Proposition d'outils et démarches pour l'intégration de filières de recyclage de matières plastiques dans la "supply chain" automobile.

Carole Maudet-Charbuillet

▶ **To cite this version:**

Carole Maudet-Charbuillet. Proposition d'outils et démarches pour l'intégration de filières de recyclage de matières plastiques dans la "supply chain" automobile.. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2009. Français. NNT : 2009ENAM0039 . pastel-00005773

HAL Id: pastel-00005773
https://pastel.hal.science/pastel-00005773

Submitted on 17 Jun 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°: 2009 ENAM 0039

Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

T H È S E

pour obtenir le grade de

Docteur
de
l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Génie Industriel"

présentée et soutenue publiquement
par
Carole MAUDET-CHARBUILLET

le 18 Décembre 2009

PROPOSITION D'OUTILS ET DEMARCHES POUR L'INTEGRATION DE FILIERES DE RECYCLAGE DE MATIERES PLASTIQUES DANS LA SUPPLY CHAIN AUTOMOBILE

Directeur de thèse : ***Daniel FROELICH***

Co-encadrement de la thèse : ***Gwenola BERTOLUCI***

Jury :

Mickael GARDONI, Professeur, LGECO, INSA de Strasbourg	Rapporteur
Valérie LAFOREST, Chargée de recherche, HdR, SITE, Ecole des Mines de Saint Etienne.....	Rapporteur
Jacques GUILLET, Professeur, LRMP, Université Jean Monnet Saint Etienne.....	Président du jury
Fabrice MATHIEUX, Maître de Conférences, G-SCOP, INPG	Examinateur
Daniel FROELICH, Professeur, MAPIE, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
Gwenola BERTOLUCI, Maître de Conférences, LGI , Ecole Centrale de Paris	Examinateur
Frédéric VIOT, Docteur, Responsable Eco-conception, POAE	Invité
Gérard MAEDER, Professeur, Président de l'Association Française de Mécanique	Invité

Laboratoire de Modélisation, Analyse et Prévention des Impacts Environnementaux
Arts et Métiers ParisTech, centre de Paris, Institut de Chambéry

Arts et Métiers ParisTech (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers) est un Grand Etablissement dépendant du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, composé de huit centres :
AIX-EN-PROVENCE ANGERS BORDEAUX CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE CLUNY LILLE METZ PARIS

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ici toutes les personnes (collègues, amis, famille) qui par leur contribution ou leur soutien m'ont permis de mener à bien ce travail de recherche.

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement Daniel Froelich pour m'avoir proposé ce sujet de thèse mais surtout d'avoir toujours cru en moi pour terminer ces travaux.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à Gwenola Bertoluci pour ces précieux conseils, les discussions intenses et les échanges fructueux que nous avons eus tout au long de cette thèse. Son exigence à mon encontre, sa rigueur dans ses méthodes de recherche ont su faire ressortir l'originalité de ce travail. Sans elle ce mémoire ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Frédéric Viot de POAE, pour son enthousiasme sur les thématiques du recyclage qu'il a su me faire partager, pour tous les industriels qu'il m'a permis de rencontrer pour enrichir ces travaux.

Je remercie toutes les personnes qui ont accepté de juger ce travail, notamment Mickaël Gardoni et Valérie Laforest qui ont accepté la dure tâche de rapporter ces travaux.

Merci également à toutes les personnes de l'institut Arts et Métier ParisTech que j'ai côtoyées tout au long de ces années (Merci à tous les personnes du plateau « thésards », Merci Stéphane pour ta bonne humeur, Merci Charlotte pour m'avoir aidée à concilier vie de famille et vie professionnelle). Merci pour vos encouragements et votre soutien dans les moments de découragement. Un merci tout particulier à Sabine Feroul pour sa disponibilité, son écoute, son aide précieuse pour gérer le quotidien d'un travail en laboratoire. Un merci également à Alain Cornier pour m'avoir aidé à résoudre certaines situations difficiles.

Je tiens également à remercier Gérard Coffignal, directeur de l'Ecole Doctorale des Arts et Métiers ParisTech de m'avoir permis de finaliser cette thèse malgré mon parcours atypique.

J'exprime également ma reconnaissance à Danièle et Jean-Claude pour m'avoir accueillie chez eux pour que je puisse rédiger ce mémoire dans le calme et la sérénité.

Je remercie mes parents pour leur soutien et pour m'avoir donné les moyens pour réaliser ce doctorat.

Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance à Clément de n'avoir jamais douté que je finirais ces travaux et de m'avoir permis de finaliser ce mémoire en s'occupant de toutes les petites choses du quotidien.

« On commence par dire : cela est impossible pour se dispenser de le tenter, et cela devient impossible, en effet, parce qu'on ne le tente pas. »
Charles Fourier

PROPOSITION D'OUTILS ET DEMARCHES POUR L'INTEGRATION DES FILIERES DE RECYCLAGE DES MATIERES PLASTIQUES DANS LA SUPPLY CHAIN AUTOMOBILE

SOMMAIRE

INDEX DES FIGURES 10

INDEX DES TABLEAUX 14

LISTE DES ACRONYMES UTILISES DANS LE TEXTE 16

INTRODUCTION 19

CHAPITRE 1

L'ENJEU ENVIONNEMENTAL DES MATIERES PLASTIQUES

PARTIE 1 : LE RECYCLAGE DES MATIERES PLASTIQUES : UN ENJEU ENVIRONNEMENTAL POUR L'INDUSTRIE AUTOMOBILE 23

I- L'INDUSTRIE AUTOMOBILE AU CŒUR DE LA PROBLEMATIQUE ENVIRONNEMENTALE 23

I-1. L'EVOLUTION DU CONTEXTE REGLEMENTAIRE 23
I-1-1. EVOLUTION DE LA REGLEMENTATION 23
I-1-2. EVOLUTION PAR RAPPORT AU CYCLE DE VIE 24
I-2. LES ACTIONS PREVENTIVES ET CURATIVES 25

II- L'INDUSTRIE AUTOMOBILE ET LES MP 27

II-1. ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX LIES AUX MP 28
II-1-1. UNE MATIERE EN PLEINE EXPANSION DANS LES VEHICULES 28
II-1-2. LA GESTION DES DECHETS AUTOMOBILES EN FIN DE VIE 30
II-2. LES IMPLICATIONS DU RECYCLAGE DES MP AUTOMOBILES POUR LES ACTEURS DE LA SUPPLY CHAIN AUTOMOBILE 33
II-2-1. LE RECYCLAGE DES MP AUTOMOBILES : UNE ACTIVITE DE DIMENSION NON INDUSTRIELLE 33
II-2-2. L'INDUSTRIE AUTOMOBILE DOIT SE REORGANISER POUR LE RECYCLAGE DES MP .. 36

III- POAE : UN EQUIPEMENTIER AUTOMOBILE COMME UTILISATEUR ET DEMANDEUR DE MPR 39

III-1. L'ENTREPRISE POAE 39
III-2. POAE ET SA DEMARCHE ENVIRONNEMENTALE 40
III-3. UNE VOLONTE D'UTILISER DES MPR DANS DES PIECES DE STRUCTURE 42

PARTIE 2 : LES DIFFERENTS ENJEUX SOCIETAUX ASSOCIES AU CYCLE DE VIE DES MATIERES PLASTIQUES 45

I- LA PLACE DES MP DANS NOTRE SOCIETE DE CONSOMMATION 45

I-1. LES MP : DES MATIERES EN PLEINE CROISSANCE : PRODUCTION ET CONSOMMATION 45
I-2. LES DIFFERENTS TYPES D'APPLICATIONS 46
I-3. REPARTITION DES DIFFERENTES RESINES 47

II- LES ENJEUX POUR LA SOCIETE DU DEVENIR DES MP : DE LA RESSOURCE AU PRODUIT EN FIN DE VIE 49

II-1. LES RESSOURCES DE PETROLE : MATIERE PREMIERE ET SOURCE ENERGETIQUE 49
II-1-1. LA RESSOURCE : LE PETROLE 49
II-1-2. DE LA DIMINUTION VERS LA RAREFACTION DES RESSOURCES PETROLIERES 50
II-1-3. LES SOLUTIONS ALTERNATIVES 52
II-2. LES DECHETS DE MP 53
II-2-1. DEFINITION 53
II-2-2. LES SOLUTIONS ALTERNATIVES ET LEURS RESULTATS 55
II-3. D'UN ENJEU TECHNIQUE ET ECONOMIQUE A UN ENJEU SOCIETAL 61
II-3-1. L'ENJEU SOCIO-ECONOMIQUE DES MP 61
II-3-2. L'ENJEU SOCIETAL 62
II-4. BILAN DE L'IMPLICATION DES DIFFERENTES PARTIES PRENANTES 63

III- LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE 65

CHAPITRE 2

PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESE

I- POSITIONNEMENT DE LA QUESTION DE RECHERCHE 67

II- CARACTERISATION DES FILIERES DE VALORISATION 69

II-1. LA NOTION DE FILIERE 69
II-1-1. ELEMENTS CONSTITUTIFS 69
II-1-2. LES DIFFERENTS TYPES DE FILIERES 71
II-1-3. LES DIFFERENTES FORMES D'ORGANISATION 71
II-1-4. NOTRE REPRESENTATION 73
II-2. VALEURS DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES FILIERES DE MP ISSUES DE PRODUITS COMPLEXES 74
II-2-1. LES RESULTATS 74

II.2.1.B. RESULTATS ORGANISATIONNELS 76
II.2.1.C. RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX 77
II-2-2. BILAN 78

III- DE L'EMERGENCE A LA STABILITE 78

III-1. LES FILIERES DE RECYCLAGE, DES SYSTEMES DITS « EMERGENTS » 78
III-1-1. LES FREINS AU DEVELOPPEMENT DES FILIERES 79
III.1.1.A. LES CAUSES COMMUNES AUX FILIERES 79
III.1.1.B. LES CAUSES SPECIFIQUES AU RECYCLAGE DES MP 81
III-1-2. BILAN DE LA FILIERE DE RECYCLAGE DES MP 83
III-2. LES CARACTERISTIQUES DE L'EMERGENCE D'UNE INDUSTRIE 84
III-2-1. LA PHASE D'EMERGENCE D'UNE INDUSTRIE 84
III-2-2. LA PHASE D'EMERGENCE D'UNE FILIERE DE RECYCLAGE 88
III-3. LES CRITERES DE PASSAGE DE L'EMERGENCE A LA STABILITE 90
III-3-1. LES THEORIES DE L'EVOLUTION ASSOCIEES AUX SYSTEMES INDUSTRIELS 90
III-3-2. LES CRITERES D'EVOLUTION DE L'EMERGENCE A UN ETAT PLUS STABLE ET LEUR QUANTIFICATION 93
III-3-3. ENONCE DE LA PREMIERE PROBLEMATIQUE 95

IV- LES OUTILS D'ANALYSE DES FILIERES 97

IV-1. LES DOMAINES D'ANALYSE ADAPTES AUX FILIERES 97
IV-1-1. GREEN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT (GRSCM) 97
IV.1.1.A. DEFINITION 97
IV.1.1.B. LA REVERSE LOGISTICS (RL) 98
IV.1.1.C. LE GREEN PRODUCT CHAIN MANAGEMENT (GRPCM) 101
IV.1.1.D. L'ENVIRONMENTAL VALUE CHAIN MANAGEMENT (EVCM) 101
IV-1-2. BILAN 103
IV-2. LES OUTILS D'ANALYSE DES FILIERES IDENTIFIES DANS LA BIBLIOGRAPHIE 105
IV-2-1. LES CRITERES DE CLASSIFICATION DES OUTILS 105
IV-2-2. BILAN DE LA CLASSIFICATION DES OUTILS 106
IV-2-3. ENONCE DE LA DEUXIEME PROBLEMATIQUE 108

V- L'UTILISATION DE MPR : UNE COMPOSANTE NON DEFINIE DES OUTILS DE CONCEPTION POUR LA FIN DE VIE 111

V-1. LES OUTILS DE CONCEPTION POUR X (CPX) 111
V-2. INTEGRATION DE MPR EN CONCEPTION DE PRODUITS AUTOMOBILES 115

VI- CHANGEMENT ORGANISATIONNEL ET ACQUISITION DE CONNAISSANCES 118

VI-1. INTEGRATION DE LA MPR : UN CHANGEMENT ORGANISATIONNEL 118
VI-1-1. LA NOTION D'INTEGRATION DE LA MPR 118
VI-1-2. LES FLUX D'INFORMATIONS CONCERNES PAR CETTE INTEGRATION 119
VI-2. CREATION ET CAPITALISATION DE CONNAISSANCES 122
VI-2-1. PROCESSUS DE CREATION 122
VI-2-2. PROCESSUS DE CAPITALISATION 125
VI-2-3. ENONCE DE LA TROISIEME PROBLEMATIQUE 126
VI-2-4. SYNOPTIQUE DE L'ANALYSE DE LA QUESTION DE RECHERCHE 127

CHAPITRE 3

PROPOSITION D'UNE DEMARCHE ET OUTIL POUR L'INTEGRATION DES FILIERES DE RECYCLAGE DE MP DANS LA SUPLLY CHAIN AUTOMOBILE

I- UNE DEMARCHE GLOBALE D'INTEGRATION DE LA MATIERE RECYCLEE EN CONCEPTION 128

I-1. REPONSE A L'HYPOTHESE 3 : HYPOTHESE D'INTEGRATION PAR LA CREATION ET LA CAPITALISATION DE CONNAISSANCES EXPLICITES 128
I-2. DAIMRE : UNE DEMARCHE D'INTEGRATION DE LA MATIERE RECYCLEE BASEE SUR L'ACQUISITION DE CONNAISSANCES EXPLICITES 129
I-2-1. PRINCIPE 129
I-2-2. LA DEMARCHE 130

II- UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR LE DEVELOPPEMENT DES FILIERES VERS UN REGIME STABLE 145

II-1. REPONSE AUX HYPOTHESES 1 ET 2 : MISE EN PLACE D'UN MODELE DYNAMIQUE BASEE SUR UNE VISION SYSTEMIQUE POUR LA MESURE DES PERFORMANCES ET UNE AIDE A LA DECISION POUR L'EMERGENCE DES FILIERES 145
II-2. ODEFIRE : OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR L'EMERGENCE DE FILIERES DE RECYCLAGE DES MP 146
II-2-1. PRINCIPE, CADRE D'APPLICATION 146
II-2-2. LE SYSTEME DE REFERENCE D'ANALYSE D'ODEFIRE: TYPOLOGIE DE LA FILIERE 148
II-2-3. CONSTRUCTION DE L'OUTIL DYNAMIQUE 154
II-2-4. MESURE DES PERFORMANCES 163
II-2-5. SYNOPTIQUE DES REPONSES APPORTEES A LA PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE 165

CHAPITRE 4

EXPERIMENTATION

I- DEMARCHE POUR L'INTEGRATION DE LA MPR DANS DES PRATIQUES DE CONCEPTION D'UN EQUIPEMENTIER AUTOMOBILE 166

I-1. MISE EN ŒUVRE DE LA DEMARCHE DAIMRE AU SEIN DE POAE 166
I-1-1. OBJECTIFS 166
I-1-2. LE PROJET PILOTE 166
I-1-3. LE DEROULEMENT DE LA DEMARCHE 167
I-2. RESULTATS DE L'INTEGRATION DE PP-FVR DANS LES FAT 168
I-2-1. Φ1 : HOMOLOGATION ET REFERENCEMENT DU PP-FVR 168
I-2-2. Φ2 : INDUSTRIALISATION DU PP-FVR DANS LES FAT 173
I-2-3. Φ3 : INTEGRATION DES CONNAISSANCES, UN PAS VERS LA STANDARDISATION DE L'UTILISATION DE MPR 174
I-2-4. ANALYSE DES RESULTATS 174
I-3. REPONSE A LA PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE ET DE RECHERCHE 175
I-3-1. POAE 175

