

BILAN MATIÈRE-ÉNERGIE DE LA FILIÈRE DE TRAITEMENT DES VÉHICULES HORS D'USAGE (VHU)

Jean-Michel Boulmier*, Aline Grapin*, Patrick Rousseaux**,
Industrielle nationale de réemploi automobiles (Indra), Insa de Lyon

Cet article présente une modélisation de la filière française actuelle de traitement des véhicules en fin de vie ou VHU. Son bilan matière-énergie, qui, dans cet article, prend en compte à la fois le traitement d'un VHU de référence et celui de la quantité de ferrailles à broyer (ou FAB) correspondante, a été réalisé en utilisant la méthode des analyses de cycle de vie (ACV). Il permet de conclure que le taux actuel de valorisation par la filière d'un VHU de référence (VHU moyen comprenant le plein de fluides, y compris de carburant) est de 81,4 %. Par ailleurs, nous avons montré que le broyage consommait 50 % de l'énergie électrique utilisée par la filière. La consommation de gazoil se répartit quant à elle entre les transports intersites et l'activité sur les chantiers dans une proportion respective de 40 %/60 %. Enfin la valorisation énergétique des produits aujourd'hui mis en décharge permettrait de dégager autant d'énergie que la filière n'en consomme pour son fonctionnement.

This article presents a modelling of the present French treatment method of end of live vehicles (or VHU). The final analysis matter-energy, which in this article takes into consideration the treatment of a reference VHU as well as the treatment of the corresponding quantity of steel scrap for shredder (or FAB) was accomplished by the application of the Life Cycle Assessment (LCA) method. This leads to the conclusion that the present valorisation rate of the reference VHU (the average VHU emptied of fuel) is 81.4 %. On the other hand, it was shown that crushing consumed 50 % of the electric energy used by the treatment method. Concerning the diesel oil consumption itself, 60 % was accountable for place to place transportation and 40 % for the treatment sites. Finally, the energetic valorisation of the products being disposed in landfill nowadays should allow to release as much energy than the treatment method consumes to guarantee its own functioning.

INTRODUCTION

La loi du 13 juillet 1992 interdisant la mise en décharge des déchets non ultimes au 1^{er} juillet 2002 et la flambée des prix des centres d'enfouissement technique (ou CET) de classe 2 consécutive à cette loi ont entraîné une forte mobilisation des industriels concernés pour développer des solutions alternatives : valorisation matière et énergétique.

La profession automobile n'échappe pas à ces nouveaux enjeux et tout particulièrement celle du recyclage automobile : si les métaux ferreux et non ferreux sont facilement recyclés après broyage des carcasses de VHU (véhicules hors d'usage, c'est-à-dire en fin de vie), il n'en va pas de même des résidus de broyage (ou RB), qui sont les fractions non métalliques composées des mousses, plastiques, caoutchoucs, verre, etc. À l'heure actuelle considérés comme déchets, ils sont mis en CET de classe 2. Pour le broyage des seules carcasses automobiles, ils totalisent annuellement environ 300 000 tonnes en France (CAS, 97).

C'est dans ce contexte qu'il faut replacer l'accord-cadre du 10 mars 1993 sur le traitement des VHU, signé entre les pouvoirs publics, les constructeurs et les professionnels du recyclage automobile, et la récente directive européenne relative aux VHU (CHA, 96 et JOC, 99). Cette dernière prévoit de porter les taux de valorisation des VHU à 85 % en poids au 1^{er} janvier 2006 et à 95 % au 1^{er} janvier 2015, avec une nette prérogative donnée à la valorisation matière (au moins 80 % en 2006).

OBJECTIF ET CHAMP DE L'ÉTUDE

Objectif de l'étude

Depuis le début des années 90, des études ponctuelles, localisées géographiquement ou ne cherchant à améliorer qu'une étape particulière du traitement des VHU sans souci de ses incidences sur le reste de la filière ont été réalisées par quelques acteurs de la profession. Elles se sont essentiellement attachées à diminuer la quantité de RB mis en décharge en agissant soit avant broyage (démontage de matériaux en vue d'une valorisation matière), soit après broyage (essais de fabrication de combustibles de substitution à partir des

RB). Mais aucune d'entre elles n'a de vision globale de la filière permettant de mettre en évidence les interactions entre phénomènes, et notamment les transferts de pollutions. Autrement dit, il est aujourd'hui impossible d'évaluer les effets sur le reste de la filière d'une action à caractère environnemental menée sur une partie de celle-ci. Pourtant, une amélioration ponctuelle peut entraîner des effets négatifs sur d'autres étapes et, au final, s'avérer être une mauvaise solution.

L'objectif de cet article est donc de présenter un bilan matière-énergie de la filière actuelle simplifiée de traitement des VHU, ou scénario de référence, afin de déterminer ses impacts environnementaux. La méthodologie utilisée est l'ACV (analyse du cycle de vie) (Iso, 97).

Dans une seconde étape, qui fera l'objet d'un prochain article, seront étudiés des scénarios alternatifs, c'est-à-dire d'autres filières de traitement des VHU. Ceux-ci seront évalués et comparés en terme d'impact environnemental au scénario de référence. Il sera ainsi possible de sélectionner les possibilités de valorisation les plus pertinentes au regard des critères choisis.

Choix de l'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle « *spécifie les fonctions du système étudié* » ; il s'agit d'une « *référence nécessaire pour assurer la comparabilité des résultats d'une analyse du cycle de vie* » entre plusieurs systèmes (Iso, 97). Généralement, l'unité fonctionnelle prend en compte à la fois une unité de fonction, une unité de produit et une unité de temps.

– L'unité de fonction définit la tâche que le système doit remplir. Dans notre cas, il s'agit du traitement des véhicules en fin de vie et de la quantité de ferrailles à broyer (ou FAB) correspondante. En effet, les FAB sont indissociables du traitement des VHU et leur prise en compte dans le système rend celui-ci plus représentatif de la réalité. Les résultats sont ainsi plus parlants pour les professionnels du recyclage automobile. Nous n'appliquerons donc pas de règle d'allocation entre le VHU et les FAB, car celles-ci font intégralement partie de notre système d'étude et des résultats.

– L'unité de produit définit la qualité et la quantité de produit traité par la fonction choisie. Nous retiendrons comme unité de produit un VHU de référence tel que défini ci-dessous ainsi que la quantité de FAB correspondante.

