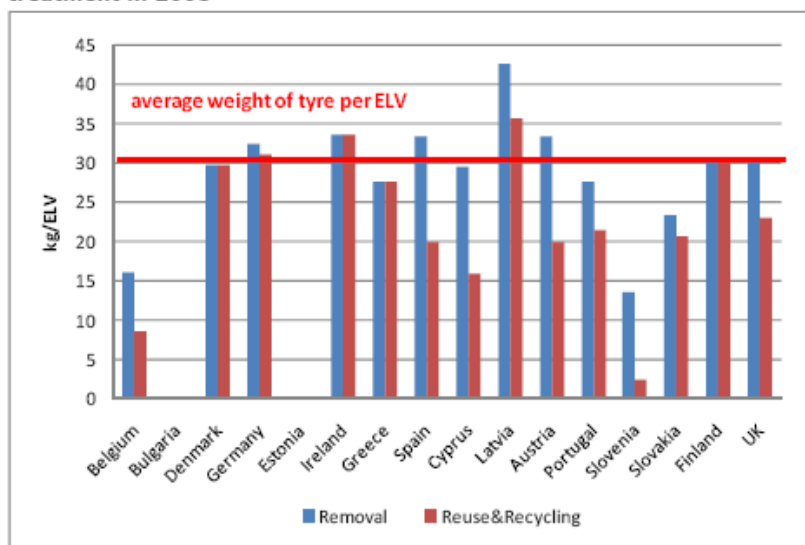
#### Démontage des pneumatiques avant broyage des VHU

Au plan technique, les pneus ont tendance à perturber le fonctionnement des marteaux des broyeurs. Leur broyage avec les VHU entraîne une augmentation de la teneur en élastomères dans les RB lourds, ce qui complique les opérations de tri en fractions homogènes.

Les données publiées par Eurostat montrent que le démontage des pneus est largement pratiqué.

<sup>33</sup> Un motif fréquent de transfert illégal est que le propriétaire d'un ancien véhicule peut réaliser un certain profit (habituellement quelques centaines d'euros) lorsqu'il le vend à un concessionnaire automobile qui l'expédie à l'étranger, alors qu'il ne reçoit généralement pas d'argent s'il met au rebut un VHU dans le pays où a lieu la radiation de l'immatriculation.

**Figure 11 : Removal and Reuse & Recycling of tyres in the course of ELV treatment in 2008**



Source: Umweltbundesamt based on data provided by Eurostat (available at: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastestreams/elvs>)

Source : Eurostat

### *Démontage des parties vitrées avant broyage des VHU*

Peu de pays démontent les pare-brise, les lunettes arrière et les vitres latérales des VHU avant broyage. Les situations sont contrastées :

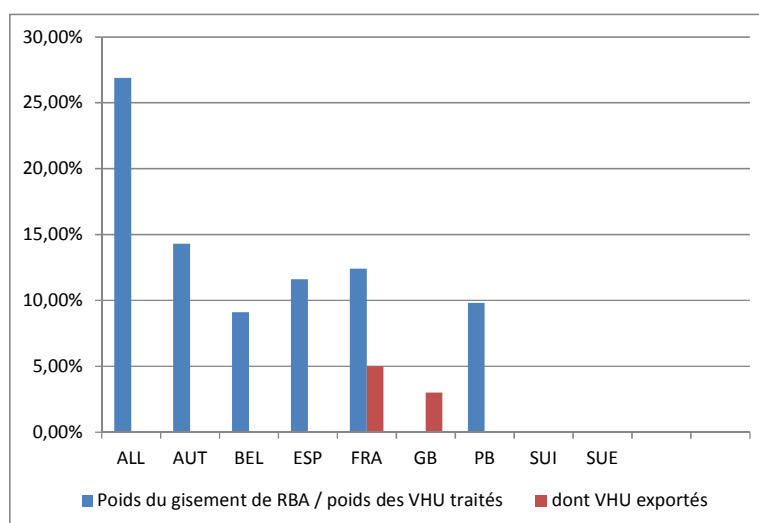
- en Allemagne, le démontage des vitrages est obligatoire.
- aux Pays-Bas, les pare-brise sont démontés, mais ARN voudrait arrêter car c'est très couteux, le seul débouché à ce jour étant la laine de verre.
- en Suède, les pièces en verre devraient en théorie être systématiquement démontées avant broyage. En pratique, le taux de démontage ne dépasse pas 50 % car les véhicules arrivent souvent compactés.
- en Grande-Bretagne, les pratiques sont variables selon les démanteleurs
- dans les autres pays, les pièces en verre sont peu (ou pas) démontées.

Il convient toutefois de noter que certains états-membres interprètent la directive dans un sens différent de celui retenu à ce jour par les pouvoirs publics français. Ils se basent en effet sur le fait que, selon eux, l'obligation d'extraction du verre telle qu'elle figure dans la directive VHU ne précise pas chez quel opérateur elle doit être réalisée (centre VHU ou broyeur).

### *Démontage d'autres pièces*

Les pare-chocs sont fréquemment démontés avant broyage. Au final, le taux de démontage des VHU avant broyage est très variable selon les pays, comme le montre le graphique ci-dessous.

### Proportion de pièces démontées avant broyage



Source : Eurostat

#### **5.3.4 Broyage commun (ou séparé) des flux de produits en fin de vie (VHU, DEEE, autres déchets....)**

Le WEEELABEX a défini les "bonnes pratiques" de traitement des DEEE au niveau européen<sup>34</sup>. Il précise que « Les DEEE et leurs fractions contenant des déchets dangereux seront traités séparément des autres déchets. Les déchets dangereux ne seront ni mélangés à d'autres catégories de déchets dangereux, ni à d'autres types de déchets, substances ou matières ». A terme, il est probable que cette préconisation devrait devenir une norme applicable à l'échelle européenne (traitement dans des broyeurs différents ou au moyen de campagnes séparées dans un même broyeur).

En pratique, on constate que la plupart des broyeurs en Europe mélangent le GEM hors froid, les VHU et les autres DIB riches en métaux dans la charge des broyeurs. Par contre, très peu d'entre eux mélangent les VHU et les DEEE autres que les GEM hors froid.

#### Modalités de broyage (commun ou séparé) des flux de VHU et de DEEE

ALL	Le traitement en mélange des VHU et des DEEE n'est pas interdit, mais est peu pratiqué.
AUT	Traitement en mélange des VHU, des produits blancs dépollués, des déchets industriels métalliques et des déchets d'emballages issus de la collecte sélective. Les PAM et produits gris sont traités dans des unités de broyage séparées.
ESP	Traitement en mélange des VHU, des produits blancs dépollués et des déchets industriels métalliques. Les broyeurs évitent de traiter des VHU seuls car il n'y aurait pas suffisamment de produits légers et cela augmenterait très sensiblement la consommation d'énergie des broyeurs.
FRA	Les broyeurs ont l'obligation de traiter les DEEE de manière cantonnée.
GB	Le mélange des RB de différentes origines est autorisé. Toutefois, certains broyeurs préfèrent traiter séparément les VHU et les produits blancs car cela facilite le travail de séparation et de recyclage en aval (les polymères dominants n'étant pas les mêmes dans les VHU et dans les DEEE). Les petits DEEE sont traités dans des unités différentes.
PB	Le broyage simultané des VHU, des bicyclettes, des meubles métalliques et des produits blancs est autorisé.
SUI	Le mélange des RB de différentes origines est autorisé.
SUE	En théorie, rien n'interdit aux broyeurs de VHU de traiter des DEEE, mais en pratique ces déchets vont majoritairement vers d'autres unités spécialisées dans le traitement des produits blancs, des ordinateurs ou des téléphones mobiles.

<sup>34</sup> WEEELABEX - Document normatif sur le traitement - 2 mai 2011.

### *5.3.5 Degré de développement du recyclage des fractions combustibles contenues dans le RB*

Les Pays-Bas, l'Autriche, l'Allemagne et la Belgique ont fortement misé sur le recyclage matière des fractions combustibles contenues dans le RB. Les installations de traitement du RB capables de recycler d'autres flux que les seuls métaux sont largement développées<sup>35</sup>. La France a également développé des capacités significatives ces dernières années.

### *5.3.6 Sur / sous-capacité d'incinération des UIOM par rapport à la demande*

Certains pays connaissent d'importantes surcapacités d'incinération (Allemagne...) tandis que d'autres font face à une situation opposée (Grande-Bretagne). L'impact de ce critère sur les débouchés du RBA vers les UIOM est évidemment très fort.

### *5.3.7 Contextes réglementaires et fiscaux en matière de valorisation énergétique et de mise en décharge des déchets*

#### Réglementation relative aux installations de traitement thermique

La directive 2010/75/UE du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution) définit, entre autres, deux mesures ayant un impact potentiel important sur l'incinération des RB dans les UIOM :

- des limites sont fixées relativement aux émissions de poussières, de NOx, SOx, CO, HF, PCDD, métaux lourds et mercure issues de l'incinération des déchets municipaux, des déchets médicaux et des déchets dangereux
- les déchets dangereux contenant plus de 1 % de composés halogénés organiques doivent être traités à une température supérieure à 1100°C.

#### Réglementation relative au taux de récupération de l'énergie par les UIOM

Il n'y a pas de lien direct entre le taux d'incinération des ordures ménagères résiduelles et la récupération de chaleur. Ainsi<sup>36</sup> :

- l'Allemagne incinère 98 % de ses déchets combustibles non recyclables mais ne récupère que 44 % de l'énergie contenue dans les déchets, dont 11 % sous forme d'électricité et 33 % sous forme de chaleur.
- à contrario, la Norvège n'incinère que 35 % de ses déchets combustibles non recyclables mais récupère une part très élevée de l'énergie contenue dans les déchets, dont 7 % sous forme d'électricité et 92 % sous forme de chaleur.
- la situation en France est assez défavorable puisque les UIOM ne traitent que 55 % des déchets combustibles non recyclables et que de surcroît 22 % seulement de l'énergie contenue dans les déchets est récupérée, dont 6 % sous forme d'électricité et 16 % sous forme de chaleur.

Selon la directive déchets, la valorisation de l'énergie par une UIOM est caractérisée par la formule R1, qui définit le seuil d'efficacité énergétique au-delà duquel l'incinérateur est considéré comme un centre de valorisation énergétique.

#### Evolution des prix de mise en enfouissement

Lorsque le prix de mise en enfouissement est supérieur au prix de reprise des UIOM, l'effet incitatif est déterminant sur le développement de l'incinération des RB. Jusqu'à présent, la situation était

<sup>35</sup> Source : « Etude de la gestion de la filière de collecte et de valorisation des VHU dans certains pays de l'UE » - ADEME – 2010.

<sup>36</sup> Source : NL Waste Management Administration (Pays-Bas 2009).

défavorable en France, mais elle évolue sous l'effet de la hausse de la TGAP. La situation est très contrastée selon les Etats Membres. A l'horizon 2015, il est prévu que<sup>37</sup> :

- l'on atteindra un équilibre autour de 100€/tonne en France
- les prix de mise en décharge seront plus élevés d'environ 20 % en Espagne, d'environ 90 % en Grande-Bretagne et d'environ 55 % aux Pays-Bas par rapport aux prix de l'incinération

En Allemagne, il n'y a pas de taxe sur la mise en décharge, mais des restrictions fortes sont appliquées (interdiction de mise en décharge, sauf pour les déchets ayant subi un prétraitement (moins de 5 % de carbone organique et PCI inférieur à une valeur plafond) ainsi que pour les déchets inertes).

**Les réglementations et taxes destinées à prévenir l'enfouissement des déchets constituent un facteur clé du développement de la valorisation énergétique.**

---

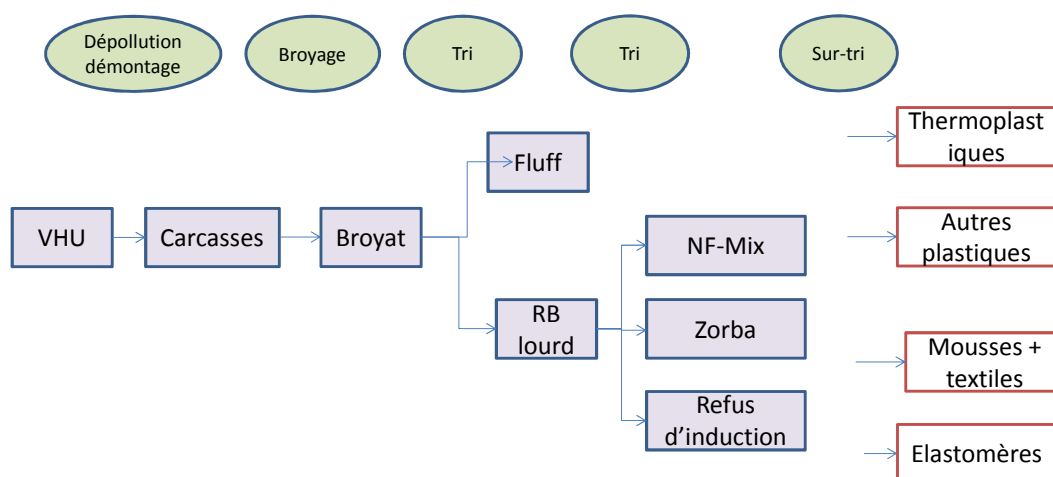
<sup>37</sup> Source : Les marchés du traitement et de l'élimination des OM et des DIND en Europe – BIPE – Décembre 2010.

## 6 Caractéristiques physiques et thermochimiques des flux issus du tri des broyats

### 6.1 Situation actuelle

#### 6.1.1 Schéma d'ensemble du processus de traitement des VHU

Le présent chapitre a pour but de caractériser qualitativement et quantitativement les différentes fractions issues du tri post-broyage du RBA. Le schéma ci-dessous montre les différentes étapes de traitement possibles. On rencontre chez les broyeurs français de multiples cas de figure, allant du simple broyage jusqu'à des tris fins par polymère, soit chez les broyeurs eux-mêmes, soit chez des prestataires en aval de la chaîne de traitement.



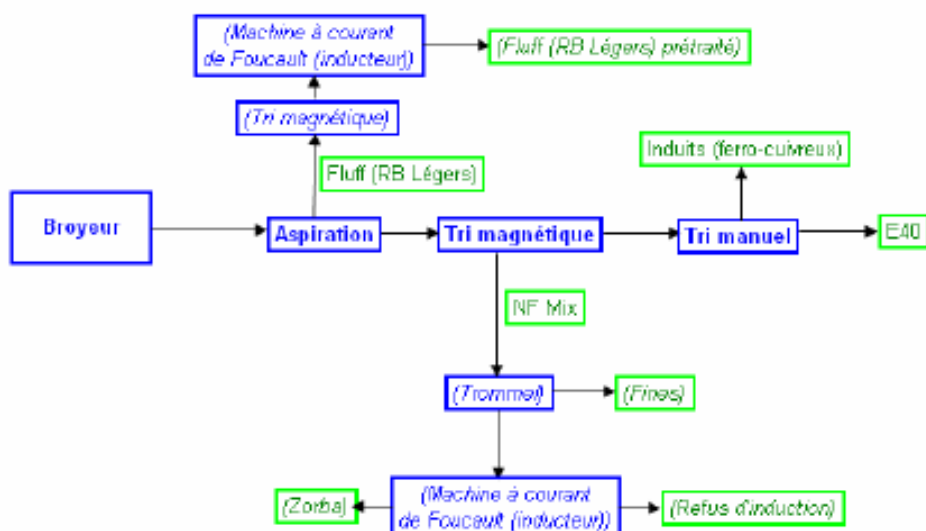
Les caractéristiques des fractions issues du tri sont présentées ci-après en 3 parties :

- fractions issues du premier tri (RB léger <-> RB lourds)
- fractions issues du sur-tri des RB lourds (NF-Mix <-> Zorba <-> Refus d'induction)
- fractions issues d'un sur-tri complémentaire par matériaux (thermoplastiques, caoutchoucs....).

## 6.1.2 Fractions issues du premier tri après broyage

Le schéma ci-dessous indique en italiques les opérations que chaque broyeur peut (ou non) décider d'inclure dans son process. Selon le choix effectué par le broyeur, le nombre et les caractéristiques des fractions triées sont différentes.

### Schéma-type de broyage de VHU



Source : ADEME – Guide d'aide à l'utilisateur de l'outil développé pour les broyeurs dans le cadre de la déclaration VHU annuelle à l'ADEME

Après broyage des carcasses, élutriation et tri magnétique, le flux broyé est réparti en deux fractions :

- Une fraction légère (« RB léger » ou « fluff ») composée principalement de films plastiques, de mousses, de métaux non ferreux, de tissus et de fines particules (bois, poussières...). Après traitement dans une machine à courant de Foucault pour éliminer les métaux non ferreux, on obtient un RB léger prétraité, qui est considéré comme un déchet dangereux<sup>38</sup> dans la plupart des pays de l'UE du fait de sa contamination par des liquides organiques (principalement des PCB et des HAP<sup>39</sup>) et par des liquides résiduels pouvant résulter d'une décontamination insuffisante (lubrifiants...).
- Une fraction lourde (« RB lourds ») composée principalement d'élastomères, de plastiques et de verre.

La composition des RB léger et lourds varie très fortement d'une installation de broyage à l'autre, en fonction des flux qui alimentent le broyeur et de l'intensité d'aspiration de l'élutriateur.

D'autre part, on observe que les fractions ayant la granulométrie la plus élevée possèdent des propriétés énergétiques intéressantes, mais que celles-ci diminuent fortement avec la taille des particules :

- la fraction < 2 mm peut être obtenue par criblage des RB léger et lourds. Son PCS est inférieur à 4 MJ/kg et la teneur en cendres est supérieure à 80 %. C'est une matière dense (1,28 à 1,52 kg.dm<sup>3</sup>), de couleur brune, d'aspect terreux, avec un taux d'humidité de 3 à 17 %.

Une analyse plus fine montre qu'elle contient environ :

<sup>38</sup> Liste 2000-532-CEE ; Chapitre 1910, annexe de la directive 91-689-CE sur les déchets dangereux.

<sup>39</sup> PCB : polychlorobiphényles ; HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques. La présence de ces deux composés dans le fluff a fortement diminué ces dernières années grâce aux mesures prises quant à leur utilisation et aux obligations de dépollution des VHU et des DEEE avant leur broyage.



- 25 % de polymères, bois, textiles....
  - 25 % d'une fraction ferreuse (teneur d'environ 50 % en fer)
  - 45 % de matières minérales inertes (verre, béton, céramiques)
  - 3 % de non-ferreux (aluminium, cuivre, laiton, zinc...)
- au contraire, la fraction à granulométrie élevée est majoritairement composée de matières organiques à haut PCI.

Le tableau ci-dessous montre que les RB lourds contiennent une part majoritaire de résidus organiques de broyage (ROB) combustibles. A contrario, les RB légers prétraités contiennent une proportion élevée de résidus fins de broyage (RFB) difficiles à valoriser énergétiquement.

Répartition et production des ROB et des RFB

		RFB	ROB	Métaux		Total
RB lourds	%	25	35	40		100
RB légers	%	54	46	(40) <sup>a</sup>	0 (6) <sup>a</sup>	100
RB	%	42,4	41,6	(38,0) <sup>a</sup>	16,0 (19,6) <sup>a</sup>	100,0
	Mt/an	12,7	12,5	(11,4) <sup>a</sup>	4,8 (5,8) <sup>a</sup>	30,0
Output broyeurs	%	10,6	10,4	(9,5) <sup>a</sup>	4,0 (4,9) <sup>a</sup>	25,0

<sup>a</sup> Avec traitement TPB des RB légers (récupération mécanique des métaux)

Source : Université de Liège - Thèse M. Bareel – « La valorisation des résidus de broyage de déchets métalliques – Proposition d'un procédé intégré » - 2009/2010.

### 6.1.3 Les opérations de sur-tri

L'optimisation du recyclage matière suppose que les matériaux contenus dans les différentes fractions issues du premier tri soient séparés le plus finement possible.

Plusieurs technologies de sur-tri ont été développées au plan industriel. Les principales différences parmi ces technologies concernent la séparation des plastiques<sup>40</sup>.

Les sociétés Galloo (Belgique/ France) et Comet (Belgique) ont développé des procédés intégrés incluant des étapes de flottation différentielle, de séparation mécanique et de tri optique. Ces procédés conduisent à des fractions aptes au recyclage (métaux, plastiques, ...) et à une fraction restreinte en volume de résidu non recyclable.

La flottation est le procédé par voie humide le plus utilisé pour la séparation des plastiques contenus dans les RB (RBA, RBE....). Ce terme générique recouvre plusieurs variantes qui permettent d'obtenir des qualités de plastiques recyclés extrêmement variées, depuis des mélanges de plastiques jusqu'à une séparation fine par polymère (pour certains d'entre eux) ou par plage de densité. Les progrès récents permettent de réaliser une séparation des plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés dans le cas des RBE. Malgré sa relative complexité, le procédé de flottation dispose d'un atout important, son faible coût d'exploitation, à condition de disposer d'un flux de déchets d'un volume élevé (10 000 t/an de plastiques recyclés).

Les sociétés SiCon (Allemagne) et Scholtz (SRW - Allemagne) ont développé des procédés basés principalement sur le tri mécanique et visant à récupérer les métaux, à préparer un résidu combustible et à stabiliser les boues en vue de leur mise en décharge. Le procédé TBS (Autriche), d'une conception assez proche de celle du procédé SiCon, vise en priorité à produire une fraction combustible adaptée à une utilisation dans des hauts-fourneaux.

En pratique, on constate que SiCon fonctionne comme procédé de préparation pour l'incinération, dans les pays ayant des surcapacités d'UIOM, mais pas pour les hauts fourneaux ni les cimenteries

<sup>40</sup> Les principaux procédés de préparation des RB sont détaillés dans les fiches en Annexe 1.

#### 6.1.4 Modèle de simulation quantitative des flux

Nous avons effectué une simulation des flux actuels de VHU broyés en France, en utilisant le modèle développé par l'ADEME pour permettre aux broyeurs d'effectuer leurs déclarations d'activité.

Le tableau ci-dessous propose une estimation de la ventilation des flux traités par les broyeurs, par type de procédé. La répartition indiquée dans ce tableau a été discutée et validée par plusieurs professionnels du secteur, mais doit être considérée comme un ordre de grandeur.

Estimation de la répartition des flux par type de séparation post-broyage  
(situation en 2008)

Equipements des broyeurs	Fractions de sortie	Répartition actuelle (au niveau national)	Répartition des tonnages traités (kt)
Ni trommel, ni Foucault	NF-Mix	20 %	310
Trommel seul	NF-Mix + Fines	10 %	155
Foucault seul	Zorba + refus d'induction	30 %	465
Trommel + Foucault	Zorba + refus d'induction + fines	40 %	618
Total			1548

Les résultats de cette simulation sont présentés dans les pages suivantes, sous la forme d'une fiche individuelle par fraction issue du tri.

**Note importante :** Les proportions indiquées dans les paragraphes ci-après s'entendent « hors métaux » contenus dans chaque fraction (sachant que les métaux contenus ne présentent pas d'intérêt en vue de la valorisation énergétique).

#### 6.1.5 Fraction « RB léger »

##### Définition

Le RB léger (ou « fluff ») correspond à la fraction légère post-broyage, après récupération magnétique du fer et de l'acier. Un contre-courant d'air permet de séparer les légers tels que le papier et les caoutchoucs. Puis les non-ferreux sont séparés dans une machine à courant de Foucault et le flux restant est calibré.

##### Dangerosité

Le RB léger prétraité est considéré comme un déchet dangereux<sup>41</sup> dans la plupart des pays de l'UE, du fait de sa forte hétérogénéité, de la variabilité de sa composition et de sa contamination fréquente par des liquides organiques (principalement des PCB et des HAP<sup>42</sup>) et par des liquides résiduels

<sup>41</sup> Liste 2000-532-CEE ; Chapitre 1910, annexe de la directive 91-689-CE sur les déchets dangereux.

<sup>42</sup> PCB : polychlorobiphényles ; HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques. La présence de ces deux composés dans le fluff a fortement diminué ces dernières années grâce aux mesures prises quant à leur utilisation et aux obligations de dépollution des VHU et des DEEE avant leur broyage.

pouvant résulter d'une décontamination insuffisante (lubrifiants...). Selon son contenu en substances dangereuses, il est classifié en "déchets spéciaux" ou en "déchets dangereux" (décisions 2000/532/EC, 2001/18/EC2, 2001/119/EC3 et 20001/573/EC4).

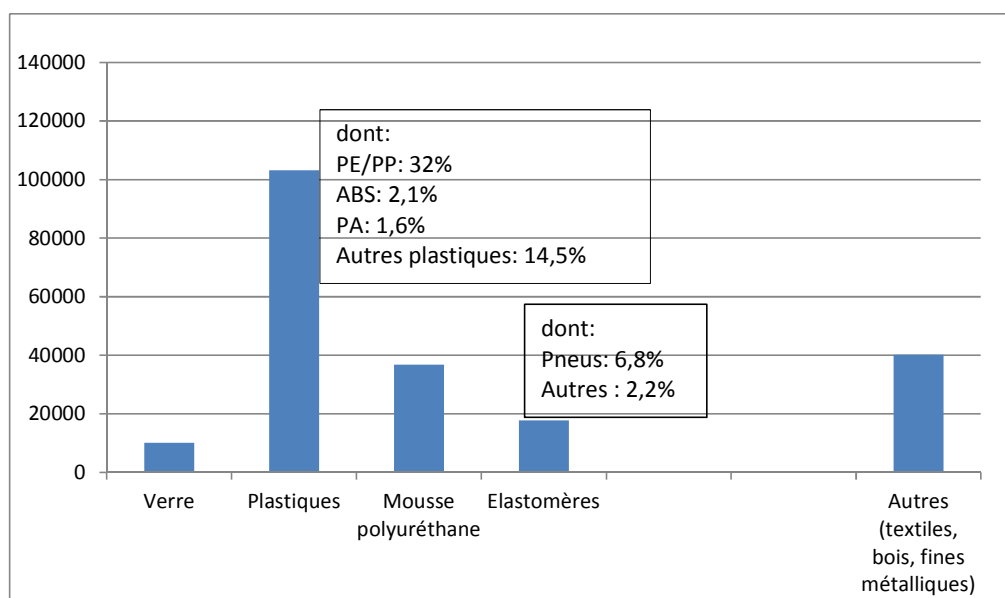
### Principales caractéristiques

	RB léger (total)	dont résidus fins de broyage	dont résidus organiques de broyage
% en poids		54 % du RB léger	46 % du RB léger
Contaminants	Proportion variable d'huiles en mélanges		
Aspect		Couleur brune, aspect terreux	
Granulométrie		< 2mm	>2mm
Taux d'humidité		3 à 17 %.	
Composition moyenne	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 50 % de films plastiques</li> <li>o 18 % de mousse PU</li> <li>o 8,5 % d'élastomères</li> <li>o 5 % de verre</li> <li>o 19 % d'autres matériaux constitués principalement de bois, peintures, fines de cuivre et autres fines métalliques.</li> </ul> <p>Au sein de la fraction plastique, les thermoplastiques les plus faciles à trier représentent plus de 70 % en poids.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 25 % de polymères, bois, textiles....</li> <li>o 25 % d'une fraction ferreuse (teneur d'environ 50 % en fer)</li> <li>o 45 % de matières minérales inertes (verre, béton, céramiques)</li> <li>o 3 % de non-ferreux (aluminium, cuivre, laiton, zinc...)</li> </ul>	Fraction majoritairement composée de matières organiques à haut PCI.
PCI	<18MJ/kg	<4MJ/kg	18 MJ/kg
Densité	0,3	1,28 à 1,52	0,3
Teneur en cendres	30 à 40 %	>80 %	30 à 40 %

### Tonnage et composition matière

Le tonnage total de RB léger atteignait 208 kt en 2008.

#### Composition actuelle du fluff (hors métaux)

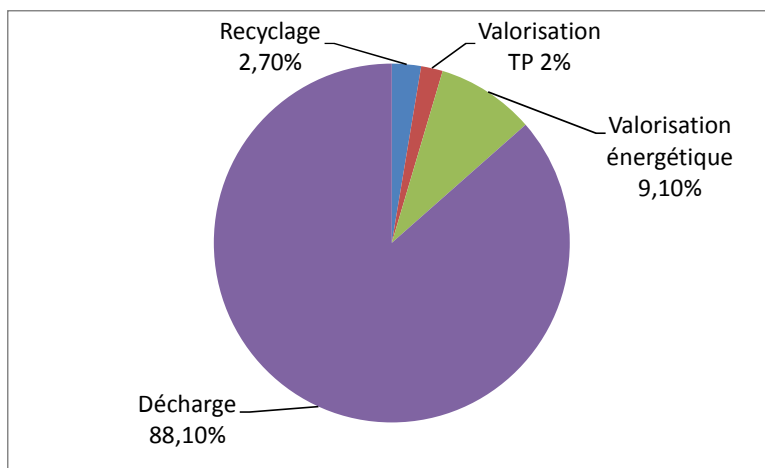


Source : Résultats de la modélisation

## Mode de valorisation

Quelques recycleurs recyclent une partie des plastiques contenus dans le RB léger, mais une grande majorité est encore mise en enfouissement.

### Répartition du RB léger (hors partie métallique) par mode de valorisation (année 2011)



Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.

### 6.1.6 Fractions « RB lourds »

Les RB lourds correspondent aux fractions lourdes post-broyage, après récupération magnétique des ferreux. Ils se présentent en plusieurs fractions, en proportions variables selon la configuration du broyeur :

- NF-Mix (si le broyeur n'est équipé ni d'un trommel ni d'un séparateur à courant de Foucault)
- NF-Mix + Fines (si le broyeur n'est équipé que d'un trommel)
- Zorba + refus d'induction (si le broyeur n'est équipé que d'un séparateur à courant de Foucault)
- Zorba + refus d'induction + fines (si le broyeur est équipé d'un Trommel et d'un Foucault).