I-3-2. REPONSE A LA PROBLEMATIQUE 3 177
I-3-3. CONCLUSION 178

II- AIDE AU DEVELOPPEMENT DES FILIERES A L'AIDE DE L'OUTIL ODEFIRE 179

II-1. MODELISATION DE LA FILIERE DE RECYCLAGE DU PP ISSU DE VFV 179
II-1-1. OBJECTIFS DE L'EXPERIMENTATION 179
II-1-2. LES ETAPES DE L'EXPERIMENTATION 179
II-1-3. LE MODELE DE DEPART 180
II-1-4. VALIDATION DES PERFORMANCES DE FIREPPAUTOPC 182
II-2. AMELIORATION DES PERFORMANCES DE LA FILIERE POUR REPONDRE AUX ATTENTES DES PARTIES PRENANTES 184
II-2-1. LES ATTENTES DES PARTIES PRENANTES 184
II-2-2. CHOIX DES PARAMETRES D'ANALYSE 184
II-2-3. LES PLANS D'EXPERIENCE 188
II-2-4. ANALYSE DES EFFETS DES DIFFERENTS PARAMETRES 188
II-2-5. CONFIGURATION D'AMELIORATION DES PERFORMANCES DE FIREPPAUTOPC 188
II-2-6. SCENARIOS D'EVOLUTION 193
II-2-7. ANALYSE DES RESULTATS 194
II-3. REPONSE AUX PROBLEMATIQUES 195
II-3-1. VALIDATION DE L'HYPOTHESE 1 195
II-3-2. VALIDATION DE L'HYPOTHESE 2 196
II-4. ANALYSE DE L'OUTIL ODEFIRE 198
II-4-1. CONCLUSIONS SUR L'OUTIL 198
II-4-2. DISCUSSION 199
II-4-3. PERSPECTIVES 200

CONCLUSION 201

BIBLIOGRAPHIE 206

ANNEXES 219

INDEX DES FIGURES

Figure 1: Bilan réglementaire environnemental impactant l'industrie automobile européenne (synthèse issue des travaux de (Le Pochat 2005, The European Commission , Viot 2001, ACEA)) 24

Figure 2: Quelques mesures environnementales européennes concernant l'automobile adapté de (Jacqueson 2002) 25

Figure 3: Positionnement de l'industrie automobile vis-à-vis des différentes démarches environnementales selon (Millet et al. 2001) 26

Figure 4: a) Evolution de la part de MP dans les véhicules de 1960 à aujourd'hui (Duval 2007b), b) Composition d'un véhicule en 2005 29

Figure 5 : Evolution du taux de recyclage en fonction du temps et de la composition des véhicules (synthèse issue des publications de (Günther et al. 2008, François 2004)) 31

Figure 6: Objectifs de la directive et efficacité technique de la valorisation des VFV (Günther et al. 2008, François 2004, François 2003, Del vecchio et al. 2004) 32

Figure 7: Notre représentation de la gestion des VFV 34

Figure 8:Filière de recyclage des MP automobiles. Les données présentées sont issues d'entretiens réalisés auprès des acteurs de la filière en 2006 et de documents internes à l'entreprise POAE (Vera et al. 2004). 35

Figure 9: Bilan des champs de contraintes liées aux MP s'exerçant sur la Supply Chain automobile 37

Figure 10: Illustrations de composants automobiles conçus et fabriqués par POAE 40

Figure 11: Evolution de l'utilisation de PPR (PolyPropylène Recyclé), données obtenues auprès de Frédéric Viot, responsable éco-conception et recyclage de POAE. 42

Figure 12: Solutions globales demandées par POAE (Maudet et al. 2005) 43

Figure 13: Synoptique de la partie 1 44

Figure 14: Evolution de la production mondiale de MP de 1950 à 2006 (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008) 46

Figure 15: Les domaines d'application des MP (ADEME 2006, PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008) 47

Figure 16:Répartition de la consommation de différentes MP en Europe et en France adaptée de (ADEME 2006, PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008) 48

Figure 17: Prix indicatifs et places sur le marché mondial des principales MP (Peck 2003) 49

Figure 18: Etapes de transformation des MP des matières premières au produit fini 50

Figure 19: Objectifs exigés par les directives VHU, DEEE et emballages en MP 55

Figure 20: Evolution des voies de traitement des déchets de MP en Europe de 1996 à 2006 adaptée de (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008, APME 2004) 58

Figure 21: Taux de recyclage et de valorisation énergétique de déchets MP post-consommation en fonction de leur application pour quelques pays d'Europe de l'Ouest en 2004 (Consultic marketing and industrieberatung GmbH 2005) 58

Figure 22: Taux de recyclage matière par MP TP en France en 2005 59

Figure 23: Cycle de vie des MP de l'extraction à la fin de vie: a) en EU25+N/CH en 2006, b) en France en 2004-2005 60

Figure 24: Evolutions comparées du cours du pétrole et des principales résines MP de 1996 à 2006 (ADEME 2006). 61

Figure 25: Les différentes parties prenantes impliquées dans la gestion des MP 64

Figure 26 : Représentation des acteurs de la valorisation des MP 64

Figure 27: Synoptique de la partie 2 66

Figure 28: Positionnement de la problématique de recherche au sein du domaine du génie industriel 67

Figure 29: Synoptique du chapitre 2 68

Figure 30: Schémas simplifiés des trois grands modes d'organisation des filières 72

Figure 31: Notre proposition d'axes de caractérisation d'une filière de valorisation 74

Figure 32: Structure d'une filière en fonction de sa logique produit et matière 80

Figure 33: Opposition recyclage matière- valorisation matière 81

Figure 34: Position des recycleurs face au marché de la matière vierge 83

Figure 35: Evolution du nombre de dépôts de brevets concernant le démantèlement et le recyclage des VFV de 1991 à 2004 (Viot 2004) 89

Figure 36: Illustration du cycle de vie technologique selon Abernathy (Le Dortz 1995) 92

Figure 37: La mesure du passage de l'émergence à la stabilité par la mesure des performances 95

Figure 38: Classification de la littérature existante sur le GrSCM adaptée de (Srivastava 2008) 98

Figure 39: Processus inclus dans la notion de RL adapté de (De Brito et al. 2004) et (Srivastava 2008). 100

Figure 40: Acteurs et flux concernés par la chaîne de RL traduit de (Fernandez 2003). 100

Figure 41: Bilan des flux intervenant dans un EVCM interne à une organisation industrielle traduit et adapté de (Ishii et al. 2000) 102

Figure 42: Exemple d'un EVCM externe traduit de (Rose et al. 2000) 102

Figure 43: L'analyse des filières, un domaine à l'intersection des domaines de recherche sur la gestion de l'environnement 103

Figure 44: Bilan de notre classification des outils de la littérature en fonction du produit traité et du type d'acteurs pris en compte 106

Figure 45: Bilan de l'évolution des approches de CpFV dans l'industrie automobile (Mathieux 2002, François 2003, Coppens 1999, Villalba et al. 2004, Tonnelier 2002, Ferrao et al. 2006b, Renard 2001) 111

Figure 46: Classification des outils et méthodes de CpFV en fonction du procédé pris en compte (Mathieux 2002) . 112

Figure 47: Intégration des MP vierges et MPR dans le processus de conception d'un équipementier automobile 117

Figure 48: Evolution préconisée pour l'utilisation de MPR dans l'industrie automobile 117

Figure 49: Les différents niveaux (métier, processus) des flux d'informations et nature de ces flux pour l'intégration de la MPR en conception. 120

Figure 50: Flux d'informations environnementales entre les différents métiers impliqués dans un projet automobile. 120

Figure 51: Les deux grandes catégories de connaissances de l'entreprise selon (Grundstein 1998) 124

Figure 52: Evolution dynamique des connaissances (Le Pochat 2005) 125

Figure 53: Processus de capitalisation des connaissances adapté de (Grundstein 1998, Gardoni et al. 2005). 126

Figure 54: Synoptique de la démarche proposée pour une intégration réussie de la matière recyclée par acquisition de connaissances induisant les changements organisationnels nécessaires 131

Figure 55: Synoptique de Φ1a 133

Figure 56: Synoptique de Φ1c 135

Figure 57: Evaluation des capacités des recycleurs et comparaison avec les caractéristiques matière- Processus de création de la fiche fournisseur-matière 135

Figure 58: Procédure de calcul de la note de recyclage associée à une matière donnée (M_x). NMx=note de recyclage finale. 136

Figure 59: Note de recyclage de différentes matières en fonction des notes de chaque critère. 138

Figure 60: Intégration de la note de recyclage pour le référencement de la matière. 138

Figure 61: Schéma des flux d'informations entre les acteurs de Φ1. 139

Figure 62: Modification apportées au déroulement du projet automobile par la prise en compte des informations concernant la matière recyclée pour son intégration. 140

Figure 63: Flux de connaissances créées par l'intégration de la matière recyclée dans le projet 142

Figure 64: Standardisation de l'utilisation de matière recyclée par l'intégration de connaissances au sein de l'entreprise 144

Figure 65: Niveaux d'analyse à prendre en compte dans l'outil d'analyse des performances des filières 146

Figure 66: Synoptique de la construction d'ODEFIRE 148

Figure 67: Définition de la typologie de filières, i=le métier considéré, j=le n° de la classe 149

Figure 68: Etapes génériques de création de la typologie d'une filière de valorisation 150

Figure 69: Processus de création des classes pour un Métier i à partir des caractéristiques différenciatrices. 151

Figure 70: Les quatre composantes d'une organisation selon (Livian, 2001) 152

Figure 71: Typologie de la filière de recyclage des MP issus de composants automobiles- TypPPauto 154

Figure 72: Création des classes pour la filière de recyclage des MP issus de composant automobile, N_D=2000 entreprises, N_B=61 entreprises, N_R=83 entreprises [ADE, 04]. 155

Figure 73: Bilan des caractéristiques de la filière sélectionnée: la filière de recyclage du PP issus de produits automobiles fin de vie en France 156

Figure 74 : Modèle d'une activité et de ses composantes par le formalisme IDEF0 157

Figure 75: Description des niveaux de modélisation d'un système et des activités associées 158

Figure 76: a) Composantes du formalisme utilisé pour la construction de modèle de filière de recyclage basé sur IDEF0 (adaptable à tous type de PFV et de MP). b) Composantes du modèle de la filière de recyclage des MP automobiles (seule la composante produit des flux matière est représentée). 159

Figure 77: Article sous WITNESS@ 160

Figure 78: Machines sous WITNESS@ 162

Figure 79: Le modèle final sous WITNESS@ 163

Figure 80: Définition des indicateurs et paramètres du modèle utilisés pour évaluer les performances techniques et économiques (la définition des acronymes est dans le Tableau 26). 164

Figure 81: Déroulement de l'expérimentation pour la validation de DAIMRE comme démarche d'intégration de MPR chez un équipementier automobile 166

Figure 82: Déroulement de DAIMRE au sein de POAE 168

Figure 83: Production du PP-FVR 168

Figure 84: Fiche matière du PP-FVR 170

Figure 85: Création de la fiche Recycleur-PP-FVR 170

Figure 86:Note de recyclage pour le PP-FV 171

Figure 87: Référencement du PP-FVR : la fiche PP-FVR-FAT-Recycleur 172

Figure 88: Solution d'éco-conception globale développée pour les FAT par l'intermédiaire de DAIMRE 176

Figure 89: Evolution obtenue par DAIMRE pour l'utilisation du PP-FVR au sein de POAE 177

Figure 90: FiRePPAutoPC régionale 181

Figure 91: Cahier des charges de la filière modélisée 182

Figure 92: Effets des paramètres sur $M_{D,Démolition,VFV}$ *et* $M_{R,Recyclage,PP}$ 190

Figure 93: Approche globale d'intégration des filières de recyclage dans la Supply Chain 203

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1: Exemples d'actions initiées par l'industrie automobile pour la prise en compte de l'environnement __ 28

Tableau 2: Propriétés d'usage des MP dans l'industrie automobile (Viot 2001, Duval 2007a) _____ 29

Tableau 3: Répartition des résines utilisées dans l'industrie automobile en Europe en 2003 (Duval 2007b) et exemples d'applications (Viot 2001) _____ 30

Tableau 4: Exemples d'actions conduites par POAE en termes d'éco-conception et de recyclage (Maudet et al. 2005) _____ 41

Tableau 5: Les alternatives au pétrole en tant que matière première des MP _____ 52

Tableau 6: Implications et attentes des parties prenantes dans la gestion des enjeux des MP _____ 65

Tableau 7: Définition des activités principales d'un circuit de valorisation _____ 71

Tableau 8: Avantages et inconvénients des différents scénarios _____ 76

Tableau 9: Les différentes caractéristiques des régimes technologiques issue de (Larrue 2002, Marsili 1999) __ 86

Tableau 10: Principaux régimes technologiques rencontrés pour des systèmes industriels adapté de (Marsili 1999) _____ 87

Tableau 11 : Développement des technologies de tri de MP (ADEME 2003b) _____ 89

Tableau 12: Régime technologique des filières de recyclage _____ 90

Tableau 13: Profil de l'émergence des filières _____ 90

Tableau 14: Avantages et inconvénients des différentes théories d'évolution d''une industrie _____ 92

Tableau 15: Illustration des critères d'évolution maîtrisables (Tahon 2003, Fenneteau 1997, Porter 1985) _____ 94

Tableau 16: Valeurs actuelles et valeurs cibles des critères d'évolution de la filière de recyclage des MP _____ 96

Tableau 17: Comparaison des différents concepts prenant en compte la valorisation des produits adaptée de (Seuring 2004) _____ 104

Tableau 18: Bilan des critères de classification des outils _____ 106

Tableau 19: Classification des outils en fonction de différents critères (60% des outils sont issus de la RL) ___ 110

Tableau 20: Axes de classification des méthodes de CpFV adaptés de Mathieux (Mathieux 2002) _____ 114

Tableau 21: Types d'informations environnementales transitant entre les différents métiers adaptés de (Jacqueson 2002) et (Maudet et al. 2006) _____ 121

Tableau 22: Correspondance entre les éléments de l'entreprise modifiés par l'intégration de la MPR et les 4 composantes de l'organisation de Livian, adaptée de (Le Pochat 2005) _____ 123

Tableau 23: Critères de notation et poids associés- Valeur des critères et notes associées. _____ 137

Tableau 24: Exemples de critères et des caractéristiques associées _____ 153

Tableau 25: Carcatéristiques générales et différenciatrices des différents métiers de la filière _____ 154

Tableau 26: Caractéristiques génériques des différents flux à décliner en fonction de l'acteur, du procédé et de la matière ou produit considéré _____ 160

Tableau 27 : Propriétés mécaniques du PP-FVR en fonction du PP-FV vierge, ☺=équivalence entre les propriétés du compound et la matière vierge _____ 169

Tableau 28: Critère de notation et poids associés- Valeur des critères et notes associées (cf. Chapitre 3). ____ 171

Tableau 29: Critères d'évaluation de la démontabilité des FAT (Maudet 2005) 172

Tableau 30: Bilan de l'intégration des connaissances liées aux MPR au sein de l'entreprise POAE 175

Tableau 31: Validation des étapes du processus de capitalisation des connaissances 178

Tableau 32: Dimensionnement des flux de pare-chocs collectables 182

Tableau 33: Performances de FiRePPAutoPC de référence. La signification des tendances est explicitée dans l'Annexe 20. 183

Tableau 34: Attentes des parties prenantes et performances associées 185

Tableau 35: Les différents niveaux des paramètres pour la construction des plans d'expérience 189

Tableau 36: Configuration de paramètres la plus favorable pour maximiser les marges: comparaison des résultats donnés par le plan et par la simulation 191

Tableau 37: Performances de FiRePPAutoPC avant et après amélioration 192

Tableau 38: Préconisations pour la mise en place de la filière de démontage des pare-chocs 193

Tableau 39 : Réponse de FirePPAutoPC par rapport aux attentes des parties prenantes 195

Tableau 40: Exemples de critères d'évolution quantifiés par ODEFIRE 196

Tableau 41 : Critères de classification de l'outil ODEFIRE 197

LISTE DES ACRONYMES UTILISES DANS LE TEXTE

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène

ACV : Analyse de Cycle de Vie

CET : Centre d'Enfouissement technique

COV : Composé Organique Volatil

CpD : Conception pour le Désassemblage

CpDV : Conception pour le Désassemblage en vue de la valorisation

CpFV : Conception pour la Fin de Vie

CpFiVa : Conception pour les Filières de Valorisation

CpMR : Conception pour la Matière Recyclée

CpND : Conception pour le Non Désassemblage

CpR : Conception pour le Recyclage

CpSV : Conception pour le Système de Valorisation

CpX : Conception pour X

DAIMRE : Démarche d'acquisition de connaissances explicites pour l'Intégration de la Matière REcyclée dans le processus de conception