– L'unité de temps définit la durée pendant laquelle est étudiée la fonction remplie par le système. Compte tenu des arrêts des machines, notamment du broyeur, nous considérerons des valeurs moyennes sur un an d'exploitation. Cette durée suffisamment longue permet également de s'assurer que tout véhicule entrant dans la filière est bien intégralement traité par les différents acteurs.

Choix du VHU de référence

Hypothèses

Il est nécessaire de choisir comme référence un véhicule dont la composition définira le flux entrant du système. Dans le

cadre de cette étude, nous ne nous intéresserons qu'aux VHU non issus des assurances, ces derniers étant en général des véhicules accidentés plus récents dont le traitement et l'impact économique sur la filière diffèrent.

Les VHU retenus ayant en moyenne 10 à 12 ans d'âge, il faut donc théoriquement choisir un véhicule représentatif de l'année 1988. Pour les besoins de l'étude, nous avons fixé une composition qui s'appuie sur la masse moyenne des matériaux constitutifs des véhicules d'Europe de l'Ouest de 1984 à 1990 (APM, 96) et sur les résultats des campagnes de broyage réalisées par la société Indra (IND, 98, I et ZAR, 98, I). Ce véhicule est plutôt proche d'un modèle petit à moyen, les gros modèles ne représentant que 30 % du parc automobile français d'après les statistiques de l'Association auxiliaire de l'automobile de 1997.

Les principaux composants du VHU de référence sont indiqués dans le tableau I : nous avons considéré que le VHU entrant dans le système comprenait le plein de fluides, y compris celui de carburant, ceci afin de comparer les taux de valorisation obtenus par notre modèle à ceux annoncés par les constructeurs automobiles. Cette hypothèse ne reflète toutefois pas la réalité, le carburant étant en général presque entièrement vidangé avant son entrée chez le déconstructeur et réutilisé à titre individuel par les différents acteurs précédents.

Tableau I : Composition du VHU de référence

Valeur retenue (kg)	
Métaux ferreux	686,0
Métaux non ferreux, dont :	65,0
Aluminium	43,5
Caoutchoucs	53,0
Plastiques	85,0
Verre	28,0
Divers	61,0
Liquides totaux, dont :	57,0
Carburant	40,0
Huiles (liquides de freins et lubrifiants)	6,0
Liquides de refroidissement et lave-glace	8,0
Acide sulfurique (batterie)	3,0
Total VHU de référence	1035,0

Limites du système

La norme Iso 14040 préconise de « *modéliser le système de sorte que les entrants et les sortants aux frontières soient des flux élémentaires* ». Dans notre système d'étude, tous les flux ne sont pas élémentaires : certains sont des flux de produits finis (VHU, ferrailles légères à broyer ou FAB, pièces, etc.), d'autres sont des flux de matériaux fabriqués (acier, verre, plastiques, etc.). En toute logique, pour comparer plusieurs scénarios entre eux, il faudrait revenir à la production de ces produits finis ou de ces matériaux à partir des flux élémentaires.

En réalité, les différents scénarios que nous souhaitons étu-

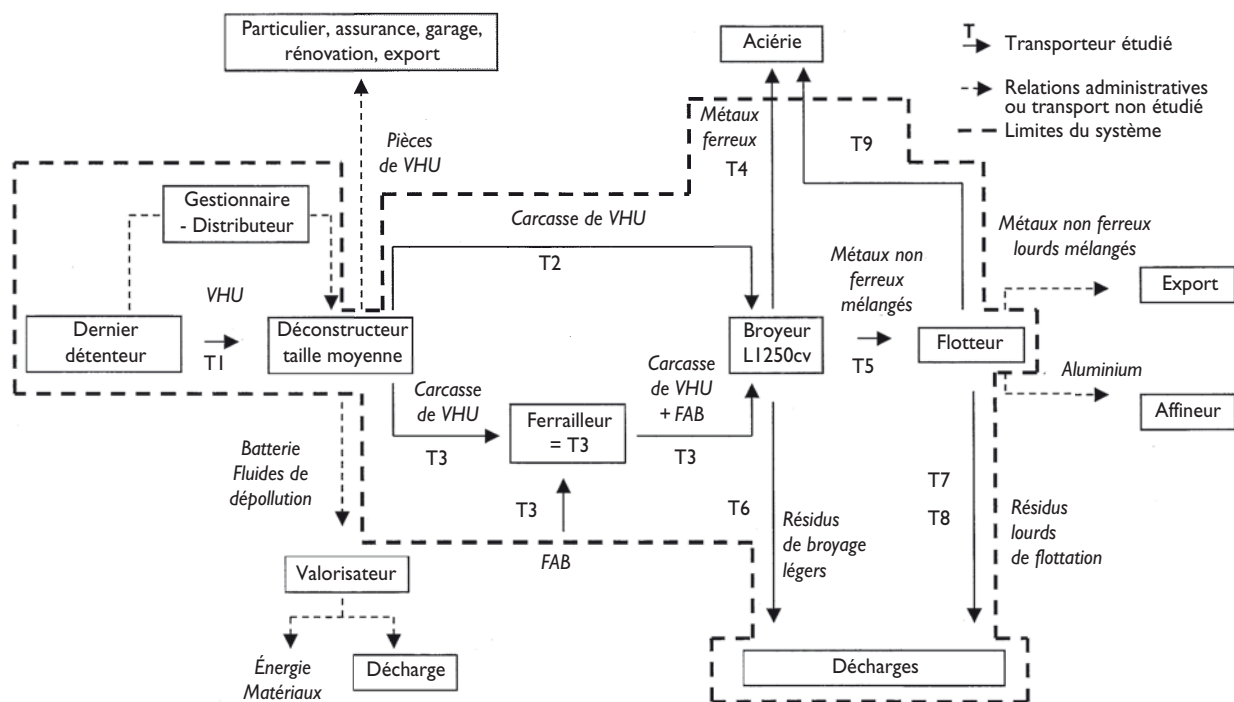


Figure 1 : Filière de traitement des VHU et limites du système

dier ultérieurement, appelés scénarios alternatifs, comportent des étapes communes qui permettent de s'affranchir de ce problème. Nous avons donc exclu des limites du système les flux non élémentaires correspondant à ces étapes communes (cf. figure 1).

Par ailleurs, la fabrication des camions et des infrastructures n'a pas été prise en compte dans le bilan matière-énergie du système.