Ils contiennent :

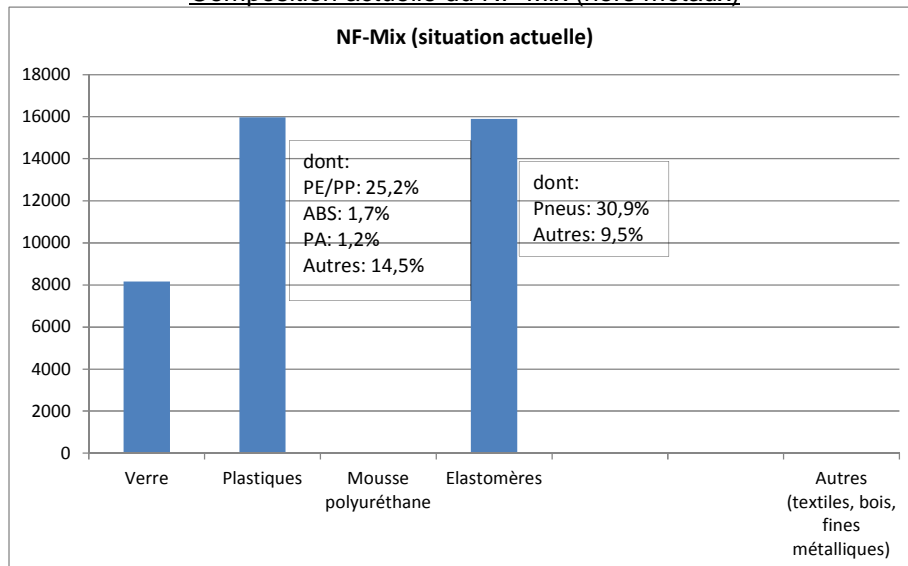
- une part majoritaire de résidus organiques de broyage (ROB) combustibles
- des résidus fins de broyage difficiles à valoriser énergétiquement.

	RB lourds	dont résidus fins de broyage	dont résidus organiques de broyage
	92 kt	39 kt	53 kt
% en poids	-	42 % des RB lourds	58 % des RB lourds
Contaminants	Proportion variable d'huiles en mélange		
Aspect			
Granulométrie		< 2mm	>2mm
Taux d'humidité			
Composition		Mélange de polymères, bois, inertes (proportion plus élevée que dans la fraction fine des RB légers), ferreux et non-ferreux	Fraction majoritairement composée de matières organiques à haut PCI.
PCI	10 à 15 MJ/kg		
Densité	0,5 à 0,8		
Teneur en cendres	60 à 80 %	46 % à 82 % (tests)	

## NF-Mix

Le NF Mix est la fraction riche en métaux non-ferreux obtenue après tri magnétique des RB lourds. Cette fraction est produite par les unités de broyage qui ne sont équipées ni d'un trommel ni d'une machine à courant de Foucault sur le RB lourd. Le tonnage total atteignait 40 kt en 2008. Les plastiques et les élastomères représentent des parts à peu près égales (environ 40 % chacune) tandis que le verre atteint 20 %.

Composition actuelle du NF-Mix (hors métaux)

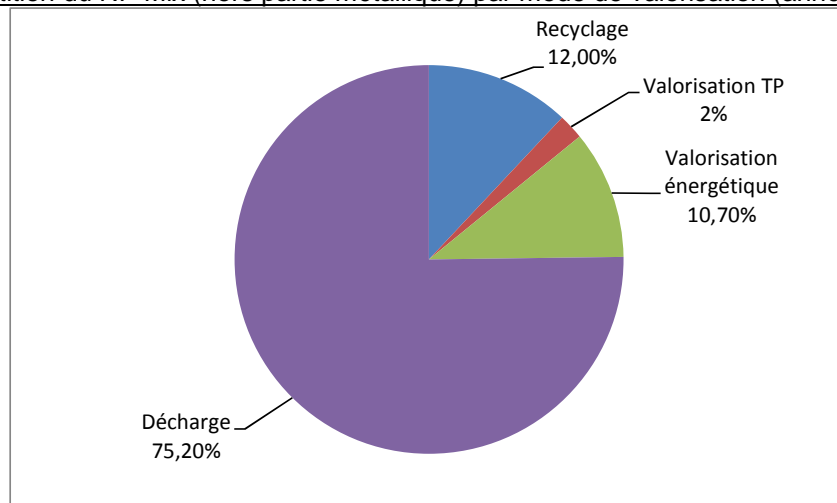


Source : Résultats de la modélisation

### Mode de valorisation

La majorité du NF-Mix (hors métaux) est aujourd'hui envoyée en enfouissement. Le recyclage matière des thermoplastiques contenus commence toutefois à se développer.

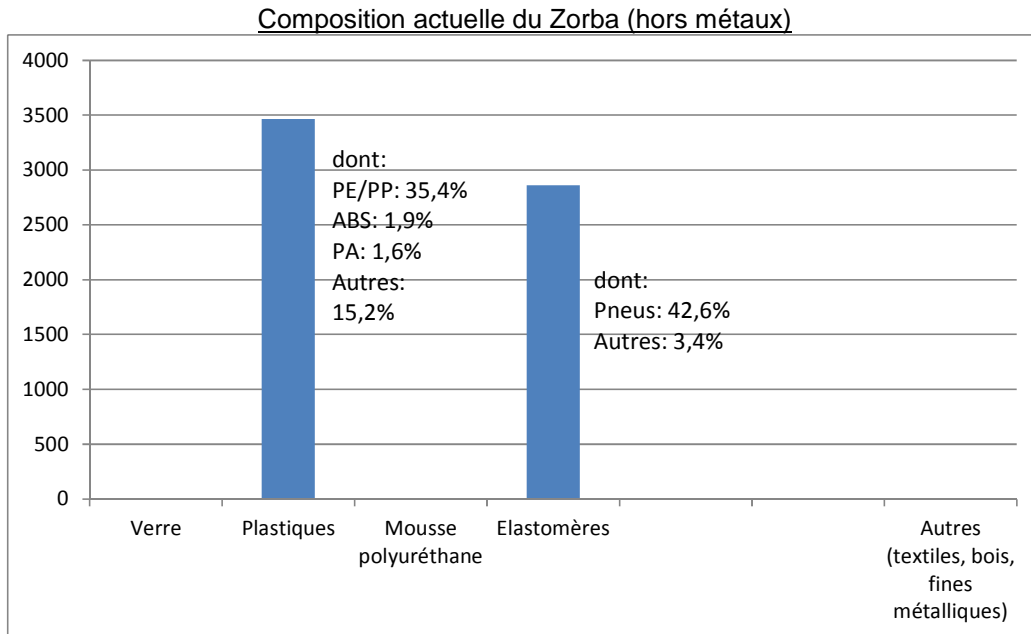
Répartition du NF-Mix (hors partie métallique) par mode de valorisation (année 2011)



Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.

## Zorba

La fraction zorba est la fraction riche en métaux non ferreux issue du tri par courant de Foucault sur les RB lourds. Elle représente un tonnage assez faible, de l'ordre de 6 kt/an. Elle se compose presque exclusivement d'un mélange de plastiques (55 %) et d'élastomères (45 %).

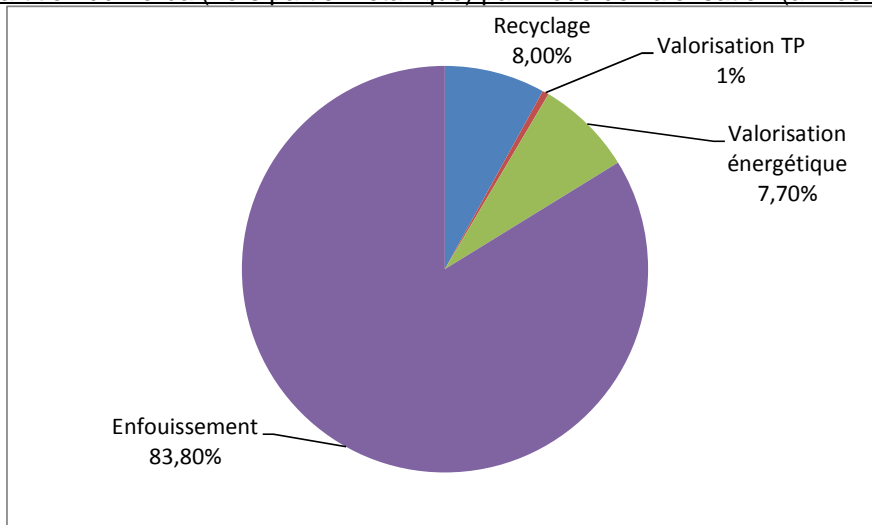


Source : Résultats de la modélisation

### Mode de valorisation

Les fractions non métalliques du zorba représentent des faibles quantités et sont peu valorisées.

Répartition du Zorba (hors partie métallique) par mode de valorisation (année 2011)

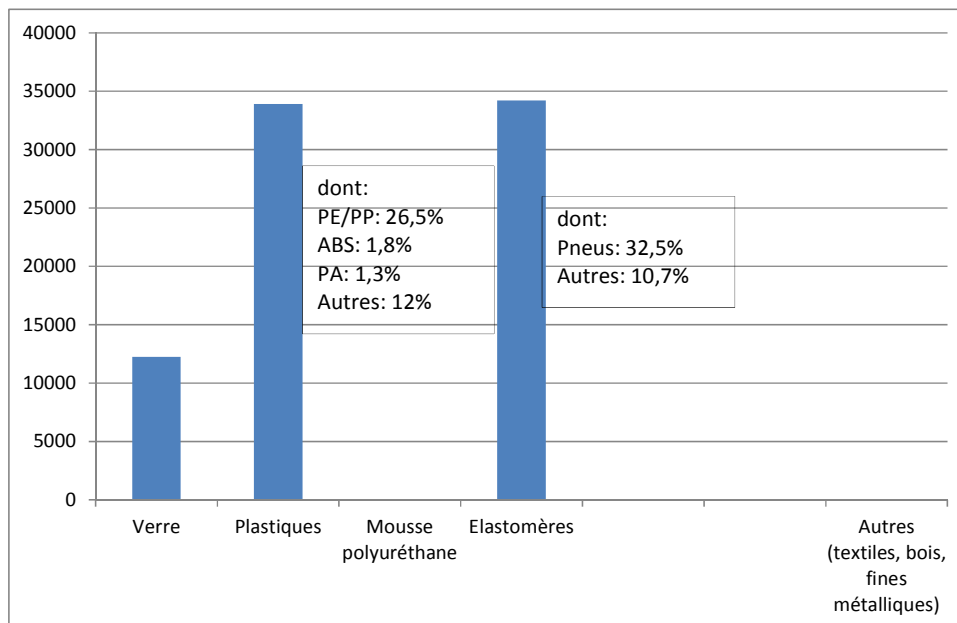


Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.

## Refus d'induction

Les refus d'induction sont constitués de la fraction pauvre en métaux non ferreux issue du tri par courant de Foucault. Ils représentent environ 80 kt/an. Leur PCI est d'environ 19 MJ/kg. La part des plastiques est d'environ 42 %, dont 70 % de thermoplastiques.

### Composition actuelle (hors métaux)

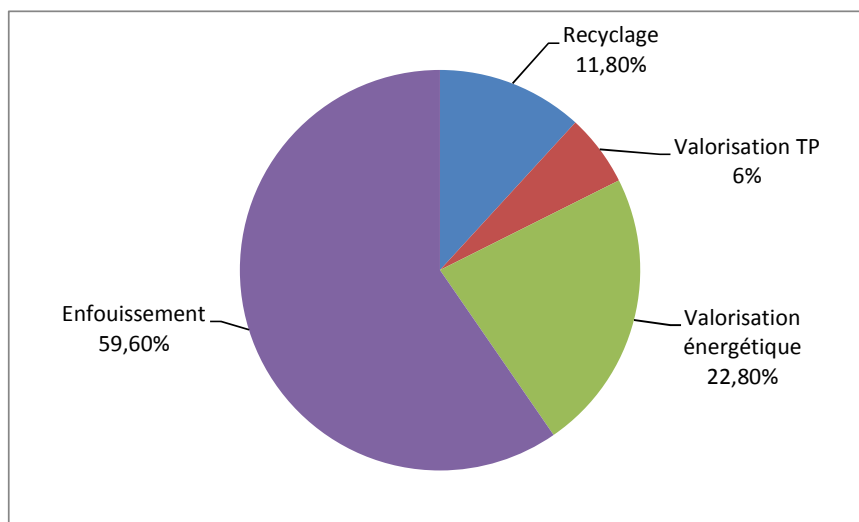


Source : Résultats de la modélisation

### Mode de valorisation

Une partie des thermoplastiques contenus dans les refus d'induction est recyclée, mais la majorité reste toutefois mise en enfouissement.

### Répartition des refus d'induction (hors partie métallique) par mode de valorisation (année 2011)



Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.

## 6.2 Analyse prospective (évolution 2015 et au-delà)

### 6.2.1 Hypothèses d'évolution

Une simulation identique à celle du chapitre précédent a été réalisée en projection 2018 pour les différentes fractions issues du tri.

#### Hypothèses d'évolution 2008-2018 utilisées pour effectuer la simulation

- Les installations des centres VHU ont pris en charge plus 88 % du nombre total de véhicules hors d'usage, les 12 % restant l'ayant été par les broyeurs agréés<sup>43</sup>
- Tous les broyeurs sont équipés de machines à courant de Foucault sur le RB léger (ou bien sous-traitent cette opération).
- Diminution d'un facteur 4 du tonnage de verre dans le RBA
- Disparition des pneus dans les broyats
- Proportion croissante de caoutchoucs TPE, plus difficiles à recycler
- Diminution de 22 % du tonnage des métaux ferreux
- Augmentation de 30 % du tonnage de métaux non-ferreux
- Augmentation de 23 % du tonnage de plastiques
- Accroissement plus rapide des thermoplastiques que des autres plastiques.

L'évolution des teneurs en métaux et en plastiques a été obtenue en interpolant les prévisions d'évolution 2020 réalisées dans le cadre du projet européen "S\_Life" (tableau ci-dessous), puis en recoupant par des dires d'experts.

	Poids moyen par véhicule (kg)		Evolution 2000-2020	Evolution 2008-2018
	2000	2020		
Ferreux	770	432	-43,9 %	-21,9 %
Aluminium	93	148	+59,1 %	29,6 %
Cuivre	15	20	+33,0 %	15,0 %
Plastiques	150	220	+46,7 %	23,3 %
Autres (organiques, liquides, peinture...)	191	125	-34,6 %	-17,3 %
Total	1250	1000	-20,0 %	-10,0 %

Le tableau ci-dessous décrit les hypothèses retenues pour la ventilation des flux traités par les broyeurs en 2018, par type de procédé. La répartition indiquée dans ce tableau a été discutée et validée par plusieurs professionnels du secteur. Elle doit toutefois être considérée comme un ordre de grandeur.

#### Prévision 2018 de répartition des flux par type de séparation post-broyage

Equipements des broyeurs	Fractions de sortie	Prévision 2018 de répartition au niveau national (pour mémoire : situation 2012)	Répartition des tonnages traités ( ktonnes)
Ni trommel, ni Foucault	NF-Mix	20 % (0 %)	0
Trommel seul	NF-Mix + Fines	10 % (0 %)	0
Foucault seul	Zorba + refus d'induction + fines	30 % (30 %)	465
Trommel + Foucault	Zorba + refus d'induction + fines	40 % (70 %)	1084
Total			1469

<sup>43</sup> Source : ADEME – Observatoire VHU.



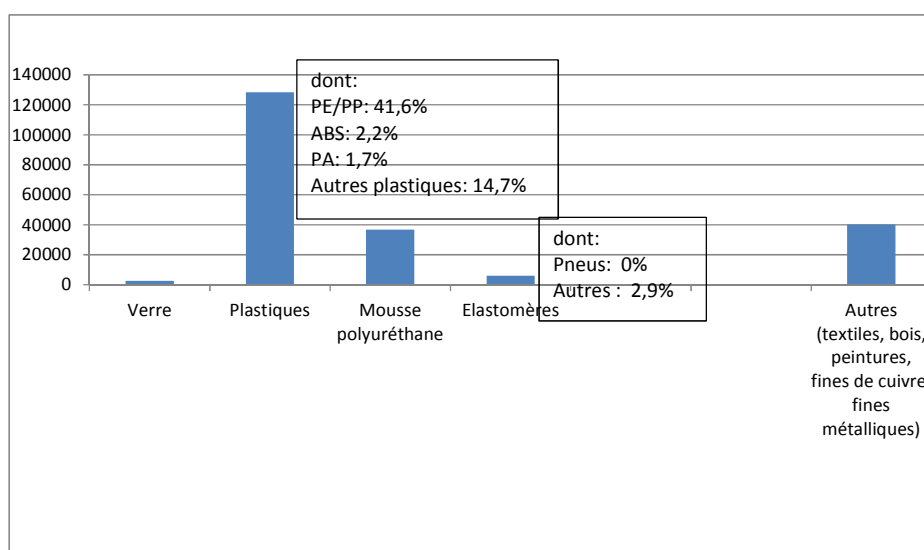
**Note importante :** Les proportions indiquées dans les paragraphes ci-après s'entendent « hors métaux » contenus dans chaque fraction (sachant que les métaux contenus ne présentent pas d'intérêt en vue de la valorisation énergétique).

## 6.2.2 Fraction « RB léger »

### Evolution à l'horizon 2018

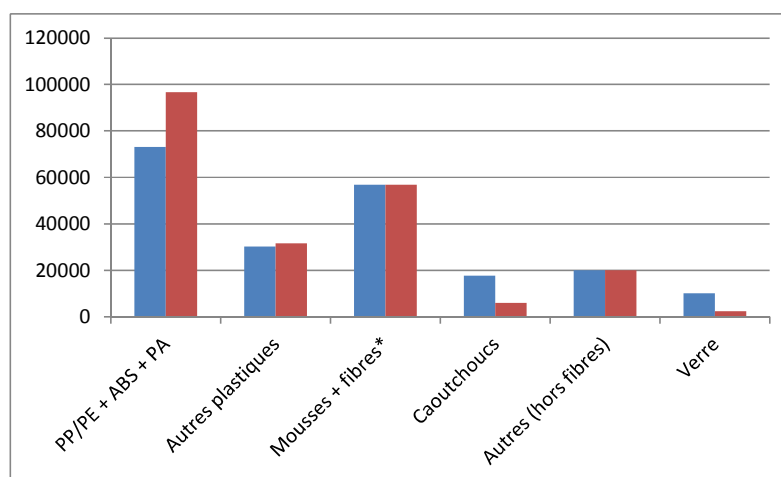
La part des plastiques dans le RB léger va fortement augmenter, de 73 kt en 2008 à 97 kt en 2018, pour atteindre environ 60 % du total. Au sein de la fraction plastique, les thermoplastiques les plus faciles à trier représenteront plus de 70 % en poids. A contrario, les proportions de verre et d'élastomères vont nettement diminuer<sup>44</sup>. La proportion des plastiques chargés va augmenter.

Composition du RB léger (projection 2018, hors métaux)



Source : Résultats de la modélisation

RB léger : Evolution 2008-2018



2008
2018

<sup>44</sup> Même si la proportion d'élastomères dans le RB diminue à moyen-terme du fait du démontage de plus en plus poussé des pneus, il restera malgré tout des caoutchoucs dans le RB, et donc du soufre.

## *Potentiel de valorisation*

### Résidus fins de broyage

Les résidus fins de broyage, qui représentent 54 % du fluff, seront difficiles à valoriser en recyclage matière du fait de leur hétérogénéité matière, de leur faible granulométrie et de leur pollution élevée

De même, ils ne sont pas aptes à la valorisation énergétique du fait de leur faible PCI (<4 MJ/kg) et de la proportion élevée en charges minérales (teneur en cendres >80 %).

### Résidus organiques de broyage

La fraction thermoplastiques des résidus organiques de broyage (46 % du fluff) pourrait faire l'objet d'un recyclage matière à condition d'extraire les chlorés et les bromés jusqu'à moins de 0,5 %. D'autre part, leur teneur en cendres est de l'ordre de 30 à 40 %.

Les caoutchoucs pourraient être recyclés matière sous réserve d'un tri suffisamment fin.

Les autres plastiques, mousses, fibres n'offrent aucune perspective de recyclage matière.

La valorisation énergétique des plastiques, mousses, fibres et caoutchoucs est envisageable, tant du point de vue de la granulométrie que du PCI (env. 18MJ/kg).

### *6.2.3 Fractions« RB lourds »*

La valorisation énergétique des fines dans des UIOM est difficilement envisageable, la teneur en cendres étant très supérieure à 30 %.

Le recyclage matière des ROB est envisageable à condition d'extraire les chlorés et les bromés jusqu'à moins de 0,5 %.

Les pare-chocs mixés ou additivés posent problème car ils contiennent de la fibre de verre (teneur en cendre élevée). Les joints de portes sont additivés

## NF-Mix

### Evolution à l'horizon 2018

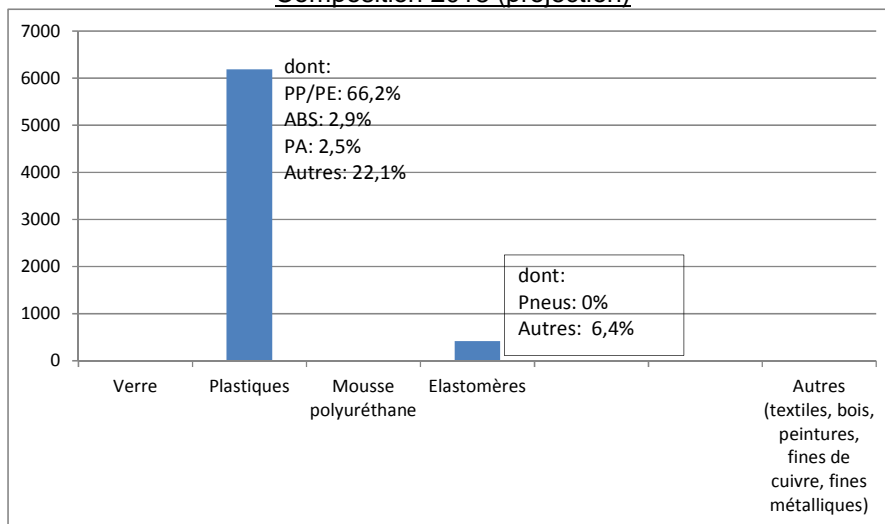
A moyen-terme, la fraction NF-Mix va progressivement disparaître, du fait de l'équipement croissant des broyeurs en machines de tri à courant de Foucault et en trommels sur les RB lourds.

## Zorba

### Evolution à l'horizon 2018

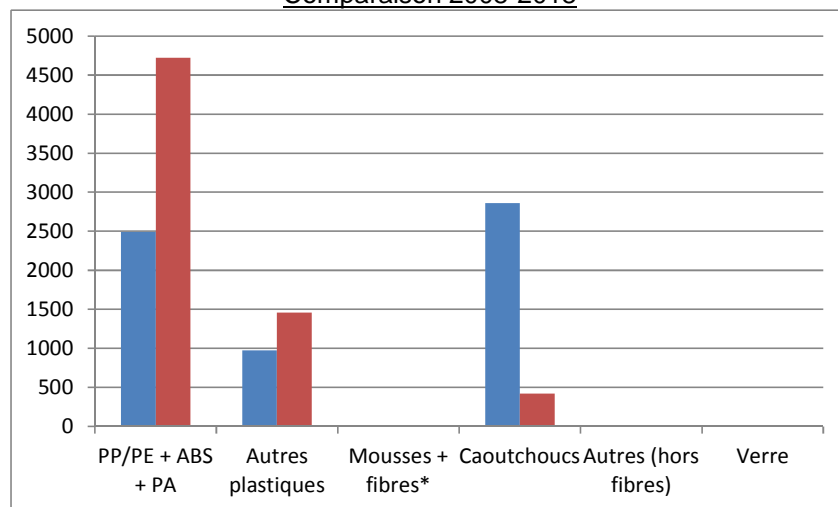
A moyen-terme, le tonnage de cette fraction va légèrement augmenter. La proportion des plastiques va s'accroître pour atteindre 94 % du total. Au sein de la fraction plastique, les thermoplastiques les plus faciles à trier représenteront 75 % en poids.

Composition 2018 (projection)



Source : Résultats de la modélisation

Comparaison 2008-2018



2008
2018

Source : Résultats de la modélisation

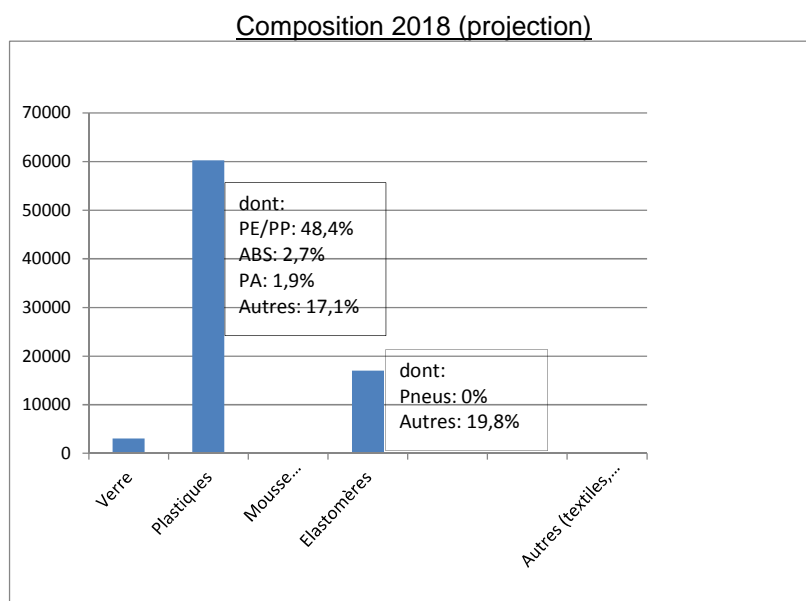
### Potentiel de valorisation

Le faible enjeu du zorba en tonnage (hors métaux non-ferreux) ne sera pas propice au développement du recyclage mécanique.

## Refus d'induction

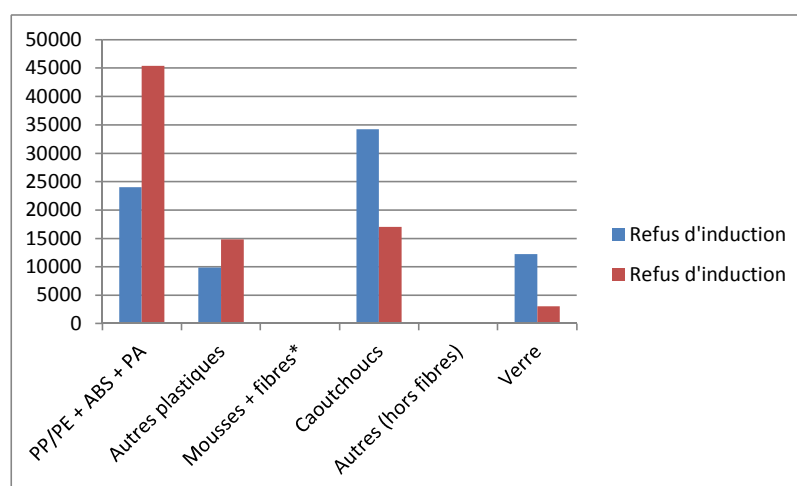
### Evolution à l'horizon 2018

A moyen-terme, la proportion des plastiques dans les refus d'induction va augmenter fortement pour atteindre 75 % du total des refus d'induction. Au sein de la fraction plastique, les thermoplastiques les plus faciles à trier représenteront plus de 75 % de la fraction en poids.



Source : Résultats de la modélisation

### Comparaison 2008-2018



	2008
	2018

### Potentiel de valorisation

La fraction ROB pourrait faire l'objet d'un recyclage matière (teneur en cendres <10 %) sous réserve d'éliminer le verre et les élastomères. Son PCI élevé (de l'ordre de 19 MJ/kg) la rend également apte à la valorisation énergétique. Par contre, le potentiel de valorisation matière et énergétique des fines semble réduit

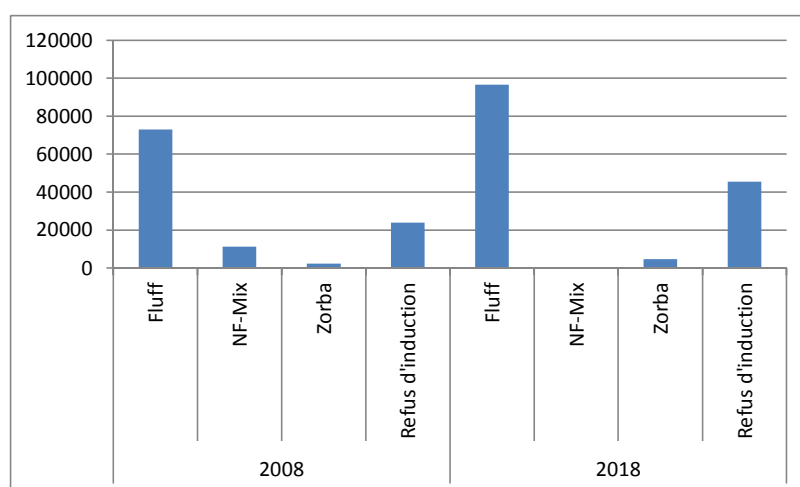
## 6.3 Répartition des matériaux selon les fractions issues du sur-tri

Note importante : Les proportions indiquées dans les fiches s'entendent « hors métaux » contenus dans chaque fraction. Les métaux contenus ne présentent pas d'intérêt en vue de la valorisation énergétique.