DEEE : Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques

ECOV : Eco-conception pour la valorisation

EVCM : Environmental Value Chain Management ou gestion de la chaîne de valeur environnementale

ESCM : Environmental Supply Chain Management ou gestion de la chaîne de fournisseurs environnementale

FAT : Face-Avant-Technique

GCX : Gestion de la Chaîne de X

GEM : Grand ElectroMénager

GrPCM : Green Product Chain Management

GrSCM : Green Supply Chain Management

MF : Métaux Ferreux

MNF : Métaux Non Ferreux

MP : Matières Plastiques

MPFV : Matières Plastiques Fin de Vie

MPR : Matières Plastiques Recyclées

ODEFIRE : Outil d'aide à la Décision pour l'Emergence de FIlières de REcyclage des matières plastiques

PA : PolyAmide

PCM : Product Chain Management

PE : Polyéthylène

PEM :Petit ElectroMénager

PET : Polyéthylène Téréphtalate

PC : PolyCarbonate

PCM : Product Chain Management

PFV : Produits fin de vie

PLM : Product Life cycle Management

PMMA : PolyMéthacrylate de Méthyle

PP : Polypropylène

PP-FV : Polypropylène chargé avec des Fibres de Verre

PP-FVR : Polypropylène-Fibres de Verre Recyclé

PPR : Polypropylène recyclé

PR : Plastic Recycling

PS :Polystyrène

PSE : Polystyrène expansé

PU : PolyUréthane

PVC : Polychlorure de vinyle

RB : Résidus de Broyage

RBA : Résidus de Broyage Automobile

REACH :Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

RL : Reverse Logistics

RPCM : Recovery Product Chain Management

RePCM : Recycling Product Chain Management

SCM : Supply Chain Management

TD : ThermoDurcissable

TP : ThermoPlastique

VA : Véhicules Accidentés

VCM : Value Chain Management ou gestion de la chaîne de valeur

VE :Valorisation Energétique

VFV : Véhicules en Fin de Vie

VM : Valorisation Matière

VHU : Véhicules Hors d'Usage

VSM : Value System Management ou gestion du système de valeur

XCM : X Chain management

INTRODUCTION

La prise en compte des conséquences des activités humaines sur l'environnement est devenue un des critères d'évaluation des processus de décision gouvernementaux comme de ceux des donneurs d'ordre du monde industriel… Face à l'urgence de la situation, les initiatives des gouvernements et de la société civile (Sommet de Copenhague en Décembre 2009, Grenelle de l'environnement, Réglementations environnementales) se multiplient pour tenter d'apporter des réponses aux différentes problématiques environnementales. Parmi ces problématiques, la gestion des produits en fin de vie a fait l'objet de nombreuses réglementations dans le but de diminuer la quantité de déchets non traités mais surtout de déployer des solutions de recyclage pour ces produits et ainsi faire du déchet une nouvelle ressource.

Dans ce contexte, l'industrie automobile est pleinement impliquée puisqu'elle fut parmi les premières industries soumises aux réglementations sur la fin de vie au début des années 90. Pour atteindre les objectifs de la réglementation sur l'élimination des véhicules hors d'usage (VHU) et compte-tenu de l'augmentation croissante de la part de matières plastiques dans les véhicules, les producteurs doivent désormais justifier de scénarios de valorisation fiables pour leurs produits et par conséquent pour ces matières.

Par ailleurs, elle est particulièrement suscitée car elle est considérée comme disposant des moyens (organisationnels et financiers) suffisants pour répondre aux problématiques environnementales. Les pouvoirs publics attendent également d'elle, comme ce fut le cas dans la mise en place de démarches de qualité et d'organisation de la production (Juste à Temps), qu'elle assure le transfert de savoirs et savoir-faire à d'autres secteurs industriels moins structurés.

L'industrie des matières plastiques, matériau techniquement incontournable dans la société de consommation actuelle, est soumise à des pressions sociétales (pollutions induites par les industries chimiques), environnementales (épuisement du pétrole, gestion des déchets) et réglementaires (directive REACH, devenir des produits en fin de vie) fortes remettant en cause leur devenir dans la société. Que ce soit en termes d'économie de pétrole ou d'élimination des déchets, il est impératif de mettre en place des solutions techniquement, économiquement et environnementalement satisfaisantes pour les matières plastiques. Une des voies de recherche proposée est le développement de filières de recyclage palliant à la fois aux deux problématiques (économiser des ressources en faisant du déchet une matière première). Mais ces filières sont des systèmes au fonctionnement instable. Les informations disponibles sur les capacités et qualités de ces systèmes sont insuffisantes pour permettre aux institutions publiques et donneurs d'ordres privés de mettre en place des actions favorables à leur développement.

Dans ce cadre, l'industrie automobile a développé de nombreux outils de conception pour la valorisation et de conception pour le recyclage. Mais ces outils ne prennent en compte ni les matières issues des filières de recyclage, ni les contraintes et capacités de ces systèmes, les producteurs et équipementiers ne se voyant pas comme utilisateurs de celles-ci. Pour des motivations tant économiques qu'environnementales, cette intégration s'avère cependant nécessaire pour parvenir à instaurer une régularité et une qualité des approvisionnements en matières recyclées propres aux exigences du secteur automobile.

Nos travaux de thèse combinent donc à la fois :

- des approches systémiques inhérentes au traitement de la problématique de gestion de produits en fin de vie et du déploiement de filières de recyclage,
- une proposition méthodologique de structuration de l'intégration des matières recyclées dans les processus de conception.

Les objectifs de ces travaux sont :

- intégrer de façon pérenne l'usage de matières plastiques recyclées dans des applications à hautes performances mécaniques au sein des pratiques d'un équipementier automobile,
- apporter aux parties concernées par les filières de recyclage (du donneur d'ordres aux acteurs du recyclage en passant par les pouvoirs publics) les informations nécessaires pour définir les actions à mettre en œuvre afin de stabiliser ces systèmes.

La combinaison de ces deux objectifs aboutit à l'objectif principal de cette thèse : intégrer la filière de recyclage des matières plastiques dans la Supply Chain automobile.

Ce travail de recherche réalisé à l'institut Arts et Métiers Paristech de Chambéry a été initié à la demande d'un équipementier automobile (Plastic Omnium Automotive Exterior). Ce travail s'est intégré dans un projet européen Eureka[1] dont l'objectif était de développer des solutions techniques, économiques et environnementales satisfaisantes pour des pièces automobiles de structure en polypropylène chargées avec des fibres de verre. Nos travaux s'intègrent donc parfaitement dans le domaine du génie industriel

La problématique de la gestion de matières plastiques en fin de vie nous amène à faire les constats suivants :

- les filières de recyclage des matières plastiques sont des systèmes embryonnaires et instables,
- les parties impliquées dans les filières de recyclage ne disposent pas des moyens suffisants pour prendre des décisions en adéquation avec un développement efficient de ces systèmes.

L'analyse de ces constats, nous amène à poser les questions suivantes :

- pourquoi l'utilisation de Matières Plastiques Recyclées (MPR) n'est pas pérennisée dans les stratégies d'éco-conception de pièces à haute valeur ajoutée au sein de l'industrie automobile ?
- pourquoi les filières de recyclage qui ont commencé à émerger il y a une quinzaine d'années, parallèlement à l'apparition des premières réglementations sur la gestion de produits en fin de vie, ne sont pas parvenues à un état de maturité stable??

Nous souscrivons à l'idée que le frein majeur à la résolution de ces constats est la non-implication de toutes les parties concernées dans le développement des filières et par conséquent la non prise en compte de leurs différents besoins souvent divergents.

Nous proposons dans ces travaux une démarche de création et de capitalisation des connaissances explicites sur les caractéristiques des matières et des filières associées. Les connaissances sur les

[1] Projet SAFFIR: Structural Automotive Functions FIber. Reinforcements

caractéristiques des filières sont obtenues à l'aide d'un outil de modélisation de filières mis en place, dans le cadre de ces travaux, pour mesurer leurs performances technico-économiques.

Le chapitre 1 de ce mémoire s'attache à définir:

- les enjeux de la gestion des Matières Plastiques (MP) en fin de vie pour l'industrie automobile au travers de la volonté d'un équipementier d'utiliser ces matières dans des pièces de structure (contexte industriel),
- les enjeux environnementaux et sociétaux des MP au sein de notre société au travers de la pénurie de ressources pétrolières et l'augmentation croissante des déchets non traités (contexte de recherche).

Ce chapitre dont l'objectif est de faire émerger la question de recherche intrinsèquement liée à la question industrielle, a également pour but de faire comprendre au lecteur la complexité de la thématique de la gestion des produits en fin de vie et de l'utilisation de matière recyclée en conception automobile : comment permettre à la Supply Chain automobile et aux acteurs impliqués dans la gestion des matières plastiques en fin de vie d'identifier les actions adéquates pour développer des filières de recyclage en réponse au enjeux du devenir de ces matières ?

Le chapitre 2 analyse la question de recherche et met en exergue trois axes de la problématique. Premier axe : la difficulté à trouver un consensus sur la définition du terme filière est présentée. Cette difficulté représente une des premières causes d'échec du développement des filières. Ainsi nous montrons qu'un certain nombre de caractéristiques internes et externes à une filière doivent être identifiées avant toute recherche de solutions pour leur développement. La raison principale à leur non-développement est le manque d'implication de toutes les parties concernées et le manque de consensus sur le choix d'actions pour le déploiement des filières. Nous proposons ensuite une analyse du processus d'émergence et d'évolution d'une industrie, spécifiée pour le cas des filières de recyclage. Cette analyse conduit à l'identification des critères d'évolution d'une situation émergente à un état stable. Ce premier axe met en exergue **le besoin de création de connaissances sur les filières par le biais de la mesure de leurs performances**.

Second axe : une synthèse des outils de modélisation des filières existants dans la littérature est effectuée. Ces derniers sont classés en fonction des caractéristiques d'une filière présentées dans la première partie. La mise en évidence des lacunes de ces outils nous conduit à formuler la deuxième problématique sur **la nécessité d'une représentation dynamique et systémique des filières pour aboutir à une analyse efficiente**.

Troisième axe : un état des lieux sur l'intégration des MPR dans le processus de conception d'un équipementier est proposé. En s'appuyant sur les théories de capitalisation des connaissances, la troisième problématique repose sur **la création et la capitalisation de connaissances explicites sur les MPR et les filières associées afin de compléter les outils de conception pour la fin de vie**.

Dans le **chapitre 3**, nous formulons les hypothèses sur lesquelles nous nous appuyons pour proposer des démarches et outils distincts mais interdépendants pour répondre aux problématiques. D'une part, nous présentons **une démarche de création et de capitalisation des connaissances pour une intégration pérenne de la matière recyclée, démarche dénommée DAIMRE**. Les informations sur les filières sont obtenues par le biais de la création d'**un outil de modélisation des filières**

dénommé ODEFIRE. Cet outil est une **représentation dynamique et systémique des filières de recyclage des MP** issues de produits automobiles **permettant la mesure des performances des filières par le biais d'une simulation de flux**. Cet outil apporte une réponse aux deux premières problématiques identifiées.

Enfin, la phase expérimentale est explicitée dans **le chapitre 4**. Elle est composée du déploiement de DAIMRE dans un projet de conception pilote de pièces de structure pour l'intégration de MPR au sein de la société Plastic Omnium Automotive Exterior. En parallèle, ODEFIRE est expérimenté au travers de la mesure des performances de la filière de recyclage du polypropylène issu de produits automobiles en fin de vie. La réalisation d'une série de plans d'expérience conduit à l'amélioration du système d'origine en fonction des attentes des parties prenantes. A l'issue de ces plans, des scénarios d'évolution (ensemble d'actions) à mettre en place auprès des différentes parties pour améliorer les performances des filières sont établis. L'exploitation des résultats obtenus nous permet de valider l'aptitude de DAIMRE et d'ODEFIRE à répondre aux problématiques de recherche et industrielle.

La série d'expérimentations réalisée dans ces travaux ne constituent qu'une première étape dans la validation globale de cette démarche et de cet outil. Ainsi DAIMRE repose sur un processus d'itération sur plusieurs projets pour évaluer la pérennisation de l'intégration des MPR et ODEFIRE s'enrichit continuellement par la mise à jour des informations qui le constituent mais également par les changements permanents subis actuellement par le monde du recyclage. La démarche et l'outil créés dans ces travaux ouvrent ainsi des perspectives pour maintenir l'intégration des filières de recyclage des MP dans la Supply Chain automobile.

Chapitre 1
L'enjeu environnemental des matières plastiques

Partie 1 : Le recyclage des matières plastiques : un enjeu environnemental pour l'industrie automobile

La problématique environnementale est de nos jours au cœur des préoccupations à la fois sociétales et industrielles. L'industrie automobile est directement concernée par cette problématique tant par le fonctionnement de ses produits (Cabal et al. 2005) que par leurs devenirs en fin de vie. Ainsi cette industrie, sous le coup de fortes pressions réglementaires et sociétales, doit prendre en compte la gestion environnementale de son produit tout au long de son cycle de vie, soit de la conception à la fin de vie. Ces pressions concernent essentiellement l'utilisation du pétrole (ressource non renouvelable) et la gestion de leurs déchets post-consommation. Dans ce contexte, l'utilisation croissante de MP (Matières Plastiques) par le secteur automobile représente un enjeu environnemental important. Dans un premier temps, nous présenterons les incidences de la prise de conscience environnementale de la société sur l'industrie automobile. Dans un deuxième temps, nous expliciterons les raisons pour lesquelles les MP représentent un enjeu pour ce secteur. Dans un dernier temps, nous discuterons de la position exprimée par un équipementier au sein de ce contexte, ce qui nous amènera à formuler la problématique industrielle.

I- *L'industrie automobile au cœur de la problématique environnementale*

I-1. l'évolution du contexte réglementaire

L'industrie automobile a été parmi les premières industries concernées par la prise de conscience des conséquences des modes de consommation actuels sur l'environnement. Nous pouvons tout d'abord avancer comme explication à cette situation que l'automobile est un objet polluant non seulement dans l'esprit du public et dans les faits (émissions de CO_2) mais est également un produit consommateur de ressources non renouvelables et producteur de déchets insuffisamment traités à ce jour. D'autre part, l'industrie automobile s'est montrée dans le passé un secteur innovant tant dans ses produits que dans ses méthodes de gestion (on lui doit notamment le Taylorisme, le Fordisme, le Juste à Temps, les cercles de qualité, le Six Sigma, le développement de nombreux systèmes de gestion des informations techniques…) et dans sa relation aux fournisseurs (peu de fournisseurs de rang 1 face aux donneurs d'ordre) (Lung 2000, Freyssenet et al. 2000). Par conséquent cette industrie est perçue comme une industrie qui a les moyens et les capacités de développer rapidement des solutions efficaces et de transférer ses savoirs et son expérience aux autres secteurs industriels. Cependant cette dynamique habituelle de changement et d'innovation ne s'est pas vraiment retrouvée, jusqu'à présent sur le développement de solutions pour des sujets environnementaux sur lesquels la société- au travers des réglementations Européennes- attend une évolution (Kemp et al. 2000).

I-1-1. Evolution de la réglementation

La réglementation environnementale européenne est apparue il y a plus de 20 ans avec la promulgation de la directive SEVESO I (JOCE 1982). La prise en compte de l'environnement a connu un réel essor au début des années 1990 (cf. Figure 1). Parallèlement à une évolution de la

réglementation environnementale d'une vision nationale à une vision communautaire, la gestion de l'environnement a évolué d'une gestion « end-of-pipe »[2] des sites industriels à une gestion intégrée[3] (JOCE 1996) en passant par une gestion préventive (Le Pochat 2005, JOCE 1996). De la même façon, les pressions réglementaires impactant directement ou indirectement l'industrie automobile se sont transformées (cf. Figure 1). Actuellement cette industrie est l'une des plus réglementées, une quarantaine de textes donnent un cadre à sa gestion de l'environnement (The European Commission[4]).

