

Etude expérimentale de l'incidence du niveau de démantèlement sur le taux de valorisation avant broyage des véhicules hors d'usage (VHU)

SCHMID Alexis¹, NAQUIN Pascale² et Gourdon Rémy³

1. Société ACYCLEA, Groupe PRAXY, 21850 Saint-Apollinaire, France.

2. INSAVALOR division POLDEN, 69603 Villeurbanne cedex, France.

3. Université de Lyon, INSA de Lyon, Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale, 69621 Villeurbanne cedex, France.

remygourdon@insa-lyon.fr

RÉSUMÉ

Afin de déterminer les principaux leviers qui permettraient d'améliorer dans des conditions acceptables les taux de valorisation des VHU, ACYCLEA (groupe PRAXY) a lancé en 2009 un programme de recherche intitulé OPTIVAL VHU en collaboration avec l'INSA de Lyon. Dans ce cadre, des campagnes expérimentales de déconstruction et de broyage visant à comparer différents scénarii de déconstruction ont été réalisées sur des lots de VHU, avec le soutien de l'ADEME et à travers un groupement de professionnels. Cet article présente les premiers résultats, qui concernent les bilans matière des opérations de dépollution / sécurisation et démantèlement / platinage. La phase de broyage et l'analyse d'autres critères d'évaluation feront l'objet de publications ultérieures.

Le recensement et l'analyse des données bibliographiques révèlent que la masse moyenne des VHU a augmenté significativement dans la période de temps étudiée, passant de 910 kg en 1985 à près de 970 kg en 1997. Dans le même temps, la proportion de métaux ferreux a baissé, partiellement compensée par une augmentation des matériaux polymères, alors que les proportions en métaux non ferreux apparaissent stables au regard de la variabilité des données disponibles entachées de fortes incertitudes.

Les campagnes expérimentales ont chacune traité des échantillons d'au moins 90 VHU, dont la masse et l'âge moyens ont été évalués à 989 kg /VHU et 14 ans respectivement. La masse des matériaux retirés lors des opérations de dépollution / sécurisation est de 3,6 +/- 0,1 % de la masse des véhicules. La contribution de ces opérations au taux de recyclage des métaux ne concerne que le plomb des batteries et représente seulement environ 1% de la masse des VHU.

La contribution des opérations de démantèlement / platinage au calcul des taux de valorisation est plus élevée que celle des opérations précédentes. Les campagnes d'essais montrent que le taux de valorisation augmente logiquement avec le niveau de démantèlement réalisé, passant de 5% de la masse moyenne des VHU pour le scénario minimal à près de 10% pour le scénario le plus poussé. La contribution au taux de recyclage des métaux est assez faible cependant (de l'ordre de 2,6 à 2,8% de la masse moyenne des véhicules). Elle est peu affectée par le niveau de démantèlement.

Mots clés : Véhicule Hors d'Usage (VHU), démantèlement, valorisation, recyclage, bilan matière

SUMMARY

To identify key factors for improving the recovery rates of ELVs, ACYCLEA (PRAXY group) launched in 2009 the "OPTIVAL VHU" research program in collaboration with INSA Lyon. Experimental campaigns were conducted to compare different scenarios of deconstruction, with the support of ADEME. This article presents the first results obtained, which concern the material balances on the stages of depollution (cleanup) and dismantling. Results on the shredding stage and the analysis of other evaluation criteria will be published later.

The identification and analysis of bibliographic data revealed that the average weight of ELVs increased significantly in the time period studied, from 910 kg in 1985 to nearly 970 kg in 1997. At the same time, the proportion of ferrous metals declined, partially offset by an increase in polymeric materials, while the proportions of non-ferrous metals appear stable with respect to the variability of the literature data and their uncertainties. The campaigns were done on samples of 90 ELVs. The average mass and age were evaluated at 989 kg / ELV and 14 years respectively. The mass of materials removed during cleanup operations was 3.6 +/- 0.1% of the mass of vehicles. The incidence of these operations on the rate of metal recycling is related to lead batteries and was about 1% of the weight of ELVs. The contribution of the operations of deconstruction to the recovery rate is higher than that of previous operations. The experimental campaigns showed that the recovery rate increased logically with the level of deconstruction, from 5% of the average weight of ELVs for the minimal scenario up to almost 10% for the scenario with the highest level of deconstruction. The contribution of deconstruction to the rate of metals recycling was found to be quite low however, in the range of 2.6 to 2.8% of the average mass of vehicles. This rate was poorly affected by the level of deconstruction of the different scenarios tested in the study.

Key words: End of life vehicles (ELVs), deconstruction, recycling, mass balance

INTRODUCTION

Les démolisseurs et broyeurs de véhicules hors d'usage (VHU) ont dans leurs cahiers des charges (ARR, 2005) les obligations prioritaires de dépollution et de démontage suivantes :

- Dépollution :
 - les batteries et les réservoirs de gaz liquéfiés sont retirés ;
 - les composants susceptibles d'exploser sont retirés ou neutralisés ;
 - les huiles de carters, les huiles de transmission, les huiles de boîtes de vitesse, les huiles hydrauliques, les liquides de refroidissement, antigel et de freins, les fluides de circuits d'air conditionné ainsi que tout autre fluide présent en quantité significative sont retirés à moins qu'ils ne soient nécessaires pour le réemploi des parties de véhicule concernées ;
 - les composants recensés comme contenant du mercure sont retirés dans la mesure du possible ;
 - les éléments mentionnés comme devant être démontés dans l'arrêté pris en application du I de l'article R. 318-10 du code de la route et qui ont été rendus identifiables à cette fin sont retirés.
- Démontage¹ :
 - pots catalytiques ;
 - composants métalliques contenant du cuivre, de l'aluminium, du magnésium ;
 - pneumatiques et composants volumineux en matière plastique (pare-chocs, tableau de bord, récipients de fluides, etc.) ;
 - verre.

En outre, la directive européenne 2000/53/CE (DIR, 2000) relative aux VHU instaure des enjeux majeurs d'un point de vue environnemental. Elle fixe entre autres des objectifs chiffrés à atteindre au plus tard le 1^{er} janvier 2015 :

- un taux minimum de réutilisation et de recyclage de 85 % en masse du VHU ;
- un taux minimum de réutilisation et de valorisation de 95 % en masse du VHU.

En France, le Décret n° 2011-153 (DEC, 2011) modifie le Code de l'Environnement (COD, 2011) pour la gestion des VHU, qui transpose la Directive 2000/53/CE. Les nouveaux articles renforcent les obligations de validation et de traçabilité sur le mesurage de la valorisation des acteurs. On trouve ainsi parmi les nouveaux articles :

- Art. R. 543-165. - Le cahier des charges mentionné à l'article R. 543-162 impose aux broyeurs, notamment : « *Alinéa 10 : 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...* »

- Art. R. 543-164. - Le cahier des charges mentionné à l'article R. 543-162 impose aux centres VHU agréés : « *Alinéa 6 : De tenir à la disposition des opérateurs économiques avec lesquels ils collaborent leurs performances en matière de réutilisation et recyclage et de réutilisation et valorisation des véhicules hors d'usage...* »

Il apparaît clairement le besoin de définir des modalités standards de calcul, aussi bien pour assurer l'harmonisation européenne des données que la reproductibilité des valeurs. Dans cette optique, il convient également de préciser le plus exhaustivement possible les typologies de valorisations et d'éliminations des déchets issus des VHU, conformément aux définitions de la Directive 2008/98/CE (DIR, 2008).

Afin de déterminer les principaux leviers qui permettraient d'améliorer dans des conditions acceptables les taux de valorisation des VHU, ACYCLEA (groupe PRAXY) a lancé en 2009 un programme de recherche intitulé OPTIVAL VHU en collaboration avec l'INSA de Lyon. Dans ce cadre, des campagnes expérimentales de déconstruction et de broyage visant à comparer différents scénarii de déconstruction ont été réalisées sur des lots de VHU, avec le soutien de l'ADEME à travers un groupement de professionnels. Cet article présente les premiers résultats issus de ces campagnes, en se limitant ici aux opérations de dépollution et de déconstruction.

Le modèle utilisé par Reuter (Reuter et al. 2006), qui prend en considération les limites de techniques séparatives et de valorisation des matériaux, révèle que le taux cible de 95% de valorisation est très difficile, voire impossible à réaliser pour les voitures actuelles, mais surtout à venir. Il suggère cependant qu'une solution avec un minimum de démontage et la mise en place d'une technologie post-broyage adaptée, doit permettre d'atteindre le taux de valorisation de 85%.

CONTEXTE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1 - Données bibliographiques sur les VHU en France

En 2009, on comptabilisait en France environ 1500 démolisseurs (ADEME, 2009) conformément aux dispositions de l'arrêté du 15 mars 2005 (ARR1, 2005) et une cinquantaine de broyeurs. Ces centres ont pris en charge plus de 1 500 000 VHU, dont près de 60 % proviennent des concessionnaires et des particuliers, ce qui correspond à un taux de récupération de 77% pour la filière agréée.

Peu de données relatives à la composition moyenne des voitures ou des VHU sont disponibles dans la littérature. Les principales sources ciblent les années comprises entre 1980 et 1995 et concernent soit les voitures neuves, soit des VHU, voire parfois des modélisations.

Afin de déterminer l'évolution de la composition moyenne des VHU, une compilation des sources bibliographiques disponibles est fournie dans le tableau 1.