### 6.3.1 Répartition des « Thermoplastiques »

Les polyoléfines (PP et PE) sont relativement simples à recycler. Pour la plupart, ils contiennent peu (ou pas) d'additifs gênant le recyclage (on observe toutefois quelques références avec fibres de verre). La fraction Fluff représente le plus gros potentiel de sur-tri en tonnage d'un mélange PE/PP/ABS/ PA. Les refus d'induction et dans une moindre mesure le NF-Mix représentent des enjeux plus faibles en tonnage. La fraction Zorba contient des quantités négligeables.

#### Situation actuelle et projection d'évolution des tonnages de thermoplastiques

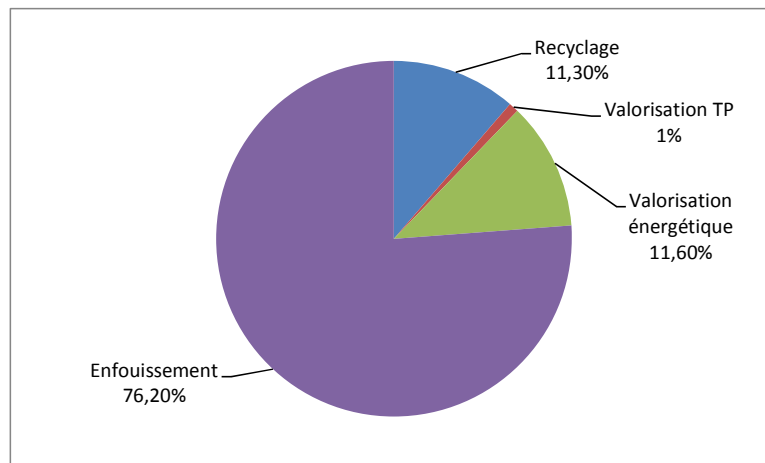


Source : Résultats de la modélisation

#### Caractéristiques de la fraction « Thermoplastiques »

PCI	>20 MJ/kg
Composition	Principalement PE + PP + ABS
Teneur en cendres	<10 %
Densité	<1

### Valorisation des plastiques contenus dans le RBA en France en 2011



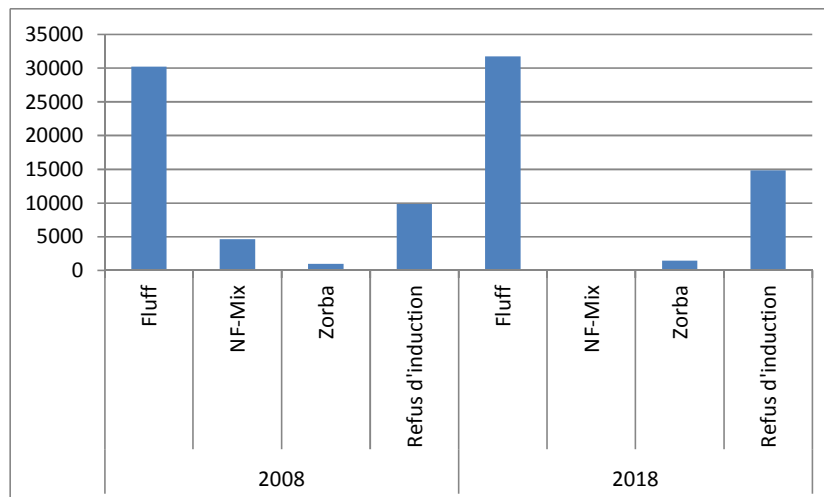
*Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.*

Note : Ce graphique concerne tous les plastiques contenus dans le RBA (thermoplastiques + autres plastiques)

### 6.3.2 Répartition des « Autres plastiques »

La fraction Fluff représente le plus gros potentiel de sur-tri (en tonnage) du mélange d'autres plastiques. Les refus d'induction et dans une moindre mesure le NF-Mix représentent des enjeux plus faibles. La fraction Zorba en contient des quantités négligeables.

#### Situation actuelle et projection d'évolution des tonnages de la fraction « Autres plastiques »



*Source : Résultats de la modélisation*

#### Caractéristiques de la fraction « Autres plastiques »

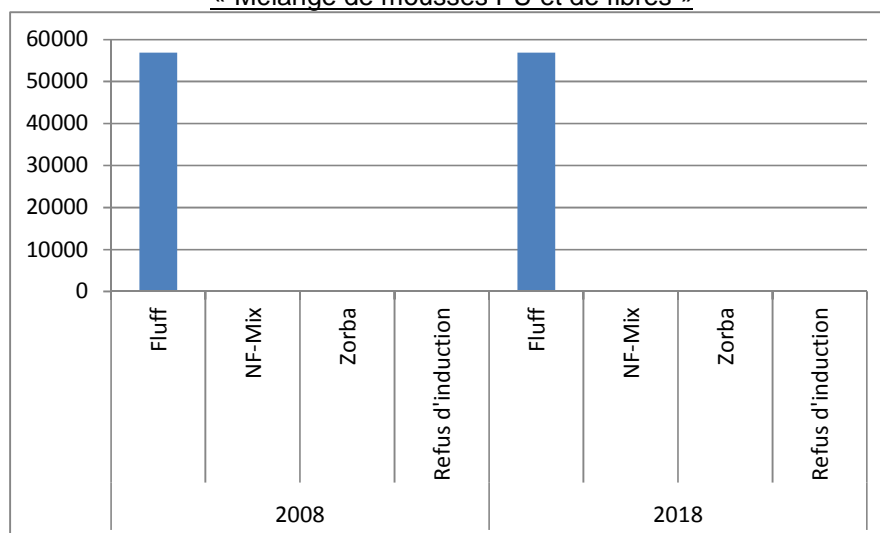
PCI	n.r
Composition	Principalement PA (+ PVC...)
Teneur en cendres	15 %
Densité	<1
Contraintes de valorisation	La majorité va aujourd'hui en enfouissement.

	<p>En pyrolyse, la présence de thermodurcissables entraîne un risque d'agglomération et de colmatage.</p> <p>A terme, on pourrait imaginer un panachage entre les cimenteries et les UIOM.</p>
--	--

### 6.3.3 Répartition du « Mélange de mousses PU et de fibres »

Toutes les mousses PU et fibres sont contenues dans le RB léger.

Situation actuelle et projection d'évolution des tonnages de la fraction « Mélange de mousses PU et de fibres »



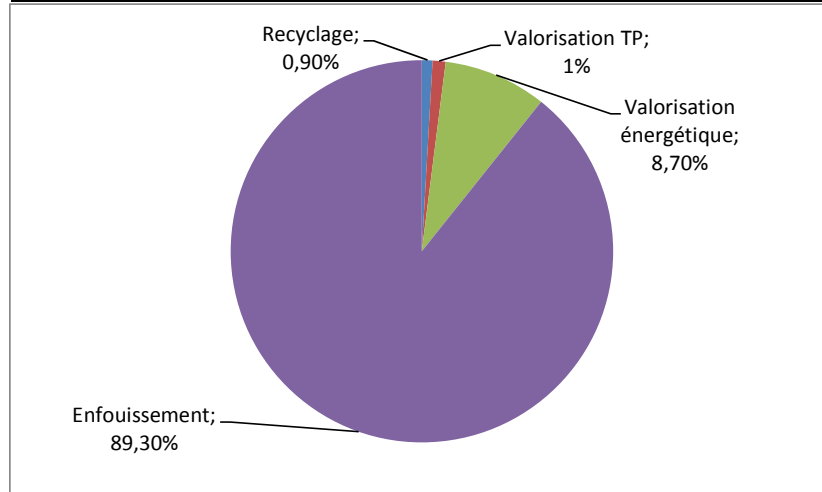
Source : Résultats de la modélisation

Caractéristiques de la fraction « Mélange de mousses PU et de fibres »

PCI	14 MJ/kg
Teneur en cendres	3 à 4 %
Densité	0,08
Point de ramollissement de cendres	Des tests de pyrolyse ont conduit à 22 % de « char » à 400°C sur cette fraction
Granulométrie	40 mm
Contraintes de valorisation	<p><u>Mousses</u> Les mousses en fin de vie sont souvent âgées, jaunies, sales et souillées, ce qui accroît leur dangerosité. Leur composition présente une grande variabilité<sup>45</sup>.</p> <p><u>Textiles</u> Peu d'installations permettent à ce jour de traiter les textiles automobiles. Les procédés qui ont été développés concernent essentiellement le contenu en PVC des textiles (les fibres textiles peuvent être enduites de PVC). Les techniques identifiées ne permettent en outre que le traitement des textiles PVC issus du démontage.</p> <p>Certains recycleurs de textiles indiquent un risque de contamination par les fluides – huile, saletés, poussières (y compris lorsque les véhicules sont démontés).</p> <p>L'incinération pourrait se développer, mais pas en cimenteries car le PCI est trop faible.</p>

<sup>45</sup> Source : « Etude du marché du polyuréthane et Etat de l'art de ses techniques de recyclage », ADEME.

### Valorisation des mousses contenues dans le RBA en France en 2011

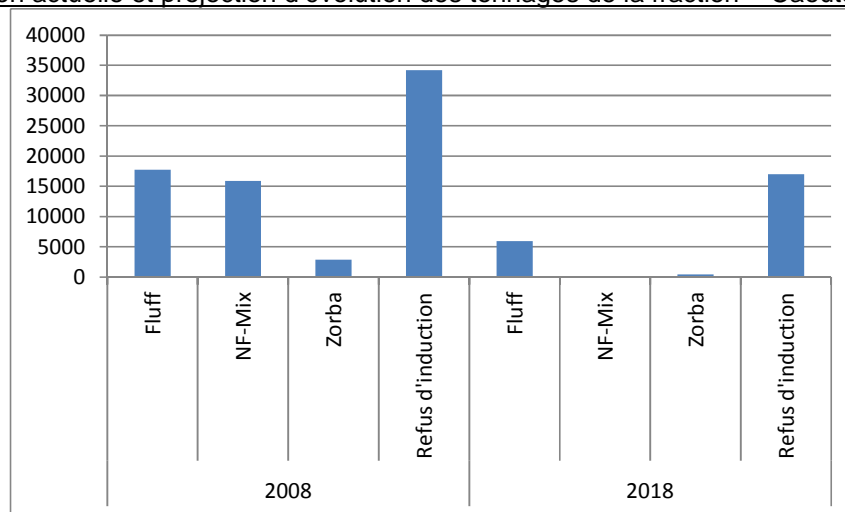


Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.

### 6.3.4 Répartition des « Caoutchoucs »

Le principal gisement potentiel de caoutchoucs (en tonnage) se situe dans les refus d'induction. Le Fluff, le NF-Mix et la fraction Zorba représentent des enjeux plus faibles.

#### Situation actuelle et projection d'évolution des tonnages de la fraction « Caoutchoucs »



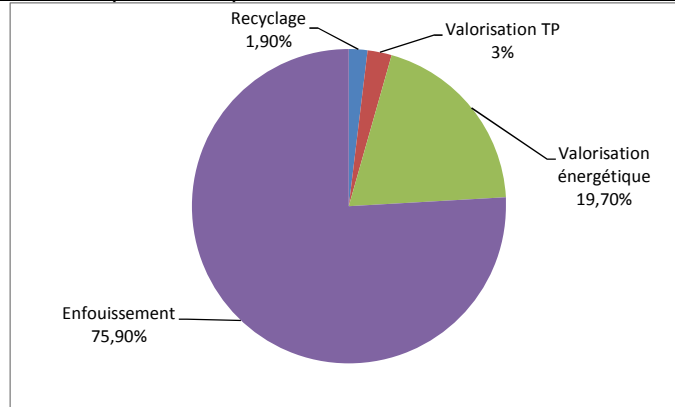
Source : Résultats de la modélisation

#### Caractéristiques des caoutchoucs

PCI	15 à 20 MJ/kg
Composition	
Teneur en cendres	Elevée
Densité	n.r
Contraintes de valorisation	<p>Des problèmes de stabilité de couleurs peuvent causer une dégradation de la qualité.</p> <p>La fraction « caoutchoucs » est hétérogène. Elle contient du bois, des pierres, un peu de plastiques et un peu de métaux (les durites armées d'acier peuvent poser des problèmes d'homogénéité)</p> <p>Les caoutchoucs sont parfois contaminés par de l'éthylène glycol contenu dans les liquides de refroidissement.</p>

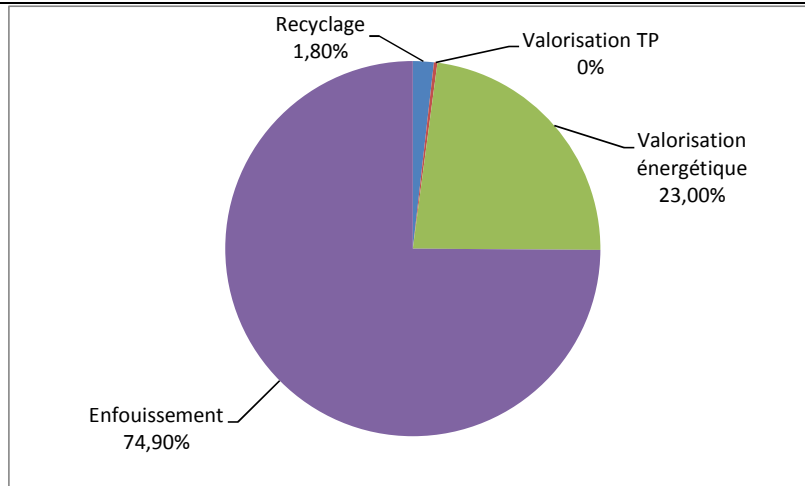


### Valorisation des pneumatiques contenus dans le RBA en France en 2011



Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.

### Valorisation des autres caoutchoucs contenus dans le RBA en France en 2011



Source : ADEME : « Taux 2011 de réutilisation, de recyclage et de valorisation des VHU » - Commission VHU – 16 juillet 2013.

## 7 Analyse des procédés de valorisation énergétique des RB : contraintes et opportunités

Les fiches du présent chapitre sont structurées selon les rubriques suivantes :

Degré de maturité de la technologie
Parc actuel
Sur/sous-capacité de traitement par rapport à la demande
Degré d'utilisation actuel du RB
Nombre d'UIOM autorisées à traiter du RB
Contexte réglementaire
Efficacité énergétique
Prérequis sur les charges
Impact sur les effluents
Impact sur les co-produits et résidus
Coût net de traitement / tonne de déchet traité
Bilan masse-énergie

## Fiche T1 : Incinération dans les UIOM

Degré de maturité de la technologie	Technologie mature. Des tests ont été réalisés, en particulier en Allemagne, Suisse, Espagne et Suède. Seule la Suisse utilise industriellement l'incinération à grande échelle pour le traitement du RBA.
Parc actuel	127 UIOM en exploitation.
Sur/sous-capacité de traitement par rapport à la demande	Variable selon les régions. Il n'y a pas d'excédent structurel de capacité des UIOM au niveau national. Chaque contexte régional doit être examiné au cas par cas
Degré d'utilisation actuel du RB	France : Difficile à estimer mais probablement très faible. Autres pays : L'Allemagne et la Suisse sont les seuls pays européens à co-incinérer le RBA à grande échelle. Ils ne dépassent pas une proportion de 5 à 10 % dans la charge des UIOM. Les opérateurs d'UIOM sont réticents à co-incinérer des RB pour des raisons à la fois opératoires, économiques et environnementales.
Nombre d'UIOM autorisées à traiter du RB	Certaines UIOM sont autorisées, par arrêté préfectoral, à traiter du RB (il n'existe pas de recensement de ces unités au niveau national). Chez SITA, un ou deux sites disposent de cette autorisation.
Contexte réglementaire	Déchets contenant moins de 1 % de chlore en poids dans la fraction à traiter : Température minimale du gaz : 850°C ; temps de résidence égal à au moins 2 secondes. Déchets dangereux contenant plus de 1 % de chlore en poids : température minimale du gaz : 1100°C ; temps de résidence égal à au moins 2 secondes. 25 à 30 % des capacités d'UIOM en France atteignent un taux suffisant pour que l'incinération du RBA soit reconnue comme de la valorisation énergétique (R1 supérieur au ratio « plancher »). Pas de stratégie claire des pouvoirs publics en matière de prise en compte du RB dans les arrêtés d'exploitation des UIOM.
Efficacité énergétique	Très variable selon l'installation (35 % en moyenne)
Prérequis sur les charges <sup>46</sup>	Si le PCI est > 15 MJ/tonne, on prend le risque de provoquer des surchauffes dans les fours, voire de brûler les grilles
	Teneur en chlore <0,5 %, sinon risque de formation de POP dans les effluents gazeux L'alternative consistant à « diluer » le RB à l'entrée des OMR semble techniquement peu réaliste.
	Teneur en composés bromés <3 %
	La teneur de certains métaux lourds dans le RB est jusqu'à 100, voire 1000 fois plus élevée que dans les OMR. Ceci entraîne une augmentation sensible (10 % en moyenne avec le RBA) des teneurs en métaux lourds dans les mâchefers et les cendres volantes (jusqu'à 60 %), en particulier en Cu et en Fe. En outre, il se produit une volatilisation presque complète du Pb et du Zn, favorisée par la présence de chlore.
Impact sur les co-produits et résidus	Un taux de cendres trop élevé entraîne une augmentation significative du volume des mâchefers. Augmentation de la teneur en métaux lourds dans les mâchefers.
Coût net de traitement / tonne de déchet traité	OMR : 70 à 120€/tonne (coût net de revente de l'énergie) (30€/t en Allemagne).  La combustion d'une tonne de RBA apporte environ 22 MJ/kg d'énergie, au lieu de 8 MJ/kg dans le cas des OMR. Cela signifie que le four d'incinération prendra presque 3 tonnes de moins d'OMR chaque fois qu'il accepte de traiter une tonne de RBA.
Bilan masse-énergie	Sachant que les UIOM en fonctionnement ont incinéré 13,5 Mt de déchets ménagers, les 150 kt de RBA correspondant à 10 % du poids des VHU représenteraient 1,1 % du tonnage total traité par les UIOM et 3,1 % de la charge thermique (voir détails en annexe 3).

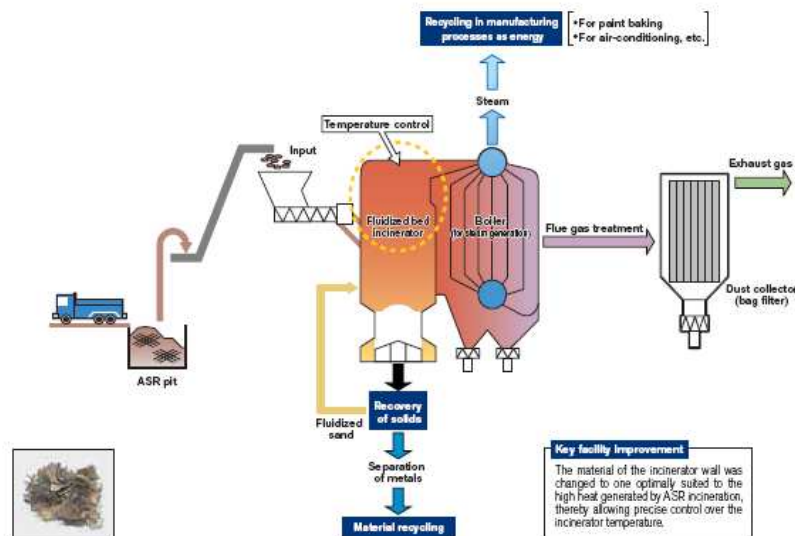
<sup>46</sup> Les détails relatifs aux prérequis sont consultables en annexe 3.

## Fiche T2 : Co-combustion du RBA dans des fours industriels

Au Japon, Nissan Motor a démarré en 2005 un incinérateur à son usine automobile d'Oppama, après l'avoir adapté pour le traitement d'un mélange de RBA et de déchets de production. L'unité traite 5000 t/an. La vapeur produite est utilisée dans l'usine pour les ateliers de peinture.

Les principaux problèmes rencontrés au démarrage étaient liés au PCI élevé de la charge (difficulté de maintenir sous contrôle la température opératoire) et au fait que les imbrûlés avaient tendance à fondre et à s'agglutiner aux parois internes du four. Ces problèmes ont été résolus en affinant le système de régulation de température.

Les industriels sont réticents à utiliser du RB dans leurs fours du fait des contraintes opératoires. La séparation des élastomères permettrait d'améliorer la qualité du RB.



Source : Nissan Motor

## Fiche T3 : Co-combustion en cimenterie

Degré de maturité de la technologie	Mature																																																		
Parc actuel	33 cimenteries en activité.																																																		
Sur/sous-capacité de traitement par rapport à la demande	Variable selon la conjoncture économique. Situation actuelle de surcapacité.																																																		
Degré d'utilisation actuel du RB	Plusieurs cimenteries françaises valorisent du RBA depuis de nombreuses années, par exemple la cimenterie Vicat de Montalieu-Vercieu (38) qui a un partenariat depuis 1992 avec Derichebourg Environnement à Saint-Pierre-de-Chandieu (69) avec une filiale commune Valerco.  L'Espagne est le pays d'Europe qui a développé le plus largement l'usage du RB en cimenterie, cet usage étant toutefois limité aux précalcinateurs.																																																		
Contexte réglementaire	Tous les cimentiers ont un cahier des charges et des exigences strictes en matière de teneurs en chlore, en soufre et en métaux lourds dans les effluents et dans les clinkers. Ces teneurs sont réglementairement limitées <sup>47</sup> .																																																		
Prérequis sur les charges	Le PCI minimum requis est de 20 MJ/kg (pas de limite haute) en alimentation de la tuyère d'injection et de 16 MJ/kg (pas de limite haute) en alimentation du précalcinateur. Ces limites sont compatibles avec le PCI du RBA, qui est > 18 MJ/kg.  Dans le cas de l'injection en tuyère, un taux de cendres trop élevé entraîne une augmentation notable de la production de cendres, induisant des risques de colmatage dans la zone d'injection du combustible.																																																		
Impact sur les produits fabriqués	L'utilisation de RBA dans un four à ciment <sup>48</sup> a un impact négatif sur la qualité du clinker fabriqué. Dans le cas d'une alimentation avec un combustible contenant 50 % de RBA, les concentrations en chlore, en plomb, en cadmium, en cuivre et en zinc dans le clinker augmentent de manière considérable, comme le montre le tableau suivant.  <p style="text-align: center;"><u>Concentrations en métaux lourds dans le clinker</u> (1<sup>ère</sup> colonne : combustible fossile 2<sup>ème</sup> colonne : avec 50 % de RBA dans la charge)</p> <p style="text-align: center;"><small><i>L. Vermeulen et al. / Journal of Hazardous Materials xxx (2011) xxx-xxx</i></small></p> <p style="text-align: right;"><small>11</small></p> <p><small>Table 9 Heavy metal concentration in the cement clinker; co-incineration ratio of ASR: 50% [88].</small></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Unit</th> <th>Without waste</th> <th>With ASR</th> <th>Swiss Buwal<sup>a</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cl</td> <td>mg/kg</td> <td>134</td> <td>1180</td> <td>1000<sup>b</sup></td> </tr> <tr> <td>As</td> <td>mg/kg</td> <td>13</td> <td>14.9</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Pb</td> <td>mg/kg</td> <td>16.2</td> <td>55.4</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Cd</td> <td>mg/kg</td> <td>0.3</td> <td>6.6</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>mg/kg</td> <td>34.6</td> <td>129</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>mg/kg</td> <td>17.9</td> <td>1070</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Ni</td> <td>mg/kg</td> <td>27.3</td> <td>98.5</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Hg</td> <td>mg/kg</td> <td>0.12</td> <td>0.08</td> <td>0.5<sup>b</sup></td> </tr> <tr> <td>Zn</td> <td>mg/kg</td> <td>59.6</td> <td>1750</td> <td>350</td> </tr> </tbody> </table> <p><small><sup>a</sup> Swiss product specifications for clinker. <sup>b</sup> Guide values for Portland cement.</small></p>	Element	Unit	Without waste	With ASR	Swiss Buwal <sup>a</sup>	Cl	mg/kg	134	1180	1000 <sup>b</sup>	As	mg/kg	13	14.9	40	Pb	mg/kg	16.2	55.4	100	Cd	mg/kg	0.3	6.6	1.5	Cr	mg/kg	34.6	129	150	Cu	mg/kg	17.9	1070	100	Ni	mg/kg	27.3	98.5	100	Hg	mg/kg	0.12	0.08	0.5 <sup>b</sup>	Zn	mg/kg	59.6	1750	350
Element	Unit	Without waste	With ASR	Swiss Buwal <sup>a</sup>																																															
Cl	mg/kg	134	1180	1000 <sup>b</sup>																																															
As	mg/kg	13	14.9	40																																															
Pb	mg/kg	16.2	55.4	100																																															
Cd	mg/kg	0.3	6.6	1.5																																															
Cr	mg/kg	34.6	129	150																																															
Cu	mg/kg	17.9	1070	100																																															
Ni	mg/kg	27.3	98.5	100																																															
Hg	mg/kg	0.12	0.08	0.5 <sup>b</sup>																																															
Zn	mg/kg	59.6	1750	350																																															
Impact sur les effluents																																																			
Impact sur les co-produits et résidus	L'utilisation de RBA entraîne une volatilisation du mercure et donc des concentrations accrues d'éléments dangereux dans les poussières																																																		
Autres atouts	Le temps de résidence des gaz d'incinération dans un four principal de cimenterie																																																		

<sup>47</sup> Les limites sont fixées par l'arrêté du 20/09/02 (modifié par l'arrêté du 10 février 2005). relatif aux installations d'incinération et d'incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux, et par les arrêtés préfectoraux des cimenteries.

<sup>48</sup> Cf. travaux réalisés par Gendebien et al.(2003) en Suisse.

	(environ 8 secondes au-dessus de 1200°C) est favorable à la destruction complète des polluants dangereux.
Coût net de traitement / tonne de déchet traité	<p>L'exemple du CSR permet d'approcher ce que pourrait être le prix de cession du RBA. Toutefois, pour présenter un intérêt pour le cimentier, le RBA doit être nettement mieux rémunéré que le CSR.</p> <p>Le prix payé au cimentier par le préparateur de CSR dépend très largement de la qualité du CSR livré (surtout son PCI et sa teneur en chlore). Il se situe actuellement aux environs de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> 20 à 50 €/t (transport inclus) pour du CSR de PCI &lt;15-18 MJ/kg</li> <li><input type="checkbox"/> 0 à 20 €/t pour du CSR de PCI &gt;18 MJ/kg.</li> </ul> <p>En ce qui concerne le chlore, deux cas de figure peuvent se présenter pour un cimentier souhaitant utiliser du CSR en quantité significative, selon la configuration et le mode d'exploitation de la cimenterie concernée :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> soit l'installation n'est pas équipée d'un by-pass chlore mais peut accepter de passer la quantité de chlore supplémentaire sans que cela engendre de problèmes majeurs ;</li> <li><input type="checkbox"/> soit l'utilisation de CSR suppose impérativement l'installation d'un by-pass chlore (possible que sur les procédés secs, c'est-à-dire moins de la moitié des unités françaises), Dans ce cas, le cimentier n'a pas d'autre choix que d'équiper l'installation d'un by-pass chlore, pour un coût d'investissement de 5 à 10 M€. <p>Les critères de qualité du CSR, en sus du PCI et du chlore, comprennent aussi l'humidité (l'utilisation d'un CSR à forte teneur en humidité se traduit par une perte de production comprise entre 1 et 5 %), la disponibilité, la régularité de livraison, la logistique d'approvisionnement et l'absence de corps étrangers.</p> <p>En Allemagne, le prix de cession payé par le préparateur de CSR se situe dans une fourchette plus large (entre 0 et 80 €/t selon la qualité du CSR) car les débouchés des CSR sont plus nombreux et donc les qualités plus diversifiées.</p> <p>Forte « concurrence » des autres combustibles de substitution, en particulier des pneus, farines animales, solvants, huiles usagées.</p> </li></ul>
Bilan masse-énergie	<p>La consommation énergétique des cimenteries en France était de 67 700 TJ en 2008, dont 73 % de combustibles fossiles (coke de pétrole, charbon, fioul lourd, brais bitumineux) (source : ATILH). La valorisation énergétique de la totalité des fractions combustibles non recyclables du RBA représenterait par conséquent environ 4,9 % de la charge thermique totale des cimenteries françaises.</p> <p>Il faut toutefois nuancer ce chiffre dans la mesure où l'utilisation du RBA devra probablement être limitée aux précalcinateurs pour des raisons techniques. Sachant que la consommation énergétique des précalcinateurs représentait 7,1 %<sup>49</sup> de la consommation énergétique totale des cimenteries françaises en 2008, la combustion de la totalité du RBA représenterait 70 % de la consommation énergétique des précalcinateurs. Par conséquent, les cimenteries ne pourraient probablement pas traiter à elles-seules la totalité du RBA.</p>

<sup>49</sup> En 2008, 5 cimenteries françaises sur 33 étaient équipées de précalcinateurs (Vicat/Montalieu ; Lafarge / St-Pierre La Cour ; Lafarge/Port-la-Nouvelle ; Calcia/Couvrot et Calcia/Beaucaire). En outre, l'énergie consommée par une cimenterie équipée d'un précalcinateur est répartie à 60 % dans le précalcinateur et à 40 % dans la (les) tuyère(s) principale(s).