Qualité des données

Toutes les données utilisées dans l'inventaire du cycle de vie (cf. *Modélisation du scénario de référence et inventaire du cycle de vie du VHU*) proviennent de campagnes de démontage et de broyage de VHU réalisées sur le terrain par des professionnels du recyclage automobile – et souvent par la société Indra elle-même - ou de sources bibliographiques dûment vérifiées et recensées. Chaque donnée a été répertoriée dans une base précisant notamment son type, sa valeur, sa date d'établissement et sa source bibliographique. Lorsqu'il s'agissait d'une moyenne, le nombre de véhicules, d'acteurs, etc. sur lequel porte la valeur a été indiqué chaque fois qu'il était connu.

MODÉLISATION DU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE ET INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE DU VHU

Généralités

Afin d'étudier le système, une modélisation préalable et donc une simplification de la filière ont été nécessaires, car cette dernière est relativement complexe et fait intervenir tous les scénarios de traitement envisageables, c'est-à-dire

l'ensemble des acteurs et de leurs relations possibles (cf. figure 1). Bien que simplifiée, cette modélisation s'attache à refléter du mieux possible la réalité française actuelle.

Nous présentons dans les paragraphes suivants les hypothèses retenues pour chaque acteur du scénario de référence, l'ensemble de ces données constituant l'inventaire du cycle de vie du VHU. Les données ont été en grande partie tirées des résultats de campagnes de démontage, de broyage et de flottation réalisées par les sociétés Indra et Sofival en 1998.

Pour les besoins de la modélisation, nous avons considéré que le parc de VHU français s'élevait à 1,7 million de VHU, ce qui était le cas en 1996-97. En 1999, le nombre de VHU est plutôt estimé à 1,3 million : il a chuté suite aux mesures gouvernementales prises successivement par MM. Balladur et Juppé, mais devrait augmenter de nouveau dans les années à venir.

Pour déterminer la consommation de carburant et les rejets gazeux des camions de transport intersites, nous avons réalisé la moyenne des données de différentes sources (COU, 92 et FRI, 94). En ce qui concerne le transport par voie ferrée, supposée entièrement électrifiée, la consommation électrique retenue est la moyenne des bases de données (FRI, 94; HAB, 91 et HAB, 98, 2). Pour tous les transports étudiés, y compris par voie ferrée, l'aller s'effectue à vide et le retour pleine charge ou l'inverse.

Les émissions gazeuses des engins de chantier ont été assimilées à celles de camions de livraison de moins de 3,5 t consommant autour de 0,2 l/km (FRI, 94). Nous considérerons les mêmes rejets gazeux pour les chariots élévateurs, les pelles hydrauliques et les chargeurs présents chez

les autres acteurs de la filière.

Enfin, le gazoil et l'électricité utilisés pour le chauffage et l'éclairage des locaux n'ont été pris en compte que pour le déconstructeur. Pour les autres acteurs, ils ont été négligés devant l'énergie nécessaire au fonctionnement des engins de chantier et des machines de production.

Dernier détenteur de référence

C'est le premier acteur de la chaîne. Nous avons choisi l'ensemble des derniers détenteurs (concessionnaires, garagistes indépendants, particuliers, fourrières, Domaines), exception faite des assurances (cf. *Choix du VHU de référence*).

Gestionnaire-distributeur

Il s'engage auprès du dernier détenteur, avec lequel il est lié par contrat, à faire traiter ses VHU dans le respect de la législation en vigueur, notamment environnementale. Véritable interface entre le dernier détenteur et le déconstructeur, son action est essentielle dans la mesure où il est actuellement à la fois la centrale d'achat et le conseiller technique des déconstructeurs. Il existe deux gestionnaires-distributeurs en France, dont la société Indra, de laquelle proviennent de nombreuses données de cet article.

Transport du dernier détenteur au déconstructeur (transport T1)

La base de données Indra, qui regroupe des informations sur environ 250 déconstructeurs de son réseau, indique que 6 VHU en moyenne sont collectés par tournée auprès du dernier détenteur (collecte par camions porte-six) et que la distance moyenne séparant ces deux acteurs est de 50 km (IND, 98, 1).

Déconstructeur de référence

Rappelons qu'un déconstructeur est un démolisseur certifié, qui s'engage donc à effectuer la dépollution et la mise en sécurité des VHU lui parvenant avant tout démontage et vente de pièces. Il existe en France environ 2500 démolisseurs, mais tous ne sont pas des déconstructeurs. Dans le scénario de référence choisi, nous avons considéré que tous les démolisseurs étaient des déconstructeurs certifiés et que tous les VHU passaient par cet acteur avant broyage. Nous avons défini un déconstructeur de taille moyenne employant 7 personnes et traitant 700 VHU par an. Il réalise les opérations suivantes : extraction de la batterie, vidange des différents fluides, démontage et revente de pièces (IND, 98, 1).

Après mélange, les huiles et liquides de freins, dont le mélange est appelé « huiles », sont incinérés par des opérateurs agréés. Les liquides de refroidissement et liquides lave-glace, dont le mélange est appelé « liquides de refroidissement » sans distinction, sont évapo-incinérés. Nous prendrons pour hypothèse que 5 kg d'huile sur 6 kg présents dans le véhicule sont effectivement dépollués (IND, 98, 1), 4 kg de liquides de refroidissement sur 8 kg présents (MES, 99, 3) et 38 kg de carburant sur 40 kg présents. L'huile et le car-

burant résiduels n'ont pas été négligés, car ils sont biodégradables et peuvent entraîner une fermentation des RB mis en décharge.

Le déconstructeur réalise également le démontage et la revente de pièces. La masse moyenne des pièces enlevées représente 19 % de la masse initiale du VHU, soit environ 196,7 kg pour notre VHU de référence (ZAR, 98, 1 et ISA, 96). En revanche, leur composition n'a pu être appréhendée par des campagnes de mesure spécifiques. Elle a donc été déduite en tout dernier et par différence, après bouclage du bilan des entrées et des sorties du système. Cette estimation, cohérente, indique que les pièces extraites sont constituées à plus de 75 % de matériaux métalliques, ce qui est en accord avec le fait qu'il s'agisse principalement de pièces mécaniques.

Notons que dans le scénario de référence choisi, aucune pièce, hormis la batterie, n'est extraite en vue d'une valorisation matière. Le démontage des vitrages, des pare-chocs, etc. sera étudié ultérieurement dans le cadre des scénarios alternatifs.