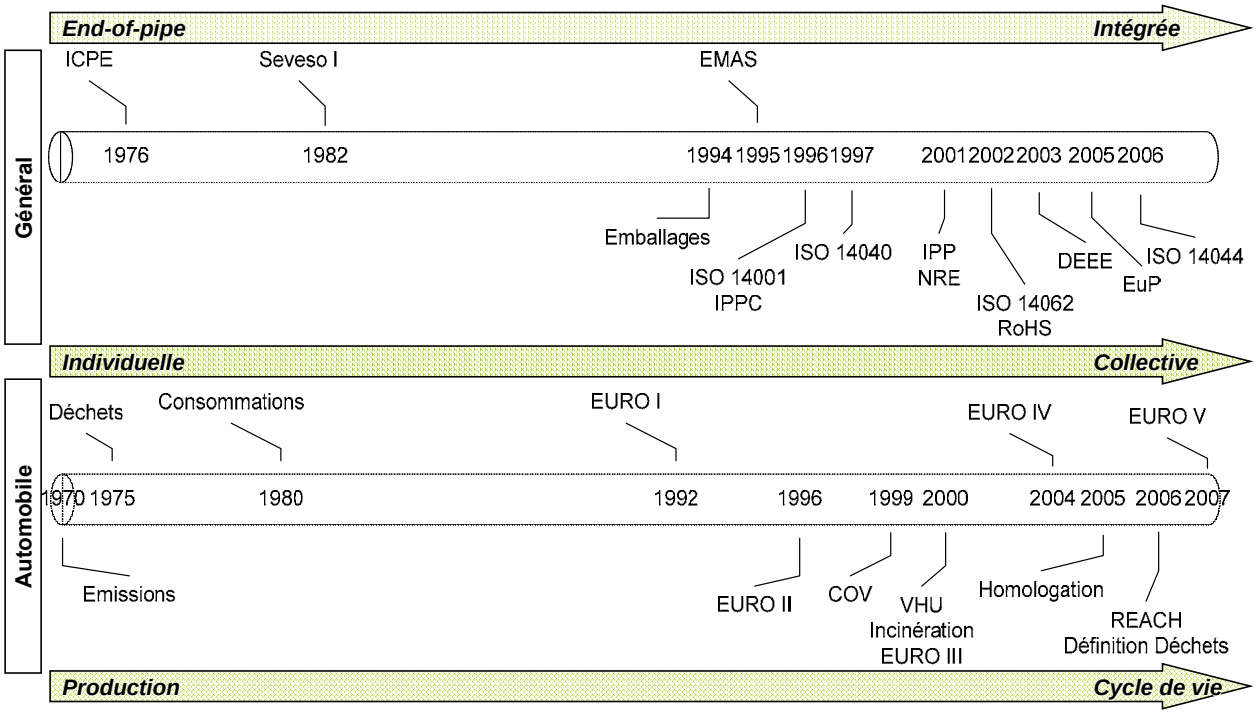


Figure 1: Bilan réglementaire environnemental impactant l'industrie automobile européenne : d'une démarche individuelle axée production à une démarche collective axée cycle de vie (synthèse issue des travaux de (Le Pochat 2005, The European Commission [5], Viot 2001, ACEA[6]))

I-1-2. Evolution par rapport au cycle de vie

Nous pouvons également remarquer que cette évolution réglementaire s'est accompagnée d'une modification des phases du cycle de vie du produit concernées par ces textes. Ainsi la prise en considération de l'environnement est passée d'une gestion « impact de l'utilisation des produits », soit d'une vision « end-of-pipe » à une gestion « impact tout au long du cycle de vie », débouchant notamment sur les principes d'éco-conception (AFNOR 2003, AFNOR 1998, CCE 2001).

---

[2] La gestion end-of-pipe (littéralement « au bout du tuyau ») est une approche curative soit un traitement des pollutions une fois les dommages sur l'environnement ou l'être humain constatés. Les dommages sont dans certains cas traités pour éviter une propagation des pollutions engendrées.

[3] Ou approche produit. C'est une approche globale associant le produit au process visant à prévenir notamment les atteintes à l'environnement (émissions de substances dangereuses, consommations énergétiques, production de déchets) et à l'homme. C'est une approche plus cohérente et moins sectorielle pour une gestion efficiente de l'environnement.

[4] The European Commission. Http://ec.Europa.eu/enterprise/automotive/directives/vehicles/index_map.Htm. 2008.

[5] The European Commission. Http://ec.Europa.eu/enterprise/automotive/directives/vehicles/index_map.Htm. 2008.

[6] European Automobile Manufacturers' Association. Http://www.Acea.be/ . 2008.

Pour l'industrie automobile, la pression réglementaire s'est exercée tout d'abord sur les questions de pollution atmosphérique par des émissions de polluants (particules, COV, NOx…)[7] (JOCE 1970, JOUE 2007) en ce qui concerne la phase d'utilisation du produit mais également sur les émissions de COV au cours de leur fabrication (JOCE 1999) notamment avec l'utilisation croissante de MP (cf. Figure 2). Depuis le début des années quatre-vingt, les réglementations se sont orientées vers les autres phases du cycle de vie telle le devenir des véhicules en fin de vie (cf. Figure 2).

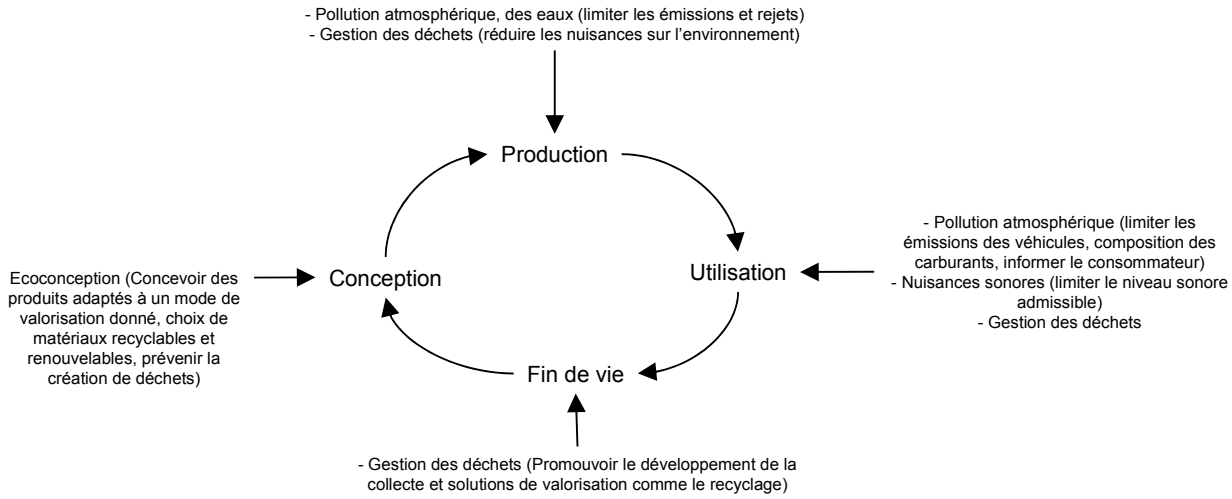


Figure 2: Quelques mesures environnementales européennes concernant l'automobile adapté de (Jacqueson 2002)

Le bilan réglementaire (cf. Figure 1et Figure 2) met en évidence la prise de conscience de plus en plus importante de la nécessité de mettre en place des systèmes de gestion adéquates des impacts environnementaux des véhicules tout au long de leur cycle de vie.

I-2. les actions préventives et curatives

Pour s'adapter à l'évolution des réglementations environnementales, les stratégies déployées par l'industrie automobile ont de même évolué.

Tout d'abord, les stratégies observées dépendent du constructeur considéré, du contexte politique national (Jacqueson 2002, IDSE-CNR 2000), de l'interprétation des textes réglementaires mais surtout de la vision de l'environnement perçue par l'exécutant de la stratégie. Ainsi (Millet et al. 2001) a proposé un positionnement des différentes stratégies déployées par les entreprises en fonction de

[7] Les normes d'émissions Euro ont pour objectif de limiter la pollution atmosphérique liée aux émissions des véhicules au cours de leur phase d'utilisation. Elles fixent des limites maximales de rejets pour différents polluants. Il existe pour le moment cinq générations de normes européennes – Euro I en 1992 à Euro VI en 2008) abaissant de façon continue les limites d'émissions (ADEME : information presse du 15 Mai 2007, les normes Euro pour limiter les émissions de polluants des véhicules neufs).

Type Véhicule	Norme	Année d'entrée en vigueur (nouveau véhicule)	CO (g/km)
Diesel	Euro I	1992	2,72
	Euro II	1996	1
	Euro III	01/2000	1
	Euro IV	01/2005	0,640
	Euro V	09/2009	0,5
	Euro VI	12/2012	0,5

Ces normes obligent la supply chain automobile à améliorer constamment les performances des véhicules incitant certains constructeurs à s'orienter vers des solutions alternatives.

la période considérée, du niveau de transformation de l'entreprise mais également en fonction de la perception de l'environnement par l'entreprise (d'une contrainte à une valeur) (cf. Figure 3).

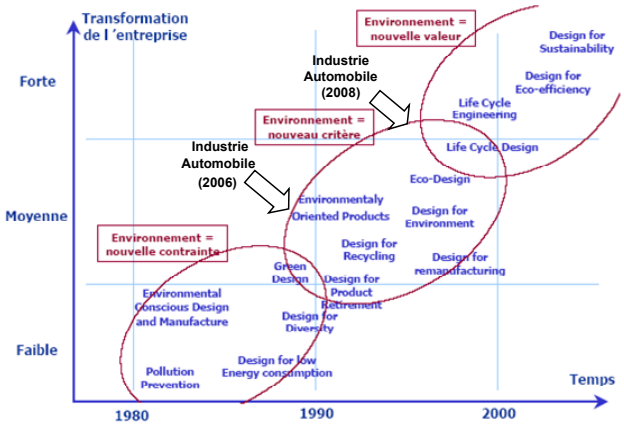


Figure 3: Positionnement de l'industrie automobile vis-à-vis des différentes démarches environnementales selon (Millet et al. 2001)

Aujourd'hui, compte-tenu des changements amorcés par l'industrie automobile (outils développés, relations clients-fournisseurs, communication), l'environnement est perçu comme un nouveau critère touchant toutes les fonctions de l'entreprise mais également par déclinaison de contraintes toutes les entreprises liées directement ou indirectement aux constructeurs. Pour autant, percevoir la prise en compte des atteintes à l'environnement comme une valeur n'en est qu'à ses balbutiements pour cette industrie (cf. III-). Par exemple, la gestion de la fin de vie est encore trop souvent limitée à un critère de conception même si elle peut apporter une nouvelle valeur au produit et devenir sur le marché un critère de choix au même titre que le prix, le design…

Les constructeurs ont mis en place différentes actions tant curatives[8] que préventives[9] (Coppens 1999), tant communes qu'individuelles en fonction de la stratégie adoptée (UNEP 2002) (cf. Tableau 1). L'efficience de ces actions est possible uniquement en combinant curatif et préventif pour obtenir des actions produit/process adaptées à une gestion intégrée de l'environnement. Ainsi les premières actions ont été mises en place uniquement dans l'objectif de tenir au mieux les objectifs des réglementations. Elles ont évoluées vers des actions volontaires en prévention des risques (Cabal et al. 2005).

A ces actions s'ajoutent des démarches de communication pour informer les consommateurs et dans certains cas, faire de l'environnement un critère d'achat (consommation du véhicule, taux d'émissions en CO_2, véhicules hybrides, taux de recyclabilité) (Cabal et al. 2005). Mais la communication sur les actions menées peut être trompeuse[10] et est à relativiser, s'agissant dans certains cas d'actions ponctuelles et non d'actions pérennes qui donnent aux consommateurs une image erronée sur la démarche environnementale de l'entreprise.

[8]Ces actions sont une réponse à la gestion end-of-pipe. Elles interviennent pour réparer les dommages sur l'environnement une fois les pollutions ou dégâts constatés. Nous pouvons citer en exemple le traitement des déchets liés au produit.

[9] Ces actions sont une réponse à la gestion préventive. Elles permettent d'anticiper et de réduire les pollutions. Nous pouvons citer comme exemple le choix de matériaux en conception pour faciliter le traitement des déchets ou bien pour diminuer la quantité produite.

[10] Article du journal de l'environnement, « Grande-Bretagne : une pub Renault trop écolo pour être honnête », 31 Mars 2008. « Liaisons dangereuses entre environnement et publicité » du 13 Décembre 2006.

Si nous prenons, comme exemple, la gestion des déchets automobiles en fin de vie, les actions ont tout d'abord été curatives pour devenir actuellement préventives notamment par l'intégration de critères de fin de vie en conception. Mais pour que ces actions soient efficientes un retour d'expériences, et des échanges d'informations doivent exister entre les acteurs des différentes phases du cycle de vie pour une réelle adéquation entre fin de vie et conception. Nous verrons dans les parties suivantes que cet échange n'est pas toujours efficace et dans certains cas inexistant (cf. II-2-2). Ce positionnement doit cependant évoluer pour satisfaire l'objectif de l'Union Européenne d'inciter les entreprises industrielles à gérer les matériaux de leurs produits en boucles closes (soit une réutilisation de la matière recyclée dans l'application ou tout du moins le secteur industriel d'origine) (Zoboli 1998).

Les actions ont tout d'abord été menées par les constructeurs, principaux acteurs dans la conception des véhicules automobiles et disposant des plus importants leviers d'action et ont évolué par déclinaison de contraintes vers les équipementiers. Par exemple, dans le cadre de la directive homologation (JOUE 2005), ces derniers doivent justifier de l'existence de solutions techniques pour la valorisation de leurs pièces, soit en réponse à la demande des constructeurs soit par anticipation de leurs futures demandes. Anticiper ces demandes peut leur permettre de disposer d'un avantage concurrentiel sur le marché.

Au même titre que le contexte réglementaire évolue d'une vision end-of-pipe à une gestion produit/process de l'environnement, les stratégies déployées par l'industrie automobile passent d'une prise en compte de l'environnement comme une contrainte à un critère produit. Mais l'environnement n'est pas encore pleinement considéré comme une valeur. Les constructeurs ont donc mis en place des actions tant curatives que préventives pour répondre aux enjeux environnementaux entourant leurs produits. Ces diverses actions ne peuvent être menées indépendamment de celles des autres constructeurs et acteurs du cycle de vie des véhicules, mais doivent être liées par des échanges constants pour une adéquation entre conception à un instant t et la gestion technique des produits en fin de vie à instant $t+\Delta t$. D'autre part, les stratégies déployées manquent de globalité c'est-à-dire qu'elles ne font pas, ou peu, intervenir les fournisseurs apparaissant pourtant comme devant jouer un rôle important dans l'efficacité de ces actions. Ceci met en évidence la nécessité de se concerter au sein de la Supply Chain ou chaîne de fournisseurs pour mettre en place des actions efficientes et durables dans le temps.

II- *L'industrie automobile et les MP*

Nous avons montré que l'industrie automobile est soumise à de nombreuses pressions dans le but de réduire les impacts environnementaux liés aux véhicules. Dans ce contexte, l'utilisation croissante de MP dans cette industrie a un rôle important à jouer dans la gestion de ces impacts de part la nature même du matériau et son implication dans la gestion du produit en fin de vie. Nous développerons dans cette partie les raisons pour lesquelles les MP représentent un enjeu environnemental fort pour l'industrie automobile.