## Fiche T4 : Utilisation du RB dans des hauts-fourneaux

Degré de maturité de la technologie	Mature, mais peu développée.
Parc actuel	Hauts-fourneaux d'Arcelor Mittal à Dunkerque et à Fos-sur-mer.
Degré d'utilisation actuel du RB	<p>Les aciéries allemandes Arcelor Bremen et Arcelor Eisenhüttenstadt du groupe ArcelorMittal<sup>50</sup> ont traité par le passé des refus de collecte sélective d'emballages dans leurs hauts-fourneaux (il ne s'agissait pas de résidu de broyage).</p> <p>Des essais ont également été effectués en coopération avec VW, en introduisant directement des carcasses de VHU. Les résultats ont été désastreux au plan technique.</p> <p>A l'issue de plusieurs campagnes de tests, Arcelor est arrivé à la conclusion que l'utilisation du RB dans les hauts fourneaux génère des problèmes d'exploitation réhhibitoires, liés en particulier à :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la présence de cuivre dans le RB (poison pour l'acier)</li> <li>- la présence de zinc, qui s'accumule à l'intérieur des hauts-fourneaux et finit par provoquer leur encrassement</li> </ul> <p>En outre, l'utilisation du RB est rendue délicate par la variabilité de la qualité de la charge, ainsi que par la composition chimique et la teneur en métaux non-ferreux<sup>51</sup></p>
Contraintes réglementaires	La directive-cadre ne précise pas clairement si l'usage du RB dans des hauts-fourneaux est considéré comme de la valorisation matière ou énergétique.
Prérequis sur les charges	<p>Le RBA doit nécessairement faire l'objet d'une préparation couteuse afin de limiter les concentrations en chlore, en cuivre, en plomb et en zinc. En outre, les travaux réalisés par le "Competitive Analysis Center Inc" et par « Economic Associates Inc. » ont montré que les caractéristiques suivantes doivent être satisfaites:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• granulométrie : 3,2 à 6,4 mm</li> <li>• teneur en humidité: &lt; 7,5 %</li> <li>• teneur en cendres : &lt;10 %.</li> </ul>
Impact sur les produits fabriqués	<p>Une teneur en cuivre trop élevée de l'acier entraîne sa fragilisation<sup>52</sup></p> <p>Des traces de métaux lourds se dissolvent dans le métal chaud et le laitier et peuvent nuire aux performances de l'acier fabriqué.</p>
Impact sur les effluents	Risque d'augmentation de la teneur en HCl dans les gaz de sortie, au-delà des limites réglementaires.
Impact sur les co-produits et résidus	

<sup>50</sup> Entretien avec Mr Birat (Arcelor Mittal) le 24/05/2013

<sup>51</sup> Deux voies ont été identifiées pour pallier le problème des fluctuations de l'alimentation en combustible. Toutefois, elles en sont encore au stade de la R&D :

- Le procédé thermique Thermobath® permet de séparer par densimétrie les plastiques et les sédiments (métaux, verre, poussières...) contenus dans le RBA, dans un bain d'huile à 280°C.
- L'entreprise Comet Traitement travaille activement à la préparation d'une fraction carbonée (Char), co-produit d'un craquage catalytique (dépolymérisation thermique) du RB, qui pourrait être utilisé directement dans un haut-fourneau.

<sup>52</sup> J.K. Fink, Pyrolysis and combustion of polymer wastes in combination with metallurgical processes and the cement industry, J. Anal. Appl. Pyrol. 51 (1999) 239–252..

Autres atouts	Les conditions opératoires garantissent la destruction complète de tous les POP.
Autres inconvénients	<p>La présence de plomb et de zinc dans le RB génère la formation structures solides indésirables dans le haut-fourneau et provoque un accroissement de la consommation de coke et de la consommation d'énergie.</p> <p>Le chlore s'accumule dans les poussières, dont une partie risque de se « recycler » dans le four. Une teneur excessive en chlorés dans la charge réduit la durée de vie de l'installation.</p>
Coût net de traitement / tonne de déchet traité	n.r
Bilan masse-énergie	n.r



## Fiche T5 : Utilisation du RB dans des fours électriques (acier)

L'utilisation de RB suscite de fortes interrogations du fait de la présence de cuivre (la présence de ce dernier étant toutefois beaucoup moins gênante que dans les hauts fourneaux), la teneur en cuivre pouvant fluctuer dans des proportions importantes. En Europe, aucun aciériste ne s'est lancé dans cette voie.

Une étude est en cours par BRGM / Arcerlor (dans le cadre du projet ANR « Reforba ») pour définir les exigences de préparation du RB afin de le rendre apte à une utilisation en sidérurgie.

Le point de vue d'Arcelor sur les perspectives de valorisation énergétique du RB en sidérurgie confirme les obstacles déjà identifiés et la réticence des industriels à s'impliquer dans des développements futurs. Arcelor n'est pas motivé du tout pour tenter des essais<sup>53</sup>.

L'introduction de résidus organiques spécifiques tels que des pneus broyés ou des RB lourds (fraction combustible) dans les paniers de ferrailles pourrait permettre de maintenir un milieu légèrement réducteur et de soulager la consommation électrique, sans trop affecter la qualité de l'acier produit.

Il est intéressant de faire l'analogie avec l'application consistant à utiliser des broyats de pneus en substitution au charbon dans les fours électriques des aciéries. Arcelor a acquis une bonne expérience dans l'utilisation de broyats de pneus. C'est un flux stable et reproductible, qui donne satisfaction. Utilisés entiers ou sous forme de découpes en morceaux, les pneus usés ont le même effet que l'antracite du charbon pour réduire la rouille des ferrailles usagées introduites dans le four où se forme l'acier. Mais ils ne contiennent pas assez de ferrailles pour pouvoir être manipulés par l'électroaimant qui sert à alimenter les fours électriques dans les installations classiques et il faut donc prévoir des grappins. Les contraintes sont nombreuses (nécessité de revoir les installations et de recevoir l'agrément des DREAL, qui exigent toute une batterie de mesures pour donner leur validation).

En conclusion, bien qu'elle ne soit pas utilisée aujourd'hui par les industriels, cette piste mériterait d'être approfondie, afin de mieux comprendre les atouts et handicaps des résidus de broyage par rapport aux autres types d'agents réducteurs.

---

<sup>53</sup> Après vérification, aucune information n'existe concernant l'introduction directe de carcasses de VHU dans des fours électriques au Japon. Il y a probablement confusion avec les essais réalisés dans des hauts fourneaux.

## Fiche T6 : Gazéification

Degré de maturité de la technologie	Plusieurs concepteurs de procédés de gazéification revendiquent la capacité de leur procédé à accepter tous les types de déchets plastiques broyés, sans contraintes particulières concernant la propreté des déchets (traces de peinture, de colle, d'étiquettes) ou leur contenu en additifs ou en métaux. Dans la pratique, on constate que l'utilisation de RBA s'est limitée généralement à des tests, dont les résultats ne sont pas connus précisément. Les unités de gazéification en exploitation consomment principalement des déchets d'emballage plastique issus de la collecte sélective, voire des déchets issus de la transformation des plastiques.
Parc actuel	Pas d'installation industrielle en France (2 en Allemagne, une au Canada, une en Belgique).
Sur/sous-capacité de traitement par rapport à la demande	Sans objet.
Degré d'utilisation actuel du RB	Aucune unité industrielle en Europe ne fonctionne (même partiellement) avec du RBA ou des fractions issues du RBA.
Nombre d'unités autorisées à traiter du RB	Sans objet
Contraintes réglementaires	<p>Au titre de la réglementation ICPE, les installations de gazéification sont considérées comme de l'incinération. La modification en cours des rubriques 2910 A et 2910 B de la classification ICPE pourrait faire évoluer la situation.</p> <p>Les discussions sur les possibilités de sortie du statut de déchet pour certains sous-produits liquides ou solides issus des procédés de gazéification (afin de faciliter les conditions de leur commercialisation) n'ont pas encore abouti.</p>
Efficacité énergétique	Mr. Gleis, "senior expert" au Ministère allemand de l'environnement souligne que l'efficacité énergétique de l'unité Thermoselect de Karlsruhe (Allemagne) a été évaluée à seulement 8,5 % par le Centre de recherche de Karlsruhe.
Prérequis sur les charges	<p>La proportion d'halogènes dans la charge ne doit pas dépasser 10 % afin d'éviter les problèmes de corrosion.</p> <p>Les morceaux doivent avoir une taille de 4 à 100 mm de diamètre et 200 mm de longueur maximale.</p> <p>Le taux d'humidité des déchets entrants ne doit pas dépasser environ 20 %.</p> <p>Un point de ramollissement des cendres trop bas provoque un encrassement des installations. Le niveau du point de ramollissement dépend de la teneur en alcalins dans le RB.</p> <p>Nécessité d'éliminer les métaux lourds dans la charge.</p> <p>Le gaz de synthèse doit être préalablement décontaminé (soufre, chlore, poussières...) avant d'être valorisé comme combustible dans des moteurs lents ou pour des synthèses chimiques (ammoniac...).</p>
Impact sur les produits	Faible
Impact sur les effluents	Faible
Impact sur les co-produits et résidus	Du fait de sa concentration élevée en métaux lourds et en minéraux, le résidu est généralement mis en décharge. Dans le cas des procédés de gazéification assistée par torche à plasma, les températures atteintes permettent de fondre les résidus de gazéification qui, après refroidissement, se présentent sous forme d'un vitrifiat inerte. Le matériau obtenu peut être

	<p>réutilisé, par exemple pour la construction de routes.</p> <p>Les opérateurs d'unités de gazéification au Japon optimisent leurs procédés en effectuant une séparation « post-coulée » de la fraction solide produite, ce qui permet de sortir une fraction « métaux » (valorisable) et une fraction « inertes ». Ces opérateurs sont principalement des sidérurgistes, qui ont transposé au domaine de la gazéification leur savoir-faire en sidérurgie.</p>
Autres atouts	<p>Les procédés de gazéification opèrent en milieu partiellement oxydant. Ils présentent l'avantage de ne pas trop oxyder les métaux contenus dans la charge. Le besoin en préparation des déchets est donc moindre.</p> <p>La gazéification accepte les déchets sales ou pollués par des graisses ou des traces de peinture.</p> <p>Certains procédés (tel que Ecoloop – Allemagne) permettent de F traiter des déchets contenant du PVC ou des additifs bromés, sans impact environnemental négatif.</p> <p>On peut atteindre une teneur de 15 % en poids d'halogènes (dont 3 % en bromés) dans la charge sans entraîner de problèmes de corrosion des équipements ou de risque d'émission de composés dangereux.</p>
Autres handicaps	<p>Le gaz de synthèse doit être préalablement décontaminé (soufre, chlore, poussières...) avant d'être valorisé comme combustible dans des moteurs lents ou pour des synthèses chimiques.</p>
Coût net de traitement / tonne de déchet traité	<p>Le coût de production du procédé Ebara/Twinrec est de l'ordre de 120 à 200 €/t de déchet traité<sup>54</sup> (voir fiche procédé en annexe 2).</p> <p>Le coût opératoire du procédé Thermoselect est de l'ordre de 140 €/t de déchet traité.</p>
Bilan masse-énergie	<p>Deux options s'offrent aujourd'hui aux concepteurs de procédés de gazéification, de pyrolyse ou de dépolymérisation, en matière de capacité de traitement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Soit développer des unités de capacité moyenne (20 000 à 50 000 t/an de déchets traités), capables de traiter des charges variées, afin de répondre aux attentes des détenteurs de déchets disposant de flux de déchets limités en quantité, pour le marché européen ou pour les pays en voie de développement ;</li> <li>– Soit développer des unités de grande capacité (200 000 à 300 000t/an) capables de produire des tonnages suffisants de carburants pour amortir des unités aval de production de carburant diesel par synthèse Fischer et Tropsch. La fabrication de carburants par ce procédé se heurte toutefois à des contraintes techniques et économiques : d'une part les exigences de pureté du gaz de synthèse destiné à alimenter ce type d'unité sont très fortes car il s'agit d'un procédé catalytique. D'autre part ce procédé est coûteux et nécessite pour être économiquement viable des unités de grande capacité (quelques centaines de milliers de tonnes de déchets/an<sup>55</sup>).</li> </ul> <p>Si l'on retient la première option, 3 à 7 nouvelles unités de traitement seraient nécessaires pour pouvoir traiter les 150 kt/an de RBA, en supposant que ces unités soient intégralement dédiées au traitement du RBA.</p>

<sup>54</sup> Source: "An Economic Solution for Recycling Fluff from Shredder Light Fraction". Andreas Bartl, Vienna University of Technology.

<sup>55</sup> Source : Tâche 39 de l'AIE « Bioenergy », année 2009.

## Fiche T7 : Pyrolyse et dépolymérisation thermique

Degré de maturité de la technologie	Plusieurs concepteurs de procédés de pyrolyse et de dépolymérisation thermique revendiquent la possibilité d'utiliser des déchets plastiques broyés. Toutefois, aucun d'entre eux ne souligne avoir effectué des tests sur du RBA.
Parc actuel	Unités opérationnelles  <u>Pyrolyse</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Carbon Green (USA) / CBp Carbon (Slovaquie) - Pneus usagés</li> <li>○ Klean Industries Inc. (Canada) - Plastiques issus des déchets ménagers, pneus</li> <li>○ Toshiba Corp. (Japon), en partenariat avec Sapporo Plastics Recycling Co. Ltd. - Déchets plastiques municipaux.</li> </ul> <u>Dépolymérisation thermique</u> Plastic Advanced Recycling Corp. (USA) - Déchets plastiques (films, corps creux...) y compris déchets souillés, déchets hospitaliers.
Sur/sous-capacité de traitement par rapport à la demande	Sans objet
Degré d'utilisation actuel du RB	Nul
Nombre d'unités autorisées à traiter du RB	Sans objet
Contraintes réglementaires	Non
Efficacité énergétique	n.r
Prérequis sur les charges	Nécessité de limiter les teneurs en métaux lourds, en PVC, en élastomères, en PE et en PP.  Les charges contenant des thermodurcissables et du polyuréthane ne peuvent pas être traitées par ce type de procédé.  Le PE et le PP ont tendance à former des cires.
Impact sur les produits	Le PVC peut contaminer le gaz de pyrolyse avec le chlorure de méthyle.
Impact sur les effluents	
Impact sur les co-produits et résidus	Les élastomères forment des goudrons et accroissent la proportion des résidus carbonés.
Autres atouts	Possibilité de traiter des déchets sales ou pollués par des graisses ou des traces de peinture.  Permet de traiter des DEEE contenant des produits dangereux, en particulier des circuits imprimés riches en retardateurs de flamme bromés. Les tests réalisés ont montré que l'on peut atteindre une teneur de 15 % en poids d'halogènes (3 % en bromés) sans entraîner de problèmes de corrosion des équipements ou de risque d'émission de composés toxiques.  Possibilité de valoriser les gaz et liquides produits comme combustibles ou comme matières premières pour la chimie.  L'atmosphère réductrice (cas de la pyrolyse) évite la formation de produits tels que les PCDD/F.  La température modérée évite la volatilisation des métaux lourds et de leurs oxydes ou sels. Les métaux lourds se retrouvent dans le coke de pyrolyse.

	<p>La pyrolyse permet de maîtriser les teneurs en dioxines, en HCl, en NOx, en SOx, en poussières et en CO dans les gaz produits.</p> <p>La température modérée évite la volatilisation des métaux lourds et de leurs oxydes ou sels. Les métaux lourds se retrouvent dans le coke de pyrolyse.</p> <p>La pyrolyse permet de maîtriser les teneurs en dioxines, en HCl, en NOx, en SOx, en poussières et en CO dans les gaz produits.</p>
Autres handicaps	Absence de solution adaptée pour la valorisation du coke de pyrolyse.
Coût net de traitement / tonne de déchet traité	Le coût d'exploitation du pilote en opération depuis 1986 sur procédé PyroArc (ScanArc Plasma Technologies AB - Suède) incluant la vitrification des produits minéraux, est d'environ 50 à 230 €/t de déchet traité.
Bilan masse-énergie	Problématique identique à celle de la gazéification

## 8 Synthèse technico-économique : situation actuelle, enjeux et perspectives

### 8.1 Situation actuelle

La valorisation énergétique actuelle du RBA en France est estimée à 29 kt, soit :

- 8,1 % des 355 kt de RBA produites ;
- 1,9 % du tonnage des VHU traités<sup>56</sup>.

Situation actuelle de la valorisation du RBA  
( % en poids des différentes voies de valorisation / élimination, hors métaux)

	Recyclage matière		Valorisation énergétique		Enfouissement	
	RB léger	RB lourds	RB léger	RB lourds	RB léger	RB lourds
Thermoplastiques	20 %	25 %	10 %	10 %	70 %	65 %
Autres plastiques	0 %	0 %	10 %	10 %	90 %	90 %
Mélange mousses PU + fibres	2 %	-	10 %	10 %	88 %	90 %
Caoutchoucs	3 %	10 %	20 %	20 %	77 %	70 %
Verre	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %	100 %
Autres	0 %	10 %	10 %	10 %	90 %	80 %

*Source : Données relatives au recyclage et à la valorisation des fractions issues du broyage des VHU traités - Données 2010 + recoupements avec entreteins.*

Situation actuelle de la valorisation du RBA  
( ktonnes, hors métaux)

	Recyclage matière		Valorisation énergétique	
	RB léger	RB lourds	RB léger	RB lourds
Thermoplastiques	15	9	7	4
Autres plastiques	0	0	3	2
Mélange mousses PU + fibres	1	-	6	-
Caoutchoucs	5	2	2	5
Verre	0	0	0	0
Autres	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>11</b>

*Source : Résultats de la modélisation*

<sup>56</sup> Pour mémoire, l'un des leaders du broyage des RB en France a évalué entre 4,8% et 8% du poids des VHU le taux de valorisation énergétique des fractions combustibles en 2012. La moyenne nationale est certainement plus faible.

## 8.2 Analyse prospective (2015 et au-delà)

### 8.2.1 Méthode

L'approche utilisée pour estimer le potentiel de valorisation énergétique du RBA à moyen-terme comporte quatre étapes :

- La première étape consiste à caractériser les fractions susceptibles d'être recyclées matière à moyen-terme. En effet, compte tenu de la tendance observée depuis 4 à 5 ans, une proportion croissante des thermoplastiques et des caoutchoucs contenus dans le RBA devrait être recyclée matière dans les prochaines années. Les tonnages correspondant ne seront pas accessibles à la valorisation énergétique. L'incertitude à moyen-terme sur l'évolution du recyclage matière a conduit à élaborer deux scénarios ;
- La deuxième étape consiste à identifier les technologies de valorisation énergétique permettant de traiter dans des conditions techniquement acceptables les tonnages non valorisés matière et à décrire les prérequis en matière de préparation de la charge (PCI, granulométrie, teneur en contaminants.....) ;
- La troisième étape consiste à quantifier le potentiel de valorisation énergétique du RBA à partir des deux étapes précédentes ;
- La quatrième étape consiste à analyser les contraintes économiques liées à chacune des voies de valorisation énergétique envisageables.

### 8.2.2 Potentiel de valorisation matière du RBA

#### 8.2.2.1 Fractions « RB léger » et « RB lourds » non sur-triées

Le recyclage matière des flux de RB léger et lourds sans sur-tri préalable n'est pas envisageable du fait de l'hétérogénéité matière.

Potentiel de valorisation matière des RB léger et lourds à moyen terme  
(unité : kt/an)

Fractions	Rappel 2008	Prévision 2018	Potentiel de valorisation matière		Obstacles au recyclage matière	Tonnage restant disponible pour la valorisation énergétique	
			Hyp basse	Hyp haute		Hyp basse	Hyp haute
Total RB léger (non trié)	208	214	0	0	Hétérogénéité matières	214, dont : RFB : 114, ROB : 100	id. hyp. basse
Total RB lourds (non trié)	147	94	0	0	Hétérogénéité matières	94, dont : RFB : 40, ROB : 54	id. hyp. basse

### 8.2.2.2 Fractions issues du RB léger

#### Recyclage matière

Le recyclage matière des thermoplastiques devrait continuer à se développer. Les perspectives sont moins favorables pour les autres fractions issues du RB léger.

#### Valorisation énergétique

Le flux total potentiellement disponible pour la valorisation énergétique en 2018 est de l'ordre de 130 à 170 kt, principalement composé de thermoplastiques, d'autres plastiques (majoritairement des thermodurcissables), de mousses et de fibres.

Perspective 2018 du potentiel de valorisation matière du RBA léger  
(unité : kt/an)

Fractions	Rappel 2008	Prévision 2018	Potentiel de valorisation matière (2018)		Obstacles au recyclage matière	Tonnage restant disponible pour la valorisation énergétique	
			Hyp basse	Hyp haute		Hyp haute	Hyp basse
Thermoplastiques	73	97	50	80	Teneur en chlore Pollution résiduelle (lubrifiants...) <u>Condition</u> : Tri des chlorés, criblage des fines ?	17	47
Autres plastiques	30	32	0	0	Forte proportion de thermodurcissables	32	32
Mousses PU + fibres	56, dont 37 mousses	56 (dont 37 mousses)	0	0	Produits souillés, hétérogènes.	56	56
Caoutchoucs	17	6	0	6	Petit gisement. Manque de débouchés des produits recyclés	0	6
Verre	10	2	0	0	Sans objet	2	2
Autres	20	20	0	0	Produits très mélangés Proportion élevée de fines	20	20
<b>Total</b>						<b>127</b>	<b>163</b>



### 8.2.2.3 Fractions issues des RB lourds

#### Recyclage matière

Les thermoplastiques et les caoutchoucs contenus dans les refus d'induction constituent les plus gros tonnages susceptibles d'être recyclés matière. La présence de fines de verre dans les refus d'induction augmente la difficulté du recyclage.

#### Valorisation énergétique

Les fractions disponibles pour la valorisation énergétique proviendront principalement des refus d'induction.

Le flux total potentiellement disponible pour la valorisation énergétique en 2018 est de l'ordre de 15 à 50 kt, principalement composé de thermoplastiques, de thermodurcissables et de caoutchoucs.

Perspective 2018 du potentiel de valorisation matière des RBA lourds  
(unité : kt/an)

		2008	Prévision 2018	Potentiel de valorisation matière		Obstacles au recyclage matière	Tonnage restant disponible pour la valorisation énergétique	
				Hyp basse	Hyp haute		Hyp basse	Hyp haute
NF-Mix	Thermoplastiques	10,7	0	0	0		0	0
	Autres plastiques	5,3	0	0	0		0	0
	Caoutchoucs	16	0	0	0		0	0
	Verre	8	0	0	0		0	0
Zorba	Thermoplastiques	2,5	4	2	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teneur en chlore</li> <li>Pollution résiduelle (lubrifiants...)</li> <li>Proportion élevée de fines</li> </ul>	0	2
	Autres plastiques	1	2	0	0	Présence de thermodurcissables	0	2
	Caoutchoucs	2,8	0,5	0	0,5	Petit gisement. Manque de débouchés des produits recyclés	0	0,5
Refus d'induction	Thermoplastiques	23,3	42	30	42	Teneur en chlore Pollution résiduelle (lubrifiants...) Proportion élevée de fines	0	12
	Autres plastiques	10,7	15	0	0	Forte proportion de thermodurcissables	15	15
	Caoutchoucs	34	17	0	17	Manque de débouchés des produits recyclés	0	17
Total							15	48,5

## 8.2.3 Quelles sont les technologies de valorisation énergétique utilisables ?

### 8.2.3.1 RB léger et RB lourds non sur-triés

#### Incinération dans des UIOM

Les expériences industrielles en Suisse et en Allemagne montrent que les incinérateurs modernes de grande capacité sont capables d'absorber jusqu'à 15 à 25 % de RB léger sans que cela pose trop de problèmes. Si le RB est trop chargé en chlorés, un tri serait toutefois nécessaire afin d'éviter le dépassement du seuil de 1 % de chlore, qui oblige à monter en température opératoire. La proportion élevée de fines dans les RB lourds constitue également une contrainte forte, pouvant être résolue au moyen d'un criblage préalable.

#### Co-combustion en cimenteries

La solution consistant à éliminer les chlorés par tri en amont est une solution envisageable, quoique coûteuse. C'est ce que font les industriels qui utilisent le procédé SiCon<sup>57</sup>. Les préparateurs de CSR ont fréquemment recours à ce type de tri (cf. société ETARES au Havre).

#### Gazéification

Le faible point de ramollissement des cendres du aux mousses constitue un facteur rédhibitoire.

#### Pyrolyse / dépolymérisation thermique

La présence de thermodurcissables constitue un facteur rédhibitoire du fait du risque d'agglomération et de colmatage, surtout avec les époxy.

#### Perspective 2018 de valorisation énergétique des RB léger et lourds : prérequis et contraintes d'utilisation

(cases en gris clair : contraintes techniquement surmontables ; cases foncées : facteurs rédhibitoires)

Fractions	Tonnage non recyclable matière		Incinération UIOM	Co-combustion cimenteries	Gazéification	Pyrolyse / dépolymérisation thermique
	Hyp haute	Hyp basse				
RB léger	214, dont : RFB : 114 ROB : 100	id.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Catégorie déchets dangereux ou spéciaux</li> <li>○ PCI élevé</li> <li>○ Teneur en chlore</li> <li>○ Présence de fines</li> <li>○ Teneur en cendres dans les mâchefers</li> </ul>	Teneur en chlore		Présence de thermodurcissables
RB lourds	94, dont : RFB : 40 ROB : 54	id.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Catégorie déchets dangereux ou spéciaux</li> <li>○ Teneur en chlore</li> <li>○ Présence de fines</li> <li>○ Teneur en cendres dans les mâchefers</li> <li>○ Métaux lourds contenus dans les fines</li> </ul>	PCI trop faible Métaux lourds contenus dans les fines  Teneur en chlore		

<sup>57</sup> Le procédé SiCon a été conçu initialement pour la préparation des RB en vue de son utilisation dans des hauts-fourneaux. En pratique, il semble surtout se développer vers la préparation de déchets pour la combustion en cimenteries.

### 8.2.3.2 Fractions issues du sur-tri du RBA léger

On disposera à terme de flux de thermoplastiques, de thermodurcissables, de mousses et fibres, de caoutchoucs, de verre et de produits divers (bois, peintures, fines de cuivre et autres fines métalliques). Ces fractions sont appauvries en thermoplastiques recyclables par rapport au RB léger d'origine.

Valorisation énergétique des fractions du RBA léger : Prérequis et contraintes d'utilisation  
(cases en gris clair : contraintes techniquement surmontables ; cases foncées : facteurs rédhibitoires)

	Tonnage non recyclable matière		Incinération UIOM	Co-combustion cimenteries	Gazéification	Pyrolyse / dépolymérisation thermique
	Hyp basse	Hyp haute				
Thermoplastiques	17	47	PCI élevé Teneur en chlore Elimination préalable des fines	Teneur en chlore		
Autres plastiques	32	32	PCI élevé Teneur en chlore	Teneur en chlore		Présence de thermodurcissables
Mousses PU + fibres	56	56		PCI trop faible		
Caoutchoucs	0	6	PCI élevé	PCI trop faible	Teneur en soufre	
Autres	20	20		PCI trop faible		

Les pistes envisageables sont les suivantes :

- L'incinération dans des UIOM semble envisageable pour le RBA léger résiduel, sous réserve d'un criblage préalable destiné à éliminer les fines, riches en matières minérales inertes<sup>58</sup>. Leur mise en enfouissement restera probablement la meilleure alternative possible.
- Pour la co-combustion en cimenterie (dans les précalcinateurs uniquement), un tri préalable serait nécessaire pour isoler la fraction « thermoplastiques + autres plastiques) afin de disposer d'un PCI suffisant. Le refus de tri, composé de mousses, de caoutchoucs et de la fraction « autres » pourrait être traité par incinération ou pyrolyse / dépolymérisation thermique.
- La gazéification semble capable de traiter l'ensemble des flux concernés. Un tri préalable serait toutefois nécessaire pour éliminer les mousses (point de ramollissement des cendres trop bas), ce qui augmenterait le coût de préparation. En outre, la faible densité des mousses entraînerait une hausse des coûts de transport.
- La pyrolyse et la dépolymérisation thermique se heurtent à la présence en proportion significative de thermodurcissables. Un tri, nécessairement coûteux, semble difficilement envisageable.

<sup>58</sup> Pour mémoire, la composition des fines est la suivante : 25% de polymères, bois, textiles..., 25% d'une fraction ferreuse (teneur d'environ 50% en fer), 45% de matières minérales inertes (verre, béton, céramiques), 3% de non-ferreux (aluminium, cuivre, laiton, zinc...).

### 8.2.3.3 Fractions issues du sur-tri des RB lourds

On dispose de deux fractions :

- Un flux « ex-zorba » de 0 / 4,5 kt/an, constitué principalement de thermoplastiques et de thermodurcissables
- Un flux « Refus d'induction résiduel » de 15 / 44 kt/an, constitué d'un mélange de thermoplastiques, de thermodurcissables et de caoutchoucs. Les refus d'induction contiennent généralement plus de 3 % de chlore à cause des câbles en PVC.