Énergie consommée par le site

Globalement, peu d'énergie électrique est utilisée par le déconstructeur, et pour les quelques outils fonctionnant à l'électricité, comme les dévisseuses électriques ou les ponts élévateurs, il ne semble guère possible d'établir un bilan énergétique qui ne soit pas entaché d'erreurs. Nous avons donc préféré retenir le bilan global d'électricité pour tout le site en nous basant sur la facture annuelle d'électricité d'un déconstructeur type. Celle-ci s'élève à 25 000 kWh, et comprend l'électricité utilisée pour les bureaux et le magasin de vente de pièces.

Le déconstructeur de référence consomme également du gazoil pour le fonctionnement de ses deux chariots élévateurs et le chauffage de ses locaux. La consommation du même déconstructeur type s'élève à 13 400 l/an.

Eaux de procédé et eaux pluviales

Les eaux de lavage des pièces démontées et les eaux pluviales provenant notamment des aires de stockage sont collectées dans un débourbeur-déshuileur. Les plus utilisés par la profession ont un débit de 3 l/s et sont conçus pour un rejet maximum de 5 mg/l en hydrocarbures. La quantité d'hydrocarbures retenus par le déshuileur a été estimée, d'après plusieurs déconstructeurs, à 25 kg/an. Ils sont traités en centres agréés avec les boues retenues dans le débourbeur, qui ont été évaluées à 1 tonne par an (humides).

La quantité annuelle d'hydrocarbures s'échappant du débourbeur-déshuileur pour ce site de déconstruction de référence a quant à elle été calculée en tenant compte de la superficie drainée et de la pluviométrie annuelle moyenne en France, soit une valeur maximale de rejet en hydrocarbures de 1,7 kg/an. Cette valeur est certainement très surestimée par rapport à la réalité puisqu'elle suppose que la limite supérieure de rejet est atteinte en permanence.

Par manque de données mesurées sur le terrain, nous n'étudierons pas les rejets autres que les hydrocarbures. Des

mesures ultérieures de ces substances permettront de compléter cette étude.

Effluents gazeux

Il s'agit des effluents gazeux dus à la consommation de gasoil (engins de chantier, chauffage) (cf. *Généralités*).

Transport des pièces, fluides et batteries extraits par le déconstructeur

Les pièces démontées sont supposées être revendues à la clientèle (particuliers, garages, assurances, etc.) directement depuis le magasin situé sur le site de déconstruction. Nous n'étudierons donc pas le transport de ces pièces. De même, le transport des fluides et batteries ne sera pas pris en compte car cette étape du traitement ne sera pas remise en cause et restera donc commune à tous les scénarios alternatifs étudiés par la suite (limites du système).

Transport direct des carcasses du déconstructeur au broyeur (transport T2)

D'après l'expérience de plusieurs déconstructeurs, 12 carcasses aplaties au grappin peuvent être empilées par benne de 30 m³ et la distance moyenne séparant un déconstructeur d'un broyeur est de 100 km environ.

Transport par l'intermédiaire d'un ferrailleur/récupérateur de référence (transport T3)

Nous avons choisi un petit récupérateur classique, dont le rôle consiste à collecter les épaves, mais aussi les autres ferrailles locales ou FAB (ferrailles à broyer) et à les livrer à un broyeur. Il ne possède pas de presse.

Le récupérateur modélisé réalise lui-même, au cours de la même tournée, la collecte des carcasses chez les déconstructeurs et celle des FAB locales, et les livre directement au broyeur. En moyenne, les déconstructeurs font appel à un récupérateur pour 30 % de leurs tonnages de carcasses (IND, 98, 1).

La collecte des carcasses de VHU et des FAB s'effectue par camions-bennes de 30 m³ contenant 15 t de produit. Le récupérateur est en général peu éloigné du déconstructeur chez lequel il collecte les carcasses mais il doit effectuer tout un circuit pour collecter d'autres FAB, si bien que la distance finale parcourue jusqu'au broyeur a été estimée à environ 150 km.

Broyeur de référence

Alimentation du broyeur

Le broyeur de référence choisi est un Lindeman Zerdirator de 1250 cv (LIN, 94), modèle représentant 65 à 70 % du parc français actuel, ce parc comprenant environ 49 broyeurs en activité. La ligne est munie d'un tambour magnétique pour l'extraction des métaux ferreux, ou E40, qui seront valorisés en aciérie électrique. Nous ne prendrons pas en compte la filière convertisseur (ou aciérie à l'oxygène) dans le scénario de référence, celle-ci n'utilisant que 25 % des ferrailles à recycler. Un tri manuel sur la bande des métaux ferreux permet également d'extraire les bobines de cuivre

et les morceaux de pneumatiques.

Nous supposons que le broyeur ne possède pas de tri par induction, et donc que les refus de tri magnétique, constitués de métaux non ferreux mélangés à des résidus de broyage lourds, partent directement en flottation. Enfin, tous les résidus de broyage légers, ou « fluff », iront en décharge, ce qui représente 95 % des cas actuellement.

Nous considérerons dans toute l'étude une alimentation moyenne classique de broyeur français, à savoir 60 % de VHU et 40 % de FAB en pourcentages massiques (données Sofival 1997 et Federec 1996). La capacité effective de broyage retenue est de 30,5 t/h (ZAR, 98, 4) et non 40 t/h, qui est la capacité théorique moyenne indiquée par le constructeur. Cette différence reflète bien le suréquipement de la France en broyeurs, qui fonctionnent presque tous en sous-capacité.

Les autres engins utilisés sur le chantier comprennent une grue, deux pelles hydrauliques, un chargeur et un chariot élévateur. Les huiles et graisses d'entretien ont été négligées dans le bilan matière.

Proportion et composition des différentes fractions issues du broyeur

Les proportions des fractions issues du broyeur ont été estimées à partir des résultats de plusieurs campagnes de broyage (ZAR, 98, 1 et ISA, 96). Les métaux ferreux (ou E40) sont destinés aux aciéries électriques, les métaux non ferreux (ou MNF) et résidus de broyage lourds acheminés sur des sites de flottation et les résidus de broyage légers (ou fluff) mis en CET de classe 2.