Tableau 1 Sources et natures des informations bibliographiques utilisées

Références et abréviations utilisées dans le présent article		Type de source prise en compte	Type de véhicules	Année*	Moyenne d'âge (an)
(Nathani, 1998)	NAT	Compilation de données bibliographiques	Neuf	1985, 90, 95	(NC)
(Schmidt & Leitner, 1995)	S&L	Compilation de données bibliographiques	Neuf	1985, 95	(NC)
(Christen, 1997);	CHR	Compilation de données bibliographiques	Neuf	1990, 95	(NC)
(Reinhardt & Richers, 2004)	R&R	Estimation	Neuf	1999	(NC)
(EIPC, 2008)	EIPC	Compilation de données bibliographiques	Neuf	2005	(NC)
(ARN, 2007)	ARN	Déclaration annuelle	Hors d'usage	2007	15
(FEBELAUTO, 2009)	FEB2	Déclaration annuelle	Hors d'usage	2009	13 (estim.)
(SEES, 2006)	SEES	Campagne d'essai	Hors d'usage	2006	13 (estim.)
(ADEME, 2006)	ADE	Campagne d'essai	Hors d'usage	2006	16
(DTI UK, 2005)	DTI	Campagne d'essai	Hors d'usage	2005	15
(OPTIVAL, 2011)	OPT	Campagne d'essai	Hors d'usage	2010	14
(ACORD, 2001)	ACO	Compilation de données bibliographiques	Hors d'usage	2000	12-13
(VITO, 1999)	VITO	Compilation de données bibliographiques	Hors d'usage	1999	13 (estim.)
(FEBELAUTO, 2008)	FEB1	Compilation de données bibliographiques	Hors d'usage	2000	13 (estim.)
(INDRA, 2010)	IND	Compilation de données bibliographiques	Hors d'usage	2010	13 (estim.)

*Année de fabrication pour les véhicules neufs et de l'année de l'étude pour les VHU

Selon les études, les données exploitées par les auteurs proviennent :

- des déclarations annuelles des acteurs de la filière, auprès de l'organisme en charge de sa surveillance : l'ARN pour la Hollande et FEBELAUTO pour la Belgique ;
- d'informations bibliographiques disponibles sur les VHU et les véhicules neufs ;
- de campagnes expérimentales de caractérisation.

L'analyse bibliographique révèle que la moyenne d'âge des VHU est variable au sein des pays européens. Elle peut aller de 11 ans pour la Hongrie, jusqu'à 15 ans pour la Hollande, avec une moyenne de 12 ans pour l'Angleterre (GHK, 2006).

En considérant les données disponibles sur les moyennes d'âge des VHU (voir Tableau 1), on peut estimer à l'échelle européenne une moyenne d'âge de 13 ans pour les VHU. Les résultats de nos campagnes expérimentales seront ainsi comparés aux valeurs disponibles dans la bibliographie pour des véhicules du même âge (Tableau 2).

Soulignons que les tableaux 1 et 2 ne présentent que les données bibliographiques que nous avons jugées exploitables pour notre étude. D'autres études ne concernent que les métaux ferreux (Michaeli, 1998 ; Wallau, 2001) et n'ont donc pas été reprises ici. Néanmoins leurs données corroborent les valeurs du tableau 2 pour l'année 1995. Les données R&R de 1999 (Reinhardt & Richers, 2004), qui correspondent à des projections, ont été écartées, de même que les données EIPC 2005 (EIPC, 2008) qui sont issues de la base Ecoinvent et établissent une masse de VHU de 1394 kg, bien en dehors des valeurs disponibles (Tableau 3).

Le Tableau 2 révèle une disparité importante des données pour une même année selon les sources considérées. Si certaines particularités géographiques peuvent expliquer en partie les disparités constatées, les différences dans les modalités de caractérisation des véhicules et de quantification des matériaux utilisés dans chaque étude en sont probablement la cause principale. On peut penser par exemple à des écarts entre le recueil des données de constructeurs sur les quantités de matériaux utilisés pour la fabrication de leurs véhicules et un bilan matière expérimental réalisé sur la base d'un échantillonnage.

Tableau 2 Compositions moyennes des VHU issus de véhicules mis en service entre 1985 et 1997

SOURCE*	NAT	S&L	VIT	ACO	FEB1	NAT	CHR	NAT	S&L	CHR	IND	R&R	EIPC
Années	1985		1986	1987		1990		1995			1997	1999	2005
Métaux ferreux (%)	73	68	67	68,3	68	67,5	68	62,4	63,5	63	61	57,5	62,1
Moyenne %	70,5		67	68,2		67,7		63			61	57,5	
Incertitude %	3,5			0,2		0,4		0,9					
Métaux non ferreux (%)	4,3	7,5	9	8,5	9	6,1	5,5	8,0	10	7	7 ²	10	5,8
Moyenne %	5,9		9	8,8		5,8		8,3			7		
Incertitude %	27			2,9		5,1		20,4					
Polymères (%)	3,6	10	10,4	10,2	10,3	4,9	10,5	6,2	12,5	12	12	7,5	12,2
Moyenne %	6,8		10,4	10,3		7,7		10,2			12	7,5	12,2
Incertitude %	47			0,5		36,4		39,2					
Verres (%)	3,1		3	2,9	3	3,8		4,5			3	5,2	2,9
Elastomères (%)	3,8		5	5,1	5	3,8		3,9			6 ³	3,9	
Textiles/mélange (%)	4					5,1		6,2				7,3	
Polyuréthane (%)			2	2 ⁴	1,7						2		
Liquides (%)	2,9					2,8		2,7				2,6	
Autres (%)	5,4		3,6	3		6,0		6,1			6	6	14,5 ₅

■ élément pris en compte dans la ligne « Autres »

*voir correspondance des abréviations au Tableau 1

Tableau 3 Masses moyennes des VHU issus de véhicules mis en service entre 1985 et 2005

SOURCES*	NAT	NAT	DTI	SEES	ARN	ADE	NAT	OPT	FEB2	R&R	EIPC ²
ANNEE	1985	1990		1993	1994	1995		1996		1999	2005
MASSE (kg)	910	933	983	950	936	928	955	989	939	1000	1394
MOYENNE (kg)	910	958		950	936	942		964		1000	1394
INCERTITUDE (%)	0	2,5		0	0	1,4		2,6		0	0

voir correspondance des abréviations au Tableau 1

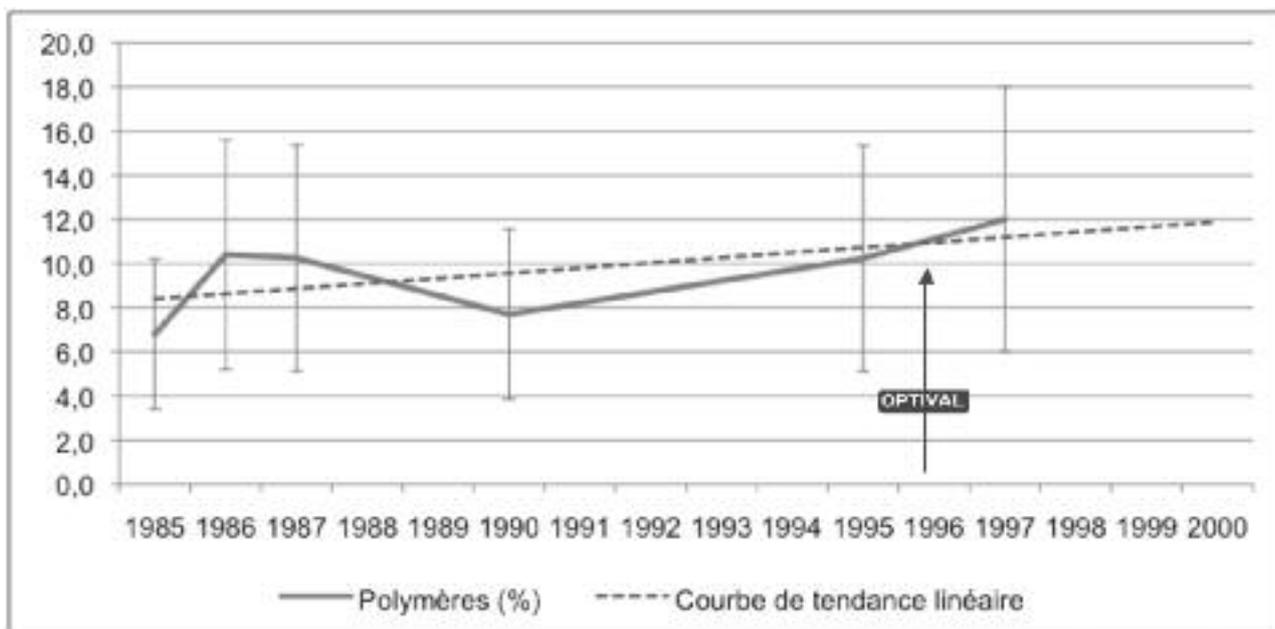
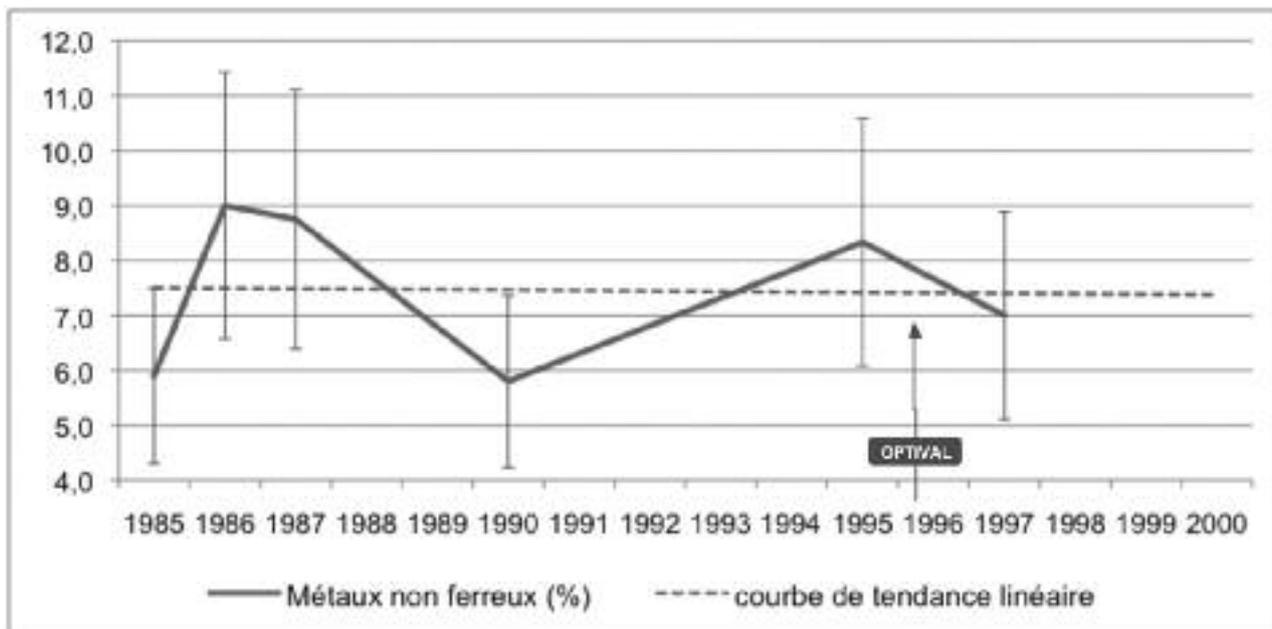
La disparité des données induit des incertitudes importantes sur les valeurs à utiliser. Dans l'exploitation des résultats de notre étude, nous adopterons une approche majoritaire en retenant l'incertitude maximale sur la teneur en chaque élément, incertitude que nous considérerons constante par souci de simplification.