#### Valorisation énergétique des fractions issues des RBA lourds : prérequis et contraintes d'utilisation (kt)

(cases en gris clair : contraintes techniquement surmontables ; cases foncées : facteurs rédhibitoires)

		Tonnage non recyclable matière		Incinération UIOM	Co-combustion cimenteries	Gazéification	Pyrolyse / dépolymérisation thermique
		Hyp basse	Hyp haute				
Zorba	Thermoplastiques	0	2	PCI élevé Teneur en chlore Elimination préalable des fines	Teneur en chlore		
	Autres plastiques	0	2	PCI élevé	Teneur en chlore		Présence de thermodurcissables
	Caoutchoucs	0	0,5		PCI trop faible	Teneur en soufre	
Refus d'induction	Thermoplastiques	0	12	PCI élevé Teneur en chlore Elimination préalable des fines	Teneur en chlore		
	Autres plastiques	15	15	PCI élevé Teneur en chlore	Teneur en chlore		Présence de thermodurcissables
	Caoutchoucs	0	17		PCI trop faible	Teneur en soufre	

Les technologies suivantes sont envisageables :

- L'incinération dans des UIOM semble envisageable pour le refus d'induction, sous réserve d'un criblage pour éliminer les fines ;
- Pour la co-combustion en cimenterie (dans les précalcinateurs uniquement), un tri préalable serait nécessaire pour isoler la fraction « thermoplastiques et + autres plastiques) afin de disposer d'un PCI suffisant. Le refus de tri, composé de caoutchoucs, pourrait être traité par incinération ou pyrolyse / dépolymérisation thermique.
- La gazéification semble capable de traiter l'ensemble des flux concernés.
- La pyrolyse et la dépolymérisation thermique se heurtent à la présence en proportion significative de thermodurcissables dans les flux concernés. Un tri coûteux et techniquement difficile semble difficilement envisageable.

### 8.2.4 Potentiel global de valorisation énergétique du RBA

Le tableau ci-dessous récapitule le niveau d'adéquation entre chaque technologie de valorisation énergétique et chaque fraction issue du tri du RB léger et des RB lourds. On constate que les technologies existent pour toutes les fractions, mais que des contraintes importantes sont à surmonter dans la plupart des cas.

Prospective 2018 de valorisation énergétique du RBA (en kt, hors métaux)  
(cases en gris clair : contraintes techniquement surmontables ; cases foncées : facteurs rédhibitoires)

		Potentiel de recyclage matière		Tonnage non recyclable matière		Technologies de VE envisageables et contraintes à surmonter				Potentiel de valorisation énergétique	
		Hyp. basse	Hyp. haute	Hyp. basse	Hyp. haute	Incinération	Co-combustion (cimenteries)	Gazéification	Dépolymérisation thermique	Hyp. basse	Hyp. haute
RB léger	Thermoplastiques	50	80	17	47	PCI, fines, Cl <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>			17	47
	Autres plastiques	0	0	32	32	PCI, Cl <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>		Thermodurs	32	32
	Mélange mousses PU + fibres	0	0	56	56	Pt ramolisst cendres	PCI Pt ramolisst cendres	Pt ramolisst cendres		56	56
	Caoutchoucs	0	6	0	6	PCI	PCI	Soufre		0	6
	Autres	0	0	20	20	PCI	PCI			20	20
Zorba	Thermoplastiques	2	4	0	2	PCI, Cl <sub>2</sub> , fines	Cl <sub>2</sub>			0	2
	Autres plastiques	0	0	0	2	PCI, Cl <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>		Thermodur	0	2
	Caoutchoucs	0	0,5	0	0,5					0	0,5
Refus d'induction	Thermoplastiques	30	42	0	12	PCI, Cl <sub>2</sub> , fines	Cl <sub>2</sub>			0	12
	Autres plastiques	0	0	15	15	PCI, Cl <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>		Thermodur	15	15
	Caoutchoucs	0	17	0	17		PCI	Soufre		0	17
<b>Total</b>										<b>140</b>	<b>209,5</b>

Note : Si un déchet présente un faible point de ramollissement des cendres, c'est d'autant plus contraignant que le procédé travaille à haute température.

Sur la base du tableau de la page précédente, le gisement disponible pour la valorisation énergétique présente un potentiel de 140 à 210 kt/an à moyen-terme soit :

- 45 à 68 % des 308 kt de RBA prévues en 2018
- 9,3 à 14 % du tonnage des VHU traités<sup>59</sup>.

En outre, les pneus préalablement démontés représentent un potentiel de valorisation énergétique supplémentaire d'environ 37 kt (maximum), soit 2,5 % du poids des VHU traités, la proportion actuelle étant de 0,25 %. La proportion totale des VHU potentiellement valorisable énergétiquement à moyen-terme est donc estimée entre 9,5 % et 14,2 % du tonnage de VHU.

**Même dans l'hypothèse où toutes les fractions combustibles potentiellement recyclables contenues dans le RBA seraient effectivement recyclées à l'horizon 2015, il resterait suffisamment de fractions combustibles pour atteindre le taux de 10 % de valorisation énergétique des VHU.**

## 8.3 Bilan économique

### 8.3.1 Incinération

Deux facteurs peuvent avoir une influence décisive sur le prix de cession du RB aux UIOM :

- La situation excédentaire ou déficitaire de l'incinérateur en termes de capacité de traitement par rapport au marché local (les contextes locaux étant très variables)
- Le besoin plus ou moins fort de l'UIOM concernée en charge à fort pouvoir calorifique. Ce besoin est fonction à la fois du rendement énergétique de l'incinérateur et des caractéristiques des OMR traitées par l'incinérateur.

Selon le contexte local de chaque incinérateur, le prix de cession du RBA pourrait donc fluctuer dans une fourchette très large :

- un gestionnaire d'incinérateur en situation de sous-capacité et dont l'installation a un rendement énergétique faible ne sera pas enclin à accepter du RBA et fera payer un prix élevé, de l'ordre de 150 €/tonne de RBA, sachant qu'on incinère trois fois moins de RBA que d'OMR (en poids) à charge calorifique égale. Il est peu probable, compte tenu des coûts d'enfouissement, que les détenteurs de RBA soient prêts à accepter de payer un tel prix.
- à contrario, un gestionnaire d'incinérateur en situation de surcapacité et dont l'installation a un rendement énergétique élevé pourrait accepter un prix de cession faible, de l'ordre de 50 €/tonne afin de saturer son installation<sup>60</sup>.

En outre, l'utilisation de RBA se traduirait par une augmentation de la concentration en métaux lourds dans les mâchefers. Les solutions techniques existantes pour les éliminer conduisent à des coûts prohibitifs pour les industriels (150 à 240 €/t<sup>61</sup>).

<sup>59</sup> On fait l'hypothèse que le nombre de VHU traités restera constant à moyen-terme (tonnages générés en France et broyés en France ou à l'étranger).

<sup>60</sup> Le prix de cession des OMR est compris dans une fourchette de 70 à 120€/tonne en France et de 30€/t en moyenne en Allemagne, pays où la capacité d'incinération est fortement excédentaire.

<sup>61</sup> Source: "An Economic Solution for Recycling Fluff from Shredder Light Fraction". Andreas Bartl, Vienna University of Technology.

### 8.3.2 Co-combustion en cimenterie

Sur la base des coûts observés pour le CSR, il est probable que le prix à payer au cimentier par le détenteur de RBA dépendrait très largement de la qualité du RBA livré (surtout son PCI et sa teneur en chlore). Le prix de cession pourrait varier autour de 50 €/t (transport inclus).

Si la teneur en chlorés dans le RBA est supérieure à 0,5 %, le cimentier devra envisager l'installation d'un by-pass chlore (possible que sur les procédés secs, c'est-à-dire moins de la moitié des unités françaises) pour un coût d'investissement de 5 à 10 M€.

### 8.3.3 Hauts-fourneaux

On ne dispose pas de données économiques pour cette technologie, qui par ailleurs n'offre pas de perspectives au niveau national.

### 8.3.4 Gazéification

Les coûts de production de la gazéification et de la pyrolyse (nets de revente des produits fabriqués) sont de l'ordre de 100 à 600€/t de déchet traité<sup>62</sup>. Les coûts d'exploitation recensés dans le cadre de différentes études sont disparates et dépendent fortement du niveau de développement de l'installation, de sa capacité et de la nature du procédé.

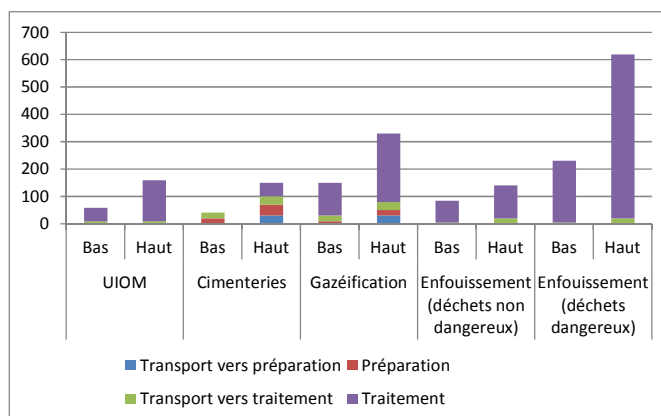
### 8.3.5 Pyrolyse et dépolymérisation thermique

Le coût d'exploitation du pilote en opération depuis 1986 sur procédé PyroArc (ScanArc Plasma Technologies AB - Suède) incluant la vitrification des produits minéraux, est dans une fourchette de 50 à 230 €/t de déchet traité selon la capacité et le type de déchet.

### 8.3.6 Synthèse

Le graphique ci-dessous récapitule les données économiques des différentes technologies de valorisation énergétique. Pour chaque type de traitement, deux hypothèses (haute, basse) ont été indiquées.

Coûts comparés des filières de préparation et de traitement du RBA (€/tonne de RBA traité).



Sources : recoupement de plusieurs sources et de dires d'experts.

<sup>62</sup> Source : ADEME - Etat de l'art de la production de liquides ou de gaz à partir de déchets autres que les déchets de biomasse propre - Mars 2012. Pour mémoire, le coût de production du procédé Ebara/Twinrec est de l'ordre de 120 à 200 €/t de déchet traité et le coût opératoire du procédé Thermoselect est de l'ordre de 140 €/t de déchet traité.

## 9 Conclusions et recommandations

### 9.1 Conclusions

Les conclusions présentées dans la première partie de ce chapitre visent à identifier des pistes de développement réalistes pour la valorisation énergétique des RB, en particulier du RBA, à l'horizon 2015 et au-delà. A la lumière de la situation actuelle et des tendances d'évolution décrites dans les chapitres précédents, elles dressent un constat articulé autour de quatre questions clés :

- comment le gisement de RB va-t-il évoluer à l'horizon 2015 et au-delà, aux plans quantitatif et qualitatif ?
- quels sont les procédés envisageables pour atteindre les objectifs 2015 de valorisation énergétique des VHU ?
- quelles sont les conséquences en matière de besoins d'investissements ?

La deuxième partie de ce chapitre détaille les principales recommandations et leviers destinés à optimiser le développement de la valorisation énergétique du RBA en France.

#### 9.1.1 Comment le gisement de RB va-t-il évoluer à l'horizon 2015 et au-delà ?

##### *Au plan quantitatif*

##### **Flux de ferrailles dirigés vers les gros broyeurs**

Les flux de ferrailles dirigés vers les gros broyeurs sont compris actuellement dans une fourchette de 3 à 4 Mt/an. Les VHU représentent environ 30 % de ce tonnage, le reste étant composé de chutes neuves de production sidérurgique et métallurgique, de ferrailles de démolition et de ferrailles légères (principalement du GEM hors froid et des meubles usagés).

A l'horizon 2015 et au-delà, ce tonnage devrait diminuer tendanciellement, les flux de VHU étant stables, voire en légère augmentation, tandis que les tonnages de chutes de production sidérurgique et métallurgique déclineraient.

La proportion des VHU dans le flux total traité par les unités de broyage devrait augmenter sensiblement à moyen-terme, sous les effets conjugués de l'augmentation du poids moyen des véhicules (on traite des véhicules mis sur le marché il y a 10 ou 15 ans), de la diminution des sites de traitement illégaux, de la montée en puissance de la filière REP DEEE (qui prendra en charge des flux croissants de GEM non-froid) et de la filière « Meubles usagés ». D'autre part, les gisements de chutes neuves et de ferrailles de démolition contiennent une proportion élevée de métaux et par voie de conséquence une proportion relativement faible de matériaux valorisables énergétiquement. Compte tenu de ces facteurs, on estime que plus de 90 % du tonnage des résidus de broyage (hors métaux) proviendront des VHU à moyen-terme.

##### **Gisement de RBA potentiellement accessible à la valorisation énergétique**

Le gisement de RBA disponible pour la valorisation énergétique représente un potentiel de 140 à 210 kt/an à moyen-terme soit :

- 45 % à 68 % des 308 kt de RBA prévues en 2018. Compte tenu de la tendance observée, le reste du RBA produit devrait normalement être valorisé matière
- 9,3 % à 14 % du tonnage des VHU traités.

En outre, les pneus préalablement démontés représentent un potentiel maximum de valorisation énergétique supplémentaire d'environ 37 kt, soit 2,5 % du poids des VHU traités par la filière. En



pratique, le taux actuel de valorisation énergétique est de l'ordre de 15 % du tonnage des pneumatiques démontés à partir des VHU<sup>63</sup>, La fourchette de valorisation des pneumatiques démontés se situe donc entre 0,25 % (estimation moyenne : 2,5 % x 0,15) et 2,50 % (estimation maxi) du poids des VHU traités par la filière.

La proportion totale des VHU potentiellement valorisable énergétiquement à moyen-terme est donc estimée entre 9,5 % et 14,2 %.

Même dans l'hypothèse où toutes les fractions combustibles potentiellement recyclables contenues dans le RBA seraient effectivement recyclées à l'horizon 2015, il resterait par conséquent suffisamment de fractions combustibles pour atteindre le taux de 10 % de valorisation énergétique des VHU.

### *Au plan qualitatif*

En moyenne, le RBA est constitué de 50 % de plastiques, 18 % de mousses, 8,5 % de caoutchoucs, 19 % de bois et de fines.

Compte tenu de l'évolution de la composition moyenne des VHU, de la diminution de la proportion des chutes de production sidérurgique et métallurgique, de la diminution de la proportion des DEEE et de la systématisation du démontage des pneumatiques avant broyage on assistera à une diminution de la proportion des caoutchoucs et à une augmentation de la proportion des plastiques dans le RB.

En ce qui concerne le verre, les progrès en matière de démontage des pièces en verre avant broyage devraient permettre de réduire la proportion de verre dans le RBA. Toutefois, la question de savoir si les pare-brise, les lunettes arrière et les vitres latérales des VHU doivent être démontées préalablement au broyage fait débat. Les constructeurs automobiles poussent plutôt la solution consistant à ne pas démonter, à trier et à valoriser la fraction broyée riche en verre pour des applications de sous-couches routières. Le débat est avant tout de nature économique. En effet, les pièces en verre démontées par les démolisseurs n'ont pas de débouchés économiquement intéressants (les pièces en verre démontées par une chaîne telle que « Carglass » sont recyclées sous la forme de fibre de verre, avec une faible valeur ajoutée)

Toutefois, la qualité des opérations de dépollution<sup>64</sup> demeure une source d'incertitude importante, car elle laisse encore à désirer dans de nombreux centres de traitement agréés et dans les casses non autorisées. Si la dépollution des véhicules n'est pas réalisée conformément aux règles en vigueur, on risque dans les années à venir d'être confronté au basculement du RBA de la catégorie « déchets non dangereux » vers la catégorie « déchets dangereux ».

## *9.1.2 Quels sont les procédés envisageables pour atteindre les objectifs 2015 de valorisation énergétique des VHU ?*

### *Incinération dans les UIOM*

L'incinération dans des incinérateurs municipaux est actuellement la principale voie de valorisation énergétique des RB en Europe, en particulier en Allemagne, le parc des UIOM étant en situation de forte surcapacité. Dans tous les pays, les quantités de RB traitées ne dépassent pas 10 % de la charge des incinérateurs.

---

<sup>63</sup> Les tonnages de la collecte des pneus usagés démontés avant broyage des VHU sont déclarés à l'ADEME par Aliastocks et FPR, avec la répartition des tonnages par filière de valorisation. A ces tonnages viennent s'ajouter les pneus conservés par les centres VHU pour être revendus d'occasion (réutilisation). La répartition actuelle des pneus démontés, par mode de valorisation est la suivante : réutilisation : 35% ; recyclage mécanique : 20% ; Valorisation énergétique : 15% ; Autres formes de valorisation (dont utilisation en TP) : 30% (source : ADEME).

<sup>64</sup> Huiles usagées, batteries au plomb, CFC dans les systèmes de climatisation, retardateurs de flamme dans certaines pièces plastiques, mercure dans certains équipements électriques, etc....

Le tonnage total des RB incinéré dans des UIOM demeure faible en valeur absolue. Plusieurs facteurs permettent d'expliquer la faiblesse de ces tonnages incinérés dans la plupart des pays étudiés :

- des conditions économiques souvent défavorables par rapport à la mise en décharge
- une sous-capacité structurelle des UIOM dans certains pays
- la plupart des incinérateurs de conception ancienne et de faible capacité ne sont pas en mesure de consommer du RBA
- la réglementation stricte depuis 2005<sup>65</sup> concernant la construction de nouvelles unités d'incinération
- les réticences des gestionnaires d'UIOM à traiter du RBA à cause de son PCI élevé et du fait qu'il contient parfois des traces de lubrifiants.

D'autre part, selon le contexte local de chaque incinérateur, le prix de cession du RBA fluctue dans une fourchette large selon que l'incinérateur est en situation de sur ou de sous-capacité et selon son rendement énergétique.

Les gestionnaires d'UIOM sont globalement réticents. Ils considèrent que la valorisation énergétique du RBA n'est pas un enjeu prioritaire et se positionnent clairement sur les conditions requises pour son développement. Selon eux, il ne sera pas possible de co-incinérer plus de 2 à 3 % de RB sans risquer des effets rédhibitoires sur les conditions opératoires. En outre, le gisement de RBA est très éloigné de leurs sources « habituelles » en termes de traçabilité et de variabilité. En particulier, les techniques d'analyse dont disposent les opérateurs d'UIOM ne permettent pas de maîtriser la mesure des concentrations en métaux lourds dans le RBA (cela pourrait toutefois changer si la profession s'approprie les techniques).

A l'horizon 2015, l'incinération dans les UIOM constitue une piste sérieuse pour valoriser énergétiquement les 150 kt de RBA correspondant à l'atteinte du taux de 10 % de valorisation énergétique des VHU. Ce flux de RBA représenterait 1,1 % du tonnage total et 3,1 % de la charge thermique des déchets traités par les 127 UIOM en exploitation. Ces pourcentages se situent dans les limites techniquement admissibles<sup>66</sup>.

### *Co-combustion en cimenteries<sup>67</sup>*

L'utilisation du RBA dans les précalcinateurs de cimenteries est techniquement et économiquement envisageable. La teneur en chlore ne pose pas trop de problème à condition d'être inférieur à 0,7 %, ce qui oblige certains opérateurs à prévoir un prétraitement pour réduire la teneur en PVC. Dans ce cas, on n'observe qu'un faible impact sur le colmatage de la zone de pré-calcination et sur les émissions atmosphériques. Toutefois, cet impact se traduira inévitablement sur l'usure des équipements et sur les coûts de maintenance.

Deux exemples permettent d'illustrer pourquoi l'usage du RBA en cimenterie s'est plus développé dans certains pays que dans d'autres :

- en Espagne, le poids économique du secteur du BTP et le volontarisme dont fait preuve le secteur cimentier en matière de valorisation énergétique du RB ont joué un rôle décisif. En outre, aucun flux n'est dirigé vers les UIOM car ces dernières sont peu nombreuses et en situation de forte sous-capacité de traitement ;
- en Allemagne, la combustion du RB en cimenterie est peu développée du fait de l'existence de standards de qualité des combustibles de substitution définis par l'industrie cimentière, qui

<sup>65</sup> L'incinération est réglementée depuis 2005 par la Directive cadre sur l'incinération (2000/76/CE) ainsi que par la directive cadre sur les déchets 2008/98/CE.

<sup>66</sup> Les références industrielles au niveau européen convergent vers une teneur maximale en RB dans la charge de l'ordre de 10 à 15%. Au-delà, des problèmes mécaniques apparaissent au niveau du fonctionnement de l'incinérateur.

<sup>67</sup> L'utilisation de RB comme combustible dans des fours principaux de cimenteries n'est pas envisageable à cause de la teneur trop élevée en chlore et de l'impact négatif des métaux sur la qualité du clinker. Les cimenteries qui utiliseraient du RB dans leurs fours rotatifs seraient obligés d'effectuer une préparation coûteuse des déchets, ce qui n'empêcherait d'ailleurs pas les problèmes de colmatage.

obligent à un prétraitement coûteux du RB et rendent cette solution non compétitive par rapport à l'incinération dans des UIOM. En outre, on observe une forte surcapacité de traitement des UIOM par rapport au marché.

La co-combustion du RB dans les précalcinateurs de cimenteries est une piste sérieuse pour atteindre l'objectif de valorisation énergétique des VHU à l'horizon 2015 et au-delà. Toutefois, cette piste ne permettrait pas de traiter la totalité du RBA résiduel. Les 150 kt de RBA correspondant à 10 % du poids des VHU représentent en effet environ 70 % de la charge thermique des précalcinateurs.

En outre, la filière CSR est en plein développement et il n'y aura pas de la place pour tous les flux.

### *Hauts-fourneaux*

Les hauts-fourneaux n'ont pas vocation à traiter des résidus solides. Ce sont des installations sensibles, ayant une faible tolérance au chlore, au zinc et au plomb. Seul Voest Alpine (Autriche) continue à utiliser des déchets plastiques à petite échelle, les autres sidérurgistes ayant abandonné. Compte tenu des contraintes sur les caractéristiques de la charge, il est nécessaire de limiter à environ 3 % la teneur en RBA dans le combustible utilisé. En outre, le contexte économique du secteur sidérurgique en France n'est pas favorable à cette piste (déclin relatif de la filière fonte par rapport aux aciéries électriques).

L'utilisation de RB dans les hauts-fourneaux n'est pas une piste crédible.

### *Gazéification*

Les procédés intégrés de gazéification de première génération offrent des opportunités intéressantes pour la valorisation énergétique des RB à moyen-terme, en particulier du fait de leurs atouts au plan environnemental. Les technologies d'abattage sont en effet les mêmes que pour les incinérateurs. Néanmoins, les contraintes liées à la présence de métaux lourds et de soufre constituent des obstacles importants. A ce jour, l'existence d'une seule unité industrielle opérationnelle a été prouvée (usine d'Aomori, procédé TwinRec). Les projets sont toutefois nombreux et la R&D foisonnante.

Le développement d'unités industrielles de gazéification capables de traiter le RBA résiduel est envisageable dans une perspective de moyen terme (au-delà de 2016/2018), lorsque les coûts d'exploitation auront été optimisés.

La gazéification constitue une piste prometteuse à moyen-terme pour valoriser le RBA. Trois à sept nouvelles unités de traitement de capacité moyenne (20 à 50 kt/an de déchets traités) seraient nécessaires pour pouvoir traiter les 150 kt/an de RBA, en supposant que ces unités soient intégralement dédiées au traitement du RBA.

### *Pyrolyse et dépolymérisation thermique*

Bien que les projets soient nombreux et la R&D très foisonnante relativement à ces deux types de procédés, aucune unité industrielle opérationnelle n'a été identifiée au niveau mondial. Les déchets utilisés dans les pilotes et démonstrateurs sont de préférence propres et homogènes, ce qui explique pourquoi le RB est rarement testé. Il faudra suivre de près les projets en cours chez Stena Metall (Suède) et Comet Traitement (Belgique).

La pyrolyse et la dépolymérisation thermique constituent des pistes moins prometteuses que la gazéification pour valoriser le RBA.

### *Fours électriques (acier)*

L'utilisation de RB suscite de fortes réserves du fait de la présence de cuivre (la présence de ce dernier étant toutefois moins gênante que dans les hauts fourneaux), dont la teneur peut fluctuer dans des proportions importantes. En Europe, aucun aciériste ne s'est lancé dans cette voie. En outre, le groupe ArcelorMittal semble peu motivé pour tenter des essais.

L'étude en cours par BRGM / Arcelor dans le cadre du projet ANR « Reforba », visant à définir les exigences de préparation du RB afin de le rendre apte à une utilisation en sidérurgie, devrait permettre d'avancer sur le sujet.

Bien qu'elle ne soit pas utilisée aujourd'hui par les industriels, la piste consistant à utiliser directement du RBA dans les fours électriques mériterait d'être approfondie, afin de mieux comprendre les atouts et handicaps des résidus de broyage par rapport aux autres types d'agents réducteurs.

### *Utilisation de RB dans des fours de métaux non-ferreux*

Cette technologie ne s'applique pas au RBA. Pour des raisons économiques, elle n'est intéressante que pour les cartes électroniques usagées.

Le traitement du RBA dans des fours de fusion / affinage de métaux non-ferreux n'est pas une piste crédible.

### *9.1.3 Quelles sont les conséquences en matière de besoin d'investissement ?*

Deux scénarios sont envisageables pour assurer le développement de la valorisation énergétique du RBA en France :

- soit un scénario « extension de la stratégie actuelle », basé sur l'utilisation d'installations préexistantes (UIOM et cimenteries principalement). Dans ce cas, ce serait à ces deux activités de prendre en main le développement de la filière.
- soit un scénario « filière spécifique de valorisation énergétique du RBA », dont le développement pourrait s'appuyer sur la construction d'unités de traitement spécialisées, à l'image de la stratégie développée par les Pays-Bas. A moyen terme, une telle filière pourrait également se développer à travers la construction d'unités de gazéification ou de pyrolyse compétitives au plan économique ;

Ces deux scénarios correspondent à des besoins d'investissements très différents :

- Le développement de la filière « extension de la stratégie actuelle » supposerait très probablement des investissements relativement faibles au départ, qui se limiteraient à d'éventuelles installations de prétraitement du RBA en entrée des UIOM ou des cimenteries concernées. Toutefois, cette économie à court-terme pourrait être partiellement contrebalancée par l'usure prématurée des installations du fait de la présence inévitable de chlore dans le RBA et se heurter aux réticences des exploitants.
- Le développement d'une filière spécifique supposerait d'investir dans des installations nouvelles de traitement post-broyage dans une optique à court-terme ou de gazéification ou de pyrolyse dans une optique à moyen-terme. Toutefois, les responsables des éco-industries émettent des réserves à ce sujet et soulignent que s'ils avaient à investir dans des unités de valorisation énergétique de déchets non dangereux, il est probable qu'ils le feraient en premier lieu pour traiter des CSR, qui présentent moins de risques techniques que le RBA, ce dernier étant considéré comme dangereux. La seule façon de lever cette contrainte serait par conséquent de faire évoluer la qualité du RBA vers une spécification qui le range définitivement dans la catégorie des déchets non dangereux ;

## **9.2 Recommandations pour favoriser le développement de la valorisation énergétique des VHU**

Les recommandations s'articulent autour des neuf thématiques suivantes :

### **1- Remédier aux dysfonctionnements par rapport à l'application effective des réglementations**

#### **1.1- Respecter la réglementation sur le démontage des pneumatiques en vue d'un tri plus facile des broyats**

Au plan technique, les pneus ont tendance à perturber le fonctionnement des marteaux des broyeurs. En outre, leur broyage avec les VHU entraîne une augmentation de la teneur en élastomères dans les RB lourds, ce qui complique les opérations de tri en fractions homogènes.

Le cadre réglementaire instituant les exigences techniques minimales en matière de démontage des pneumatiques existe déjà (directive 2000/53/CE et décret « pneus »). Il s'agit donc avant tout de s'assurer de son application complète.

#### **1.2- Optimiser le démontage et/ou le post-tri des pare-brise, des lunettes arrière et des vitres latérales des VHU afin d'accroître le PCI et la qualité des broyats en aval**

Ces opérations se traduiraient par une diminution de la proportion de verre dans les RB lourds et donc par une plus grande facilité de tri et de valorisation de ces derniers. Les leviers d'action se situent sur deux plans :

- au plan européen, pour harmoniser les approches des états-membres : les situations sont en contrastées selon les pays en matière de démontage des pièces en verre et il n'est pas toujours facile de connaître l'état exact de la situation, sachant que certains états-membres interprètent la directive dans un sens différent de celui retenu à ce jour par les pouvoirs publics français. Ils se basent en effet sur le fait que, selon eux, l'obligation d'extraction du verre, telle qu'elle figure dans la directive VHU, ne précise pas chez quel opérateur elle doit être réalisée (centre VHU ou broyeur) ;
- au plan national, pour aider les démolisseurs à investir dans des méthodes de démontage performantes, contribuant ainsi à l'atteinte de l'objectif fixé aux gestionnaires de centres de démontage de VHU de démonter au minimum 5 % de matières non métalliques (hors déchets issus de la phase de dépollution) par rapport à la masse totale des VHU traités.

#### **1.3- Veiller à l'application de règles strictes en matière de broyage des DEEE:**

Le WEEELABEX a défini les "bonnes pratiques" de traitement des DEEE au niveau européen. Il précise que « Les DEEE et leurs fractions contenant des déchets dangereux seront traités séparément des autres déchets. Les déchets dangereux ne seront ni mélangés à d'autres catégories de déchets dangereux, ni à d'autres types de déchets, substances ou matières ». A terme, il est probable que cette préconisation devrait devenir une norme applicable à l'échelle européenne (traitement dans des broyeurs différents ou au moyen de campagnes séparées dans un même broyeur).

En pratique, on constate que la plupart des broyeurs en Europe mélangent le GEM hors froid, les VHU et les autres DIB riches en métaux dans la charge des broyeurs. Par contre, très peu d'entre eux mélangent les VHU et les DEEE autres que les GEM hors froid.

En France, les DEEE traités dans les gros broyeurs sont presque exclusivement de GEM froid. Pour les opérateurs de gros broyeurs, il est techniquement intéressant d'ajouter des DEEE aux flux de carcasses à broyer, afin d'éviter le risque de coincement des marteaux. L'avantage du GEM HF est que ces équipements en fin de vie ne contiennent ni polluants ni retardateurs de flamme bromés. .