Actions	Type	Cycle de vie	Type d'actions	Référence
Développement de filtres à particules	Individuel	Conception Utilisation	Préventif	(Cabal et al. 2005)
Guide de démontage à destination des démolisseurs	Collectif	Fin de vie	Curatif	IDIS 2008[11]
Aide au montage de filières Campagne de broyage	Collectif	Fin de vie	Curatif	(François 2003) (Goldmann 2003) (ADEME 2008a)
ACV de pièces ou véhicules	Individuel	Conception	Préventif	(Leborgne 1998) (Munoz et al. 2006)
Analyse des filières Cotation (Renault)	Individuel	Conception Fin de vie	Préventif Curatif	(Bustani et al. 1998) (Fleischer et al. 2003)
Utilisation d'un taux élevé de matières recyclables (95% : Renault Modus)	Individuel	Conception Fin de vie	Préventif Curatif	(Cabal et al. 2005)
Energies alternatives : hybride (Toyota), biocarburant, électrique	Individuel	Conception Utilisation	Préventif	(Cabal et al. 2005)
Outils de conception pour le démontage, la valorisation, le recyclage : guides, indices de recyclabilité (IRF[12])	Individuel	Conception	Préventif	(Jacqueson 2002, Coppens 1999, Tonnelier 2002) (AFNOR 1996) (Jacqueson 2002)
Reporting substances : Base de données IMDS[13], MACSI[14] (PSA), démarche MCV[15] (Renault)	Individuel	Conception	Préventif	IMDS[16]
Groupes de travail sur une thématique environnemental : ECODIS[17], CARS21[18], VRP[19], ACOR[20]	Collectif	Conception Production Utilisation Fin de vie	Préventif Curatif	

Tableau 1: Exemples d'actions préventives et curatives initiées par l'industrie automobile pour la prise en compte de l'environnement

II-1. Enjeux environnementaux liés aux MP

II-1-1. Une matière en pleine expansion dans les véhicules

L'industrie automobile est le troisième secteur industriel utilisateur de MP après l'emballage et l'industrie du BTP (cf. Figure 15) (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008). L'industrie automobile française a utilisé environ 530kt de MP en 2005 (ADEME 2006). La consommation de MP par cette industrie, en rapport à celles des autres matériaux, a connu l'une des plus fortes progressions ces dernières années en terme de volume mais leur proportion reste tout de même faible en comparaison des autres matériaux. Depuis le début des années 90, l'utilisation de MP par véhicule a connu une croissance moyenne de 4% par an (cf. Figure 4). Aujourd'hui la proportion

[11] IDIS. Http://www.idis2.Com/. , 2008.
[12] Indice de Recyclabilité à la Fonction. Norme Renault
[13] International Materials Data System
[14] Système d'Informations sur Composition MAtières des véhicules
[15] Management de l'environnement sur le Cycle de Vie du véhicule
[16] IMDS. Http://www.Mdsystem.Com/ Portail De La Bse IMDS. , 2008.
17 ECODesign Interactive Systems : Programme européen multisectoriel ayant pour objectif de fournir aux entreprises notamment les PME des outils d'éco-conception (2004-2007). Http://www.Ecodis.Org/. , 2008.
[18] Competitive Automotive Regulatory System for the 21st century. L'initiative Cars 21 vise à établir un cadre réglementaire compétitif de longue durée pour le secteur de l'automobile en Europe. Http://ec.Europa.eu/enterprise/automotive/pagesbackground/competitiveness/cars21.Htm. , 2008.
[19] Vehicle Recycling Partnership. L'objectif de ce groupe de travail américain est de promouvoir les approches permettant d'améliorer la faisabilité technique et économique du recyclage des véhicules,
[20] Automotive Consortium On Recycling

en poids de MP dans un véhicule est de l'ordre de 14% contre 9% il y a une vingtaine d'années (Duval 2004).

La croissance de l'utilisation des MP dans l'industrie automobile s'explique par les avantages techniques, économiques mais également environnementaux qu'elles apportent (cf. Tableau 2). Ainsi, elles ont permis notamment un allègement des véhicules conduisant à une réduction de la consommation d'essence et a fortiori des émissions de CO_2, (Cabal et al. 2005)

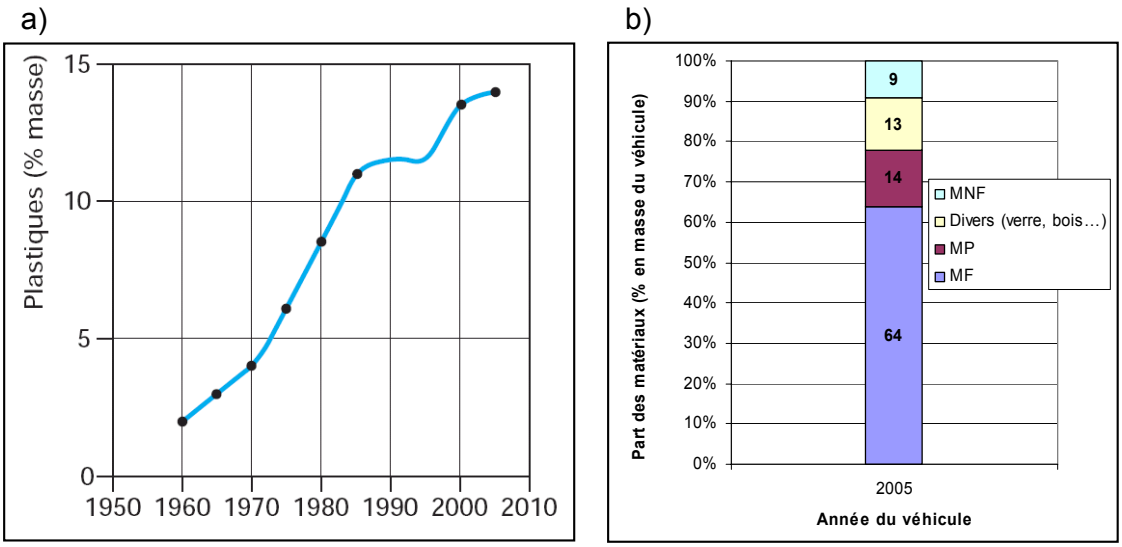


Figure 4: a) Evolution de la part de MP dans les véhicules de 1960 à aujourd'hui (Duval 2007b), b) Composition d'un véhicule en 2005 ; MF=Métaux Ferreux, MNF=Métaux Non Ferreux

	Propriétés recherchées dans les MP
Industrie automobile	- Une plus grande liberté de design - Intégration fonctionnelle. - Une diminution des coûts de revient. - Une plus grande automatisation des tâches. - Un allégement du poids des véhicules entraînant une économie de carburant - Une sécurité accrue en cas de chocs. - Un meilleur confort pour les usagers.

Tableau 2: Propriétés d'usage des MP dans l'industrie automobile (Viot 2001, Duval 2007a)

Les MP sont utilisées dans les différents modules d'un véhicule[21] :

- les pièces intérieures de l'habitacle (env. 46% des MP)
- les pièces extérieures et la carrosserie (env. 29% des MP)
- les pièces de structure et les réservoirs (env. 13% des MP)
- les pièces sous-capot (env. 12% des MP)

Les principales résines utilisées sont le polypropylène (PP), le polyuréthane (PU), et le polychlorure de vinyle (PVC) (cf. Tableau 3). Le PP représente 43% des MP utilisés. Ceci s'explique par son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et ses possibilités techniques.

[21] Fédération de la plasturgie et Service des études et des statistiques industrielles. L'Industrie De l'Équipement Automobile En Chiffres. , 2003.

Mais l'utilisation des MP est aujourd'hui remise en cause. Ainsi ce sont, d'une part, des matières qui consomment du pétrole (ressource non renouvelable) et, d'autre part, qui participent à l'augmentation de déchets automobiles par manque de systèmes de gestion efficients des flux de fin de vie de ces matériaux. Nous ne traiterons dans cette partie que de l'implication des MP dans la gestion des véhicules en fin de vie et les conséquences qui en résultent pour la Supply Chain automobile. Les enjeux des MP au vue de la diminution des ressources pétrolières seront exposés de façon plus globale dans la partie II-1.

	PART (%)	FONCTION
Polypropylène (PP)	43	Pare chocs, enjoliveurs, habillages d'intérieur
Polyuréthane (PU)	14	Mousses de sièges, pare-chocs
Polychlorure de vinyle (PVC)	3	Câblerie, joints, mastics d'étanchéité, planches de tableau de bord
Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	7	Pièces d'intérieur, calandres
Polyamide (PA)	12	Circuits, freinage, pneus (camions), canalisations d'essence
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et Polycarbonate (PC)	4	Feux arrière, toits ouvrants, plaques d'immatriculations
Polyéthylène (PE)	8	Réservoirs d'essence et lave-glace
AUTRES	9	…

Tableau 3: Répartition des résines utilisées dans l'industrie automobile en Europe en 2003 (Duval 2007b) et exemples d'applications (Viot 2001)

II-1-2. La gestion des déchets automobiles en fin de vie

La part de MP à traiter au sein des déchets automobiles ne cesse de croître. La directive européenne sur la prévention et le traitement des véhicules hors d'usage (VHU) (JOUE 2000) traduite en droit français en août 2003 (JORF 2003) définit les obligations suivantes :

- Le taux de recyclage et de réutilisation en masse des véhicules doit atteindre 80% et le taux de valorisation 85% pour 2006 (valeurs devant respectivement atteindre 85 et 95% en 2015). La directive demande l'atteinte de taux de recyclage et de valorisation effectifs (réalisés par les opérateurs économiques existants) et non théoriques (cas où l'on prend en compte la faisabilité scientifique du traitement et non la réalité technico économique).
- Le taux de matériaux recyclés employés doit être croissant.

Aujourd'hui la prise en compte des MP joue un rôle essentiel dans l'atteinte de ces objectifs. Ainsi, sur le flux de VHU traités chaque année en France (1,2 à 1,4 millions) (ADEME 2006), le taux actuel de recyclage effectif est d'environ 70-75%[22] (Günther et al. 2008), valeur qui permet ni de répondre aux objectifs de 2006, ni aux objectifs de 2015. Ce niveau est atteint pour les VHU actuels (soit 13 ans d'âge en moyenne) avec une composition forte en matériaux métalliques. Par contre, pour les véhicules de fabrications plus récentes, compte tenu de la part de MP dans leur composition (cf.

[22] Ce taux est un ordre de grandeur car il est soumis à un grand nombre d'incertitudes. Cette donnée a pour simple vocation de démontrer l'importance de l'écart entre l'efficacité actuelle du recyclage et les taux à atteindre. Le taux de recyclage et de réutilisation obtenue lors de campagne de démontage et broyage atteint tout juste les 80% ADEME. *Campagne de démontage et de broyage de 304 VHU et étude des flux de matériaux issus du traitement.* p. 1-30.

Figure 4) et du fonctionnement actuel des filières de recyclage de MP françaises (ADEME 2006, ADEME 2004) (cf. II-2-1), les taux de recyclage seront plus faibles dans ces conditions technico-économiques. En effet, les valeurs atteintes avec les VFV actuels de 13 ans d'âge sont essentiellement dues au recyclage des Métaux Ferreux (MF) et des Métaux Non Ferreux (MNF). Les 25 % de matériaux non recyclés actuellement et destinés majoritairement à la mise en décharge sont des résidus de broyage à forte teneur en MP (François 2003) . En effet, très peu de MP automobiles sont actuellement retraitées en France. Seuls environ 8% des MP utilisées dans l'industrie automobile française (ADEME 2006, Consultic marketing and industrieberatung GmbH 2005) sont recyclées[23] soit entre 1 et 2% en masse d'un VHU moyen. Ces taux sont incompatibles avec le taux global de recyclage attendu. Ainsi atteindre les objectifs suppose de recycler au minimum 5% de MP sur chaque véhicule (cf. Figure 5). La marge d'évolution est grande. Cependant, des campagnes d'essais ont montré qu'une optimisation des simples techniques existantes permettrait de recycler 3% de MP en masse des VHU actuels, principalement du PP (François 2004, Maudet et al. 2007). Mais ces conditions ne sont pas pour le moment remplies et ce pourcentage reste encore trop faible pour atteindre les objectifs de la directive VHU (cf. Figure 6).

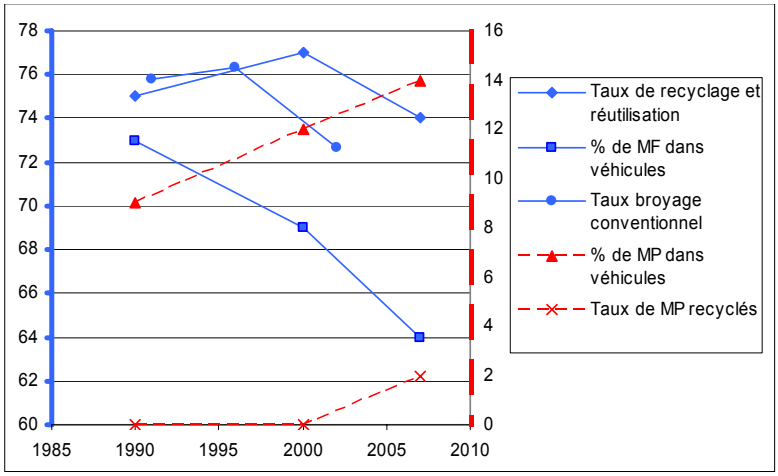


Figure 5 : Evolution du taux de recyclage en fonction du temps et de la composition des véhicules (synthèse issue des publications de (Günther et al. 2008, François 2004))

Le recyclage des métaux étant déjà optimisé, l'atteinte des objectifs de la directive passe forcément par une augmentation du taux de recyclage des MP. C'est une des raisons pour lesquelles nous nous intéressons aux MP dans l'industrie automobile.

De même que pour le premier objectif de la directive, répondre au second (accroissement progressif du taux de matières recyclées dans les véhicules) passe par l'augmentation de l'utilisation de MP recyclées dans les nouveaux produits. Mais actuellement la quantité de MP recyclées utilisée est faible, cette matière trouvant peu de débouchés dans cette industrie. Ainsi sur la quantité de MP recyclées chaque année en Europe, seulement 3% de celles-ci sont destinées à l'industrie automobile (APME 2004), ce qui représente environ 0,6Mt contre 4Mt des MP vierges destinées à l'industrie automobile en Europe (cf. Chapitre 1 partie 2). En d'autres termes, environ 15% des MP utilisées dans l'industrie automobile européenne sont des matières recyclées.

[23] % par rapport aux déchets automobiles. 8% des MP recyclées proviennent de déchets automobiles. 27% des déchets MP sont recyclés.

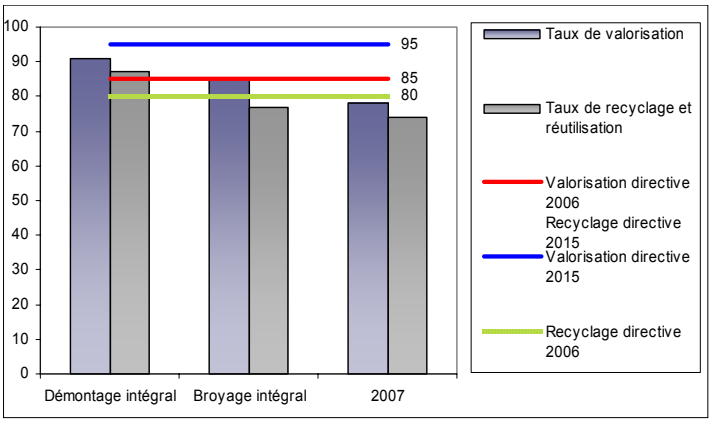


Figure 6: Objectifs de la directive VHU pour 2006 et 2015 et efficacité technique de la valorisation des VFV (Günther et al. 2008, François 2004, François 2003, Del vecchio et al. 2004)

En ce qui concerne les rebuts de production cela fait de nombreuses années que l'industrie automobile en utilise à hauteur de 10% directement sur les sites de production ou bien à hauteur de 100% pour des pièces aux propriétés mécaniques peu élevées (passages de roue…) (Maudet et al. 2006). Cette utilisation a pour but principal de réduire les coûts de production, sans risques techniques majeurs. Ainsi les rebuts de production ont des propriétés peu ou pas altérées. Mais l'utilisation de MP recyclées issues de déchets post-consommation n'est pas une pratique commune compte-tenu notamment de la forte altération de ces matières en fin de vie et de la méconnaissance des propriétés de ces matières (cf. Chapitre 1 partie 2). Par exemple, en 2003, au sein des produits Renault, 12% du PP utilisé était du PP recyclé, soit une vingtaine de kilogrammes en rapport au poids total du véhicule (1,2T) (Lassartesses 2004), chiffre donné sans distinction de l'origine de la matière. La majorité est d'origine rebuts de production (Maudet et al. 2006). La marge d'évolution est donc élevée d'autant que Renault est l'un des constructeurs européens les plus actifs dans ce domaine (Lassartesses 2004, De Medina 2006).