II.2- Exploitation des données bibliographiques pour dégager les tendances d'évolution

A partir des données bibliographiques recensées dans les Tableaux 2 et 3, nous avons étudié les évolutions de la masse et de la composition des véhicules mis en service dans la plage de temps considérée. Les résultats sont illustrés par les courbes des Figures 1 et 2 pour les principaux matériaux que sont les métaux et les plastiques.

La Figure 1 révèle que la courbe d'évolution des proportions de métaux non ferreux ne permet pas de dégager une tendance ni à la hausse ni à la baisse compte tenu des incertitudes élevées sur les données correspondantes. En revanche, la courbe d'évolution de la proportion en matériaux polymères révèle une croissance faible mais significative. La Figure 2 indique quant à elle une tendance à la hausse significative de la masse moyenne des VHU. Sur la même période, on constate en revanche que la teneur en métaux ferreux diminue sensiblement, passant de 70% en 1985 à 61% en 1997 avec une projection à environ 59% pour l'année 2000. En comparant avec la Fig. 1, on constate que les métaux ferreux ont été partiellement substitués dans les véhicules par des matériaux polymères, mais cette substitution ne permet pas d'expliquer la hausse constatée de la masse moyenne des VHU.

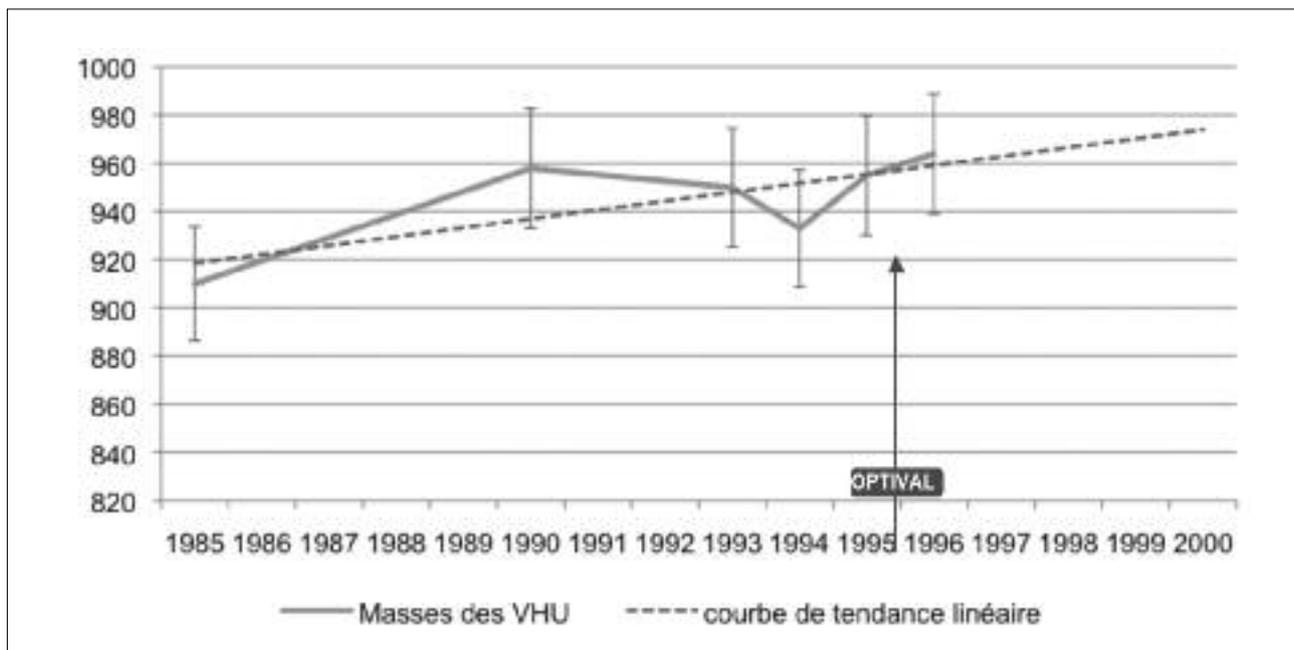
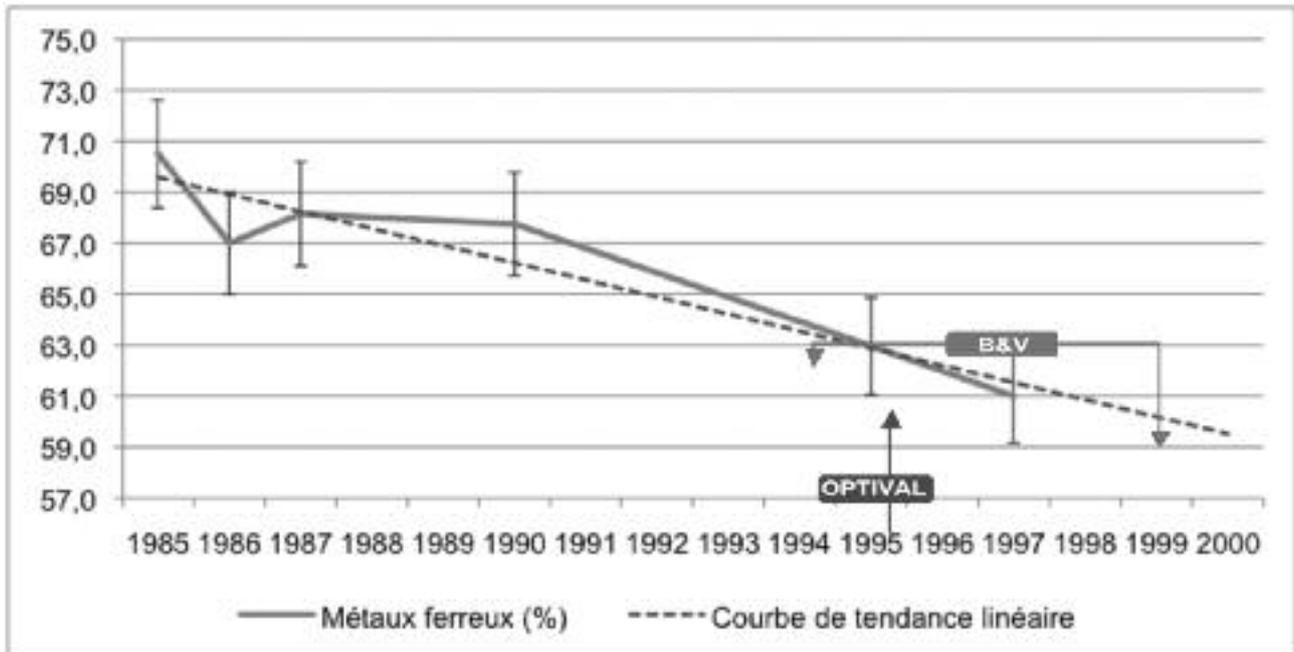
Figure 1 Evolution de la composition en métaux non ferreux (en haut) et en matériaux polymères (en bas) dans les VHU issus de véhicules mis en service en Europe entre 1985 et 1997 (Optival désigne le programme dans lequel s'inscrit notre étude)



Les courbes de tendance que nous proposons, issues de l'exploitation des données bibliographiques jugées pertinentes, ont été comparées à d'autres modèles d'évolution proposés par d'autres auteurs. Nous avons dans ce but retenu les travaux récents de Beckenbach et Voß (2010) comme base de comparaison. Si on reporte à la Figure 2 les valeurs de teneurs en métaux ferreux prévues par ces

auteurs (B&V) pour les années 1995 (61%) et 2000 (60%), on constate aux incertitudes près qu'elles coïncident avec la courbe de tendance que nous proposons (Figure 2). La valeur que Beckenbach et Voß calculent pour 2005 (58%) est également proche de la valeur de 57% correspondant à la projection issue de la droite linéaire de tendance que nous proposons.

Figure 2 Evolution de la masse moyenne (à droite) et des teneurs massiques en métaux ferreux (à gauche) des VHU issus de véhicules mis en service en Europe entre 1985 et 1997 (Optival désigne le programme dans lequel s'inscrit notre étude)



II.3- Etat de développement de la filière VHU en France

La gestion communément répandue pour les VHU, consiste en une reprise par un démolisseur, qui essaiera de rentabiliser son produit en maximisant le réemploi, puis l'élimination physique des carcasses ainsi obtenues, par un broyeur

qui assurera en partie leur recyclage. Ce schéma simple possède de nombreuses variantes comme l'illustre la Figure 3.

- soit au contraire de la réduire au minimum en se contentant des opérations de dépollution, en développant les technologies de tri post-broyage.

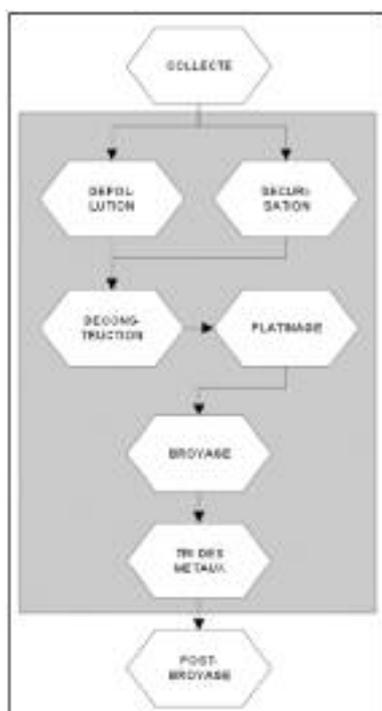
Les démolisseurs se situent entre ces deux positions, bien que globalement, hormis pour les pneumatiques, le retrait de matériaux identifiés en vue de leur recyclage, soit très peu développé.