Cette situation devrait évoluer à court-terme puisque le broyage des DEEE (tous types de DEEE confondus, y compris pour le GEM HF) simultanément avec les VHU sera officiellement interdit à partir de février 2014. Les DEEE devront être traités par « campagnes », séparément des flux de carcasses. Déjà 12 broyeurs (sur un total de 51) se conforment à cette obligation.

#### **1.4- Réduire la dangerosité du RBA**

Les VHU sont considérés comme des produits en fin de vie dangereux. Ils contiennent des huiles usagées, des batteries au plomb, des CFC dans les systèmes de climatisation, des retardateurs de flamme dans certaines pièces plastiques, du mercure dans certains équipements électriques, etc....

Or la qualité des opérations de dépollution laisse encore à désirer dans de nombreux centres de traitement français. Par voie de conséquence, le RB léger contient des composés susceptibles de polluer lors de la valorisation énergétique. Par contre, les RB lourds contiennent des polluants du même type que le RB léger, mais du fait de la masse élevée de leurs composants bien souvent inertes à la base comme le verre, les cailloux... la concentration des polluants est souvent faible.

Si la dépollution des véhicules n'est pas réalisée conformément aux règles en vigueur, on risque dans les années à venir d'être confronté au basculement du RBA de la catégorie « déchets non dangereux » vers la catégorie « déchets dangereux » :

Un contrôle renforcé du maillon « dépollution » de la filière VHU est donc indispensable, afin de vérifier que les procédures règlementaires sont bien appliquées.

En outre, afin d'avoir une vision vraiment objective de la situation, il serait intéressant d'approfondir les conditions de dépollution des VHU dans quelques pays étrangers (Allemagne, Suisse, Belgique...) afin de mieux comprendre les contextes règlementaires nationaux, les pratiques des dépollueurs et les résultats obtenus.

## **2- Améliorer les installations existantes afin de les adapter aux contraintes liées au traitement du RB**

### **2.1- Inciter les broyeurs à améliorer leurs performances de tri**

Le Code de l'environnement R 543-165 du décret n°20 11-153 du 4 février 2011 impose aux broyeurs de VHU :

- de procéder, au moins tous les trois ans à une évaluation de la performance de leur processus industriel de traitement des résidus de broyage issus des VHU
- de justifier de l'atteinte d'un taux de réutilisation et de recyclage minimal et d'un taux de réutilisation et de valorisation minimal des véhicules hors d'usage en distinguant, le cas échéant, les opérations réalisées en aval de leur installation ;
- de se conformer aux prescriptions définies en vue de l'atteinte des objectifs fixés à l'article R. 543-160, y compris par le biais d'une coopération avec les autres opérateurs économiques ;

Enfin une instance sera chargée d'évaluer l'équilibre économique global de la filière chaque année.

La stricte application de cette réglementation constitue bien évidemment un levier important pour améliorer les performances des broyeurs en matière de réutilisation et de valorisation.

### **2.2- Améliorer les procédés de valorisation des RB lourds**

Il semble indispensable d'approfondir au moyen de tests la question de la valorisation potentielle des RB lourds qui, lorsqu'ils sont retriés, peuvent amener à deux flux, un lourd non dangereux contenant une proportion élevée d'inertes, et un autre flux plus léger mais sans doute dangereux.

### **2.3- Evaluer les conditions techniques et économiques de mise en œuvre des prérequis sur la qualité des RB en entrée des UIOM et évaluer la faisabilité des investissements nécessaires.**

Les principaux prérequis identifiés dans le cadre de la présente étude concernent les critères suivants :

- PCI inférieur à 15 MJ/tonne, afin d'éviter le risque de surchauffe dans les fours, voire de brûler les grilles
- Teneur en chlore inférieure à 0,5 %, afin d'éviter le risque de formation de POP dans les effluents gazeux. Ce point est particulièrement important puisqu'il influe directement sur la contrainte de température de traitement dans les UIOM
- Teneur en composés bromés inférieure à 3 %

- Teneurs limites en certains métaux lourds (seuils à définir) afin d'éviter une augmentation trop forte des teneurs en métaux lourds dans les mâchefers et les cendres volantes.
- Teneur limite en cendres afin d'éviter une augmentation trop significative du volume des mâchefers.

Ces prérequis pourraient constituer la base d'une future spécification du RB destiné à l'incinération :

### **3- Convaincre les gestionnaires d'UIOM du bien-fondé de l'incinération du RBA**

Les gestionnaires d'UIOM sont globalement réticents et considèrent que la valorisation énergétique du RBA n'est pas un enjeu prioritaire. Ils se positionnent clairement sur les conditions requises pour son développement. Selon eux, plusieurs leviers permettraient de débloquer la situation:

- les pouvoirs publics devraient adopter une position claire sur la stratégie gouvernementale en matière de prise en compte du RB dans les arrêtés d'exploitation des UIOM et sur le rôle que devrait jouer la valorisation énergétique des RB
- améliorer le bilan économique de l'incinération du RBA
- assurer la pérennité du gisement/ des contrats d'approvisionnement en RBA
- les techniques d'analyse dont disposent les opérateurs d'UIOM ne permettent pas de maîtriser la mesure des concentrations en métaux lourds dans le RBA. Il faudrait aider la profession à s'approprier les techniques adéquates.

### **4- Inventorier les UIOM qui ont le droit de brûler des DAE**

Pour chacune des 126 UIOM en exploitation une liste de sources autorisées a été établie sous la forme d'une autorisation préfectorale. En pratique, quelques UIOM sont explicitement autorisées à traiter du RB mais il n'existe pas de recensement de ces unités au niveau national.

Il serait indispensable de dresser cette liste au niveau national afin d'évaluer la proportion des UIOM (sur la base du critère « capacité de traitement ») concernées dans le parc total.

### **5- Approfondir les caractéristiques et les performances du procédé Thermo-Ré (Suisse)**

Le procédé Thermo-Ré<sup>68</sup> est utilisé dans deux des trois lignes de l'incinérateur de Hinwil (Canton de Zürich) pour récupérer les fines de métaux non-ferreux et de métaux précieux dans les mâchefers d'incinération. Il présente en outre l'avantage de réduire sensiblement le volume de déchets ultimes mis en décharge.

Sa faisabilité dans le contexte français mériterait d'être approfondie, aucun procédé équivalent n'étant utilisé actuellement en France.

### **6- Analyser la faisabilité de la préparation du RBA (ou de certaines fractions issues du tri du RBA) face aux déchets concurrents (pneus usagés, CSR) en vue de la co-combustion en cimenteries**

Plusieurs cimenteries françaises valorisent du RBA depuis de nombreuses années, par exemple la cimenterie Vicat de Montalieu-Vercieu (38) qui a un partenariat depuis 1992 avec Derichebourg Environnement, avec une filiale commune Valerco.

La question se pose de savoir dans quelle mesure il serait possible d'aller plus loin et de généraliser l'utilisation du RBA aux quatre cimenteries françaises équipées de précalcinateurs. Cet approfondissement devra se faire en coopération avec la profession (SFIC, ATHIL) afin d'identifier les investissements nécessaires pour préparer le combustible à injecter (tri des produits chlorés par tri optique XRT, élimination du PVC et du cuivre par flottation, sur-tri des métaux résiduels par courant de Foucault et séparation magnétique....).

<sup>68</sup> Procédé développé en Suisse par la « Kehrichtverwertung Zürcher Oberland » (KEZO) et le centre pour l'utilisation durable des déchets et des ressources (ZAR).

## 7- Faire évoluer la réglementation ICPE pour la gazéification et la pyrolyse

La réglementation ICPE<sup>69</sup> assimile les installations de gazéification à des installations de co-incinération. Elle tend à freiner, voire à empêcher le développement de ces procédés. En effet, les flux sortants de ces procédés sont fondamentalement différents de ceux de l'incinération. Les liquides ou gaz combustibles produits par ces procédés peuvent être, selon les cas :

- soit brûlés dans une chaudière in-situ sur le site d'implantation du procédé lui-même ;
- soit utilisés dans des moteurs pour la production d'électricité. Dans ce cas, les teneurs en CO et NOx des gaz d'échappement des moteurs dépassent les valeurs limites d'émission de l'incinération, car les conditions de combustion sont moins optimales que dans un incinérateur de déchets. Les exploitants sont donc actuellement astreints à demander des dérogations au coup par coup pour obtenir un permis d'exploiter, ces dérogations étant difficiles à obtenir.
- soit utilisés en substitution de carburants fossiles commerciaux dans des procédés industriels. Lorsque cette utilisation se fait en contact direct avec les produits fabriqués (ce qui est le cas dans les industries du ciment, du verre, des tuiles, briques et faïences, ...) les fumées de combustion constituent une émission du procédé de fabrication, et non du procédé amont ayant servi à produire le liquide ou le gaz ;
- soit utilisés comme carburants dans des moteurs de véhicules.

Dans les trois derniers cas, les valeurs limites sur les émissions de l'incinération ou d'incinération s'avèrent inadéquates.

Les exploitants ont théoriquement la possibilité de demander une autorisation non pas pour l'installation complète mais pour l'installation de pyrolyse ou de gazéification considérée isolément. Dans ce cas, la difficulté provient du fait que les autorités demandent généralement que le gaz ou le liquide produit par l'installation soit codifié (au sens de la nomenclature « produits » officielle) pour accorder l'autorisation d'utilisation comme combustible ou carburant.

Il semble indispensable de faire évoluer la nomenclature ICPE et la réglementation applicable aux installations de pyrolyse et de gazéification, afin que ces procédés ne soient plus considérés au plan réglementaire comme de l'incinération. La modification des rubriques 2910 A et 2910 B de la classification ICPE ainsi que la transposition en droit français de la directive cadre relative aux déchets (2008/98/EU) et de la directive IED (2010/75/EU) pourraient faire évoluer la situation.

Les exigences réglementaires liées aux émissions résultant de la combustion des liquides et gaz produits pourraient évoluer de la manière suivante :

## 8- Approfondir les possibilités de développement de la piste « Fours électriques »

Bien qu'elle ne soit pas utilisée aujourd'hui par les industriels, cette piste mériterait d'être approfondie, afin de mieux comprendre les atouts et handicaps des résidus de broyage par rapport aux autres types d'agents réducteurs.

Il faudra toutefois attendre les résultats de l'étude BRGM / Arcerlor (réalisée dans le cadre du projet ANR « Reforba »), dont l'objectif est de définir les exigences de préparation du RB afin de le rendre apte à une utilisation en sidérurgie.

## 9- Mettre en place un système de péréquation et de redistribution de la recette de la TGAP

Les réglementations et taxes destinées à prévenir l'enfouissement des déchets constituent un facteur clé du développement de la valorisation énergétique.

---

<sup>69</sup> ICPE : Installation(s) Classée(s) pour la Protection de l'Environnement.



Lorsque le prix de mise en enfouissement est supérieur au prix de reprise des UIOM, l'effet incitatif est déterminant sur le développement de l'incinération des RB. Jusqu'à présent, la situation était défavorable en France, mais elle évolue sous l'effet de la hausse progressive de la TGAP. La situation est très contrastée selon les Etats Membres. A l'horizon 2015, il est prévu que<sup>70</sup> :

- l'on atteindra un équilibre autour de 100€/tonne en France
- les prix de mise en décharge seront plus élevés d'environ 20 % en Espagne, d'environ 90 % en Grande-Bretagne et d'environ 55 % aux Pays-Bas par rapport aux prix de l'incinération.

Un système de redistribution de la recette de la TGAP aurait le grand avantage de passer du système coercitif actuel (« taxer la mise en enfouissement ») à un système incitatif (« les acteurs économiques ayant le comportement le plus vertueux bénéficient de retombées économiques positives »)

## **10- Promouvoir le développement de procédés de fusion ou de vitrification capables de traiter les résidus ultimes de l'incinération des RB**

La valorisation énergétique par incinération dans des UIOM conduira inévitablement à la production d'une quantité non négligeable de résidus ultimes riches en métaux lourds et en chlorés. Il sera nécessaire de développer les technologies appropriées pour traiter ces résidus ultimes, après séparation magnétique des scories et des inertes.

## **11- Evaluer les possibilités de synergies avec la filière CSR**

La comparaison internationale réalisée au chapitre 5 a montré que le taux de valorisation énergétique du RBA est particulièrement élevé en Allemagne et en Autriche. On constate par ailleurs que ces deux pays ont beaucoup développé l'utilisation du CSR. Il semble donc que les pays qui ont déjà une vision claire de l'emploi du CSR ont également une vision claire de la valorisation des flux issus du RBA<sup>71</sup>.

Cela amène à se poser la question de savoir si, en France, certaines fractions du RBA pourraient entrer dans la filière « CSR ». La réponse à cette question passe par l'approfondissement des conditions qui permettraient d'améliorer les synergies entre la filière RBA et la filière CSR.

Aujourd'hui, à l'exception de quelques unités de broyage « phares » gérées par des grands groupes, le parc de broyeurs de VHU en France ne semble pas en capacité de produire un CSR approprié, qu'il s'agisse de la teneur en chlore ou de la régularité d'approvisionnement.

Une piste pourrait consister à développer des unités de préparation du type VW-SiCon basées principalement sur le tri mécanique et visant à récupérer les métaux, à préparer un résidu combustible apte à la valorisation en cimenteries ou dans des hauts-fourneaux et à stabiliser les boues en vue de leur mise en décharge. En pratique, les résultats obtenus par l'unité ARN exploitée depuis mai 2011 sur procédé VW-SiCon aux Pays-Bas amènent toutefois à émettre quelques réserves. En effet, les fractions non recyclables sont actuellement envoyées en enfouissement, qui s'avère plus intéressant économiquement que la valorisation énergétique.

## **9.3 Conclusion**

Les objectifs initiaux de l'étude étaient les suivants :

- effectuer un état de l'art de la valorisation énergétique des résidus de broyage en Europe
- décrire la nature des gisements de VHU et des résidus de broyage disponibles en France

---

<sup>70</sup> Source : Les marchés du traitement et de l'élimination des OM et des DIND en Europe – BIPE – Décembre 2010.

<sup>71</sup> Les cimentiers allemands ont toujours insisté sur la nécessité d'avoir des normes strictes (contrôle qualité) pour accepter de traiter du CSR. Tous les cimentiers allemands poussent au développement de l'utilisation de combustibles de substitution, dont les RB.

- analyser les caractéristiques physiques et thermochimiques des résidus de broyage potentiellement disponibles pour une valorisation énergétique
- dresser un état de l'art technico-économique détaillé des différents procédés envisageables pour la valorisation énergétique des résidus de broyage
- effectuer une analyse prospective (2015 et au-delà) de la filière, du gisement jusqu'à la valorisation.

L'étude a permis d'apporter une réponse détaillée à l'ensemble des points ci-dessus.

- L'état de l'art de la valorisation énergétique des résidus de broyage en Europe a permis de comparer en détail la situation de 9 pays différents et a mis en évidence la multiplicité des facteurs explicatifs des fortes disparités de situations entre ces pays en termes de performances
- Les gisements de VHU et de résidus de broyage disponibles en France ont été décrits au plan qualitatif et quantitatif. Le gisement global est estimé entre 3 et 4,1 Mt. Ses perspectives d'évolution à l'horizon 2015 ont été détaillées.
- Les caractéristiques physiques et thermochimiques de chaque fraction triée issue des résidus de broyage ont fait l'objet d'une description détaillée et débouchent sur une quantification du potentiel disponible en vue de la valorisation énergétique
- L'état de l'art technico-économique des différents procédés envisageables pour la valorisation énergétique des résidus de broyage analyse chaque procédé à la lumière de douze critères différents et permet d'identifier les verrous à lever.

## Annexe 1 : Fiches procédés « Traitement du résidu de broyage »

### Procédé Galloo Plastics

Le flux issu du broyage et de l'élimination des métaux ferreux et non-ferreux passe par une ligne de traitement par flottaison sur liqueur dense, afin d'isoler six fractions, par des procédés mettant en jeu les différences de densité entre matériaux:

- les reliquats de métaux ferreux et non ferreux
- un résidu lourd (contenant du caoutchouc, PVC) : utilisé comme combustible de substitution en cimenterie
- un résidu léger (contenant mousses, bois, textiles, ...) également utilisé en valorisation thermique pour récupération d'énergie
- une fraction thermodurcissables
- une fraction PE/PP
- une fraction PS/ABS.

#### Synoptique de la « Ligne de Tri des Fractions Broyées » installée chez Galloo France

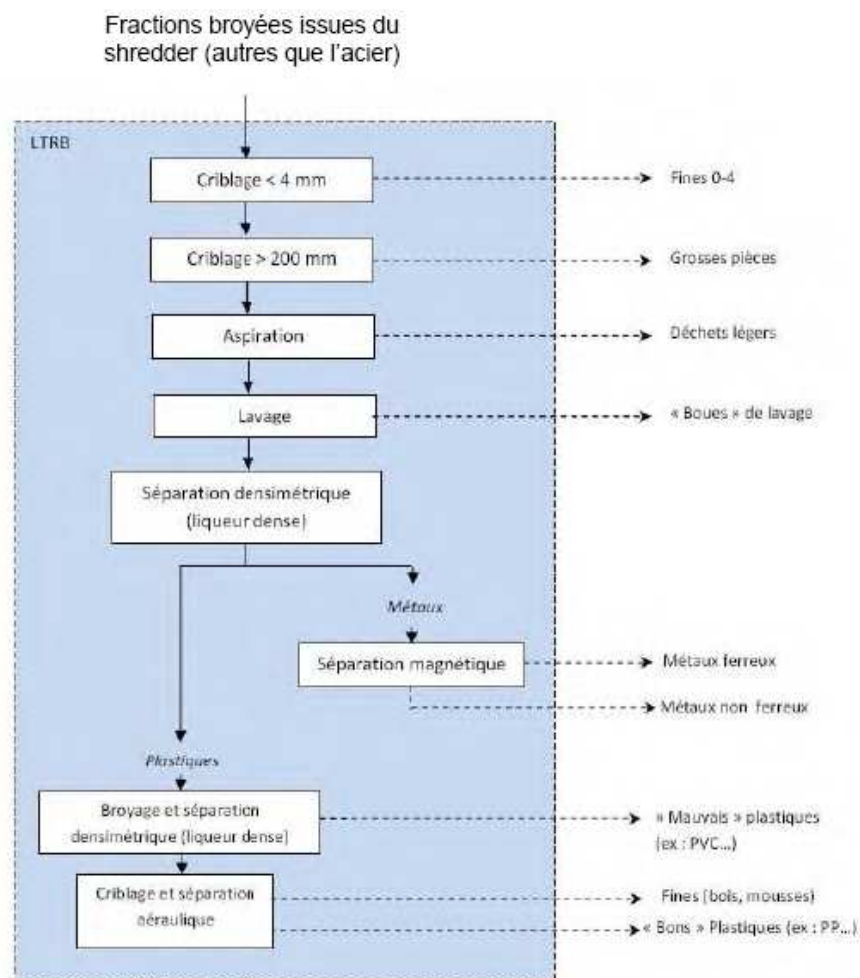
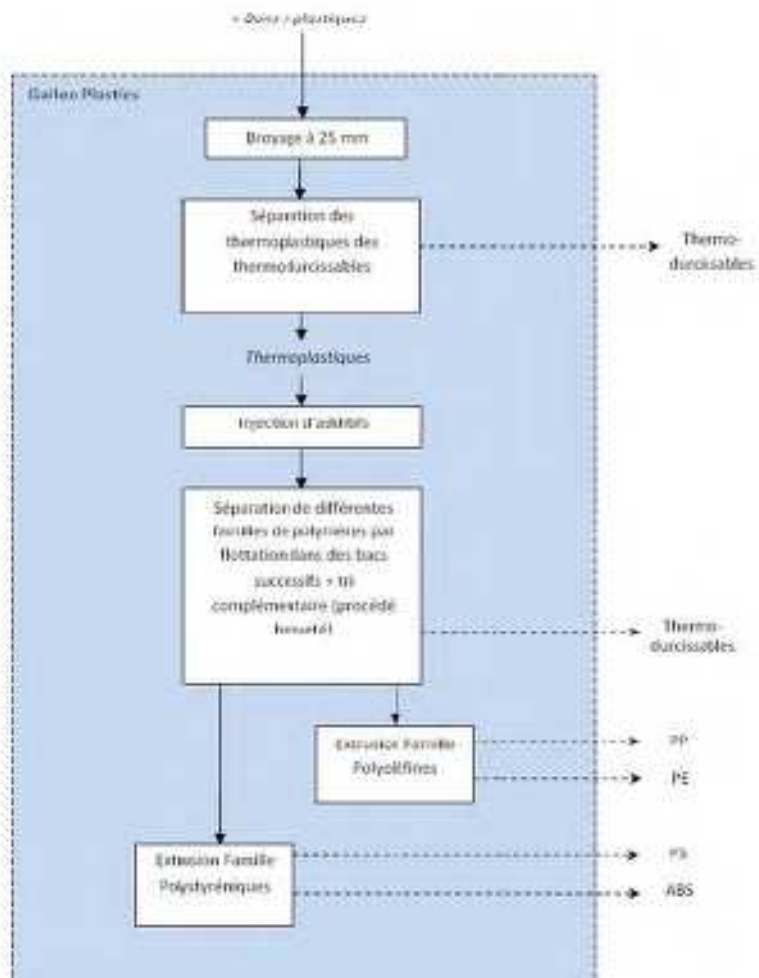


Figure 1



Source : ADEME-TERRA - "Etat de l'art des technologies de recyclage DEEE"

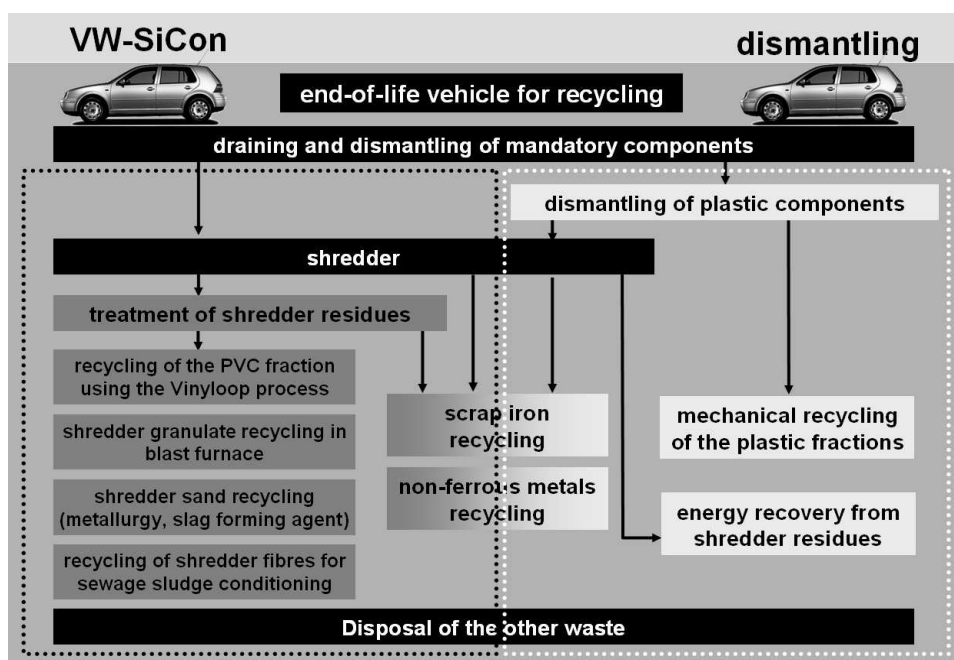
## Procédé SiCon

### Le procédé

Le procédé a été développé en coopération avec Volkswagen. Il permet de traiter les fractions lourde et légère du RBA.

Selon le concepteur du procédé, plus de 95 % du résidu de broyage est valorisable, soit en tant qu'agent réducteur en sidérurgie, soit en tant que combustible.

SiCon revendique une production de 200 000 t/an dans plusieurs sites en Europe. A mi-2011, la capacité installée atteignait 400 000 tonnes.



### Retour d'expérience de l'unité exploitée par ARN (Pays-Bas)

Depuis mai 2011, ARN<sup>72</sup> exploite une usine de traitement des RBA selon le procédé VW-Sicon, complétée par un procédé de traitement de plastique de la société Galloo Plastics. L'usine traite 30 kt/an de RBA et sera portée à terme à 100 kt/an. Le RBA est séparé en trois fractions principales : minéraux (sable), fibres et matières plastiques. Une partie des matières plastiques est séparée en plusieurs étapes en fractions PP, PE, ABS etc. commercialisables.

Les fractions non recyclables préparées par l'unité de traitement sont actuellement envoyées en enfouissement. Il s'avère en effet que la réponse à l'alternative entre la valorisation énergétique et l'enfouissement dépend de nombreux facteurs tels que le "gate fee" élevé demandé par les gestionnaires d'UIOM pour traiter ces fractions, la situation de sous-capacité du parc d'UIOM et le faible degré d'adéquation entre la composition des fractions produites et les attentes des gestionnaires d'UIOM.

<sup>72</sup> Source : Rapport annuel « Stiftung Autorecycling ».

## Procédé Scholtz

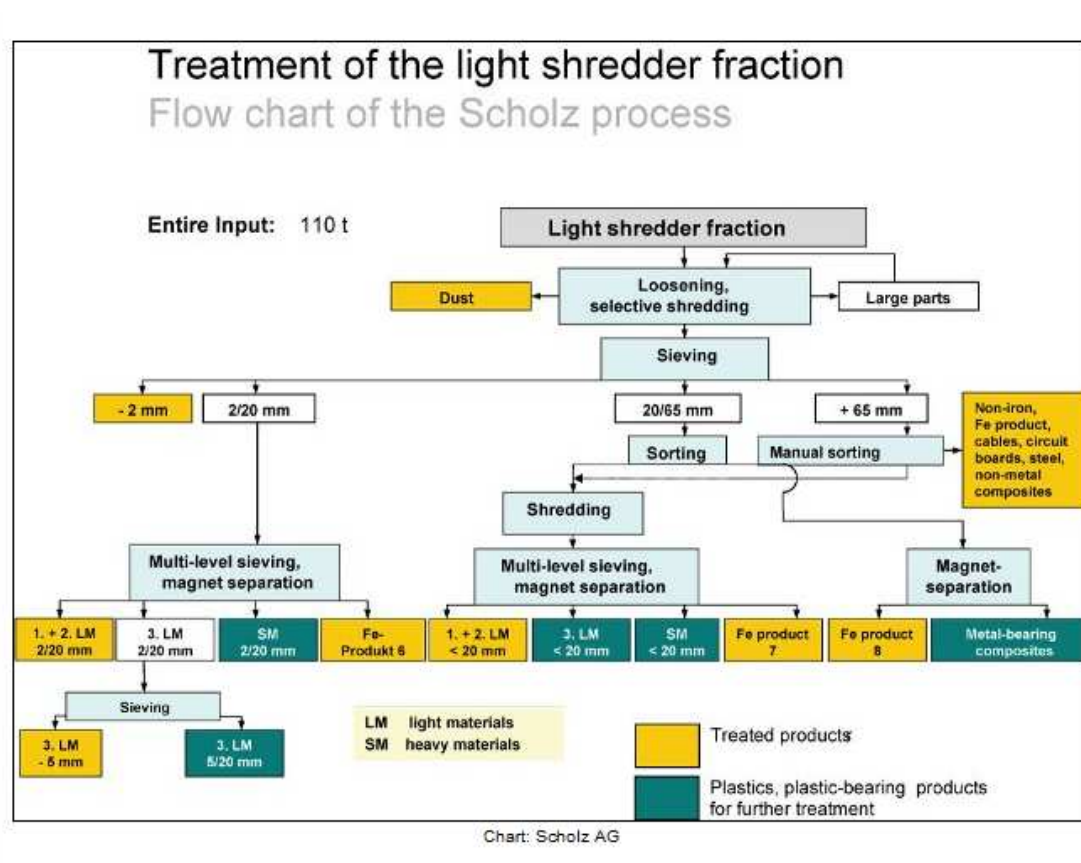
La société SRW Sächsische Recyclingwerke GmbH a développé un procédé automatique de sur-tri des RB léger et lourd.

### Sur-tri du RB léger

Plusieurs étapes successives de tri mécanique et de tri magnétique conduisent à cinq fractions différentes, la taille maximale des morceaux ne dépassant pas 300 mm:

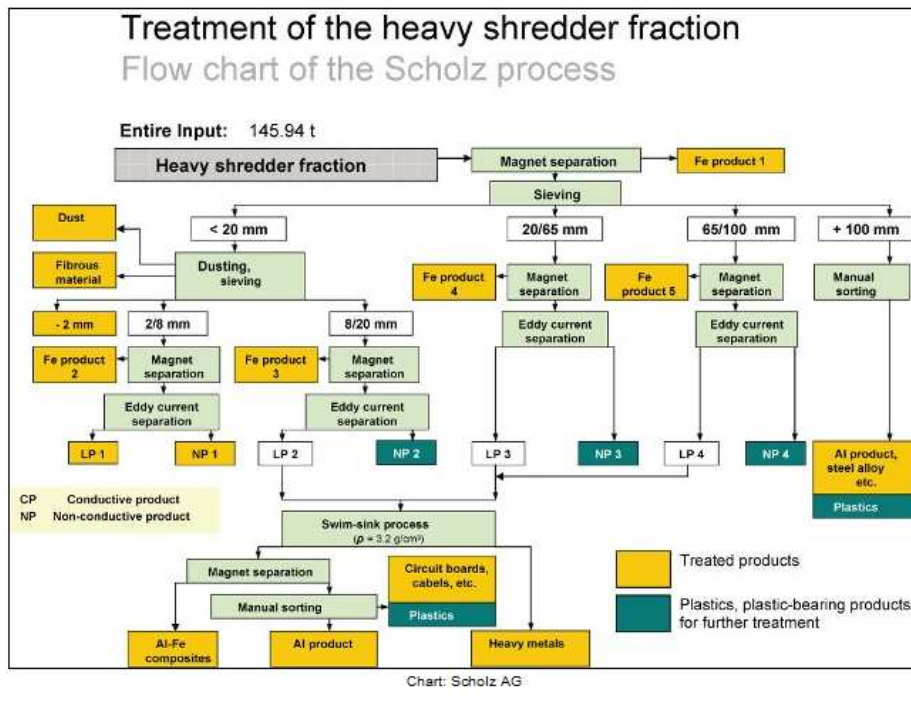
- métaux directement recyclables,
- câbles et circuits imprimés
- combustibles de substitution
- plastiques

ainsi qu'une fraction riche en produits minéraux (< 2mm).