D'autre part, l'utilisation des MP issues des Véhicules en Fin de Vie (VFV) se limite aujourd'hui à des applications de basses performances mécaniques (comme les passages de roues, absorbeurs…). Dans ce cadre, leur utilisation n'implique pas une grande prise de risque compte-tenu des faibles contraintes du cahier des charges de ces pièces. Ce type d'utilisation est aujourd'hui devenu standard. Ces pièces sont en 100% recyclées. En revanche, l'utilisation de Matière Plastique Recyclée (MPR) dans les pièces hautes performances dites pièces de structure est peu répandue, compte-tenu des faibles caractéristiques attribuées à ces matières. Certains constructeurs ont montré qu'il est possible d'utiliser de la matière recyclée pour des pièces de structure (Maudet et al. 2006, Tricot 2004) mais ces expériences se sont limitées à des actions ponctuelles sans utilisation pérenne de ces matériaux dans les différents projets ou bien ces pièces utilisent uniquement des rebuts de production.

L'incidence des MP dans la gestion des VFV apparaît également dans la directive homologation (JOUE 2005). Celle-ci exige des constructeurs de justifier de solutions de valorisation fiables pour leurs produits. Compte-tenu de la croissante utilisation de MP, ils doivent par conséquent disposer d'informations sur les filières associées à ces matières, informations transmises à l'UTAC[24]. Une non-conformité à l'homologation conduit normalement à une non-commercialisation du produit. Des

[24] L'Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle, Organisme certificateur

constructeurs comme TOYOTA (Toyota 2002) dont les produits respectent la législation européenne en vigueur poussent les constructeurs français à faire de même.

L'industrie automobile est donc tenue de prendre en compte le devenir des MP tant dans leurs produits en fin de vie qu'en conception.

II-2. Les implications du recyclage des MP automobiles pour les acteurs de la Supply Chain automobile

II-2-1. Le recyclage des MP automobiles : une activité de dimension non industrielle

Nous ne développerons ici que la situation du recyclage des MP en France car comme nous le verrons dans le Chapitre 2, même si nous sommes dans une ère de mondialisation, l'analyse d'une activité de recyclage n'a de sens qu'à une échelle relativement locale.

Nous avons montré dans la partie II-1-2 que pour atteindre les taux de recyclage obligatoires il faut être en mesure de retraiter les MP d'origine automobile mais que cette contrainte implique de disposer des installations techniques adéquates. Ce n'est pas encore le cas en France (en tout cas pas à l'échelle requise). Par ailleurs, il faut disposer d'une bonne connaissance des techniques de recyclage et de ce qu'elles impliquent sur les produits qu'elles traitent pour adapter les actions de l'industrie automobile au moment de la conception des composants.

La filière de recyclage des MP automobiles française fait partie de la filière de valorisation des VFV (cf. Figure 7). Avant toute discussion de l'avancée du recyclage des MP, il convient de présenter un état des lieux de la filière VFV globale. Cette filière est une des plus anciennes. Les broyeurs responsables de la récupération des ferrailles existent depuis plus de 40 ans, soit bien avant l'obligation environnementale de traiter les produits en fin de vie. La filière de recyclage des MP est beaucoup plus récente (une dizaine d'années). Cette situation s'explique par une prise en compte tardive de la fin de vie en conception et par l'augmentation des MP ces dernières années en remplacement des métaux ferreux.

De la filière VFV dépendent donc plusieurs filières (cf. Figure 7):

- Des filières pièces : batteries, pneus…
- Des filières matières : MF, MNF, verre, MP.

La filière de recyclage des MP automobiles est issue de deux voies possibles :

- les MP issues du tri des RB (Résidus de Broyage provenant du broyage des VFV, et parfois d'autres produits)
- les MP issues du démontage de pièces de grande taille.

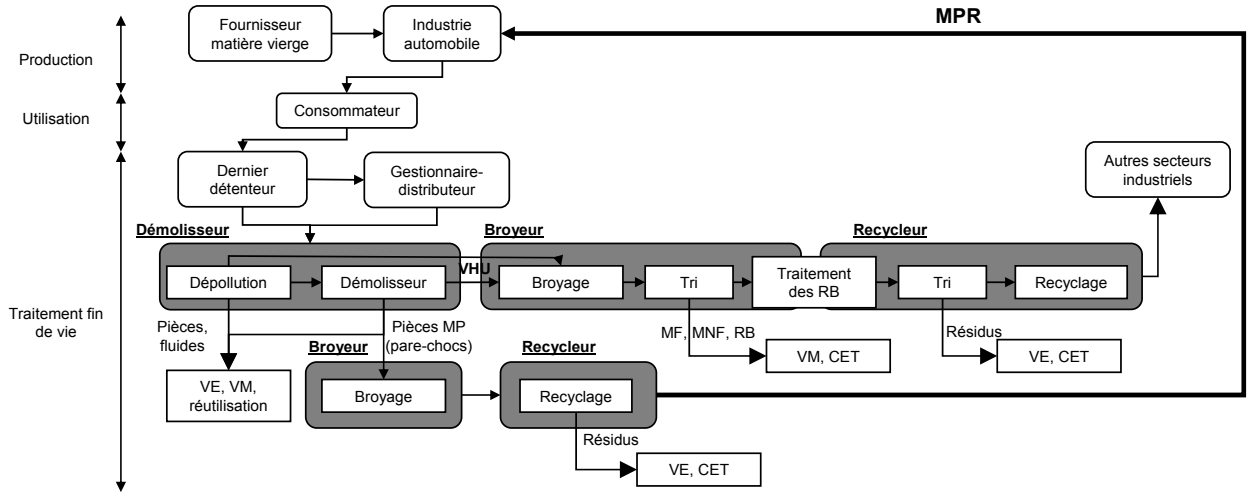


Figure 7: Notre représentation de la gestion des VFV

Ces deux voies impliquent des étapes, des acteurs, des contraintes techniques et économiques et des cahiers des charges en entrée du recycleur, différents. Le démontage de pièces est plus favorable au déploiement de débouchés avec une plus haute valeur ajoutée.

Les filières de recyclage de MP issues du démontage concernent par exemple les pare-chocs (issus de garage agréé) et les batteries en PP, pièces représentant un volume d'environ 10 000T (cf. Figure 8) en France en 2006. Les conditions essentielles du choix du démontage d'un composant est son accessibilité, la quantité de matière qu'il intègre et sa dangerosité (toxicité). Le PP est pour le moment la seule matière issue du démontage pour laquelle les industriels disposent en France de lignes de recyclage industrielles. Cependant des études ont montré la possibilité technique de récupérer et de recycler d'autres pièces automobiles (le Blanc et al. 2004), mais ces solutions n'existent pas pour le moment au statut industriel. Pourtant, les matières recyclées issues de tels flux sont maîtrisables en termes de fiabilité des performances et des comportements physiques (retrait, viscosité…) dans le temps. En revanche, ces voies de traitement sont actuellement toutes non économiquement viables pour les démolisseurs français : ils ne parviennent pas à valoriser financièrement les temps de démontage de ces composants auprès des recycleurs. De ce fait, seules quelques pièces issues des démolisseurs parviennent jusqu'aux recycleurs et ceci seulement si un réseau de collecte existe dans la région du démolisseur. L'absence d'une incitation financière, et d'une organisation de la collecte, font que ces flux ne sont pas exploités.

L'autre voie de traitement pour les MP est le tri des RB. En théorie ce procédé a tout pour plaire puisque l'on peut imaginer de mélanger des produits de différentes origines pour les broyer ensemble. La réalité industrielle est autre car si le broyage ne pose pas de difficulté technique majeure, le tri des résidus de broyage qui lui succède est autrement difficile à gérer. En France, un seul opérateur s'affirme capable d'extraire industriellement des MP des résidus de broyage. Les MP récupérées sont principalement les polyoléfines (PE, PP) (François 2004) et un peu de polystyréniques. Cependant, plus la diversité des plastiques contenus dans ces résidus augmente plus leur coût de traitement augment et plus l'efficacité des techniques de tri des MP diminue.

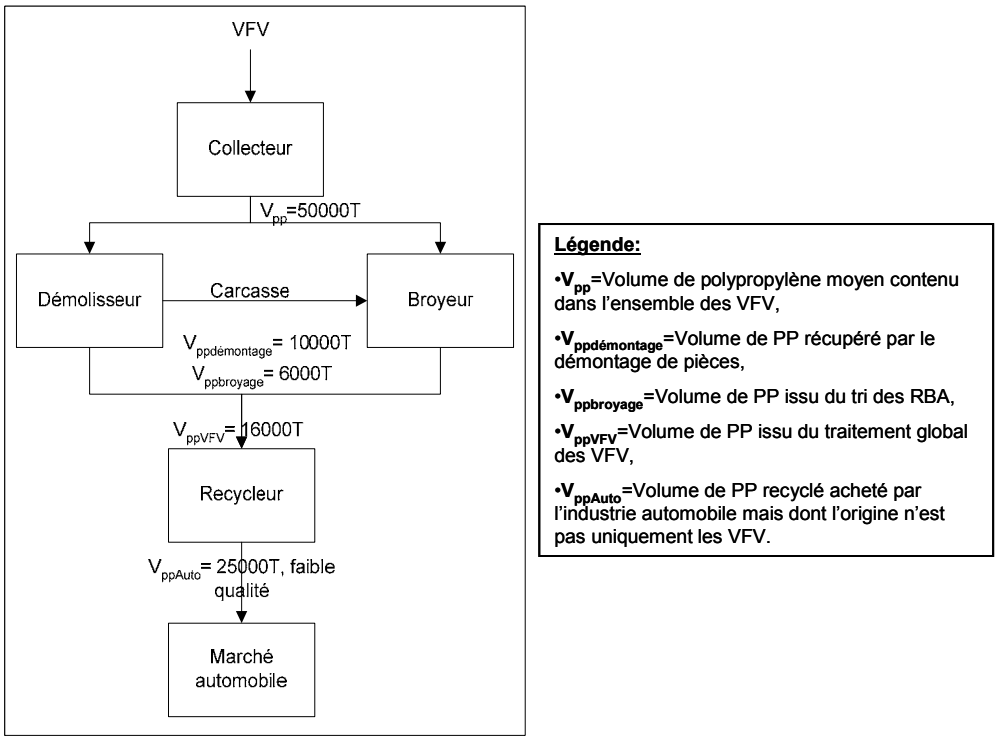


Figure 8:Filière de recyclage des MP automobiles. Les données présentées sont issues d'entretiens réalisés auprès des acteurs de la filière en 2006 et de documents internes à l'entreprise POAE (Vera et al. 2004).

Les flux de MP recyclées restent donc limités au regard du tonnage global (8% du tonnage global de MP automobiles en fin de vie). D'autre part, il n'existe que trois recycleurs de MP automobiles en France (C2P, Galloo Plastiques, Plastic Recycling) de capacité 10000-20000T chacun (ADEME 2008b) mais qui ne traitent pas uniquement ce type de produits (ils prennent en charge des MP provenant d'autres industries). La marge d'évolution est donc importante puisque l'estimation du volume annuel de MP des VFV se situe entre 130 000T et 200 000 T (Variation due au poids moyen des véhicules et à la difficulté d'estimer le flux de VFV collecté) (ADEME 2006). La filière de recyclage des MP fournit 25 000T de PP (toutes origines confondues) à l'industrie automobile (cf. Figure 8).

Selon F.Viot[25], seul Renault affiche une position claire sur l'utilisation de MP recyclées, c'est-à-dire qui exige son utilisation dans ses produits et communique sur l'utilisation de MP (Lassartesses 2004). L'entreprise souhaite à l'horizon 2015 utiliser 50 kg de PP recyclé par véhicule (Lassartesses 2004). En effet, les enquêtes auprès des recycleurs ont montré que les plasturgistes automobiles sont encore peu demandeurs (ADEME 2006, APME 2004, ADEME 2008b). Mais compte-tenu de l'état actuel des filières, les objectifs annoncés par Renault ne peuvent être tenus avec des sources nationales et sont aujourd'hui remis en cause.

Enfin, du point de vue de l'industrie automobile, la filière relève plus de l'artisanat que de la structure industrielle. La structure et l'organisation des acteurs du recyclage sont actuellement peu compatibles avec les exigences de l'industrie automobile :

- une structure artisanale face à une Supply Chain industrielle ancienne, organisée avec des systèmes de flux et d'informations complexes,

[25] Article du 17 Décembre 2006 du journal de l'environnement « les matières recyclées ont mauvaise presse »- Entretien avec Frédéric Viot, responsable de l'éco-conception et du recyclage chez Plastic Omnium.

- une matière aux propriétés non assurées dans le temps dû notamment à des flux de matières approvisionnant les recycleurs non sécurisés en quantité et qualité (manque de traçabilité) face à un marché exigeant, aux critères durs et spécifiques : le prix de la matière doit être inférieur de 15 à 20% à celui de la matière vierge, les volumes et le prix sont fixés sur la durée d'un projet.

La filière de recyclage des MP automobiles est donc actuellement une filière non industrielle, instable en termes techniques, économiques et vis-à-vis des caractéristiques des matières qu'elle fournit. Elle est en décalage et même en inadéquation avec les exigences automobiles. Compte-tenu des implications des MP pour l'industrie automobile, ces filières doivent évoluer que ce soit dans les quantités traitées ou les marchés accordés aux matières recyclées pour répondre aux exigences automobiles, réglementaires mais également environnementales.

II-2-2. L'industrie automobile doit se réorganiser pour le recyclage des MP

Répondre aux diverses contraintes liées à l'utilisation des MP (cf. Figure 9) implique que les acteurs de la Supply Chain automobile :

- justifient de scénarios de valorisation viables et efficients pour les MP et favorisent leur développement,
- disposent d'informations sur les capacités des filières et les propriétés des matières obtenues,
- étendent l'utilisation de MPR issues de produits fin de vie,
- adaptent leurs choix de conception pour faciliter le recyclage des MP.

Toutes ces actions induisent des modifications dans l'organisation de l'industrie automobile tant au niveau de sa relation client-fournisseur, de ses pratiques de conception que de son regard sur les acteurs des filières de recyclage. Les constructeurs doivent dorénavant intégrer la composante recyclage, et se doter de nouvelles compétences (De Medina et al. 2001, Energetics Incorporated 2001). Cette industrie a donc un rôle clé à jouer notamment par la promotion d'un produit dont la composition en MP entre dans des circuits de valorisation qui permettent de répondre aux objectifs de la directive VHU.

Les actions en vue d'améliorer la prise en compte des impacts environnementaux des MP sont de nature à la fois préventive et curative.

Dans le cadre des MP, les actions préventives portent sur (Field 2001) (cf. Tableau 1):

- l'amélioration de la démontabilité de pièces de grande taille (principalement en PP type pare-choc) pour favoriser le recyclage ou la seconde vie : travaux sur les modes de fixations pour récupérer les différentes matières (guides de démontabilité) (Toupe 2004, Jenseit et al. 2003),
- l'utilisation de MP compatibles chimiquement et la diminution de leur diversité pour faciliter le tri (AFNOR 1996),
- le marquage des pièces permettant d'identifier les matières et d'améliorer ainsi la qualité des flux (ISO 1993),

- le choix de MP recyclables[26] améliorant la recyclabilité des produits (Rossi et al. 2005, Juska et al. 2006),
- l'utilisation d'indicateurs pour la conception de pièces en MP en adéquation avec un scénario de valorisation donné : critère de recyclabilité, cotation des filières (Coppens 1999, Tonnelier 2002, ISO 2002).

En retravaillant le choix des MP utilisées de façon à ce que seules des matières compatibles au recyclage soient employées dans les véhicules (la grande diversité des résines présentes dans les granulats de broyage limite les possibilités de tri), en s'orientant vers du monomatériau et en améliorant les conditions technico-économiques des opérateurs des filières, un taux plus élevé de MPR que le taux actuel (entre 1 et 2 % de gain) pourrait être facilement obtenu (Bellmann et al. 1999, Poincelet 2002).