Par rapport à la situation actuelle, l'adoption de modifications radicales dans l'une ou l'autre des étapes de la filière apparaît difficilement envisageable. Il semble préférable d'évaluer les incidences possibles des modifications envisagées et de comparer les différents scénarii, par exemple à l'aide d'une analyse multicritères (Mergias et al, 2007) ou d'une analyse du cycle de vie (Schmidt et al, 2004). Dans cette démarche, les critères de valorisation ne peuvent pas être considérés de manière exclusive, au détriment par exemple des critères de coûts et d'impacts environnementaux associés. De plus, le déploiement de procédés de tri post-broyage n'est possible que si les technologies correspondantes existent.

MATERIELS ET METHODES

La filière de traitement des VHU peut être décomposée en différentes opérations, s'échelonnant de la collecte jusqu'à la valorisation ou l'élimination de chaque fraction identifiable. Nous n'abordons ici que les opérations actuellement mises en œuvre sur le site industriel d'ACYCLEA où ont été réalisées les campagnes expérimentales (voir Figure 5).

Figure 5 Périmètre de notre étude dans l'ensemble des opérations de la filière VHU



Les travaux présentés ici portent sur les bilans matière des opérations mises en œuvre. L'analyse des aspects environnementaux, sanitaires et économiques, est abordée dans le programme de recherche mais fera l'objet d'autres publications. Trois campagnes d'essais ont été réalisées sur le site industriel d'ACYCLEA (Saint Apollinaire, Bourgogne, France). Elles ont pour objectif de quantifier les taux de valorisation obtenus pour 3 scénarii de démantèlement de plus en plus poussés :

- le scénario 1 correspond à une situation intermédiaire entre le « modèle démolisseurs » et le « modèle récupérateurs & broyeurs » (voir Figure 4) : dépollution et sécurisation complète et retrait des pneumatiques, des batteries et des pots catalytiques ;
- le scénario 2 correspond à une situation intermédiaire entre le « modèle démolisseur » et le « modèle centre de déconstruction » : dépollution et sécurisation complète et retrait des pneumatiques, des batteries et des pots catalytiques, du verre et de plastiques ;
- le scénario 3 correspond à un niveau de démantèlement allant au-delà du « modèle centre de déconstruction » : dépollution et sécurisation complète et retrait des pneumatiques, des batteries et des pots catalytiques, du verre, de plastiques, des mousses de sièges, de textiles et d'une partie des faisceaux électriques.

III.1- Constitution des échantillons de VHU pour chaque campagne

La réglementation européenne sur les VHU fixe les modalités de calcul des taux de valorisation, de réemploi et de recyclage (ARR2, 2005). Les cibles sont des pourcentages, correspondant au rapport massique des fractions traitées, par rapport à la masse initiale du véhicule définie sur son certificat d'immatriculation, à laquelle on retire forfaitairement 40 kg, correspondant à une masse de carburant (ARR2, 2005).

Les VHU traités lors des campagnes d'essais ayant entre 10 et 20 ans, nous nous sommes intéressés à la constitution du parc automobile français entre 1990 et 2000 (CCFA, 2011). Le marché automobile est souvent analysé sous forme de segments ou catégories de voitures, qui indiquent le positionnement de chaque modèle sur le marché. Ces derniers sont en général catégorisés en fonction de la taille ou de l'usage du véhicule. En prenant les moyennes de ces périodes, corrigées au prorata de la gamme divers et ramenées à 100%, on obtient les valeurs indiquées dans le Tableau 4.

Tableau 4 Données bibliographiques sur la répartition par gamme du parc automobile français entre 1990 et 2000
 Gammes CCFA composition du parc automobile entre 1990 et 2000

Gammes CCFA	composition du parc automobile entre 1990 et 2000 (en % de voitures)	facteur correctif (en %)	composition de l'échantillon cible (en % de VHU)
Petites voitures	42,6	1,3	43,9
Moyenne inférieure	24,1	0,7	24,8
Moyenne supérieure	22,7	0,7	23,4
Haut de gamme	7,6	0,2	7,8

Pour chacune des campagnes, un échantillon de 90 VHU, pesés sur une balance de 3t avec une précision de ± 1 kg, a été constitué. Pour la présente étude, nous ne nous intéresserons qu'à la campagne 3, puisque c'est elle qui reprend le mode opératoire du scénario n°3, qui correspond au démantèlement le plus complet.

Les VHU traités lors de la campagne 3 ont été collectés auprès des détenteurs sur l'année 2010. Lors de cette collecte, divers incidents ne nous ont pas permis de respecter rigoureusement la répartition souhaitée par gamme (Tableau 5).

Tableau 5 : Répartition par gamme de l'échantillon constitué.

Echantillon OPTIVAL	Nombre de VHU collectés pour notre échantillon	composition de l'échantillon réalisé (en % de VHU)	composition de l'échantillon cible (en % de VHU)
Petites voitures	45	50	43,9
Moyenne inférieure	23	25,5	24,8
Moyenne supérieure	19	21,1	23,4
Haut de gamme	3	3,3	7,8

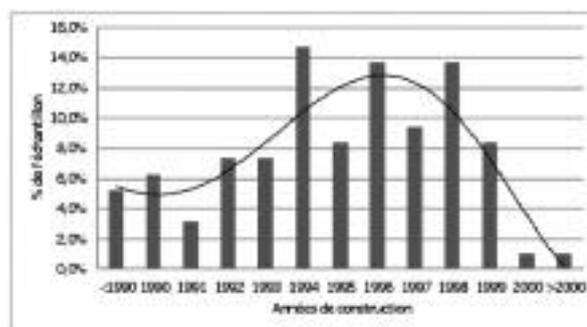
La masse moyenne des VHU des échantillons constitués pour les campagnes expérimentales était $M_{VHU} = 989 \pm 1$ kg. Contrairement aux recommandations réglementaires (l'Art. 3 de l'arrêté du 19 janvier 2005), celle-ci intègre la masse de carburant afin de permettre de comparer nos résultats avec ceux d'autres études.

Pour déterminer l'âge moyen des véhicules de notre échantillon expérimental, les dates de l'ère mise en circulation indiquées sur les certificats d'immatriculation ont été

reportées sur un graphique. La répartition de notre échantillon par tranche d'âge ainsi obtenue est représentée à la Figure 6. On constate qu'elle correspond bien à la période 1990 -2000.

La courbe de tendance polynomiale nous permet de définir un maximum qui correspond à l'année 1996.

Figure 6 Répartition (en pourcentage) des VHU de l'échantillon par année de production



Nous considérerons donc, pour nos campagnes expérimentales, que la moyenne d'âge des VHU est de 14 ans (soit d'un an supérieur à celle issue de l'analyse bibliographique).

Afin de s'assurer que l'échantillon expérimental est représentatif de la réalité, nous avons estimé, à partir des masses données sur les certificats d'immatriculation (MCI), ce que serait la masse moyenne MVHU dans un échantillon théorique correspondant exactement à la répartition cible (Tableau 5). Le même calcul a été fait en utilisant les masses mesurées expérimentalement (MME). Les résultats obtenus sont comparés au Tableau 6. On constate que :

- les masses expérimentales concordent avec les masses données par les certificats d'immatriculation,
- les masses moyennes MVHU tirées des deux hypothèses de calcul correspondent à 2% près à la masse moyenne de notre échantillon expérimental (989 +/- 1 kg).

Tableau 6 Masses moyennes MVHU de l'échantillon cible calculées à partir des masses des certificats d'immatriculation (MCI) ou des masses expérimentales (MME) des catégories de véhicules

Catégorie de véhicules	MCI moyenne (kg)	MME moyenne (kg)
Petites voitures	831,8	823,7
Moyenne inférieure	981,7	976,4
Moyenne supérieure	1246,8	1259,9
Haut de gamme	1438,8	1420
MVHU échantillon cible	1012,6	1009,3

III.2- Protocole opératoire des campagnes d'essais

Les campagnes expérimentales ont été conduites sur le site industriel ACYCLEA, filiale de PRAXY, sis à Saint Apollinaire en Bourgogne. Elles se sont déroulées sur 3 périodes, qui correspondent chacune à un scénario :

- octobre 2009 (2 semaines) : scénario 1 sur 90 VHU,
- mai 2010 (2 semaines) : scénario 2 sur 90 VHU,
- février 2011 (4 semaines) : scénario 3 sur 90 VHU et compléments apportés aux scénarii 1 et 2 sur deux échantillons de 30 VHU, en vue de la représentativité des échantillons et dans le but de réaliser des mesures qui n'avaient pas pu être réalisées sur le broyeur (COV, PCDDs, résultats non présentés ici).

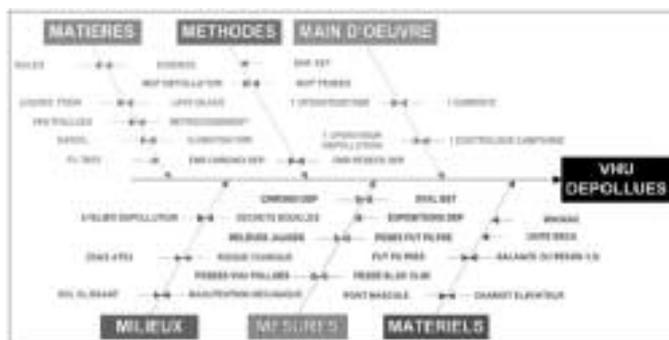
Le site a la particularité de disposer à la fois d'une activité de broyage et de démolition. Cette dernière permet la prise en charge annuelle de 1500 VHU et comprend :

- un atelier de dépollution,
- un atelier de démontage,
- un comptoir de vente de pièces détachées,
- un magasin de stockage de pièces détachées.

Pour permettre la réalisation de chaque campagne, le site a été dédié exclusivement au traitement de l'échantillon de VHU préalablement constitué.

La complexité de réalisation d'un essai en taille réelle et les coûts engagés nécessitent la mise en place d'un protocole opératoire précis. Pour sa rédaction, nous nous sommes appuyés sur le diagramme d'Ishikawa, dit « diagramme en arêtes de poisson » (Figure 7), qui recense les causes, réparties dans six catégories appelées 6M, aboutissant à un effet.