Afin de simplifier les flux, les bobinages de cuivre extraits manuellement de la bande des métaux ferreux ont été comptabilisés avec les métaux non ferreux destinés à la flottation. Ils ne représentent que 0,2 % de l'alimentation du broyeur (ZAR, 98, 1).

En ce qui concerne le fluff, plusieurs sources bibliographiques ont permis de dresser sa composition moyenne pour une alimentation classique de broyeur (PSA, 91 et DEL, 96; APM, 96; ROJ, 97; ZAR, 98,1; DIS, 97). Les résidus de broyage, aujourd'hui mis en décharge pour la grande majorité d'entre eux, font l'objet de recherches pour une éventuelle valorisation énergétique. Nous avons donc estimé le pouvoir calorifique inférieur du fluff de notre étude à 15 000 kJ/kg (DEL, 96; ROJ, 97; ZAR, 98,1).

Énergie consommée par la ligne de broyage

L'ensemble de la ligne de broyage et de la grue consomme annuellement 2,05 millions de kWh. La consommation de gasoil des engins de chantier est estimée à 56 300 l/an.

Eaux de procédé et eaux pluviales

Afin de respecter les arrêtés préfectoraux des broyeurs, les eaux de lavage et les eaux pluviales sont collectées dans un bassin tampon de 200 m³, puis traitées dans un débouilleur-déshuileur. Nous avons estimé à environ 43 kg la quantité d'hydrocarbures rejetés annuellement et à 200 kg/an celle d'hydrocarbures retenus dans le déshuileur.

Par manque de données mesurées sur le terrain, nous n'étudierons pas les autres effluents liquides.

Effluents gazeux et poussières

Les pertes au broyage sont estimées à 0,3 % (ISA, 96 et ROJ, 97). Il s'agit de particules fines qui retombent en grande partie au sol et sont régulièrement balayées pour être mélangées avec le fluff et enfouies en CET de classe 2. La fraction effectivement rejetée dans l'atmosphère n'est à ce jour pas déterminée. Pour l'estimer, nous nous appuyons sur l'arrêté préfectoral d'un broyeur de 1250 cv qui limite les rejets à 3,6 kg/h.

Les effluents gazeux éventuels liés à l'élévation de température lors de l'opération de broyage n'ont pu être pris en compte faute de données.

Les rejets gazeux des engins de chantier ont été estimés sur la base de leur consommation de gasoil (56 300 l/an).

Transport du broyeur à l'aciérie (transport T4)

La plupart des broyeurs chargent le E40 sur des wagons et le livrent à l'aciérie par trains complets contenant environ 1200 tonnes de ferrailles. Au vu de la répartition des broyeurs français et des aciéries, nous nous sommes basés sur une distance broyeur-aciérie de 250 km.

L'aciérie elle-même sort de notre système d'étude, car cette étape sera commune à tous les scénarios alternatifs.

Transport du broyeur au flotteur (transport T5)

Le transport du mélange MNF + RB lourds s'effectue par camions de 55 à 60 m³ de charge utile 25 t. Nous avons modélisé le scénario de référence en considérant qu'il n'existait que 5 flotteurs du type de celui décrit au paragraphe *Flotteur de référence*, chacun étant alimenté par environ 9 broyeurs, et nous avons maximisé la distance moyenne les séparant en l'estimant à 200 km.

Transport du broyeur au CET de classe 2 (transport T6)

Le transport s'effectue en général par camions de 70 à 80 m³ permettant de transporter environ 20 tonnes de fluff. Nous avons estimé la distance moyenne broyeur-CET à 75 km. Elle est légèrement supérieure à celle de 50 km proposée par le GIBR (GAU, 97) mais tient compte de la raréfaction actuelle des sites d'enfouissement.

CET de classe 2 pour le fluff

Le fluff, mélangé aux poussières de broyage, est considéré comme un déchet industriel banal assimilable aux ordures ménagères et enfouie en CET de classe 2. Sa composition le rend difficilement compressible, et sa densité en décharge est peu éloignée de celle en sortie de broyeur, soit environ 0,4.

Rejets liquides du CET de classe 2 dans le milieu naturel

Les résidus de broyage en décharge génèrent des lixiviats, mais ceux-ci ne sont pas directement rejetés dans l'environnement : ils subissent des traitements physico-chimiques et biologiques obligatoires dans une station d'épuration

inhérente ou extérieure au CET. Ces traitements génèrent des boues et des effluents liquides, mais aucune relation directe ne peut être établie entre la masse de RB mise en décharge et la quantité d'effluents rejetée dans le milieu naturel. Nous atteignons ici une des limites de notre étude, et nous devons nous contenter, lors de l'évaluation environnementale, du volume occupé par les déchets sans prendre en compte l'impact de leurs effluents liquides.

Biogaz générés par le fluff en décharge

Les hydrocarbures, notamment les huiles et carburants résiduels, fermentent en décharge et entraînent la formation de biogaz, essentiellement du CO₂ et du méthane. Dans notre modèle, nous avons considéré qu'il restait 3 kg d'hydrocarbures par VHU. Le volume de biogaz généré a été estimé en admettant un résultat classique qui indique que, sur la durée de vie de la décharge, soit environ 40 ans, 1 kg de carbone génère au maximum 1 litre de biogaz constitué à 60 % de CH₄ et à 40 % de CO₂. Nous en avons déduit que la mise en décharge d'une tonne de résidus de broyage générerait au maximum 4,2 g de CH₄ et 7,9 g de CO₂.

Flotteur de référence

Le flotteur effectue le tri des métaux non ferreux, mélangés aux RB lourds, issus du broyeur. La grande disparité des types de flotteurs alliée à leur faible nombre (6 en France) ne permet pas de modéliser facilement cette partie de la filière. Nous avons cependant opté pour un flotteur moyen traitant 26 000 t/an et recueilli les données d'unités de flottation de cette taille. Le flotteur de référence choisi comprend notamment :

- un système de flottation à l'eau permettant la séparation de la plupart des caoutchoucs du reste des métaux,
 - un tambour de flottation dont la liqueur dense est un mélange eau/magnétite permettant la séparation du magnésium et de l'aluminium léger du reste des métaux,
 - un tambour de flottation dont la liqueur dense est un mélange eau/ferro-silicium permettant la séparation des autres catégories d'aluminium du reste des métaux.
- Nous avons ajouté au modèle le matériel de manutention suivant : deux chargeurs, deux chariots élévateurs et un camion multibenne destiné aux besoins internes.