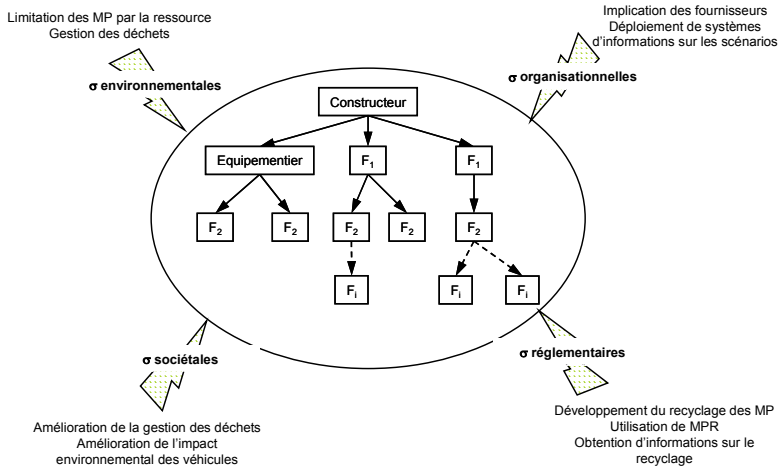


Figure 9: Bilan des champs de contraintes liées aux MP s'exerçant sur la Supply Chain automobile

Les constructeurs ont également mis en place des actions en relation avec les acteurs impliqués dans la valorisation des VFV, notamment en tant que support R&D pour le développement de nouvelles technologies et l'amélioration des procédés existants.

La campagne de broyage réalisée par Galloo (François 2003) en partenariat avec PSA et Renault dans le but de mettre en évidence la possibilité d'atteindre les taux demandés par la directive à l'aide du tout broyage (cf. Figure 6) a ainsi révélé l'obligation d'associer au tri des MP broyées des pièces démontées monomatériau afin d'atteindre les taux de recyclage de la réglementation. Elle a également démontré le besoin de développer de nouvelles technologies de tri des MP issues de RB à un niveau industriel. Ces dernières années, des actions ont donc également été conduites pour améliorer les techniques de tri des RB pour augmenter la quantité de MP récupérée et leur qualité[27] mais également sur la compatibilité de certains mélanges de MP.

D'autre part, un outil de démontage comme IDIS plant développé par les constructeurs (cf. Tableau 1) indique aux démolisseurs le poids, la composition des pièces et le protocole à suivre pour démonter

[26] Le terme recyclable signifie que la matière peut être potentiellement recyclée moyennant l'existence des structures adaptées et non que la matière est effectivement recyclée.

[27] Le projet Tricotox est un projet ANR réalisé dans le cadre du PRECODD (PRogramme ECOtechnologies et Développement Durable). Il porte sur l'influence des procédés de tri et de la formulation sur la viabilité économique et la toxicité du recyclage de polypropylènes issus de véhicules hors d'usage. Les partenaires sont la SERAM, l'ENSAM, POAE, l'INSA de Lyon et l'université Jean Monnet à Saint Etienne.

certaines pièces en MP comme les pare-chocs. De plus, des campagnes de démontage de pièces plastiques ont été menées pour définir quelles pièces pouvaient être démontées dans des conditions économiquement viables pour les démolisseurs et ainsi définir le degré optimal de démontage[28] en termes de nombre de pièces à démonter et d'accessibilité des pièces (à partir de quelle pièce, démonter n'est plus efficient). Jenseit et al. (Jenseit et al. 2003) ont également mis en évidence l'éco-efficience de démonter certaines pièces plastiques en fonction de leur position, poids, coût, impact environnemental du scénario. INDRA, gestionnaire distributeur de VFV, a également travaillé sur la possibilité de développer des filières de recyclage associées à des pièces comme les tableaux de bord. Les constructeurs participent également à l'optimisation des réseaux de collecte, notamment dans le cadre des réseaux d'échange standard et de leurs filières concessionnaires[29].

Mais tous les constructeurs européens ne s'impliquent pas dans le développement de solutions de recyclage pour les MP. Ainsi certains d'entre eux favorisent le développement de la valorisation énergétique pour les MP mettant en avant le moindre coût de développement de ces technologies compte-tenu du tissu industriel existant et exercent en parallèle un lobbying destiné à faire réviser les objectifs de la directive et augmenter la part de valorisation énergétique autorisée (CCE 2007c). D'autres souhaitent que certains procédés considérés comme de la valorisation matière (cf. chapitre 1 partie 2 II-2-2) soit comptabilisés dans la part de recyclage matière (Goldmann 2003).

Au travers de ces diverses actions menées par la Supply Chain automobile, le bilan peut être fait que les solutions mises en œuvre pour la gestion des MP en fin de vie des véhicules sont incomplètes et aujourd'hui insuffisantes. Ainsi nombreuses sont les actions se concentrant sur la démolition et le broyage et non sur le recyclage et la vente des MPR. Dans les cas où ces thèmes sont abordés c'est en termes : d'études des possibilités, de technologies ponctuelles et pilotes et non dans une vision d'industrialisation de la pratique.

L'efficience des stratégies de recyclage est donc limitée par :

- le peu d'usage qui est fait de la matière recyclée,
- les contradictions entre les critères de conception des véhicules (augmentation du poids, complexité des véhicules, variété des matériaux) et les critères de recyclage des MP,
- le manque de connaissances sur le recyclage des MP,
- le manque de stratégie globale entre les acteurs de la Supply Chain.

Atteindre les divers objectifs des directives (cf. Figure 6) implique par déclinaison de contraintes, l'intervention des équipementiers plasturgistes à plusieurs niveaux :

- premièrement ce sont les réels utilisateurs de MPR, c'est à eux de les intégrer dans leur processus de conception. Cependant l'utilisation par les équipementiers automobiles reste aujourd'hui limitée à des applications aux faibles performances mécaniques. (Maudet et al. 2006). Donc développer de nouveaux marchés suppose pour les équipementiers d'anticiper la demande des constructeurs et de déterminer les acteurs susceptibles de fournir ces matières en quantités et qualités requises.

[28] http://www.re-source-industries.fr/
[29] Article du journal de l'environnement : « Renault participe à l'économie des VHU » du 16 Septembre 2005.

- deuxièmement, au travers de la directive homologation, les constructeurs doivent fournir des données efficientes sur les systèmes de valorisation pour les différents composants du véhicule d'où une nécessité de la part des équipementiers de développer leurs propres systèmes d'informations.

En conclusion, l'industrie automobile doit se réorganiser pour le recyclage des MP tant au niveau :

- ***des relations dans la Supply Chain au niveau des systèmes d'informations et de l'implication des équipementiers dans l'utilisation de MPR,***
- ***des relations avec les acteurs des filières de fin de vie des véhicules.***

Tout ceci explique l'intervention de POAE dans le champ des travaux de recherche présentés dans cette thèse.

III- POAE[30] : un équipementier automobile comme utilisateur et demandeur de MPR

Dans le contexte décrit, les équipementiers plasturgistes se trouvent au premier plan du développement de produits adaptés au recyclage en tant qu'utilisateurs directs de MP et de par leur lien direct avec les constructeurs. Dans ce cadre, POAE se positionne en tant que demandeur et utilisateur de MPR et comme entreprise proactive en cherchant à utiliser des MPR dans des pièces de structure. Nous présenterons dans cette partie la démarche développée par POAE pour atteindre ces objectifs et la question industrielle qui en découle, question que nous proposons de traiter dans nos travaux de recherche.

III-1. L'entreprise POAE

POAE est un équipementier plasturgiste de rang 1, fournisseur d'un grand nombre de constructeurs (Renault, PSA, BMW, VW, Porsche...). Cette entreprise fait partie de la division automobile du groupe Plastic Omnium (PO)[31]. POAE est composée de 47 usines dans le monde et 19 centres de R&D dont Sigmatech, basé en France. Elle emploie plus de 10000 personnes. POAE conçoit et fournit aux constructeurs automobiles des modules de carrosserie, ailes, modules bloc avant, modules bloc arrière, des pare-chocs, diverses pièces d'habillage extérieur (cf. Figure 10). L'entreprise a une position de leader sur le marché des pièces plastiques.

POAE a également développé de nombreux partenariats avec d'autres équipementiers: avec VALEO (VPO) pour les Faces Avant Techniques (FAT), avec INOPLAST (IPO) pour les Ouvrants Arrière (OA), avec HELLA et BEHR (HBPO) pour les Blocs Avant (BA).

[30] Plastic Omnium Automotive Exterior.
[31] PO est composé de 2 divisions : la division automobile qui représente plus de 80% du chiffre d'affaires (dont plus de 50% attribué à POAE et le reste à Inergy systèmes pour les systèmes à carburant), et la division environnement (12% du CA). Cette division propose aux collectivités locales des matériels et services dans le domaine de la collecte des déchets, de l'aménagement des aires de jeux. PO dispose également d'une entreprise de recyclage de MP (Plastic Recycling) en partenariat à 50% avec De Richebourg (broyeur ferrailles).

Figure 10: Illustrations de composants automobiles conçus et fabriqués par POAE

III-2. POAE et sa démarche environnementale

Par le contexte environnemental lié aux MP et par la nature même de son organisation (division environnement), POAE est une entreprise impliquée et sensibilisée à la prise en compte de l'environnement, se présentant comme un précurseur par rapport aux autres équipementiers. Ainsi l'éco-conception est une démarche intégrée au processus de conception de POAE depuis la fin des années 1990 notamment au travers du programme EcoDIT[32]. L'objectif principal de ce projet était la sensibilisation et la mise en place de l'éco-conception dans les entreprises de plasturgie et la création d'outils de traçabilité. Le résultat principal fut le développement d'outils pour la capitalisation des informations sur les substances mais également faciliter l'éco-conception de nouveau produit. Dans le cadre d'EcoDIT, POAE a été le pilote pour la mise en place d'une méthode d'éco-conception intégrant notamment les exigences de la directive VHU.

POAE a établi pour ces différents projets en développement les critères d'éco-conception suivants (méthode validée dans EcoDIT) : le poids, les substances réglementées**,** la quantité de matière recyclée**,** le temps de démontage : fin de vie et réutilisation**,** la fraction de matière recyclable ou valorisable. Certains de ces critères sont aujourd'hui moins prédominants (la réduction du poids des véhicules), contrairement à d'autres qui sont d'actualité (quantité de matière recyclée). La prise en compte de ces nouveaux critères s'est accompagnée de changements dans les pratiques de conception et de besoins de formation des différents métiers de l'entreprise.

Ce projet s'est poursuivi au travers du projet ECODIS pour le développement d'outils d'éco-conception pour les PME de la plasturgie. POAE en est partenaire notamment au travers de formations des PME à l'éco-conception.

Le Tableau 4 résume les grandes lignes des actions engagées par POAE en 2006 en fonction de la thématique concernée. Ce tableau met en évidence l'implication de POAE dans la gestion de ses produits en fin de vie tant sur des actions correctives que préventives. Nous pouvons citer comme exemple d'action la mise en place d'un système d'évaluation de la démontabilité de leurs pièces (Toupe 2004) pour contribuer au calcul de la recyclabilité. Un guide de préconisations de démontage a été créé afin de sensibiliser les concepteurs aux critères liés à la fin de vie (accessibilité pièces, degré de démontage, vieillissement du véhicule…) et de les aider dans le choix de fixations à utiliser pour favoriser des scénarii fin de vie satisfaisants. Ces préconisations ont été définies à la fois pour la réutilisation et le recyclage. Ainsi POAE veut également favoriser la seconde vie de ses pièces de structure (Toupe 2004). Cette étude s'est accompagnée d'analyses sur le terrain pour comparer les

[32] Eco Design Interactive tools (1999- 2000) : groupe de travail réunissant des constructeurs, des équipementiers plasturgistes, et des fournisseurs de MP vierge à l'initiative de la fédération de la plasturgie.

résultats théoriques aux résultats prenant en compte les conditions techniques des acteurs du démontage. Les données obtenues ont été directement intégrées dans l'outil d'aide à la conception d'assemblage de pièces utilisées par POAE.

L'éco-conception est perçue comme créatrice de valeur ajoutée par POAE. Ainsi F.Viot, responsable de l'éco-conception et du recyclage chez POAE, déclare : « *Mettre en œuvre l'éco-conception, c'est anticiper de nouvelles niches de développement, de nouveaux marchés, et éventuellement contribuer à abaisser les coûts de production, à qualité égale* » (ADEME 2003a). Nous pouvons ainsi citer l'exemple des pare-chocs de la Mégane II, commercialisés en 2004, que l'ADEME cite comme action réussie d'éco-conception (ADEME 2003a). Cette pièce comportait notamment 3 kg de matière recyclée pour un poids total de 6.5 kg soit 46% du poids global de la pièce.

Au delà de ces actions, POAE souhaite développer une approche mettant en relation toutes ces problématiques dans le but d'avoir une vision globale des conséquences de leurs actions sur leurs produits tout au long de leur cycle de vie.

Sujet	Actions	Intérêts
Développer les filières de MPR	Définir un compatibilisant pour un compound PE/PP	Pouvoir utiliser un plus large panel de MPR
	Mise au point de méthodes de tri des RBA	Développement du partenariat PO-DeRichebourg au travers de l'entreprise Plastic Recycling
Démontabilité	Evaluer la démontabilité des véhicules	Connaitre le niveau de prise en compte de la démontabilité par les constructeurs
	Valider la démontabilité des pare-chocs	Evaluer le pourcentage de pièces recyclées et valorisées
Nouvelles MPR	Mise au point d'un compound recyclé en PP-FV	Faire baisser le coût des pièces en PP-FV Disposer d'une solution de recyclage
	Mise au point d'un compound TP élastomérique à base de pneu avec Alliapur	Faire baisser le coût des pièces Proposer une nouvelle voie de valorisation pour les pneus
Analyse du Cycle de Vie	Comparaison des impacts environnementaux entre différentes solutions matière	Maîtriser les impacts environnementaux Proposer de nouvelles solutions de conception
	Projet ECODIS	Disposer d'une base de données ACV de procédés
Sujets transversaux	Participer à CREER (club de recherche : excellence en éco-conception et recyclage)	Structure multisectorielle d'entreprises pour une recherche commune sur l'éco-conception et le recyclage
	Comité de pilotage MACODEV (Matériaux et Conception pour un DEVeloppement durable)	Connaître les priorités en recherche dans la région Rhône-Alpes
	Communication	Faire connaître les actions de POAE dans l'environnement

Tableau 4: Exemples d'actions conduites par POAE en termes d'éco-conception et de recyclage (Maudet et al. 2005)

III-3. Une volonté d'utiliser des MPR dans des pièces de structure

La quantité de MPR utilisée par POAE n'a cessé de croître ces dernières années (cf. Figure 11). Cette augmentation est due à l'utilisation de MPR dans des pièces comme les absorbeurs, les passages de roue, pièces sous capot. Cette utilisation se cantonne cependant principalement à des pièces à faibles contraintes mécaniques en 100% recyclé.

POAE souhaite étendre et pérenniser cette utilisation à des pièces de hautes performances mécaniques comme les pièces de structure. L'entreprise est précurseur dans ce domaine en se donnant pour objectifs :

- d'anticiper les futures demandes des constructeurs,
- d'augmenter l'utilisation des MPR dans des applications de haute valeur ajoutée,
- de réussir l'intégration de Plastic Recycling (PR) comme fournisseur de l'automobile.

Pour répondre à ces objectifs, POAE souhaite développer une démarche dont l'originalité repose sur le déploiement de solutions globales pour l'éco-conception et la valorisation de pièces de structure (cf. Figure 12), soit de prendre en compte simultanément :

- la conception du produit en vue d'un scénario de fin de vie donné,
- l'aide au développement des filières associées au scénario choisi,
- l'utilisation de MPR en conception.