Figure 7 Exemple d'un diagramme d'Ishikawa pour l'évaluation des opérations de dépollution



L'analyse de ce diagramme permet d'être le plus exhaustif possible sur les besoins nécessaires à la réalisation des campagnes d'essais et de déceler les points critiques susceptibles d'en compromettre le bon déroulement. Pour maîtriser les mesures, des enregistrements (Figure 8) ont été créés. En plus des relevés de mesures (masses, temps, volumes), ils indiquent les incertitudes liées aux moyens utilisés ainsi que les éventuelles difficultés rencontrées. L'ensemble de ces documents est analysé et compilé dans un tableau de synthèse, duquel sont extraits les résultats discutés ici.

Protocole des opérations de dépollution / sécurisation
Après leur pesée, les VHU sont dépollués à l'aide d'une unité moderne de marque SEDA (Figure 9). La collecte des fluides se fait à l'aide de pompes à membranes reliées à des citernes de stockage, ainsi que d'un compresseur assurant la mise en pression de l'ensemble de la canalisation et directement raccordé au vase correspondant par un bouchon conique lorsque cela est techniquement possible (Figure 10). C'est le cas pour les huiles moteurs et boîtes, le liquide de refroidissement et le liquide de frein. Le liquide lave-glace et les carburants sont, quant à eux, directement aspirés.

Figure 8 Enregistrements liés à la dépollution

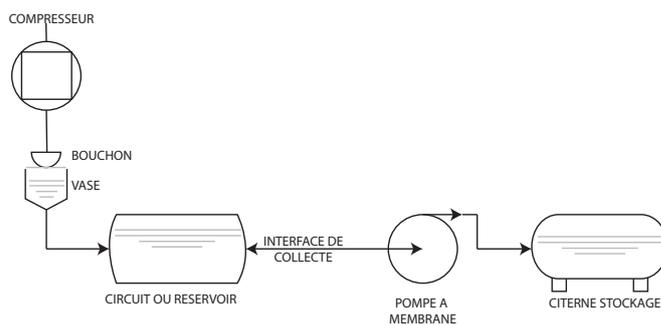
ENR PESEEE VHU							MOYEN DE MESURE : BASCULE 3 T ; $\delta = + 1 \text{ kg}$	
N° VHU	IDENTIFIANT	MODELE / TYPE	MARQUE	MARQUE	ELEMENTS MANQUANTS	COMMENTAIRES	GO	ISS
1								
30								
ENR PESEEE VHU : masses initiales des VHU								
ENR CHRONO DEP							MOYEN DE MESURE : CHRONOMETRE (MIN)	
N° VHU	HE DEP	TIS DEP	TIS DEP	TIS SEC	TIS DEP	COMMENTAIRES		
1								
30								
ENR CHRONO : temps de l'ensemble des opérations réalisées dans l'atelier de dépollution								
ENR PESEEE DEP							MOYEN DE MESURE VOLUMES : INDICATEURS JAUGES ; $\delta = + 4\%$	
ENR PESEEE SEC 1							MOYEN DE MESURE : BASCULE 3 T ; $\delta = + 1 \text{ kg}$	
ENR PESEEE DEM 1								
PRODUIT	TYPE DE RELEVÉ	RELEVÉ 1	RELEVÉ 2	VALEUR	COMMENTAIRES			
ESSENCE	JAUGE (l)							
GASOIL	JAUGE (l)							
LAVE-GLACE	JAUGE (l)							
REFROIDISSEMENT	JAUGE (l)							
LIQUIDE FREIN	JAUGE (l)							
HUILE	JAUGE (l)							
BOMBONNE CLIM	MASSE BOMBONNE CLIM (kg)							
FILTRES	MASSE FUT FILTRES (kg)							
CATALYSEURS	MASSE PALBOX 600 CATA (kg)							
BATTERIES	MASSE PALBOX 600 BATTERIES (kg)							
ENR PESEEE : pesées de l'ensemble des produits issus de l'atelier de dépollution								

Figure 9 Opération de pesée et de dépollution



L'interface de collecte, qui assure le passage de la canalisation ou du réservoir, peut-être une simple canule souple (liquide lave-glace et liquide de frein), un vase pour les écoulements gravitaires (huiles moteurs) ou encore un système de perforation mécanique (liquide de refroidissement) ou électrique (carburants).

Figure 10 Principe général de fonctionnement de la récupération des fluides



Lors de cette étape, les batteries et les filtres à huiles⁶ sont retirés et la présence éventuelle d'un réservoir GPL ou d'airbags est identifiée en vue de leur neutralisation (Figure 11).

Enfin, pour les véhicules équipés de climatisation, un dispositif permet le retrait des fluides frigorigènes et leur stockage en bonbonne.

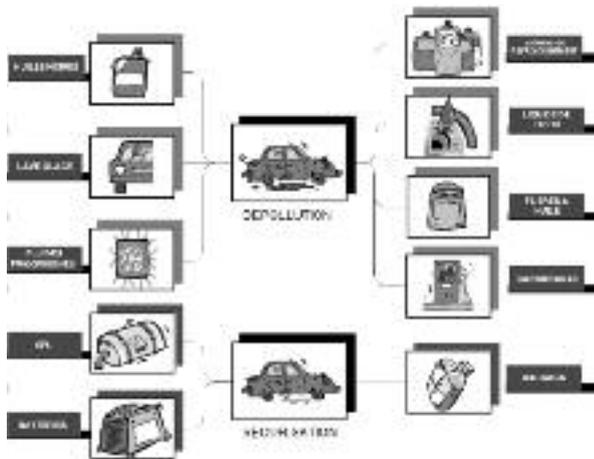
Pour des raisons pratiques, le retrait des pots catalytiques nécessitant l'utilisation d'une cisaille hydraulique est réalisé dans l'atelier de dépollution.

Figure 11 Eléments retirés dans l'atelier de dépollution



L'ensemble des éléments pris en charge lors des opérations de dépollution et de sécurisation est représenté sur la Figure 12. Les huiles noires correspondent à la somme des huiles moteurs, de boîtes de vitesses, des huiles d'amortisseurs et des huiles de direction. Elles sont collectées en mélange et, leur exutoire étant identique, leur distinction dans le cadre de notre étude ne présente pas d'intérêt.

Figure 12 Eléments retirés lors de la dépollution et de la sécurisation des VHU



Protocole des opérations de déconstruction-platinage

À l'issue de la dépollution et de la sécurisation, les VHU sont repris dans l'atelier de démontage afin d'y être déconstruits. Les opérations réalisées sont principalement manuelles, aidées d'outillages pneumatiques et électriques. Les véhicules sont déposés sur des ponts fixes ou mobiles, puis pris en charge par les opérateurs. Un mécanicien spécialisé a la charge du démontage et de la vérification des pièces destinées au réemploi. Les autres constituants sont retirés par du personnel non qualifié. Cela concerne (Figure 13) :

- les pneumatiques pour le réemploi,
- les PUNR⁷ déjantés manuellement,
- les jantes,
- les pare-brises en verre feuilleté, les vitres latérales, ainsi que les lunettes arrières, généralement en verre trempé qui sont collectés séparément,
- les textiles et les mousses en PU qui sont découpés puis arrachés,
- les plastiques identifiés en PE et PP, comme les baguettes de portes, les passages de roues, ou les pare-chocs,

Figure 13 Eléments retirés dans l'atelier de déconstruction



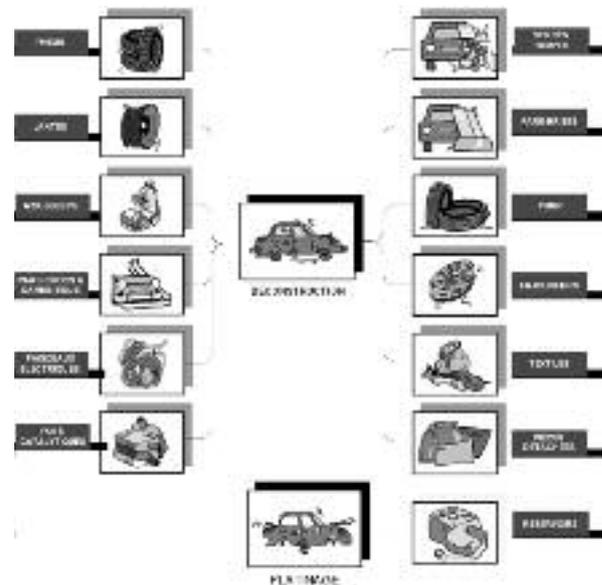
Le schéma de la Figure 14 détaille l'ensemble des éléments retirés lors de la déconstruction et du platinage des VHU pour la campagne n°3.

Le platinage est l'opération réalisée avec une pelle à grappin, qui consiste à préparer la ferraille en vue de son broyage. Pour les VHU, cela revient principalement à :

- vérifier visuellement l'absence d'éléments dangereux explosibles ou imbroyables,
- aplatir les carcasses pour faciliter leur entrée dans le caisson de broyage.

On peut donc profiter de cette opération pour retirer les réservoirs de carburant qui sont en PEHD et qui présentent un risque d'atmosphère explosible par le mélange air/vapeur d'essence qu'ils sont susceptibles de contenir en milieu confiné. Le pelleteur retourne la carcasse, arrache le réservoir à l'aide du grappin, pour le déposer dans une benne à disposition.

Figure 14 Eléments retirés lors de la déconstruction et du platinage des VHU



RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1- Opérations de dépollution – sécurisation

IV.1.1- Résultats

Les résultats quantitatifs concernant les produits retirés lors des opérations de dépollution et de sécurisation, lors des 3 campagnes, sont rassemblés dans le tableau 7. Il comprend des données relatives aux modalités de traitement de ces

produits, qui peuvent être principalement de la réutilisation, du recyclage ou de la valorisation énergétique. Certains déchets font l'objet de plusieurs modes de valorisation, comme c'est le cas pour les huiles ou le liquide de refroidissement. Leur contribution réelle sera retenue au prorata des filières correspondantes, c'est-à-dire 50% en valorisation énergétique et 50% en recyclage pour le liquide de refroidissement (ADEME, 2008) et 40% en recyclage et 60% en valorisation énergétique pour les huiles (ADEME 2, 2009). Notons que les déchets abandonnés dans les véhicules par leurs propriétaires, assimilés à des déchets ménagers, ont été pesés et remis à l'intérieur des VHU. Leur masse est de l'ordre de 0,45 kg, soit 0,05% de MVHU. Ils ne sont pas pris en compte dans le bilan matière.