Dans le scénario de référence, l'aluminium est valorisé dans des raffineries françaises. Les autres MNF sont exportés dans des pays d'Asie et sortent des limites du système. Les résidus lourds (caoutchoucs essentiellement) mis en décharge. Les huiles d'entretien ont été négligées.

Proportion et composition des différentes fractions issues du flotteur

Les compositions des mélanges MNF + RB lourds ont été obtenues à partir :

- de la campagne Sofival réalisée en 1997 sur 287 carcasses de véhicules (ZAR, 98, 1),
- de la campagne Sofival réalisée en 1997 sur 101 tonnes de FAB seules (ROJ, 97),
- d'une simulation, d'après ces campagnes, d'un mélange

60 % VHU/40 % FAB

Outre différents métaux, nous obtenons une fraction « caoutchouc + plastiques » et une fraction « verre + divers ». Le mélange « caoutchoucs + plastiques » contenant une forte proportion d'élastomères, il sera grossièrement décomposé en 2/3 caoutchoucs et 1/3 plastiques. Ce mélange, que nous appellerons « RB lourds non inertes », est actuellement enfoui en CET de classe 2 (cas retenu dans notre scénario de référence), mais des recherches sont effectuées pour une valorisation énergétique. À cet effet, nous avons évalué le PCI des RB lourds à 21 300 kJ/kg (ROJ, 97 et ZAR, 98, 1). Quant à la fraction « verre + divers », inerte, elle sera enfouie en CET de classe 3. Nous l'appellerons « RB lourds inertes ».

Énergie consommée par l'unité de flottation

La consommation annuelle d'électricité d'une unité de flottation de cette taille s'élève à 600 000 kWh. La consommation de gasoil liée à l'utilisation des chariots élévateurs et des chargeurs est de 65 000 l/an.

Eaux de procédé et eaux pluviales

Les eaux de procédé et les boues de décantation utilisées dans les différents appareils de flottation sont entièrement recyclées dans le procédé lui-même. Toutefois, de l'eau est entraînée hors du process par les matières flottées, ce qui nécessite une réintroduction de 20 m³/jour dans le système.

La perte en magnétite s'élève quant à elle à 100 t/an et celle en ferro-silicium à 60 t/an. Ces pertes se retrouvent essentiellement dans les résidus lourds de flottation et sont donc éliminées, selon la même répartition que ces derniers, en CET de classe 2 et de classe 3.

Les eaux pluviales provenant des aires de stockage non couvertes sont collectées dans un bassin de rétention. Un déboureur-déshuileur limite le rejet en hydrocarbures à 5 mg/l, soit au maximum 11,5 kg/an par analogie avec les déconstructeurs et broyeurs. Les autres rejets ne seront pas étudiés par manque de données.

Effluents gazeux

Ils correspondent aux rejets des engins de chantier, qui consomment 65 000 l/an de gasoil.

Transport du flotteur à l'affineur

Ce transport s'effectue dans des camions de 55 à 60 m³, par chargements de 27 t (NOR, 98) et sur des distances extrêmement variables puisque l'aluminium peut être livré à l'étranger. Par conséquent, nous n'étudierons ni ce transport ni l'affinerie dans notre système, ce qui n'est pas gênant puisque cette étape sera commune pour tous les scénarios étudiés ultérieurement.

Transport du flotteur au CET de classe 2 (transport T7)

Les plastiques et caoutchoucs lourds sont enfouis en décharge de classe 2. Il s'agit en général de camions de 50 à 60 m³, dans lesquels 27 tonnes de produit peuvent être transpor-

tées (NOR, 98). Les autres hypothèses concernant la distance sont similaires à celles du transport T6.

CET de classe 2 pour les RB lourds non inertes

Comme pour le fluff (§ CET de classe 2 pour le fluff), nous ne considérerons que le volume du RB lourd en décharge lors de l'évaluation environnementale, et nous estimerons que chaque CET reçoit les déchets de deux flotteurs. La densité du RB lourd en décharge peut être estimée à 0,5. La quantité de biogaz générée sera négligée car les hydrocarbures imprègnent peu les résidus de broyage lourds.

Transport du flotteur au CET de classe 3 (transport T8)

La fraction « verre + divers » est considérée comme inerte et enfouie en CET de classe 3. Ce transport s'effectue par camions-bennes de 55 à 60 m³, avec une charge de 27 tonnes (NOR, 98). Par ailleurs, sachant que les CET de classe 3 sont plus nombreux que ceux de classe 2, nous considérerons que celui-ci est éloigné au maximum de 30 km du flotteur.

CET de classe 3 pour les RB lourds inertes

Nous supposons qu'il n'y a ni lixiviats ni biogaz générés dans un CET de classe 3. La densité des RB lourds inertes en décharge est voisine de 0,7 (NOR, 98).

Tableau 2 : Bilan matière-énergie global de la filière de traitement d'un VHU et de la quantité de FAB correspondante

Unité/l VHU		Unité/l VHU	
Matières entrantes		Déchets	
<i>Matières premières</i>		<i>Déchets non ultimes</i>	
Magnétite	321,0 g	Hydrocarbures	41,5 g
Ferro-silicium	192,6 g	Huiles	5 000,0 g
Eau	14 125,2 g	Liquide de refroidissement	4 000,0 g
<i>Autres matières</i>		<i>Déchets ultimes</i>	
VHU	1 035 000,0 g	Fluff + pertes broyeur	256 250,0 g
FAB	518 200,0 g	RB lourds non inertes	26 900,0 g
Gasoil	29 690,5 g	RB lourds inertes	9 900,0 g
Co-produits		Magnétite	321,0 g
Pièces	196 700,0 g	Ferrosilicium	192,6 g
Batteries	14 000,0 g		
E40	955 800,0 g	Volume déchets stockés CET 2	667,9 dm ³
Aluminium	26 650,0 g		
Autres MNF	17 500,0 g	Volume déchets stockés CET 3	14,3 dm ³
Métaux ferreux	2 500,0 g		
Effluents liquides		Énergie utile consommée	
Hydrocarbures	3,8 g	Électricité	118,6 kWh
Effluents gazeux		Gasoil	353,0 kWh
CO ₂	61 722,2 g	<i>Total énergie utile consommée</i>	<i>471,5 kWh</i>
CO	1 017,9 g		
SO ₂	50,8 g	Énergie récupérable	
NO _x	1 356,03 g	Huiles	59 kWh
HCNM	256,0 g	Fluff + pertes broyeur	1 071,1 kWh
CH ₄	21,08 g	RB lourds non inertes	159,3 kWh
Poussières	177,29 g	CH ₄ biogaz	0,015 kWh
Pb	5,7E-01 g	<i>Total énergie récupérable</i>	<i>1 289,7 kWh</i>
Cd	8,8E-04 g		
Zn	2,5E+00 g		
Vapeur d'eau	14 125,2 g		

Transport du flotteur à l'aciérie électrique (Transport T9)

Le fer résiduel extrait par les overbands magnétiques est livré en aciérie électrique par camions de 30 m³, de charge 27 t et parcourant une distance moyenne de 200 km.