## Sur-tri du RB lourd

Scholtz utilise un procédé de séparation dérivé du procédé Galloo Plastic, basé sur la flottation différentielle à des densités de 1,5 et 3,2 g/cm<sup>3</sup>.



## Annexe 2 : Fiches procédés « Valorisation énergétique des résidus de broyage »

### Procédés d'incinération

#### Incinération du RBA lourd dans l'incinérateur industriel SLECO d'Indaver (Anvers)

La charge usuelle de cet incinérateur est composée de 70 % RDF et 30 % de boues de STEP. L'utilisation de RBA en mélange conduit aux résultats suivants :

- L'impact sur le changement climatique est favorable (le RBA génère moins de CO<sub>2</sub> non-biogénique par MJ d'énergie que le RDF).
- Ni les émissions de NO<sub>x</sub> et de SO<sub>2</sub>, ni les émissions de POP n'évoluent de façon significative].
- Les concentrations en Cu et en Fe dans les cendres augmentent.
- Durant le test, la quantité de « bottom ashes » produite par tonne de déchet traité a augmenté de 48 % par rapport à une charge « normale »
- Les concentrations en métaux lourds dans les cendres augmentent en moyenne de 10 %, mais restent en ligne avec les limites de la réglementation locale en vue d'un usage dans la réalisation de soubassements routiers, sauf pour le cuivre
- La teneur totale en métaux lourds dans les gaz de combustion augmente d'environ 60 % mais reste dans les limites réglementaires

Le test concluait que l'incinération du RBA lourd avec du RDF et des boues de STEP est une solution viable techniquement. La qualité des cendres constitue un indicateur pour fixer la proportion maximale de RBA dans le mélange à traiter<sup>73</sup>.

#### Procédé Thermo-Ré de récupération des métaux contenus dans les cendres d'incinération

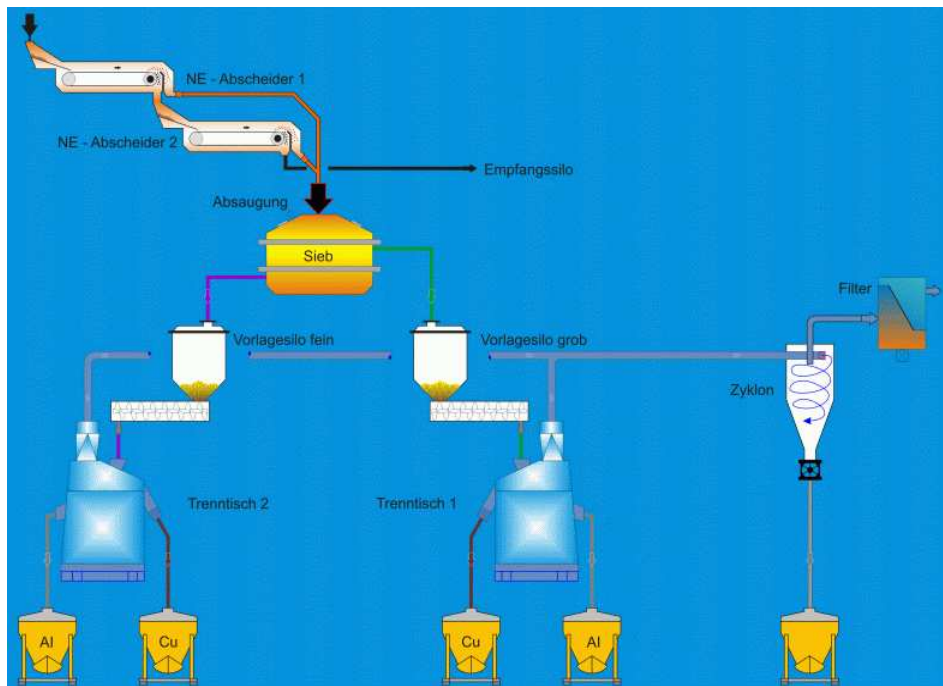
Ce procédé a été développé en Suisse par la « Kehrichtverwertung Zürcher Oberland » (KEZO) et le centre pour l'utilisation durable des déchets et des ressources (ZAR).

L'objectif visé est principalement de nature environnementale. Les autorités suisses veulent en effet que les déchets ultimes des RB mis en décharge soient aussi faibles en quantités et inertes que possible.

Le procédé en 3 étapes permet de récupérer les fines de métaux ferreux et non ferreux (0,5 à 7 mm) dans les cendres d'incinération, dont une proportion non négligeable de métaux précieux, dans les mâchefers d'incinération. Il équipe deux des trois lignes de l'incinérateur de Hinwil (Canton de Zürich).

<sup>73</sup> I. Vermeulen, C. Block, W. Dewulf, C. Vandecasteele, Proceedings 2nd International conference on Hazardous and Industrial Waste Management A4, Energetic valorisation of automotive shredder residue by co-incineration in a fluidized bed combustor – 2010.





### Procédé “RESHMENT” (Suisse)

Ce procédé a été développé par l’institut suisse « CTC Umwelttechnik ». Il utilise une combinaison d’un traitement mécanique et d’un traitement thermique. Après broyage du RB léger et élimination des ferreux et des non-ferreux, le flux est soumis à un traitement thermique à une température 2000°C. Le produit vitrifié peut être utilisé en mélange pour des applications de revêtements routiers. Le système en est encore au stade du pilote. Le coût de traitement est estimé entre 75 et 140 €/t<sup>74</sup>.

<sup>74</sup> Source: “An Economic Solution for Recycling Fluff from Shredder Light Fraction”. Andreas Bartl, Vienna University of Technology.

# Procédés de gazéification

## Procédé Ecoloop (Allemagne)

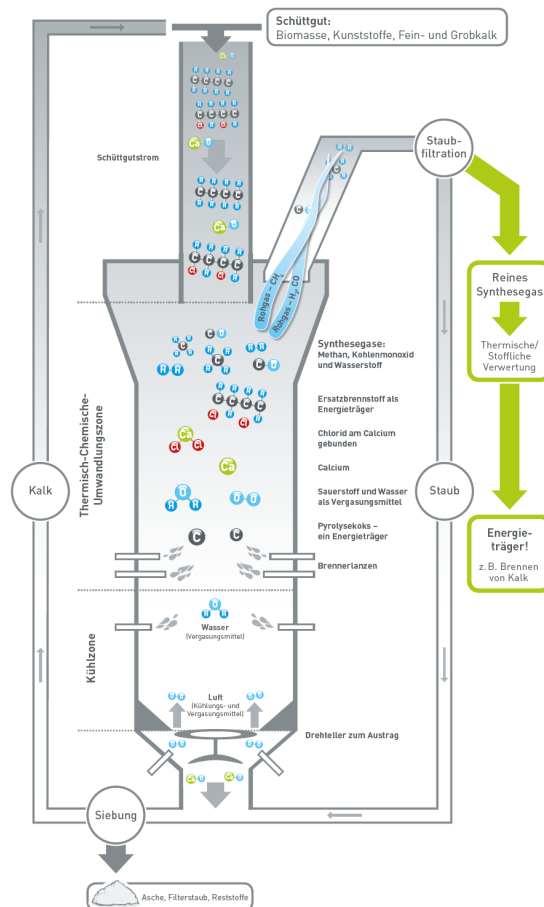
Gazéification à contre-courant, avec lit circulant.

Démonstrateur de 32 MW en construction (prévu en février 2012 mais apparemment retardé), soit 35 à 40 000t/an

Besoins de préparation de la charge : PCI mini: 15 MJ/kg.

- Granulométrie: 2-8 cm
- Teneur en chlore <10 % si possible
- Additif: chaux (0,7t/h pour 4,5t/h de RDF traité).

Produits sortants : Gaz de synthèse → électricité



## Procédé Biosyn (Enerkem - Canada)

### Procédé :

Gazéification + conversion catalytique

### Degré de développement :

Pilote (depuis 2003), démonstrateur (depuis 2009), unité industrielle (en construction)

### Déchets traités

- Pilote : déchets de cantines, déchets des IAA, déchets verts humides, pneus, liqueur noire, boues de STEP, déjections de poulaillers, RBA.
- Démonstrateur : tests effectués avec des déchets de biomasse propre, déchets plastiques, papier, bois traité, déchets ménagers, RDF, CSR.

### Besoins de préparation de la charge

Selon la nature des déchets, il faut prévoir :

- ✓ Un séchage partiel au moyen de la chaleur de récupération (le taux d'humidité des déchets entrants doit être d'environ 20 %)
- ✓ Un tri éventuel des PVC, métaux, verres, inertes...
- ✓ Un broyage (granulométrie : morceaux de 3cm au maximum).

### Produits sortants

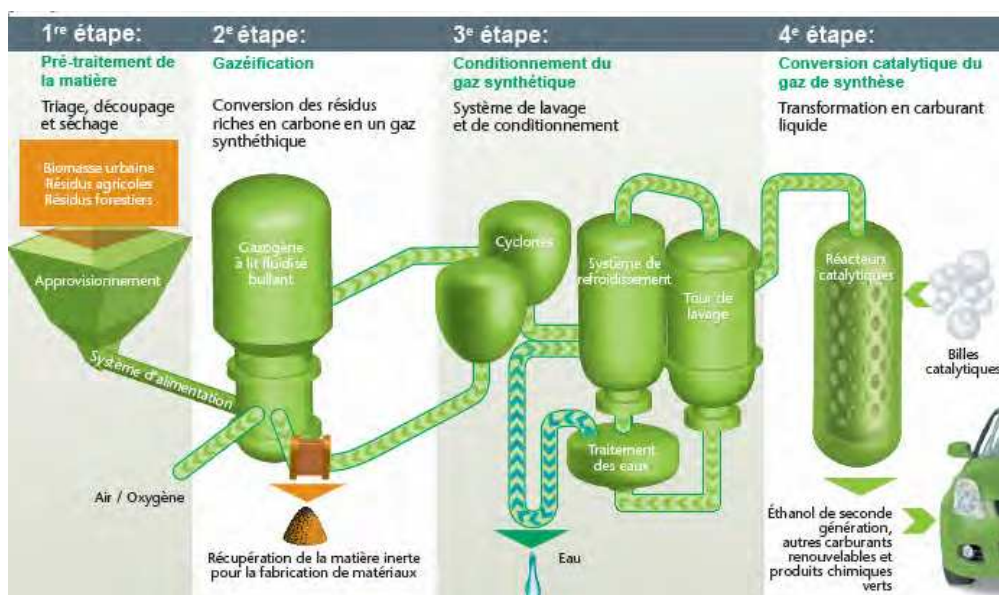
- Démonstrateur : éthanol
- Unité industrielle (en construction) : éthanol et méthanol (CAS 67-56-1) et éthanol (CAS 64-17-5)

### Sous-produits

Résidu pulvérulent (combustible d'appoint pour cimenterie) et résidus granuleux (matériau de construction). Le volume des résidus se situe entre 10 et 15 % du poids des matières premières entrantes.

### Capacité

- Design modulaire
- Démonstrateur : 40 – 45 t/jour de déchets
- Objectif industriel : 150 à 200000 t/an de déchets.



## **Procédé RODECS (Chinook Sciences Ltd)**

L'usine de la société EMR située à Liverpool envoie 184 kt/an de RBA léger en enfouissement chaque année. L'objectif est d'en valoriser 95 %.

La société Innovative Environmental Solutions (IES)<sup>75</sup> construit une unité de gazéification capable de recycler 350 000 tonnes de RBA et de déchets ménagers dans les West Midlands (Merseyside, Liverpool).

L'unité produira 40 MW électrique et 190 000 t de matériaux recyclés, dont des combustibles, du verre, des solides inertes propres et des métaux. L'unité utilise la technologie de gazéification RODECS développée par Chinook Sciences.

Température opératoire: 450 – 600°C selon le type de déchet traité. Cette plage de température basse permet d'éviter l'oxydation des métaux non-ferreux et d'éviter tout début de fusion de métaux ou de verre qui pourrait encrasser le réacteur. Le gaz de synthèse est ensuite traité dans un « reformer » en atmosphère contrôlée à 1200 – 1400°C, éliminant toutes les substances nocives et permettant une utilisation du gaz comme combustible.

## **PyroArc (Norvège)**

### Procédé

Gazéification, suivie d'un traitement du gaz de synthèse par torche à plasma.

### Degré de développement :

Pilote. Des tests ont été réalisés avec du RB.

### Températures opératoires

Température de gazéification: 1000°C

Température du réacteur plasma: 5000°C.

### Prix de reprise des déchets

Le prix de reprise est estimé à 50 €/tonne pour une unité de 50 000 t/an de RB, produisant de la vapeur. Il augmenterait à 100 Euro/tonne pour une unité convertissant la vapeur en électricité. Il passerait à 175 Euro/tonne pour une unité de 10 000 t/an.

## **Procédé PGVR (Alter-NRG – Canada)**

### Procédé:

PGVR – (Plasma Gasification Vitrification Reactor). Gazéification à contre-courant alimentée par des torches à plasma.

### Degré de développement

- Deux unités industrielles fonctionnent au Japon sur des déchets ménagers, boues de STEP, RBA
- Unités fonctionnant sur des déchets dangereux en Inde.

A l'exception d'un petit pilote, les deux unités industrielles en opération au Japon, qui tournent depuis 10 ans, sont totalement orientées vers la production intégrée de chaleur et d'électricité à partir du gaz

---

<sup>75</sup> IES : joint venture entre European Metal Recycling (EMR) et Cranford (New Jersey).

de synthèse. Ces deux unités ont permis à Alter-NRG d'acquérir une expérience en matière de traitement de déchets de biomasse et de déchets plastiques par torche à plasma.

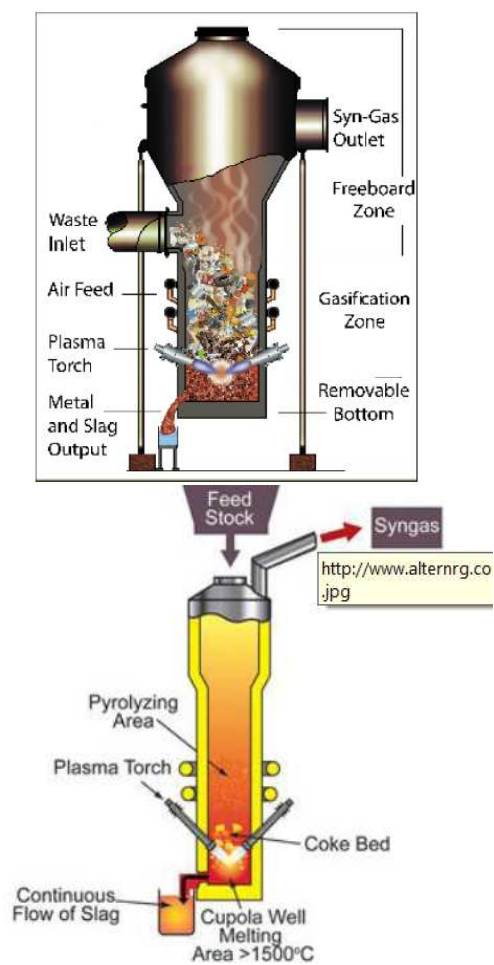
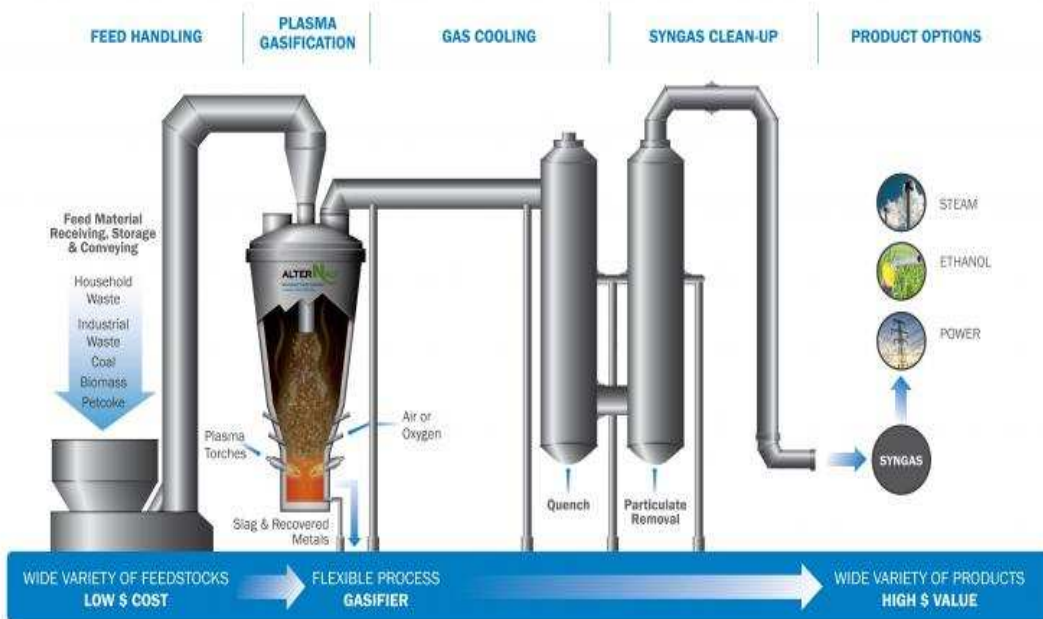
#### Produits sortants

- Industriel : Gaz de synthèse → Chaleur + électricité.

Le faible PCI du gaz de sortie ne permet pas d'envisager une combustion dans un moteur. Le gaz ne peut qu'être brûlé dans une chaudière ou utilisé pour une synthèse chimique.

#### Capacité

Industriel : 75 t/j, 150 t/j et 500 t/j.



## **Procédé Gasplasma (Advanced Plasma Power - Grande Bretagne)**

### Procédé

Gazéification. La vitrification des résidus au moyen d'une torche à plasma constitue une spécificité du procédé.

L'entreprise s'appuie sur le savoir-faire de Tetronics (plasma) et de Energy Products of Idaho, Inc. pour le four à lit fluidisé.

### Degré de développement

Le procédé est testé sur un pilote depuis plus de quatre ans sans que des applications industrielles aient vu le jour pour l'instant.

Aucun détail n'est disponible sur les trois unités dont l'exploitation est revendiquée par Advanced plasma Power en Grande-Bretagne (unités équipées de gazéificateurs de la société Energy Products of Idaho, en combinaison avec des torches à plasma Tetronics).

### Déchets traités

Tests effectués sur un pilote avec des déchets municipaux, DIB, RBA, RDF, déchets dangereux, boues de STEP ;

### Produits sortants

Le gaz de synthèse est utilisé comme combustible pour un moteur thermique afin de produire de l'électricité et de la chaleur.

### Capacité

- Pilote : 1,8 t/jour
- Industriel (projets) : 90 000 à 150 000 t/an de déchets

## **Procédé TwinRec (Ebara - Japon)**

Procédé en 3 étapes :

Gazéification en lit fluidisé : Séparation de la fraction combustible et des poussières métalliques et inertes dans une chambre en lit fluidisé, avec récupération du Fe, Al et Cu en fractions séparées.

Combustion de la fraction « fuel gas » dans une chambre de combustion et récupération de l'énergie.

Vitrification des cendres. Combustion à 1350°C.

Degré de développement

L'unité de 2 x 225 tonnes/jour située à Aomori a recyclé 120 000 tonnes de résidu de broyage (produits blancs et VHU) depuis sa mise en route en 2000.

Besoins de préparation de la charge

Aucun prétraitement n'est nécessaire. Pas de contraintes liées à la présence de traces de peinture, de colle ou d'additifs dans les déchets à traiter. L'unité de gazéification peut accepter des morceaux allant jusqu'à 300x300mm.

Produits sortants

Procédé exclusivement destiné à produire directement de la chaleur ou de l'énergie (par combustion des gaz produits).

Sous-produits

Métaux

Cendres (vitrifiées)

Le brome est capturé au niveau du lavage des effluents gazeux. Le résidu vitrifié peut être utilisé en mélange pour les revêtements routiers.



## Procédés de pyrolyse

### **Klean Industries (Canada)**

Procédé en deux étapes :

- Pyrolyse à 500°C
- Distillation.

Degré de développement

7 unités en fonctionnement depuis 12 ans, en Asie et en Europe.

Déchets traités :

- Plastiques issus des déchets ménagers, DIB, déchets agricoles, films
- Pneus
- RBA
- DEEE.

Capacité

1000 à 35 000 t/an de déchets

Déchets traités

Plastiques issus des déchets ménagers ( PP, PE, PS, HDPE, LDPE)

DIB, déchets agricoles, films

Pneus, RBA, DEEE

Besoins de préparation de la charge

Le procédé peut traiter des déchets contenant jusqu'à 20 % en volume de PVC et de PET.

La charge peut être constituée de déchets en mélange, humides, souillés (par des métaux, du papier, de la terre...). Toutefois, le rendement matière diminue lorsque la contamination du déchet traité augmente.

Produits sortants

- Mélange diesel / essence (70/30 %)
- Gaz ayant les propriétés du gaz naturel: +/-10 %
- Monomères: +/-30 %

Le principal produit sortant est un carburant dont la spécification est bien adaptée pour une utilisation dans des moteurs industriels.

## Procédés de dépolymérisation thermique et catalytique

### Procédé Agilyx

Ce procédé a été développé aux USA par une société du groupe Total. Une unité est opérationnelle aux Etats-Unis. Trois autres unités de traitement des CSR ont également été vendues récemment aux Etats-Unis.

Le principal produit de sortie est similaire à du pétrole à faible teneur en soufre. (www.agilyx.com).

### Projet Phoenix de traitement des déchets ultimes de tri des RB – Comet Traitement (Belgique)

#### Caractéristiques du projet PHOENIX :

Dépolymérisation thermique et catalytique (réacteurs de pyrolyse à 300 à 350°C, en absence totale d'oxygène).

#### Types de déchets :

- ce qui reste quand on a retiré du fluff les métaux, les plastiques recyclables et les minéraux (mélange ultime composé principalement de mousses, de textiles et de bois)
- fractions non recyclables ou valorisables matière issues du RB lourd.

#### Contraintes sur la qualité des déchets

Pour les résidus lourds, la proportion en halogénés ne doit pas dépasser 7 à 8 %. La teneur en PCB, en fluor et en métaux volatils doit également être limitée, ce qui conduit souvent à des opérations de préparation des déchets avant traitement.

#### Produits de sortie

- +/- 10 % d'eau, issue du séchage des RB et des réactions de déshydratation des matières organiques hydrocarbonées
- +/- 43 % d'hydrocarbures (gaz, hydrocarbures liquides légers) destinés à une utilisation comme carburant pour des moteurs lents (co-génération)
- +/- 20 % de résidu solide carboné (CHAR) sec et friable, dans lequel les cendres et notamment les métaux (Zn, Pb, Cu etc.) n'ont pas été piégés. Cette particularité permet d'envisager leur séparation en vue de produire un carbone ayant des applications en sidérurgie comme agent réducteur dans la sidérurgie. La valorisation de ce résidu en sidérurgie est en cours de validation par le Centre de Recherches Métallurgiques (CRM).
- Minéraux contenus dans les résidus carbonés (ces minéraux étant valorisés dans des enrobés bitumeux utilisés dans la construction de routes).
- +/- 7 % de métaux, répartis en 2 % de métaux ferreux, 3,5 % de métaux grossiers commercialisables (> 3 mm), et 1,5 % de métaux fins (< 3 %) dont la valorisation après un traitement hydro-métallurgique (lixiviation bactérienne) semble prometteuse ;
- +/- 20 % de cendres.

#### Degré de développement

Validé sur un petit pilote jusqu'en 2012.

Comet va démarrer un pilote de 100kg/h au 1<sup>er</sup> trimestre 2013.

Il n'y a pas de procédé équivalent dans le monde. De nombreux procédés revendiquent la possibilité de faire de la dépolymérisation thermique de déchets plastiques mais n'ont fait que des tests sur le RB.

## Annexe 3 : Contraintes spécifiques à l'incinération des RB

### Contraintes réglementaires

La directive européenne 2000/76/EC stipule des règles strictes concernant les conditions opératoires à respecter dans un incinérateur de déchets, selon la teneur en chlorés de la charge:

- Pour des déchets contenant moins de 1 % de chlore en poids : Température minimale du gaz : 850°C ; temps de résidence égal à au moins 2 secondes
- Pour des déchets dangereux contenant plus de 1 % de chlore en poids : Température minimale du gaz : 1100°C ; temps de résidence égal à au moins 2 secondes.

La formule R1 s'applique officiellement aux UIOM depuis le 01/01/2013. Toutefois, dans de nombreux pays, les règles de calcul du seuil de la formule R1 (Directive 2008/98/CE) ne sont pas définies dans le cas d'UIOM qui incinèrent des RB.

### Prérequis sur les charges

#### Présence de composés chlorés

Le PVC et les caoutchoucs halobutyl constituent la principale cause des concentrations en chlore dans le RBA. Une teneur élevée en composés chlorés dans la charge se traduit par une concentration élevée en HCl dans les gaz de combustion, avec pour conséquence une augmentation des opérations de maintenance et une réduction de la durée de vie des installations.

Compte tenu de la contrainte réglementaire, sachant que le RBA peut contenir jusqu'à 4 % de chlore, l'incinération sans mélange n'est donc pas envisageable, sauf à envisager un prétraitement de déchloration coûteux<sup>76</sup> ou une « dilution » du RBA dans les OMR.

#### Présence de composés bromés

L'incinération des DEEE dans des UIOM a fait l'objet de tests industriels dès la fin des années 90. Les résultats obtenus montrent que la présence de plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés n'est pas un facteur rédhibitoire d'un point de vue technique (ni corrosion des équipements ni risque d'émission de composés toxiques) à condition de ne pas dépasser une teneur de 3 % de composés bromés dans la charge introduite (sur un total de 15 % en poids d'halogènes).

#### Risques de formation de polluants organiques persistants (POP)

Du fait du contenu en chlore dans le RBA, l'incinération est susceptible de générer la formation de PCDD/F, PCB et PAH, que l'on retrouve en particulier dans les cendres volantes et les cendres d'incinération. La plupart des études réalisées s'accordent sur le fait que les POP contenus dans la charge entrante sont détruits pendant le processus d'incinération, mais que de nouveaux POP se forment durant la phase de refroidissement des gaz de sortie<sup>77</sup>. Ces travaux confirment également que les teneurs en POP dans les effluents gazeux de combustion sont en grande partie indépendantes de la teneur en POP des déchets traités<sup>78</sup>. En outre, si du RBA est incinéré avec des OMR, l'incinérateur agit comme un « puits », la quantité de POP détruits étant supérieure à la quantité de POP fabriqués<sup>79</sup>.

<sup>76</sup> Il existe de nombreuses techniques de déchloration permettant de rendre le RBA apte à l'incinération dans des installations opérant à moins de 1100°C, telles que la séparation densimétrique, le chauffage à 300°C suivi d'un lavage du résidu, l'extraction du chlore avec du Ca(OH)<sub>2</sub> ou avec un mélange NaOH / éthylène glycol, la déhydrochloration des déchets à 200–400°C par combustion à deux étages. Pour des raisons économiques liées aux coûts élevés de préparation des déchets, ces voies n'ont pas connu de développements au plan industriel.

<sup>77</sup> La méthode la plus couramment utilisée pour capturer les POP dans les gaz de sortie consiste à effectuer une adsorption sur charbon actif pulvérulent suivie d'un filtrage.

<sup>78</sup> - L. Aae Redin, M. Hjelt, S. Marklund, Co-combustion of shredder residues and municipal solid waste in a Swedish municipal solid waste incinerator, Waste Manage. Res. 19 (2001) 518–525.

- W. Funcke, J. Mayer, H. Dresch, F.E. Mark, PCDD/F emission from a municipal solid waste incinerator during co-combustion of automotive shredder residues, Organohalogen Compounds 36 (1998) 171–174.

<sup>79</sup> - J. Van Caneghem, C. Block, I. Vermeulen, A. Van Brecht, P. Van Royen, M. Jaspers, G. Wauters, C. Vandecasteele, Mass balance for POPs in a real scale fluidised bed combustor co-incinerating automotive shredder residue, J. Hazard. Mater. 181 (2010) 827–835.

La formation de PCDD/F est favorisée par la présence de particules de cendres, de cuivre ou de fer, ce qui est le cas des RB. Il a été montré qu'un mélange de 25 % RBA, 25 % RDF et 50 % de boues (en poids) contient 7,5 fois plus de cuivre qu'un mélange de 70 % RDF et 30 % de boues<sup>80</sup>.

#### Présence de métaux lourds

Une proportion élevée de Cr, Ni, Pb et Zn dans les fines <0,5mm issues du broyage du RBA a été mise en évidence. On retrouve ces métaux lourds dans les fumées de combustion et dans les mâchefers. Les techniques de traitement existent mais sont coûteuses :

- la séparation mécanique permet d'éliminer jusqu'à 77 % de ces métaux ;
- l'extraction des métaux lourds contenus dans le RBA par un acide (CH<sub>3</sub>COOH, KCl/HCl, NH<sub>4</sub>OH/HCl ou H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>). Cette technique est particulièrement efficace pour éliminer le Cu et le Zn.