Tableau 7 Produits retirés lors des opérations de dépollution et de sécurisation des 3 campagnes et modes de valorisation

CAMPAGNES			PRODUITS	CODE DECHET	% M _{VHU}	MODE DE VALORISATION (%)			% MATERIAUX PAR PRODUITS	
C1	C2	C3				ENERGIE	RECYCL.	REUTIL.	METAUX	POLYMERES
X	X	X	LIQ REFROIDISSEMENT	16 01 14*	0,35%	50%	50%			
X	X	X	LIQ LAVE-GLACE	16 01 14*	0,06%			100%		
X	X	X	LIQ DE FREIN	16 01 13*	0,04%	60%	40%			
X	X	X	HUILES	13 02 05*	0,51%	60%	40%			
X	X	X	ESSENCE	13 07 01*	0,28%			100%		
X	X	X	DIESEL	13 07 02*	0,73%			100%		
X	X	X	CARBURANTS SOUILLES	13 07 01*	0,16%	100%				
		X	FILTRES A HUILE	16 01 07*	0,04%	60%	40%			
X	X	X	LIQ FRIGORIGENES	14 06 01*	0,00%		100%			
X	X	X	BATTERIES	16 06 01*	1,43%		100%		69%	5%

Le « code déchet » (COD2, 2011) justifie, s'il était besoin, la nécessité de retirer les éléments du tableau 7 avant toute autre opération, puisque chaque « astérisque » définit réglementairement le caractère dangereux du déchet, et donc a fortiori du VHU qui les contient. La dénomination « carburants souillés » correspond à des carburants qui, par contrôle visuel, sont jugés impropres au réemploi. Ils sont donc collectés séparément et éliminés par incinération avec récupération de chaleur.

En affectant la contribution massique des produits à leur mode de traitement et en faisant la somme, on obtient le tableau 8.

Tableau 8 : Contribution des opérations de dépollution/sécurisation à la valorisation globale et au recyclage des métaux

Dépollution - Sécurisation	C1	C2	C3
Réutilisation et recyclage	2,9%	2,9%	2,9%
Réutilisation et valorisation	3,6%	3,6%	3,6%
Fraction métallique	1,0%	1,0%	1,0%
Fraction polymères	0,1%	0,1%	0,1%

L'incertitude sur les pourcentages massiques est de 0,01. Le bilan complet de la dépollution / sécurisation, est donc : 3,6 ± 0,1% de MVHU.

La contribution de ces opérations au calcul du taux de recyclage des métaux ne concerne que les 69% en masse de plomb contenu dans les batteries (DTI, 2005). Celui-ci représente donc 1% de MVHU. Quant à la contribution à la valorisation des polymères, elle est limitée au 0,1% d'apport de l'enveloppe en polypropylène des batteries.

IV.1.2 Discussion

La comparaison des résultats de notre étude à d'autres données telles que les déclarations annuelles des démolisseurs en Belgique (FEBELAUTO, 2009) ou en Hollande (ARN, 2007), ou aux résultats d'autres travaux expérimentaux réalisés dans le domaine en France (ADEME, 2008), en Autriche (SEES, 2006) ou en Angleterre (DTI, 2005), est

synthétisée au Tableau 9 et en Figure 15 pour ce qui concerne les opérations de dépollution et sécurisation.

Figure 15 Bilan matière comparatif d'après le tableau 9

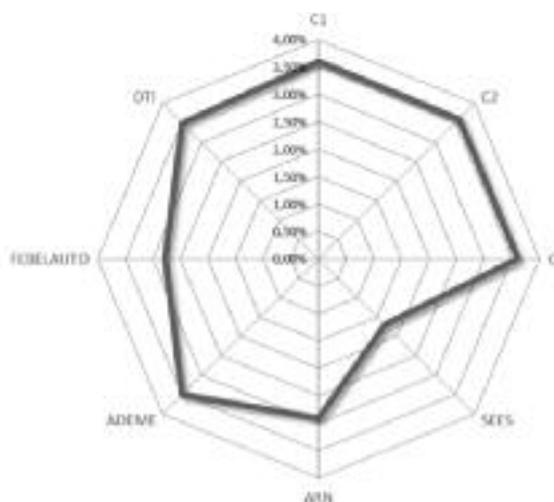


Tableau 9 : Analyse comparative des résultats de l'étude à des données bibliographiques pour les opérations de dépollution/sécurisation

SOURCE DES DONNEES	ARN	FEBELAUTO	SEES	ADEME	DTI UK	OPTIVAL
	2007	2009	2006	2008	2005	2011
MVHU	936	939	950	928,2	982,7	989
ELEMENTS	%MVHU					
LIQ REFROIDISSEMENT	0,34%	0,17%	0,13%		0,35%	0,35%
LIQ LAVE-GLACE	0,12%	0,07%	0,03%	1,03%	0,16%	0,06%
LIQ DE FREIN	0,03%	0,02%	0,01%		0,04%	0,04%
HUILES	0,54%	0,46%	0,22%		0,57%	0,51%
ESSENCE	0,53%	0,64%	0,84%	1,15%	1,15%	0,28%
DIESEL						0,73%
CARBURANTS SOUILLES						0,16%
FILTRES A HUILE		0,03%			0,01%	0,04%
LIQ FRIGORIGENES	0,00%	0,00%				0,00%
BATTERIES	1,31%	1,38%	0,40%	1,36%	1,20%	1,43%
BILAN	2,89%	2,78%	1,63%	3,54%	3,48%	3,60%

On constate que la masse globale des produits retirés dans les opérations de dépollution / sécurisation varie entre 2,8 % et 3,6% de la masse des véhicules. La valeur de 1,63% indiquée au Tableau 9 pour les campagnes SEES paraît trop faible au regard des autres, ce qui pourrait s'expliquer par la grande quantité de batteries manquantes lors de ces essais. Les résultats de notre étude (3,6%) correspondent à la limite haute des valeurs déjà publiées.

Les données fournies au Tableau 9 permettent de calculer que dans notre étude, le pourcentage massique de la somme des liquides retirés est de 2,13% de la MVHU. Les valeurs bibliographiques (Tableau 2) conduisent quant à elles à un pourcentage de 2,75%. On peut donc conclure que dans nos campagnes expérimentales, nous avons retiré de l'ordre de 80% de la masse moyenne de ces produits contenus dans les véhicules. Dans la pratique, on observe en effet la complexité d'une vidange intégrale du circuit des huiles et l'apparition de fumées de combustion lors du broyage de VHU vient étayer l'hypothèse de la présence de ces résidus d'huiles.

Il faut souligner que la forte augmentation du coût de ces produits ces dernières années a accru sensiblement leur récupération tout au long de la filière. A ce titre, le Tableau 9 montre bien la différence entre les valeurs issues de campagnes expérimentales récentes réalisées sur des échantillons ciblés de VHU (telles que celle de l'ADEME qui donne 3,54% ou la nôtre avec 3,60%), et les valeurs moyennes de représentativité nationale comme celles de ARN et FEBELAUTO.

IV.2- Opération de déconstruction – platinage

IV.2.1 Résultats

De la même manière que pour les opérations précédentes, les résultats quantitatifs concernant les produits retirés lors des opérations de déconstruction et de platinage lors des 3 campagnes sont rassemblés au tableau 10.

En sommant les pourcentages massiques affectés à un mode de traitement, on obtient les résultats portés au tableau 11 qui permet un bilan comparé des campagnes. Seuls les PUNR font l'objet d'un mode de valorisation mixte (ADEME3, 2009).

On constate que la contribution des opérations de déconstruction/platinage dans le calcul du taux de valorisation est plus élevé que pour les étapes de dépollution / sécurisation. Ce taux varie logiquement avec le niveau de démantèlement mis en œuvre dans les 3 campagnes d'essais. On observe qu'il double entre la campagne 1 (démantèlement minimal, conduisant à un taux de valorisation de l'ordre de 5% de la M VHU) et la campagne 3 (démantèlement poussé, près de 10% de valorisation).

La contribution des opérations de déconstruction / platinage au calcul du taux de recyclage des métaux concerne les 18% en masse d'acier contenus dans les PUNR (DTI, 2005), les 84% de pièces détachées en acier et aluminium (voir paragraphe suivant), 80% de la masse des câbles électriques (en cuivre) et 100% des pots catalytiques, généralement en acier inoxydable et contenant en outre quelques

Tableau 10 Produits retirés lors des opérations de déconstruction et de platinage dans les 3 campagnes

CAMPAGNES			PRODUITS	CODE DECHET	% M _{VHU}	MODE DE VALORISATION (%)			% MATERIAUX PAR PRODUITS	
C1	C2	C3				ENERGIE	RECYCL.	REUTIL.	METAUX	POLYMERES
X	X	X	PNEUS	16 01 03	2,93%	43%	57%		18%	
X	X	X	PIECES DETACHEES	NC	1,24%			100%	84%	16%
	X	X	VERRES	16 01 20	1,40%		100%			
	X	X	PARE BRISES	16 01 20	0,97%		100%			
	X	X	PARE CHOCS (PE/PP)	16 01 19	0,83%		100%			100%
X	X	X	CATALYSEURS	16 01 18	0,25%		100%		100%	
		X	PU	16 01 19	0,61%	100%				
		X	TEXTILES	16 01 99	0,21%	100%				
		X	FAISCEAUX	16 01 18	0,08%		100%		80%	20%
	X	X	GARDES BOUES	16 01 19	0,13%		100%			100%
	X	X	BAGUETTES	16 01 19	0,06%		100%			100%
		X	ENJOLIVEURS	16 01 19	0,09%		100%		20%	80%
X	X	X	RESERVOIRS	16 01 19	0,90%		100%			100%

métaux précieux (Tableau 11). Globalement, cette contribution est assez faible cependant de 2,6 à 2,8% de la masse moyenne des véhicules, et est peu affectée par le niveau de démantèlement.