Export des MNF non triés

Ce transport ne sera pas étudié, car les métaux destinés à l'exportation sortent des limites de notre système.

En conclusion, nous pouvons confronter le modèle à la réalité. Avec les hypothèses choisies, nous constatons que :

- un déconstructeur moyen traite 700 VHU/an, soit 2 400 déconstructeurs de ce type en France,
- un broyeur moyen traite l'équivalent de 34 400 VHU/an, soit 49 broyeurs de ce type en France,
- un flotteur moyen traite l'équivalent de 311 500 VHU/an, soit l'équivalent de 5,5 flotteurs de ce type en France.

Ces chiffres sont très proches de ceux que nous pouvons relever sur le terrain, à l'exception des « déconstructeurs » : si l'estimation de 2500 est correcte, elle concerne des démolisseurs qui ne sont pas tous certifiés aujourd'hui.

BILANS MATIÈRE-ÉNERGIE ET INTERPRÉTATION

Nous avons réalisé des bilans matière-énergie établis directement à partir des données d'inventaire de chaque acteur. Ils ne sont pas totalement exhaustifs, faute de données sur tous les effluents, notamment gazeux. Le tableau 2 présente le bilan matière-énergie global de la filière de traitement d'un VHU et de la quantité de FAB correspondante. Il n'est pas détaillé par acteur, mais les principales conclusions concernant ceux-ci sont présentées dans les paragraphes suivants.

Remarque : dans cet article, seuls sont présentés les bilans matière-énergie, c'est-à-dire ceux qui font apparaître la quantité d'énergie (gasoil ou électricité) utilisée dans le système. Ce type de bilan ne permet pas de tirer des conclusions sur les impacts environnementaux du système : en effet, pour cela, il faudrait réaliser des bilans matière « primaires », qui intègrent les bilans matière de la production de gasoil et d'électricité en remontant aux matières premières nécessaires à ces filières, c'est-à-dire aux flux élémentaires. Les bilans matière primaires seront présentés dans un prochain article.

Comparaison des bilans matière par VHU traité

Le CO₂ est le gaz majoritairement rejeté par la filière (il représente près de 78 % du total des effluents gazeux), suivi de la vapeur d'eau, des NO_x et du CO. Le traitement d'un VHU entraîne le rejet de 62 kg de CO₂ dans l'atmosphère. Les rejets gazeux de tous les engins de chantier réunis sont tantôt du même ordre de grandeur (exemple : CO₂), tantôt plus faibles (exemple : CO) que ceux dus aux transports intersites par camions. Globalement, il n'est pas possible de négliger les premiers par rapport aux seconds.

Les déchets ultimes, constitués par les résidus de broyage légers et lourds confondus, représentent 99,8 % des déchets solides générés par la filière et 95 % de l'énergie potentiellement récupérable.

Taux de valorisation

Afin de se référer aux objectifs de valorisation de l'accord-cadre et de la directive européenne, il est intéressant de connaître le taux de valorisation d'un VHU traité par la filière ainsi modélisée. Ce taux peut être défini comme étant le ratio (quantité valorisée)/(quantité entrante), sachant que les quantités correspondant aux FAB ne sont pas prises en compte.

Le taux de valorisation d'un VHU de référence s'élève ainsi à 81,35 %, dont 80,5 % de valorisation matière. Il se décompose de la façon suivante (tableau 3).

Tableau 3 : Taux de valorisation d'un VHU de référence

	Quantité valorisée (kg)	Pourcentage valorisé (%)	Type de valorisation
Pièces	196,7	19,0	Matière
Batterie	14,0	1,35	Matière
Huiles	5,0	0,45	Énergie
Liquides de refroidissement	4,0	0,4	Énergie
Carburant	38,0	3,7	Matière
Métaux ferreux	555,3	53,65	Matière
Métaux non ferreux	28,95	2,8	Matière
Total	841,95	81,35	

Comparaison des bilans énergétiques par VHU traité

Consommation de gasoil

La consommation de gasoil due à l'activité sur les chantiers représente 60 % de l'énergie consommée par la filière sous forme de gasoil. Comme pour les rejets gazeux (§ *Comparaison des bilans matière par VHU traité*), la simplification du modèle qui consisterait à négliger la consommation des engins de chantier devant celle des transports intersites n'est pas envisageable.

Consommation d'électricité

La consommation d'électricité représente 25 % de la consommation énergétique totale. La moitié de cette énergie électrique est utilisée pour le seul broyage d'un VHU.

Consommation énergétique totale de la filière de traitement des VHU

La consommation totale en énergie utile de la filière, ramenée au traitement d'un VHU, est de 470 kWh. Les transports intersites représentent 35 % de l'énergie totale consommée.

Énergie récupérable de la filière de traitement des VHU

L'énergie utile consommée par la filière pour son fonction-

nement s'élève à 470 kWh par VHU traité. Par ailleurs, l'énergie potentiellement récupérable de la filière, c'est-à-dire celle contenue dans les produits non valorisés ayant un pouvoir calorifique (huiles, résidus de broyage, biogaz des décharges), s'élève à 1 290 kWh par VHU traité.

Afin de comparer ces deux énergies, il est nécessaire de prendre en compte les rendements énergétiques des éventuels procédés de valorisation de ces produits. Or, nous savons que le rendement le plus défavorable correspond à une production d'électricité et peut être estimé à environ 0,3. Même dans ce cas le plus défavorable, la filière dégagerait donc une énergie récupérable de 390 kWh, pratiquement égale à celle consommée pour son propre fonctionnement.

CONCLUSION

Après avoir défini un scénario de référence de traitement des VHU, nous avons pu confronter notre modèle à la réalité, et nous pouvons considérer qu'il est bien adapté.