La teneur et la répartition des métaux lourds entre les différents produits de sortie dépendent de nombreux facteurs. Plusieurs études ont montré que la teneur en chlore favorise la volatilisation des métaux lourds tels que le zinc, le cuivre et le plomb. D'autre part, la présence de sodium accroît l'adsorption des métaux lourds par les mâchefers.

Lors du refroidissement des fumées, les vapeurs de métaux lourds condensent facilement (sauf le mercure) ce qui facilite leur captage par des techniques classiques (précipitateurs électrostatiques, filtres-cartouche en céramique...). Il est possible de pousser encore plus l'élimination des métaux lourds par injection de charbon actif directement dans les fumées (adsorption de 80 à 93 % du mercure), ce qui résout le problème du mercure dans le RBA.

Dans de nombreux pays, les mâchefers d'incinération des OM sont utilisés comme matériaux pour des applications dans la construction. Ce point est à prendre en compte dans la mesure où la teneur en métaux lourds et en POP est plus élevée dans les mâchefers issus du RBA que ceux issus des OM. Les limites réglementaires peuvent constituer une limite à la proportion de RBA incinéré.

#### Contraintes liées à la présence de PCB

L'incinération du RBA entraîne une augmentation de la concentration en PCB d'un facteur 3 à 5 dans les rejets gazeux et d'un facteur 5 dans les mâchefers. Une étude comparative sur plusieurs technologies<sup>81</sup> a montré toutefois que l'incinération du RBA avec les OM conduit à de meilleurs résultats que la co-combustion dans un four à ciment ou dans un four de destruction de déchets dangereux.

#### Facteurs économiques

Par rapport à l'enfouissement, l'incinération entraîne une forte réduction des volumes des fractions organiques des RB.

L'incinération du RBA dans des UIOM suppose d'accepter de payer 120 à 150€/tonne de RB

Les solutions techniques existent pour éliminer les métaux lourds dans les mâchefers, mais à des coûts prohibitifs pour les industriels (150 à 240 €/t<sup>82</sup>).

---

- J. Van Caneghem, C. Block, A. Van Brecht, G. Wauters, C. Vandecasteele, Mass balance for POPs in hazardous and municipal solid waste incinerators, Chemosphere 78 (2010) 701–708.

<sup>80</sup> J. Van Caneghem, I. Vermeulen, C. Block, A. Van Brecht, G. Wauters, C. Vandecasteele, Proceedings 2nd International conference on Hazardous and Industrial Waste Management A5, Destruction and formation of PCDD/Fs in a fluidized bed combustor co-incinerating automotive shredders residue with refuse derived fuel and wastewater treatment sludge, 2010, 97–99.

<sup>81</sup> F. Mark, Thermal recovery of (A)SR – a way forward to ELVs management, BHM 143 (1998) 28–35.

<sup>82</sup> Source: "An Economic Solution for Recycling Fluff from Shredder Light Fraction". Andreas Bartl, Vienna University of Technology.

Teneurs en soufre et en chlore : elles impactent fortement sur les émissions de SO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl et POP. Si la teneur en chlore est > 1,1 %, il faut monter en température, ce qui coûte cher. Dans certains cas, il est nécessaire de procéder à une désacidification des effluents gazeux à la chaux pour respecter les teneurs limites en HCl et en SO<sub>x</sub>.

Teneur en cendres : le taux de cendres du RBA est de 30 % en moyenne, ce qui conduit à une faible proportion de métaux récupérables dans les mâchefers et à une augmentation du volume des mâchefers. Les tests effectués montrent une forte augmentation de la quantité de mâchefers produite par tonne de déchet traité (+48 % d'après un test).

Teneur en métaux lourds : on observe une augmentation sensible (10 % en moyenne) des teneurs en métaux lourds dans les mâchefers et les cendres volantes (jusqu'à 60 %), en particulier en Cu et en Fe. En outre, il se produit une volatilisation presque complète du Pb et du Zn, favorisée par la présence de chlore. Ces émissions entraînent des complications pour le traitement des fumées.

Densité : les fours à grille ne supportent pas des déchets trop denses.

PCI : Si le PCI est > 15 MJ/tonne, on prend le risque de provoquer des surchauffes dans les fours, voire de brûler les grilles (« trop de PCI tue le PCI »). Compte tenu de ces contraintes, il n'est pas possible de co-incinérer plus de 15 % à 25 % de RB sans effets rétroactifs sur les conditions opératoires, sauf à utiliser des technologies coûteuses de prétraitement de la charge et de traitement des fumées et des mâchefers (récupération partielle des métaux lourds).

D'autre part, la combustion d'une tonne de RBA apporte environ 22 MJ/kg d'énergie, au lieu de 8 MJ/kg dans le cas des OMR. Cela signifie que le four d'incinération prendra presque 3 tonnes de moins d'OMR chaque fois qu'il accepte de traiter une tonne de RBA.

Ces deux raisons expliquent pourquoi, en Belgique et aux Pays-Bas, les gestionnaires d'UIOM pratiquent des prix de reprise du RB dissuasifs. En France, les gestionnaires d'UIOM ont également tendance à éviter d'utiliser des RB, qui leur rapportent moins que des OM (RB à 50€/tonne, OM à 100€/tonne).

Le procédé ZAR, déjà installé dans deux UIOM en Suisse, permet de maximiser la récupération des métaux non-ferreux contenus dans les mâchefers et à réduire au maximum le volume des déchets ultimes issus des RB.

## **Le point de vue des gestionnaires d'UIOM**

### Point de vue de la société A :

Les exploitants d'UIOM cherchent à améliorer leur image (du fait des difficultés d'implantation de nouveaux incinérateurs, des problèmes avec les riverains de certains incinérateurs existants). Ils ne souhaitent donc pas « se mettre de nouveaux problèmes sur le dos » et sont à priori sur la défensive

De ce fait, plusieurs conditions sont à remplir avant d'envisager de traiter du RB :

- les pouvoirs publics doivent avoir une position claire sur stratégie gouvernementale en matière de prise en compte du RB dans les arrêtés d'exploitation des UIOM. Aujourd'hui, le groupe a des autorisations pour traiter des OM, des DIB, des DASRI et des boues de STEP. Si, lors de la conférence ministérielle de septembre prochain le ministère de l'environnement se positionne clairement sur le rôle que devrait jouer la valorisation énergétique des RB et son positionnement dans la hiérarchie des modes de valorisation<sup>83</sup> et s'engage dans la durée sur cette position, alors la profession suivra. Il faut donc une volonté politique forte !
- effectuer une analyse au cas par cas des capacités d'incinération disponibles. Au SYCTOM (région parisienne) il n'y a aucune capacité disponible (un excédent de 400 kt/an est mis en décharge). A contrario, à l'UIOM de Gien, dans le Loiret, il reste de la capacité disponible. Il est peu probable que l'on soit en surcapacité au niveau national.

---

<sup>83</sup> Actuellement, suite au Grenelle de l'Environnement, l'incinération est mise au même niveau que la mise en décharge, avec des objectifs de réduction de capacité.

- avoir une connaissance précise de la composition des déchets à traiter et faire des essais (procédure d'essai à définir par les DREAL) pour vérifier les impacts environnementaux.

### Société B :

Le PCI des fractions RBA traitées est de l'ordre de 15 à 16 MJ/kg, au lieu de 8 en moyenne pour les OMR. Par conséquent, on incinère 2 fois moins de RBA que d'OMR à charge calorifique égale. Au plan économique, il faudra facturer le déchet deux fois plus cher. Le RB ne pourra donc pas rentrer dans les UIOM à moins de 120/150€/tonne.

Au plan technique, on observe des problèmes de surchauffe locale (certains tests ont obligé à effectuer un passage aux soupapes !)

D'autre part, la concentration élevée des RB en métaux lourds pose un important problème (la teneur de certains métaux lourds dans le RB est jusqu'à 100, voire 1000 fois plus élevée que dans les OMR). En effet, ces contaminants sont difficiles à mesurer dans l'état actuel des techniques disponibles (contrairement au soufre et au chlore, qui peuvent être mesurés en continu et dont les fluctuations de concentration dans la charge peuvent être contrôlées). Il y a donc un risque de concentrations rédhibitoires, incontrôlées, des métaux lourds dans les fumées. Les techniques d'analyse dont disposent les gestionnaires d'UIOM ne permettent pas aujourd'hui de maîtriser les concentrations en métaux lourds dans le RBA. Cela pourrait changer demain si la profession s'approprie les techniques. L'essentiel est en effet de supprimer l'inconnue liée à l'analyse. Un fois ce problème surmonté, des techniques d'injection existent (coke de lignite, charbon actif) pour compenser les fluctuations de concentration des métaux lourds. C'est déjà pratiqué couramment pour le contrôle et le dosage des DASRI.

En conclusion, si les techniques appropriées de dosage des métaux lourds sont mises en œuvre, on pourrait tout à fait imaginer d'injecter à l'avenir entre 1 et 3 % de RB. Toutefois, il sera probablement difficile d'amortir l'investissement (système de dosage, système d'injection) avec des quantités si faibles. Ce sera donc un compromis économique.

Pour pallier ce problème des fluctuations de la charge, il suffirait en théorie de « diluer » les lots correspondant aux camions déchargeant du RB dans la fosse de réception. En pratique, c'est impossible car une fosse fait de 8000 à 20000m<sup>3</sup>. En outre, le RBA livré est généralement un produit assez sec, contenant beaucoup d'éléments fins et volatils. Lorsqu'on essaie de mélanger les charges dans la fosse de réception, on est confronté à des envols importants qui présentent un problème sanitaire v/v du personnel d'exploitation.

Le taux de saturation massique des capacités des UIOM exploités par le groupe est actuellement supérieur à 95 %. En thermique, le taux est de l'ordre de 100 % (le facteur limitatif est le PCI, au niveau des turboalternateurs). Quelques sites manquent de DIB et sont en surcapacité.

Le parc d'UIOM du groupe représente environ 1/3 de la capacité d'incinération installée en France. Les installations ont un âge compris entre 10 et 40 ans.

Le SVDU confirme le fait que 25 à 30 % des capacités d'UIOM en France atteignent un taux suffisant pour que cela soit reconnu comme de la valorisation énergétique (R1 supérieur au ratio « plancher »). En France, la difficulté vient du fait que beaucoup d'UIOM font de la valorisation électrique (l'éloignement des centres urbains rendant peu rentable le chauffage urbain). Le contexte est différent en Europe du nord. Les réflexions en cours entre les grands acteurs de l'incinération devraient permettre d'accroître le nombre de raccordements à des réseaux de chaleur à moyen terme, ce qui contribuerait à accroître le ratio énergétique<sup>84</sup>.

La conséquence est double :

- dans le cadre de la réglementation nationale, seules les UIOM qui atteignent le seuil peuvent bénéficier d'un abattement sur la TGAP ;

---

<sup>84</sup> Les UIOM équipées de groupes turbo-alternateurs ont un rendement énergétique de 22 à 25%, contre 55 à 60% pour les UIOM alimentant des réseaux de chaleur.

- dans le cadre de la réglementation européenne, seules les UIOM qui atteignent le seuil peuvent effectuer des transferts transfrontaliers (c'est le cas par exemple entre les PB et la GB).

Certaines UIOM sont autorisées, par arrêté préfectoral, à traiter du RB (il n'existe pas de recensement de ces unités au niveau national). Seulement un ou deux sites du parc du groupe disposent de cette autorisation.

#### Coût d'incinération

Le coût d'incinération des OMR est compris entre 70 et 120€/tonne d'OMR (coût net de revente de l'énergie). Le coût varie principalement selon le niveau d'amortissement de l'installation, ainsi que selon le type de traitement des fumées et les conditions de revente de l'énergie.

#### **Le point de vue du MEDDE**

Il convient d'avoir en tête les priorités des politiques :

- pour les déchets, la hiérarchie prévention, recyclage matière et organique, puis valorisation énergétique, puis élimination ;

- pour l'énergie : la production d'énergies renouvelables (en priorité chaleur dans le contexte actuel), l'efficacité énergétique (puis la diminution au recours aux énergies fossiles importées), La combustion de combustibles de récupération ou la co-combustion en cimenterie peut être intéressante pour les acteurs concernés. Cependant, il n'est pas envisagé de soutiens financiers de l'Etat côté politiques de l'Energie (donc en clair : pas de TVA à taux réduit ; pas de tarif de rachat). Le soutien éventuel aux opérations exemplaires, partenariales, de valorisation de CSR (dont RBA) se fera au cas par cas, par exemple dans le cadre du Programme Investissements d'avenir (ADEME).

#### **Bilan masse-énergie**

Sachant que les 130 UIOM en fonctionnement ont incinéré 13,5 Mt de déchets ménagers, les 150 kt de RBA représenteraient 1,1 % du tonnage total traité par les UIOM et 3,1 % de la charge thermique.

	Tonnage traité ( kt )	Charge thermique (TJ)	Charge thermique (GWh)
OMR	13 500	108 000	30 000
RBA	150	3 300	917
% RBA / OMR	1,1 %	3,1 %	3,1 %

Détails des calculs :

- le traitement de 13,5 Mt d'OMR représente environ :  $(13500 \times 10^6 \times 8) / (3,6 \times 10^6)$  GWh = 30 000 GWh.
- le traitement de 150 kt de RBA représente environ  $(150 \times 10^6 \times 22) / (3,6 \times 10^6)$  GWh = 917 GWh<sup>85</sup>

La question reste toutefois posée de savoir si la réserve de capacité du parc actuel d'UIOM en France est suffisante pour absorber cette charge thermique supplémentaire. Ce point devra être approfondi dans la suite de l'étude.

<sup>85</sup> Données utilisées : PCI du RBA : 22 MJ/kg ; PCI des OMR : 8 MJ/kg ; 1 kWh = 3,6 MJ.

## Annexe 4 : Incorporation du RB dans des fours de fusion / affinage de métaux non-ferreux (pyrométallurgie)

### Description du procédé

Le principe consiste à ajouter du RB en mélange à la charge métallique dans des fours d'affinage de plomb et de cuivre<sup>86</sup>. Il contribue à la fusion-réduction en tant qu'agent réducteur (en remplacement du coke ou du fioul). Il est important de noter que les déchets utilisés interviennent dans le processus avant tout pour leur pouvoir réducteur et non pas pour leur apport calorifique. Il peut même arriver que l'apport calorifique soit trop élevé et oblige à limiter la proportion de RB.

### Principales étapes du procédé

- Démantèlement et broyage des pièces plastiques
- Mélange des déchets broyés avec les déchets métalliques
- Chargement dans le four de deuxième fusion ou dans le four de réduction de concentré de minéral. On peut ajouter jusqu'à 5 à 10 % de petits appareils en mélange ou de pièces plastiques issues d'appareils démantelés (en particulier des circuits imprimés) dans les fours de fusion / réduction de métaux non-ferreux (plomb, cuivre,...).

### Déchets utilisables

Les déchets utilisés le plus fréquemment sont les circuits imprimés broyés provenant des téléphones et d'équipements informatiques et les déchets de câbles, du fait de leurs teneurs élevées en cuivre.

Le diamètre des morceaux ne doit pas excéder 20 cm. Les téléphones mobiles sont ajoutés entiers après dépollution.

D'autre part, on peut combiner dans un même bain de fusion l'utilisation de plusieurs catégories de DEEE en fin de vie (câbles, circuits imprimés, produits gris,...), en association avec le recyclage d'autres déchets (catalyseurs automobiles usés, catalyseurs pétrochimiques, résidus de l'industrie photographique, produits intermédiaires d'autres raffineurs, etc ...).

Les atouts sont la souplesse d'utilisation, des coûts de démantèlement réduits, une forte synergie avec la valorisation des métaux précieux (circuits imprimés) et des qualités environnementales (économies de fioul et de coke, rôle de « puits à dioxines »). En revanche, le coût de préparation de la charge (broyage complémentaire) n'est pas négligeable.

**Le RBA n'est pas adapté à cette utilisation. Dans le cas des fours de fusion de cuivre, les tests ont démontré en effet que l'utilisation de déchets présente un intérêt économique dès lors que leur teneur en cuivre est supérieure à 5 %, ce qui n'est pas le cas du RBA.**

### Références

#### Pilotes, démonstrateurs, tests industriels

Localisation / exploitant / procédé	Degré de développement
Boliden Minerals AB (Suède)	Des tests ont été réalisés au cours de la période 1995-1999 par l'APME et l'American Plastics Council (APC) conjointement avec la société Boliden Minerals AB (Suède) sur 15 000 tonnes d'ordinateurs en fin de vie. Ces tests ont démontré qu'il est possible d'ajouter jusqu'à 5 à 10 % de plastiques issus de DEEE dans la charge du four.

<sup>86</sup> Le RBE n'est pas utilisé dans les usines de zinc, ceci pour des raisons économiques.



### Exploitation industrielle

Localisation / exploitant / procédé	Degré de développement
Société Boliden (Rönnskär, Suède)	L'usine traite 30000 à 35000 t/an de circuits imprimés. Les quantités ont fortement augmenté au cours des dernières années. Sa capacité est de 50 000 t/an de déchets plastiques issus des circuits imprimés.
Aurubis (anciennement « Nordeutscheaffinerie ») (Allemagne)	L'entreprise traite environ 30 000 tonnes de circuits imprimés broyés (< 5 cm) dans ses usines de Luenen et Hamburg. La proportion de DEEE dans la charge est < 3 %.  Elle a développé un procédé innovant ("KRS-Plus") permettant de valoriser des déchets à basse teneur en cuivre.
Umicore (Belgique)	Le four de fusion de cuivre de l'unité d'Anvers à une capacité de production de 250 000 t/an de cuivre.
Fonderie Home de Noranda (Rouyn, Canada)	La fonderie traite d'importantes quantités de DEEE broyés. Les pièces contenant des retardateurs de flamme halogénés sont démontées autant que possible afin d'éviter tout problème de santé.

Contraintes réglementaires	L'appartenance à la valorisation matière ou énergétique reste controversée.
Efficacité énergétique	
Prérequis sur les charges	La présence d'aluminium peut perturber le processus de fusion, du fait de la forte réactivité de ce métal, conduisant à des projections de scories. Les tests effectués par Stena pour alimenter des fonderies d'aluminium avec du RBA n'ont pas abouti.
Impact sur les produits	
Impact sur les effluents	Les niveaux d'émission d'effluents gazeux restent sensiblement les mêmes avec du RBE ou du RBA qu'avec du coke. La seule limite à l'usage de RB est l'apport calorifique (qui ne doit pas être trop élevé).
Impact sur les co-produits et résidus	Les déchets solides (« slags ») peuvent être utilisés comme matériaux de construction ou pour la construction de remblais et merlons ou bien pour la fabrication du béton (en remplacement du gravier).
Autres atouts/handicaps	On peut combiner dans un même bain de fusion plusieurs catégories de DEEE (câbles, circuits imprimés, produits gris,...) en association avec d'autres déchets (catalyseurs usés, résidus de l'industrie photographique etc ...).  Le procédé accepte les déchets sales ou pollués par des graisses, des traces de peinture, de colle ou d'additifs.  La présence de métaux lourds (plomb, zinc...) dans le RB ne pose pas de problème.  Le contenu calorifique des déchets utilisés permet de remplacer partiellement le fioul et le coke (économie de matières premières fossiles).  Le procédé se comporte comme un "puits à dioxines". Les déchets contenant du PVC ne posent pas de problème, les dioxines étant détruites dans le four sous l'effet des hautes températures. Des tests ont été réalisés par Umicore en 2004 en coopération avec EFRA. Ils ont traité 250 tonnes de plastiques contenant des retardateurs de flamme. Il a été prouvé qu'il n'y a pas d'émissions de dioxines (le taux de dioxines est inférieur à 0,005 ng/Nm <sup>3</sup> , en deçà de la limite de détection).
Conclusion	Il n'y a pas d'obstacles rédhibitoires à l'utilisation de RB dans des affineries de cuivre (à l'exception de la teneur du RB en aluminium). Toutefois, seuls les déchets à fort contenu en métaux rares et en métaux précieux, en particulier les cartes électroniques « riches » à forte teneur en

	<p>cuivre, argent, or et platinoïdes semblent vraiment intéresser les industriels<sup>87</sup>.</p> <p>L'apport de DEEE est mieux adapté à l'industrie pyrométallurgique que celui de RBA : souplesse d'utilisation, coûts de démantèlement réduits, forte synergie avec la valorisation des métaux précieux (circuits imprimés), économies de fioul et de coke, rôle de « puits à dioxines »)</p> <p>Le RBA n'est pas adapté à ce procédé.</p>
--	---

---

<sup>87</sup> Un téléphone mobile contient en moyenne 1 g d'or.

## Annexe 5 : Liste des entretiens réalisés

Pays	Entreprise / fonction
<b>UE</b>	European Commission, ESTAT E3
	Policy Department Economy and Science, DG Internal Policies
<b>France</b>	SVDU
	Séché Environnement
	Derichebourg, Directeur Environment et Developpement
	SITA
<b>Allemagne</b>	Aurubis (anciennement Norddeutsche Affinerie) - R&D recycling
	German secondary fuel association (Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung, BVSE)
<b>Autriche</b>	Directeur, ÖCAR Automobilrecycling GmbH
<b>Suisse</b>	Swiss Auto Recycling Foundation (Stiftung Auto Recycling Schweiz)
<b>Belgique</b>	Department of Chemical Engineering, University of Leuven
	Leuven Engineering College Groep T, Department of Chemical Engineering
	Comet Traitements
<b>Espagne</b>	SIGRAUTO (Asociacion espanola para el tratamiento medioambiental de los vehiculos fuera de uso)
<b>Pays-Bas</b>	Association des constructeurs et importateurs d'automobiles des Pays Bas
	ARN
	ARN Project Manager
<b>Grande-Bretagne</b>	Président de EGARA (European Group of Automotive Recycling Associations), ancien président de la MVDA (Motor Vehicle Dismantlers Association of Great Britain)
	Chairman MVDA
	BMRA - Trade Association for the UK shredders (British Metal Recycling Association)
	Consultant
<b>Suède</b>	Department for Business, Innovation and Skills (BIS), Environmental and Technical Regulation
	Conseillère Juridique et Environnementale au sein de Stena Metal, coresponsable de l'éco-organisme Refero
	Stena Metall AB

## Annexe 6 : Bibliographie

Référence	Source	Année
<b>VHU</b>		
An Economic Solution for Recycling Fluff from Shredder Light Fraction	Andreas Bartl, Vienna University of Technology	2010
Automobiles - Données 2010	ADEME	2012
Etude contraintes dépollution VHU	ADEME	
ARN : Monitoring and reporting on ELVs in the Netherlands	ARN	2007
Rapport national 2009	Febelauto	2011
Véhicules hors d'usage: aspects juridiques, pratiques nationales et recommandations pour une approche réussie dans le futur	CE (synthèse)	2010
Véhicules hors d'usage: aspects juridiques, pratiques nationales et recommandations pour une approche réussie dans le futur	CE (étude détaillée)	2010
ELV: An assessment of the current state of implementation by Member States	CE (étude détaillée)	2006
ELV-Legal aspects and national practices	CE (étude détaillée)	2010
Collecte, valorisation et élimination des véhicules hors d'usage	ADEME	2010
État des lieux de la valorisation des matériaux issus du traitement des VHU	BIO IS	2008
Etude de la gestion de la filière de collecte et de valorisation des VHU dans certains pays de l'UE	BIO IS	2010
Campagne de démontage et de broyage de VHU et étude des flux des matériaux issus du traitement.	ADEME	
Etude Transport Déchets	ADEME	2012
Observatoire de la Filière Véhicules Hors d'Usage Rapport annuel de la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives aux véhicules hors d'usage	ADEME	2011
Observatoire de la Filière Véhicules Hors d'Usage Annexe	ADEME	2011
« Results of the BMW-Scholz-Galoo_Plastics recycling trials »	8th IARC, International Automobile Recycling Congress, mars 2008, Munich, Allemagne.	
The Italian ELV situation by Fiat Group Automobiles	Fiat	2010
All Auto Shredding: Evaluation of Automotive Shredder Residue Generated by Shredding Only Vehicles,	Argonne National Laboratory	2011
Characterisation of automobile shredder residue	Department of Chemistry, "Sapienza", University of Rome	
Recycling of ASR Menad Nourredine Luleå University of Technology, Division of Process Metallurgy, Department of Chemical Engineering and Geosciences, SE-971 87 Luleå, Sweden	Journal of hazardous materials First International Conference on Engineering for Waste Treatment: Beneficial Use of Waste and By-Products (WasteEng2005)	
PRETREATMENT AND SUSTAINABLE LANDFILLING OF ASR (AUTOMOTIVE SHREDDER RESIDUE)	R. COSSU, T. LAI, R. BAUSANI	
Procédé de craquage catalytique des RBA	Comet Sambre	
EVALUATION TECHNIQUE ET ECONOMIQUE DU PROCEDE DE GAZEIFICATION DE DECHETS TWINREC de la Société EBARA	ADEME	
Energy Recovery from Automotive Shredder Residue through Co-combustion with Municipal Solid Waste	Frank mark (PlasticsEurope)	
An Evaluation of Shredder Waste Treatments in Denmark Alternative Methods to Landfilling Auto Shredding Residue in Compliance with the Strict Environmental Quota by the European Union	Denmark	2010
Benefits of the End of Life Vehicles Directive and the costs and benefits of a revision of the 2015 targets for recycling, re-use and recovery under the ELV Directive	GHK + Bio Intelligence Service pour la DG ENV	2006
End-of-life vehicles: influence of production costs on recycling rates	DG ENV Alert Service	May 2012
Environmental Data Centre on Waste: End-of-Life Vehicles	Eurostat	2012
Automotive shredder residue (ASR) and compact disc (CD) waste: options for recovery of materials and energy	Ecokem Helsinki	2003
Value from shredder waste	Resource conservation and recycling (GB)	2005
An evaluation of ASR treatment in Denmark	WPI / Reno-SAM	2010
Energy recovery from heavy ASR by co-incineration in a fluidized bed combustor		2012
A Study to Examine the Costs and Benefits of the ELV Directive – Final Report ANNEX 9 FULL BIBLIOGRAPHY AND STAKEHOLDERS	GHK + Bio Intelligence Service pour la DG ENV	
Guide d'aide à l'utilisateur de l'outil développé pour les broyeurs dans le cadre de la déclaration VHU annuelle à l'ADEME	ADEME	2011
Analyse de la performance des broyeurs français en 2010	ADEME	2010
Briefing note: Incinerating automotive shredder residues - Qualifying for recovery status using the R1 Energy Efficiency Formula	DEFRA	2011
Outil déclaration broyeur	ADEME	2011
Rapport annuel 2011	Autostiftung Suisse	2012
Power Point Autostiftung Suisse	Autostiftung Suisse	2013
End-of-Life Vehicle Recycling: State of the Art of Resource Recovery from Shredder Residue (NISSAN: ENERGY RECOVERY FROM AUTOMOBILE SHREDDER RESIDUE (ASR) AT THE OPPAMA PLANT)	Argonne National Laboratory	sept-10

<b>DEEE</b>		
Rapport_DEEE_2010_ADEME_Repères_210 pages	ADEME	2011
Analyse caracterisation DEEE_ ADEME2010 V2	ADEME	2011
Bilan matière_DEEE_ADEME	ADEME	
Campagne_caractérisation_DEEE_ADEME 2010	ADEME	2011
Note- analyse caractérisation_DEEE_ADEME_2010 v2	ADEME	2011
Inventaire 2010 des centres de traitement des DEEE	ADEME	2012
Annuaire 2010 des centres de traitement des DEEE	ADEME	2012
Rapport annuel sur la mise en œuvre de la réglementation sur les DEEE	ADEME	
LARGE SCALE DEMONSTRATION OF THE TREATMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC SHREDDER RESIDUE	PlasticsEurope	2006
The characteristics of plastics-rich waste streams FROM END-OF-LIFE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT	PlasticsEurope	2006
<b>Déchets du BTP</b>		
Bilan technico-économique de 39 plateformes de tri-valorisation de déchets du BTP en France	ADEME, Treize Développement	2010
EU Construction and Demolition Waste- Chapters 1 to 6	DG ENV	1999
EU Construction and Demolition Waste- Chapters 7 to 10	DG ENV	1999
EU Construction and Demolition Waste- Annex1	DG ENV	1999
EU Construction and Demolition Waste- Hazardous elements	DG ENV	1999
Analyse_gisement_déchets_construction_Bruxelles_2012.PDF		2012
Inventaire des installations classées	DREAL	
<b>Divers</b>		
État des lieux des centres de tri de déchets non dangereux des activités économiques en France - Données 2010	ADEME / FNADE	2013
Gas from shredder residue - Gazeification for a Swiss cement plant		
Inventaire situations réglementaires atypiques	RECORD	
Etude gazéification	ADEME / AJI-Europe	2012
Alternativ Fuels in Cement Manufacturing	CEMBUREAU	
EU étude CE RDF	DG ENV	2003
Advanced thermal treatment MSW	DEFRA	
BREF_Incineration déchets	CE	2006
Comparaison_FRA_ALL_des PCI des déchets	FNADE	2010
Les techniques actuelles de tri et de broyage	Galloo France	2008
Note du laboratoire de génie minéral et recyclage (Gemme) de l'ULg	Univ de Liège	2012
Note sur les procédés innovants de Comet Traitements		
Thèse M. Bareel - Groupe Comet - Agent réducteur pour fabriquer des éponges de fer	Univ de Liège	2009