Tableau 11 Contribution des opérations de déconstruction/platinage à la valorisation globale et au recyclage des métaux (Résultats exprimés en % de la masse moyenne des VHU)

Déconstruction - Platinage	C1	C2	C3
Réutilisation et recyclage	4,1%	7,4%	7,6%
Réutilisation et valorisation	5,3%	8,7%	9,7%
Fraction métallique	1,8%	1,8%	1,9%
Fraction polymères	1,1%	2,1%	2,2%

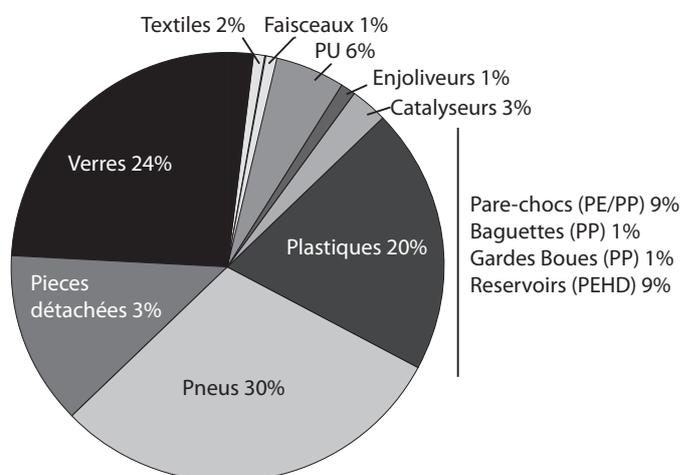
Il faut souligner que la masse de pièces de réemploi est principalement constituée par des moteurs gazoils et essences, ainsi que des pièces de carrosserie. Elle est de 1500 kg sur les 1785kg démontés pour la vente, ce qui représente 84%. Ces éléments seront comptabilisés pour apprécier le taux de métaux récupérés. On considère que les pneumatiques retirés ne sont que des PUNR. Les pneus qui pourraient servir au réemploi (occasion ou rechapage) sont comptabilisés dans la catégorie « pièces détachées ». Ce rôle de tri et de vente est en effet directement associé à la fonction du démolisseur. D'autres parts, les outils utilisés généralement pour séparer rapidement la jante du pneumatique, rendent cette dernière inutilisable.

Les mousses de PU et les textiles collectés au cours des campagnes expérimentales ont été incinérés avec récupération de chaleur dans une UIOM⁸ en tant que déchets industriels banals. Cette opération a été possible compte tenu des faibles masses concernées et de la nature expérimentale des essais, mais sa pérennité n'est pas assurée pour le traitement de flux plus élevés et réguliers.

La répartition des éléments démontés lors de la troisième campagne, est représentée Figure 16.

En regroupant les éléments plastiques de même nature (polyoléfines), on constate que 4 fractions représentent à elles seules près de 90% en masse du total. Cette valeur atteint 91% en ajoutant les enjoliveurs, majoritairement en ABS. Les pneumatiques représentent près de 1/3 de la masse valorisée lors du démontage. Dans la pratique, les opérations de déconstruction, hors réemploi, se limitent à cette fraction. Dans le cadre de notre étude et pour la campagne 1, les réservoirs ont également été retirés pour réduire les risques d'explosion lors des opérations de broyage.

Figure 16 : contribution massique de chaque élément (Résultats exprimés en % de la somme des masses des éléments démontés)



IV.2.2 Discussion

La confrontation des résultats de nos campagnes aux résultats obtenus par ailleurs est synthétisée au Tableau 12 et sur la Figure 17.

On constate que dans la majorité des cas, la contribution des opérations de déconstruction / platinage au taux de recyclage global varie entre 2,16% et 9,71 % de la masse moyenne des VHU. La valeur de 9,71 +/- 0,12 % est celle obtenue avec le démantèlement le plus poussé – campagne 3 – de la présente étude. Notons qu'avec le scénario moyen - campagne 2 de notre étude -, le taux de recyclage obtenu - 8,5% - est proche de celui obtenu dans l'étude ARN – 8,2 % - qui dispose d'un système soutenu de gestion de ses VHU depuis plus d'une décennie.

La prise en compte des pièces de réemploi est complexe. Dans notre étude, elle apporte 1,24% supplémentaires à la valorisation et dans le cas de l'étude ADEME (ADEME, 2008), cette valeur atteint 26,30%. Avec une masse moyenne unitaire de 930 kg et une masse moyenne des carcasses prises en charges par les broyeurs après leur passage chez les démolisseurs de 820 kg, on a une masse moyenne associée aux opérations de dépollution et de déconstruction de 99,5 kg par VHU (Ernst, 2009) soit 10,7% en masse de VHU, ce qui amène 2 commentaires :

- Cette masse est une moyenne obtenue d'après les données déclaratives ; elle comprend une masse métallique estimée de 53,4 kg, qui correspond à des éléments massifs comme les moteurs, qui sont régulièrement retirés par les démolisseurs, en vue d'une meilleure valorisation financière. Elle n'entre donc pas intégralement dans la dénomination « réemploi ».
- Les éléments démontés pour être vendus comme pièces détachées et comptabilisés en réemploi, sont stockés dans les magasins des installations de démolition. Une grande partie de ces stocks, une fois obsolète, repartira pour être recyclée si l'on considère les éléments métalliques et pour être éliminée pour le reste.

On peut cependant penser que la fraction destinée au réemploi va augmenter, puisqu'il est maintenant autorisé (ARR4, 2009) d'estimer des coûts de réparation sur la base du prix de pièces de réemploi lors de leur expertise, et non plus seulement sur celle du prix de pièces neuves (hormis le cas des éléments "sécurité").

Les taux affectés à la valorisation énergétique, au réemploi et au recyclage (tableaux 7 et 10) correspondent à une « approche optimiste » délibérée, qui considère que dès qu'un élément est retiré, il peut être valorisé. En ce qui concerne les huiles ou les pneumatiques qui, forts d'une

réglementation spécifique soutenue, disposent de données chiffrées annuelles quant à leur prise en charge, les taux sont bien identifiés. Pour d'autres éléments, comme les verres et les plastiques, nous avons considéré un recyclage de 100%, alors que l'ARN déclare pour ces mêmes produits des valeurs respectives de 93,6% et 62% pour le recyclage, de 1,2% et 34,3% pour la valorisation énergétique et enfin de 5,2% et 3,7% pour l'élimination (ARN, 2007).

De la même manière, les taux retenus pour la valorisation du liquide de refroidissement sont de 50% pour la valorisation énergétique et de 50% pour le recyclage (ADEME, 2008), alors que pour ce même produit, l'ARN considère seulement 23% de recyclage et 72% d'élimination (ARN, 2007). En toute rigueur, il faudrait en effet considérer les rendements des traitements pour chacun des éléments collectés lors des opérations.

La valorisation maximale pour les polymères est de 2,2%, qui se répartissent à parts égales en PP et en PE/PEHD (figure 16). Si on rapproche cette mesure de la valeur de 11 +/- 5% obtenue par projection sur la figure 1, cela signifie que 37% des polymères, au mieux, sont récupérés lors du démontage. Cette valeur descend à 14% en prenant l'incertitude maximale.

Le PVC issu des gaines des faisceaux électriques et l'ABS des enjoliveurs sont négligeables (<0,1% de MVHU).

Le démontage des verres permet la récupération de 2,4% de MVHU. Si l'on compare cette mesure à la valeur moyenne de 3,5 +/- 0,7% issue du tableau 2, on peut conclure que le démontage a assuré un taux de récupération du verre de 70 +/- 15%.

Figure 17 Bilan matière comparatif d'après le tableau 12

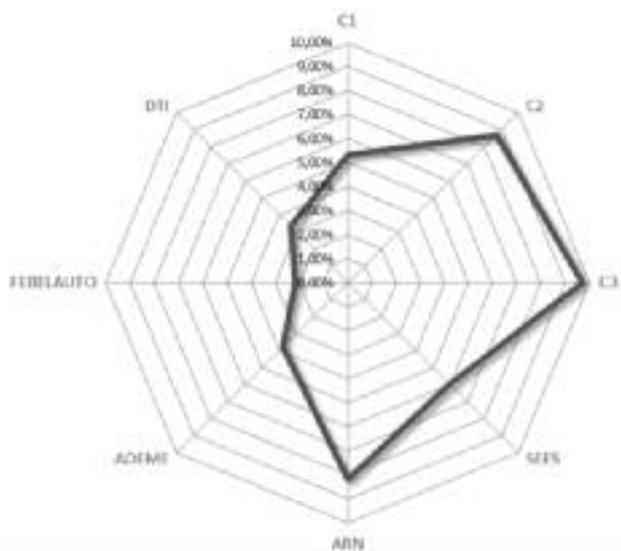


Tableau 12 Données comparatives sur la déconstruction/platinage

SOURCE DES DONNEES	ARN 2007	FEBELAUTO 2009	SEES 2006	ADEME 2008	DTI UK 2005	OPTIVAL 2011
MVHU	936	939	950	928,2	982,7	989
ELEMENTS				%MVHU		
PNEUS	3,15%	1,99%	2,71%	3,78%	3,19%	2,93%
PIECES DETACHEES				26,30%		1,24%
VERRES	2,67%					1,40%
PARE-BRISÉS						0,97%
PARE-CHOC (PE/PP)	0,61%					0,83%
CATALYSEURS		0,17%	0,20%		0,10%	0,25%
PU	0,76%					0,61%
TEXTILES						0,21%
FAISCEAUX						0,08%
GARDES BOUES						0,13%
BAGUETTES						0,06%
ENJOLIVEURS	0,09%					0,09%
RESERVOIRS						0,90%
JOINTS	0,82%					
CEINTURES DE SECURITE	0,05%					
FIBRES DE COCO	0,05%					
BILAN	8,21%	2,16%	2,91%	30,08%	3,29%	9,71%

CONCLUSION

Les résultats présentés ici sont issus d'une part d'une exploitation poussée des données bibliographiques, et d'autre part de 3 campagnes expérimentales réalisées sur site industriel. L'analyse bibliographique révèle que la masse moyenne des VHU augmente significativement dans la période de temps étudiée, passant de 910 kg en 1985 à près de 970 kg en 1997. Dans le même temps, la proportion de métaux ferreux baisse, partiellement compensée par une augmentation des matériaux polymères. Concernant les métaux non ferreux, les fortes incertitudes entachant les données disponibles ne permettent pas de dégager de tendance ni à la hausse ni à la baisse.