Le bilan matière-énergie réalisé sur le scénario de référence, qui se veut être le plus représentatif de la situation en France actuellement, a abouti aux résultats suivants :

- le taux de valorisation matière de la filière (recyclage et réemploi) est de 81,35 %, dont plus de 80 % de valorisation matière. Les objectifs 2006 de la directive européenne seraient donc atteints,

- la consommation énergétique due à l'activité sur les chantiers est supérieure à celle des transports intersites,

- la valorisation énergétique des produits aujourd'hui non valorisés permettrait de dégager presque autant d'énergie que la filière n'en consomme.

La suite de l'étude va consister à comparer, d'un point de vue environnemental, notre scénario de référence à d'autres scénarios envisageables et ceci au regard des objectifs de la directive européenne.

* **Jean-Michel Boulmier, Aline Grapin,**

Industrielle nationale de réemploi automobiles (Indra) - 17, avenue Henri Barbusse - BP 357 - 38308 Bourgoin-Jallieu cedex

** **Patrick Rousseaux,**

Insa de Lyon - Bâtiment 404 - 20, avenue Albert Einstein - 69621 Villeurbanne cedex

Bibliographie

- (AFN, 96) Afnor Véhicules routiers – Conception des véhicules en vue de l'optimisation de leur valorisation en fin de vie. Norme XP R 10-402, juillet 1996, 27 p.
- (APM, 96) APME European Assesment of Plastics Waste from End of Life Vehicles, Current Situation and Forecast 2000, 2005, 2010. 1996, 143 p.
- (CAS, 97) De Castelnau, B., Debar, P.L. *Le parc automobile français en France 1990-1996*. Comité des constructeurs français d'automobiles, Département économie et statistiques, avril 1997, 13 p.
- (CHA, 96) Chapelle, A. (Syndicat des producteurs de matières plastiques) *L'accord-cadre sur le traitement des VHU : une opportunité pour les matières plastiques ?*, Résumé des conférences du colloque Ademe/SIA : Recyclage automobile : vers une valorisation totale, Paris, 7 et 8 octobre 96, 10 p.
- (COU, 92) Courly (Communauté Urbaine de Lyon), Rhônalénergie, Commission des communautés européennes (DG XVII) Polyen – *Analyse des émissions de pollution liées à l'énergie dans l'agglomération lyonnaise*. Rapport final, volume II, mars 1992, 288 p.
- (DEL, 96) Del Vecchio, J.M. *Les résidus de broyage automobile (RBA) – Leur valorisation énergétique*, Résumé des conférences du colloque Ademe/SIA : Recyclage automobile : vers une valorisation totale, Paris, 7 et 8 octobre 96, 18 p.
- (DIS, 97) Disler W., Dr Keller C. *Co-incineration of non metallic automobile shredder waste* (Resh in solid waste incineration plants), R'97 Congress Proceedings – Thermal processes : general schemes, special processes, energy recovery, metallurgy, 1997, Vol. 5, p. 69-79.
- (FED, 97) Federec, *Commission des broyeurs installations de production de ferrailles broyées existantes en France*, 03/02/1997, 4 p.
- (FRI, 94) Frischknecht R., Hofstetter, P., Knoepfel I. (Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich), Dones S R., Zollinger E. (Paul Scherrer Institut, Villigen/Würenlingen) *Ökoinventare für Energiesysteme – Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Office fédéral de l'énergie, mars 1994, annexe B : Transporte und Bauprozesse.
- (GAU, 97) Gauthier, C. *Données générales sur l'activité broyage en France - Poids du GIBR – Évolution de 1993 à 1996*, mise à jour 12/97. Document interne GIBR, 1997, 9 p.
- (GRA, 99) Grapin A. *Étude environnementale, économique et sociale de la filière de traitement des VHU*. Rapport interne INDRA, 1999, 150 p.
- (HAB, 91) Habersatter, K. *Bilan écologique des matériaux d'emballage - État en 1990*. Cahier de l'Environnement n° 132 - Déchets. OFEFP, 1991, 167 p.
- (HAB, 98, 2) Habersatter, K., Fecker, I. *Inventaires écologiques relatifs aux emballages*, Vol. II. Cahier de l'Environnement n° 250/II - Déchets. OFEFP, 1998, p. 327-564.
- (IND, 98, 1) Indra Base de données techniques sur 250 déconstructeurs du réseau Indra, 1998.
- (ISA, 96) Isac (Instance de suivi de l'accord-cadre français) *Campagne de broyage de VHU*, Données internes ISAC, 1996.
- (ISO, 97) Iso Management environnemental – *Analyse du cycle de vie – Principes et cadre*. Norme NF EN ISO 14040, septembre 1997, 12 p.
- (JOC, 99) JOCE. (Journal officiel des communautés européennes) du 4/11/1999 Position Commune (CE) n° 39/1999 arrêtée par le Conseil le 29 juillet 1999 en vue de l'adoption de la directive 1999/.../CE du Parlement Européen et du Conseil relative aux véhicules hors d'usage (1999/C 317/03), 1999, 15 p.
- (LIN, 94) Lindemann Maschinenfabrik GmbH *Installations de déchiquetage Lindemann*, Brochure de documentation, 02/1994, 12 p.
- (MES, 99, 3) Meslem, H. *Efficacité de la dépollution – Volumes dépollués, efficacité réalisée, rendement obtenu*. Document interne Indra, 1999, 18 p.
- (NOR, 98) Norval SA Données internes, 1998.
- (PSA, 91) PSA, Direction de la Communication *Le recyclage des automobiles*, document pour l'inauguration du site CFF de Saint-Pierre de Chandieu, juin 1991, 12 p.
- (REN, 96) Renault SA, Service communication *La deuxième vie de l'automobile*. Plaque de présentation, 1996, 31 p.
- (ROJ, 97) Rojo, S. *Exploitation des résultats de la campagne de broyage Sofival sur le platine*, Données internes Sofival SA, 1997.
- (SOG, 97) Sogedac Achats Données internes Sogedac, 1997.
- (ZAR, 98, 1) Zariatti, S. *Campagne de broyage spécifique aux véhicules hors d'usage, Exploitation des résultats obtenus chez les déconstructeurs, Fréquences de démontage, Différences de masses*, Document interne Sofival SA, 1997, 36 p.