Les campagnes expérimentales ont été réalisées dans l'objectif de comparer 3 scénarios de démantèlement de plus en plus poussés des véhicules. Chaque campagne a traité un échantillon d'au moins 90 VHU, dont la masse et l'âge moyens ont été estimés à 989 kg /VHU et 14 ans respectivement. Les résultats présentés dans cet article portent sur les bilans matière des opérations de dépollution/sécurisation et de démantèlement/platinage. La phase de broyage et les autres critères feront l'objet de publications ultérieures.

La masse des matériaux retirés lors des opérations de dépollution / sécurisation est de 3,6 +/- 0,1 % de la masse des véhicules. Cette valeur correspond à la limite haute des données de la bibliographie. La contribution de ces opérations au taux de recyclage des métaux ne concerne que le plomb des batteries et représente de l'ordre donc seulement de 1% de la masse des VHU.

La contribution des opérations de démantèlement / platinage au calcul des taux de valorisation est plus élevée que celle des opérations précédentes. Les campagnes d'essais montrent que le taux de valorisation augmente logiquement avec le niveau de démantèlement réalisé, passant de 5% de la masse moyenne des VHU pour le scénario minimal à près de 10% pour le scénario le plus poussé. La contribution au taux de recyclage des métaux est assez faible cependant (de l'ordre de 2,6 à 2,8% de la masse moyenne des véhicules). Elle est peu affectée par le niveau de démantèlement.

La sélection du scénario optimal devra se baser sur l'analyse d'autres critères complémentaires à ceux présentés ici, dont l'exploitation fera l'objet de prochaines publications.

REMERCIEMENTS

Ce programme, qui fait l'objet d'un doctorat à l'INSA de Lyon, est soutenu financièrement par le crédit impôt recherche et par l'Ademe. Les auteurs remercient ces partenaires pour leur soutien.

RÉFÉRENCES

ACORD, 2001. Automotive Consortium on Recycling and Dismantling Annual Report SMMT - Environmental Resources Management for the Department of Trade and Industry

ADEME, 2008. Campagne de démontage et de broyage de véhicules hors d'usage et étude des flux des matériaux issus du traitement - Juin 2008 - Étude réalisée par ENVIRONNEMENT & SOLUTIONS - <http://www2.ademe.fr/>

ADEME1, 2009. ADEME – « synthèse Automobile – Données 2009 » - <http://www2.ademe.fr/>

ADEME2, 2009. ADEME – « synthèse Lubrifiants- Données 2009 » - <http://www2.ademe.fr/>

ADEME3, 2009. ADEME – « synthèse Pneumatiques- Données 2009 » - <http://www2.ademe.fr/>

ARN, 2007. adapté de ARN2007: Monitoring ELV_Netherland_05_2007 - <http://www.arn.nl>

ARR1, 2005. Arrêté du 15 mars 2005 relatif aux agréments des exploitants des installations de stockage, de dépollution, de démontage, de découpage ou de broyage des véhicules hors d'usage - <http://www.ineris.fr/aida/>

ARR2, 2005. Arrêté du 19 janvier 2005 relatif au calcul des taux de réemploi, de recyclage et de valorisation des véhicules hors d'usage- <http://www.ineris.fr/aida/>

ARR3, 2011. Arrêté du 27 juin 2011 relatif aux réseaux de centres VHU agréés mis en place par les producteurs ou groupements de producteurs en application de l'article R. 543-156-I du code de l'environnement - <http://www.ineris.fr/aida/>

ARR4, 2009 : Arrêté du 29 avril 2009 fixant les modalités d'application des dispositions du code de la route relatives aux véhicules endommagés pour les voitures particulières et les camionnettes – <http://www.legifrance.gouv.fr>

Beckenbach F. et Voß F., 2010. Adapté de "Material flow dynamics in the automotive industry in Germany – an agent based approach" - papers on agent-based economics nr 10 – p12

CCFA, 2006. (Comité des Constructeurs Français d'Automobiles) "industrie automobile française: analyses et statistiques 2006" - http://www.ccf.fr/IMG/pdf/Analyse_statistiques_2006_FR.pdf

CCFA, 2011. Comité des Constructeurs Français d'Automobiles : statistiques/répartition du parc automobile français par types de carrosseries (période 1990-2000) - <http://www.ccf.fr/>

Christen, Daniel, 1997. Zusammensetzung von Altfahrzeugen nach Stoffgruppen und ihre Entwicklung. Herausgegeben von IGEA-Stiftung Bern.

COD, 2011. Code de l'Environnement, Section 9: « véhicules », chapitre III Titre III livre V – <http://www.ineris.fr/aida>

DEC2, 2011. Décret n° 2011-153 du 4 février 2011 portant diverses dispositions d'adaptation au droit communautaire en matière de gestion des véhicules hors d'usage et des déchets d'équipements électriques et électroniques - <http://www.ineris.fr/aida/>

DIR, 2000. Directive 2000/53/CE du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage - <http://www.ineris.fr/aida/>

DIR, 2008. Directive 2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives - http://www.ineris.fr/aida

DTI, 2005. T. Weatherhead et D. Hulse - Report to Department of Trade and Industry, septembre 2005 « A study to determine the Metallic Fraction recovered from ELVS in the UK

EIPC, 2008. « Environmental Improvement of Passenger Cars » - European Commission : Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological Studies – 2008 - Françoise NEMRY, Guillaume LEDUC, Ignazio MONGELLI, Andreas UHLEIN - p53

Ernst, 2009 : Rapport annuel de la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives aux véhicules hors d'usage- situation en 2009 - société Ernst & Young

FEBELAUTO, 2008. Etude OVAM, IBGE/BIM, OWD et RDC, (2008) : "Environment Validation of the recycling percentages for end-of-life vehicles at shredder companies and flotation units"

FEBELAUTO, 2009. Rapport annuel 2009 FEBELAUTO <http://www.febelauto.be/files/rapportannuel2009.pdf>

FFA, 2008. Fédération Française de l'Acier – Statistiques annuelles « vieilles ferrailles broyées »- www.acier.org/pages/stat/ferrailles/scrap

GHK, 2006. A study to examine the 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 - www.ghkint.com – Annexe 2

INDRA, 2010. D'après Olivier Gaudau et Nicolas PAQUET : « Comment, gérer, neutraliser, dépolluer, traiter et valoriser des VHU » présentation SAS INDRA, 2010

Mergias I., Moustakas K, Papadopoulos, A., Loizidou M., 2007. Multi-criteria decision aid approach for the selection of the best compromise management scheme for ELVs: The case of Cyprus. *Journal of Hazardous Materials*, 147, 706–717

Michaeli W., 1998. Kunststoffe im Automobilbau. Zukunft durch neue Anwendungen ;[mit Sonderteil Textilien und Oberflächenmaterialien] ; [Tagung Mannheim, 25./26. März 1998]. Düsseldorf: VDI-Verl.

Nathani C. et Arnsberg W., 1998. Materialfluß spezifischer Abfallarten und Abfallkennziffern bedeutender Bereiche – Endbericht Teil I. Herausgegeben von Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe.

Reinhardt T. et Richers U., 2004, Entsorgung von Schredderrückständen- Ein aktueller Überblick, *Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe* –p19

Reuter M.A., Van Schaik A., Ignatenko O., De Haan G.J., 2006. Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles. *Minerals Engineering*, 19, 433–449

Schmidt J. et Leitner R., 1995. « Automobilrecycling ». Springer-Verlag Berlin, 1995. P 165-174

Schmidt W.P., Dahlqvist E., Finkbeiner M., Krinke S., Lazzaris S., Oschmann D., Pichon S. and Thiel C., 2004. *Life Cycle*

Assessment of Lightweight and End-of-Life Scenarios for Generic Compact Class Passenger Vehicles. *Int J LCA Case studies*, 9, 405 - 416

SEES, 2006. Sustainable Electrical and Electronic System for the Automotive Sector - Specific Target: Research on Innovation Project - Ref: TST3-CT-2003-506075, D6: Car shredding manual Robert PALFI, Roland POXHOFER, Martin KRIEGL, Sebastian ALBER - 2006

VITO, 1999. Composition d'une épave automobile en 1999 : d'après de Connaissances BBT (Beste Beschikbare Technieken - Meilleures Techniques Disponibles (MTD)) du VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek – Institution flamande pour la Recherche Technologique)

Wallau F., 2001. *Kreislaufwirtschaftssystem Altauto. Eine empirische Analyse der Akteure und Märkte der Altautoverwertung in Deutschland.* Aachen.

Notes :

1- Le démolisseur peut mettre en œuvre des conditions alternatives qui assurent au moins un niveau équivalent de protection de l'environnement. Le démolisseur peut ainsi ne pas retirer ces éléments s'ils sont séparés lors ou à l'issue du broyage dans des conditions qui permettent leur recyclage en tant que matériaux.

2- Les valeurs relatives aux métaux sont légèrement minorées puisque les données d'INDRA concernant les faisceaux, les batteries ou les pots catalytiques, sont comptabilisées sur un autre poste

3- Dont 3% de pneus et 3% d'autres caoutchoucs (techniques, durites, ...)

4- Cette valeur est adaptée d'une donnée ACORD (Material composition of a typical 1990s European car) dans *Towards self-disassembling vehicles (The Journal of Sustainable Product Design 3: 59–74, 2003)*

5- Cette valeur inclut, entre autres, les caoutchoucs, les textiles, les liquides et 2,2% de PUR.

6- Afin de mesurer l'impact des résidus de filtres à huiles sur la qualité des résidus de broyage légers ou fluffs, ils ont été laissés sur une série de 30 carcasses. Les résultats correspondants sont intégrés à l'évaluation des impacts sur la filière.

7- PUNR : pneus usagés non réutilisables

8- UIOM : usine d'incinération d'ordures ménagères

9- Incertitude maximale estimée entre 1997 et 1999 d'après les données du tableau I