POAE souhaite appliquer cette démarche sur les Faces Avant Technique (FAT). Ce sont des pièces de structure en PP (Polypropylène) renforcé par des fibres de verre (PP-FV). Le choix de cette matière repose sur :

- l'existence de filières de recyclage du PP et donc de la possibilité d'associer le recyclage du PP-FV à ces filières,
- le prix élevé de cette matière (2€/T contre 1,2€/T pour le PP). L'utilisation de MPR permettrait de réduire considérablement les coûts de production des composants tout en accordant aux recycleurs un prix de vente élevé.

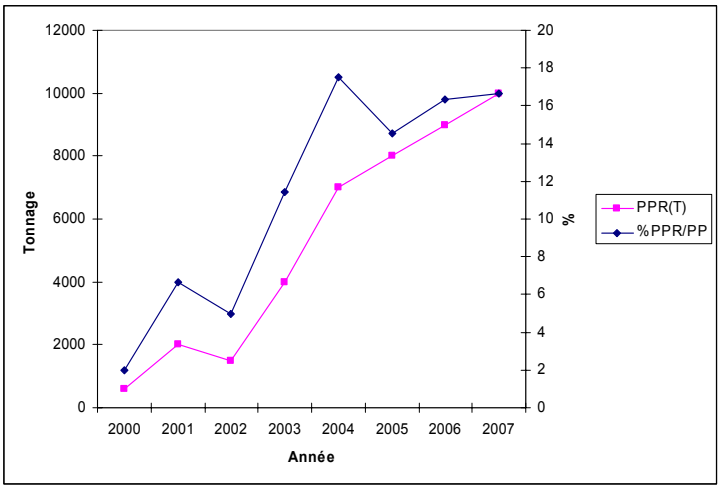


Figure 11: Evolution de l'utilisation de PPR (PolyPropylène Recyclé), données obtenues auprès de Frédéric Viot, responsable éco-conception et recyclage de POAE.

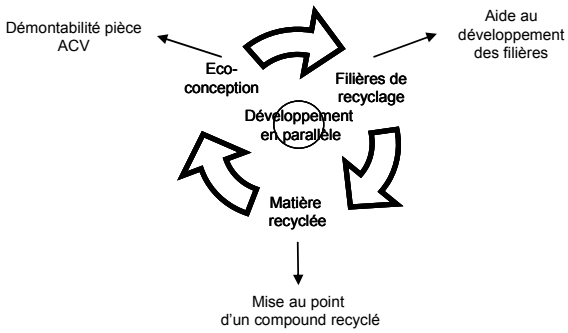


Figure 12: Solutions globales demandées à l'ENSAM par POAE (Maudet et al. 2005)

POAE a défini comme débouché pour le PP-FV recyclé (PP-FVR), obtenu à partir de déchets automobiles fin de vie, la pièce de structure d'origine soit les FAT. Il cherche à développer des solutions en boucles fermées, appelée closed-loop recycling[33], solution présentant l'avantage d'utiliser de la matière conçue pour l'automobile dans l'automobile et donc de maîtriser ses caractéristiques. L'objectif final de cette démarche est d'étendre cette utilisation à toutes leurs pièces.

Pour développer cette démarche innovante, POAE doit définir les moyens à mettre en place pour intégrer l'utilisation de cette MPR dans leur processus de conception de FAT.

La problématique industrielle peut donc se poser en ces termes :
- Quels sont les changements à apporter dans les pratiques de conception actuelles d'un équipementier automobile pour une utilisation pérenne de MPR dans des pièces à haute valeur ajoutée et donc pour une intégration du recycleur comme fournisseur de matière ?

La prise de conscience des impacts environnementaux des produits est de plus en plus présente dans notre société. Les entreprises sont tenues de mettre en place des actions pour minimiser ces impacts notamment au travers d'obligations réglementaires. Dans ce cadre, l'industrie automobile est une des plus concernées au travers d'enjeux réglementaires, environnementaux et sociétaux liés à leurs produits. Pour répondre à ces enjeux, il est nécessaire de prendre en compte le devenir des MP tout au long du cycle de vie que ce soit par les quantités utilisées, leur gestion en fin de vie ou bien l'utilisation de MPR. Cette industrie se réorganise au travers d'actions préventives et correctives mettant en évidence le besoin de développer le recyclage des MP. La réussite de ces initiatives ne peut se faire qu'au travers de l'implication de toute la Supply Chain, en commençant par les équipementiers plasturgistes réels utilisateurs de MP. Mais les enjeux associés aux MP se portent au-delà de l'industrie automobile et sont à l'origine d'une remise en cause de leur utilisation dans notre société de consommation. Ces enjeux concernent tant les Supply Chain, que la société civile et les gouvernements. Nous détaillerons ces points dans la deuxième partie de ce chapitre.

[33] Le recyclage en boucle fermée consiste à réutiliser la matière recyclée pour fabriquer un composant identique à celui d'origine ou tout du moins un produit du même secteur industriel. Il s'oppose au recyclage en boucle ouverte où la matière recyclée n'est pas réutilisée dans le même secteur industriel d'origine.

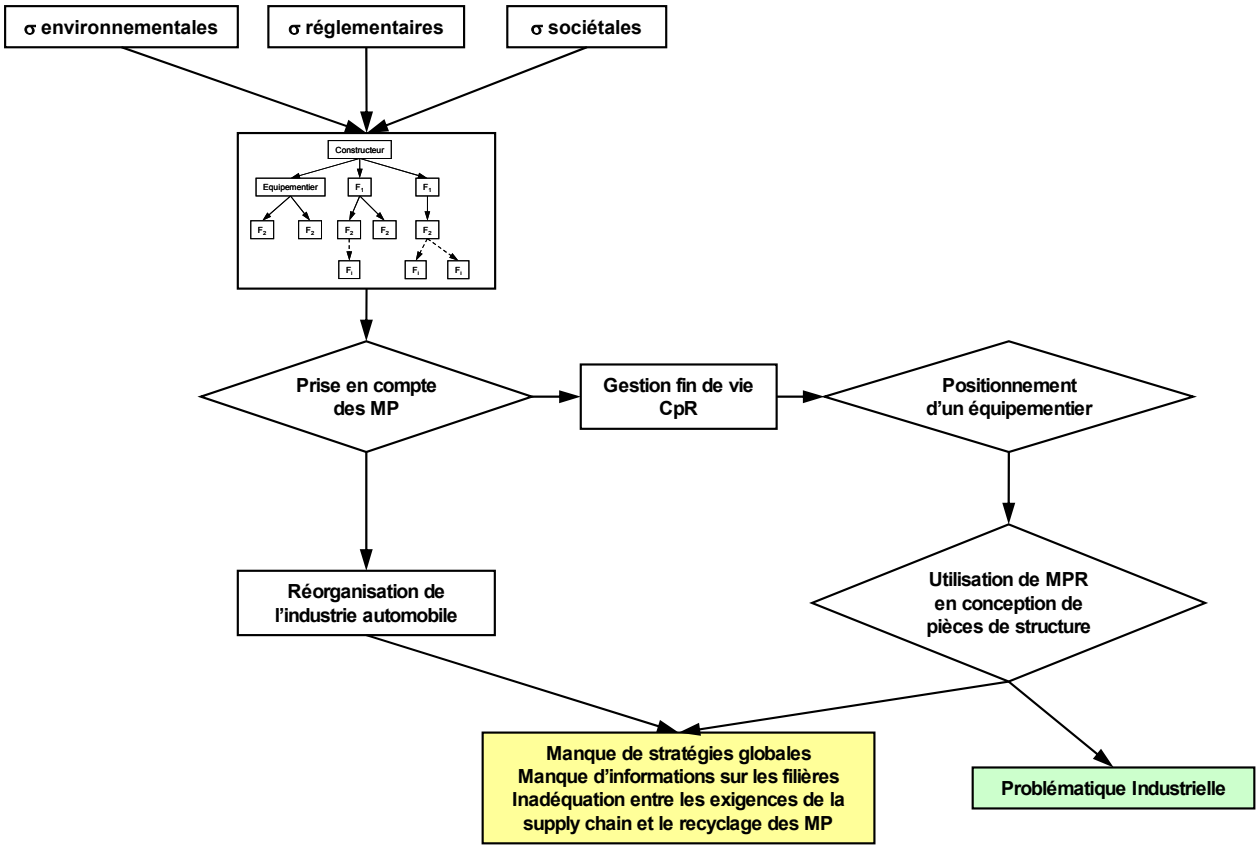


Figure 13: Synoptique de la partie 1

Partie 2 : Les différents enjeux sociétaux associés au cycle de vie des Matières Plastiques

Les MP tant par l'évolution de leur consommation que par la variété de leurs propriétés ont une place incontournable dans l'ensemble des secteurs industriels (Duval 2004). Mais leur devenir dans notre société de consommation est aujourd'hui fortement remis en cause tant par des enjeux environnementaux (de la raréfaction de la ressource pétrolière à la production de déchets), qu'économiques (le prix de la matière) et sociétaux (l'image des MP et le rôle de la société civile). Dans un premier temps, nous expliciterons les raisons qui font des MP des matières en pleine croissance. Dans un deuxième temps, nous aborderons les enjeux gravitant autour de ces matières. Dans un dernier temps, nous discuterons des solutions envisageables pour répondre à ces enjeux et des acteurs ayant un rôle à jouer. Cette réflexion nous conduira à la problématique de recherche.

I- La place des MP dans notre société de consommation

Les MP font partie intégrante de notre vie. Il suffit de regarder chez soi pour constater que nombre de produits sont faits avec ces matières. Que ce soit pour l'industrie, les MP sont des matières incontournables aux avantages divers et variés comme le gain économique, de poids, d'énergie… L'objectif de cette partie n'est pas de faire l'apologie des MP mais de donner les éléments nécessaires au lecteur pour comprendre les enjeux techniques, environnementaux et sociétaux liés à ces matières que ce soit dans les sociétés de consommation des pays industrialisés ou dans les sociétés des pays émergents.

I-1. Les MP : des matières en pleine croissance : production et consommation

Dans la société de consommation actuelle, les MP sont très présentes au quotidien que ce soit pour des produits à usages quotidiens dans la maison : emballages, bouteilles, sacs plastiques, ou dans des produits manufacturés tels que : voitures, produits électriques et électroniques… Leur utilisation ne cesse de croître depuis leur apparition au début du XXième siècle.

La production de MP ou polymères[34] synthétiques a connu une forte croissance ces dernières années quelque soit le secteur industriel observé (cf. Figure 14). En effet vis-à-vis de l'acier et de l'aluminium dont les productions ont connu une croissance de respectivement 40 et 140% ces trente dernières années, les MP affichent quant à elles une croissance de 400% (APME 2004). Elles ont notamment été utilisées en remplacement de nombreuses autres matières révolutionnant nombres d'applications.

La production mondiale de MP a été d'environ 245 millions de tonnes en 2006 (cf. Figure 14). Les principaux pays producteurs sont l'ALENA[35], la Chine, l'Allemagne (cf. Annexe 1). L'Europe des 25 plus la Norvège et la Suisse (UE_{25}+NO/CH) représentent 25% de la production mondiale des MP. La France est le 3ème pays producteur de MP en Europe avec une production de 7,3 millions de tonnes en 2006 (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008). La consommation de MP de l'UE_{25}+NO/CH a été de 49,5 millions de tonnes en 2006 dont 10,7% ont été utilisés par les industries françaises (soit 5,3Mt). Enfin, la consommation de MP par habitant a plus que doublé ces vingt dernières années dans les différentes régions du monde notamment en Europe et Asie du sud-est (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2007).

[34] ensemble des matières composées de macromolécules. Ils peuvent être naturels ou synthétiques.
[35] Accord de Libre Echange Nord Américain signé entre les Etats-Unis, le Canada et le Mexique et entré en vigueur le 1er Janvier 1994.

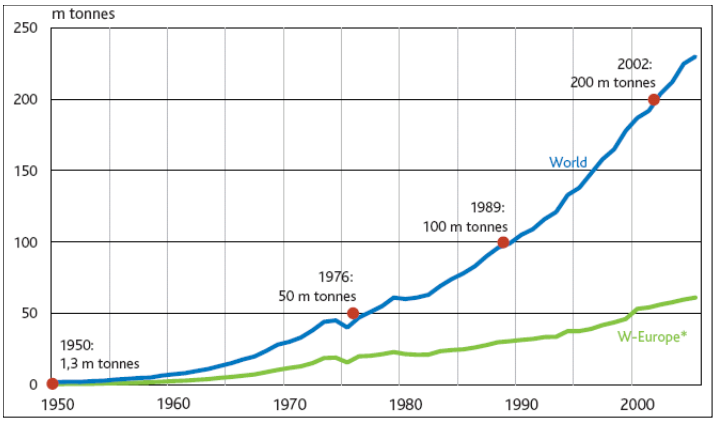


Figure 14: Evolution de la production mondiale de MP[36] de 1950 à 2006 (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008)

Cette croissance fulgurante est notamment due aux propriétés spécifiques de ces matières qui ont dans certains domaines permis des avancées humaines et technologiques importantes non envisageables avec d'autres matériaux. Par exemple les produits de l'électronique et de l'informatique au cœur des modes de communication ne pourraient actuellement être conçus sans MP notamment pour les fonctions d'isolation électrique et la conception de semi-conducteurs. L'intérêt porté à ces matières diverge selon l'application considérée (technique, économique, contextuel, environnemental)… mais également en fonction du point de vue adopté. Ainsi l'utilisateur du produit ou le consommateur ne verra pas dans l'utilisation des MP les mêmes propriétés et valeurs d'usage que le producteur. Si un consommateur ne voit dans un premier temps qu'une valeur esthétique à une pièce automobile, le concepteur tiendra compte des propriétés d'usage comme sa tenue mécanique au choc, son poids, sa facilité de mise en œuvre. De même pour un emballage, une valeur de protection sera privilégiée par l'utilisateur, le producteur sera particulièrement sensible au coût, au gain de poids conduisant à une réduction des coûts logistiques et la société civile sera plutôt interpellée par l'accumulation des déchets produits. En conséquence, les propriétés perçues positivement par certains peuvent devenir négatives pour d'autres.

L'utilisation des MP peut, en résumé, combiner plusieurs propriétés, à la fois intrinsèques au matériau et contextuelles à son usage (cf. Annexe 1). Par exemple, leur faible densité (intrinsèque) a permis un allègement des véhicules (contextuelle). Le plus marquant pour la société est sans doute l'utilisation des MP dans les applications médicales pour leurs propriétés d'usage unique minimisant les risques de contamination.

I-2. Les différents types d'applications

La diversité des MP et de leurs propriétés permet leur utilisation dans un grand nombre d'applications de la plus simple à la plus technologique.

Les principaux secteurs d'utilisation de MP sont l'emballage (37% de la consommation européenne et 41% de la consommation française), l'automobile, le BTP et l'électrique et électronique (cf. Figure 15). Même si l'emballage représente la plus grande part de MP, ce secteur n'a pas connu ces dernières années la plus forte croissance en proportion en termes de volume de MP contrairement aux secteurs automobile et électrique et électronique.

[36] Les MP prises en compte sont les thermoplastiques, les thermodurcissables, les élastomères, les adhésifs, les enduits, les mastics et uniquement les fibres en PP.

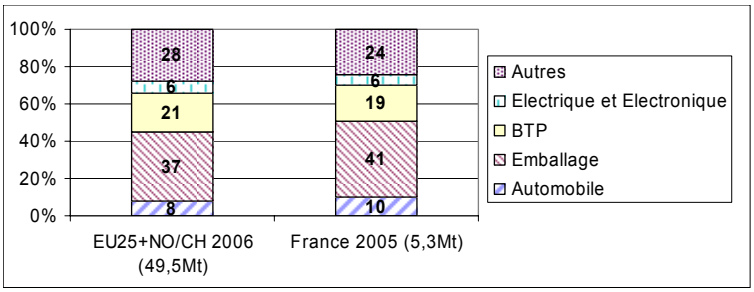


Figure 15: Les domaines d'application des MP (ADEME 2006, PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008)

La part des MP en poids reste cependant faible par rapport aux autres matériaux même pour les applications les plus consommatrices de MP (<15%) Elle représente 12% pour le secteur de l'électrique et électronique et 10 à14% pour l'industrie automobile ((APME 2004).

Il est important de noter dès maintenant que l'industrie électrique et électronique, l'industrie automobile et l'industrie de l'emballage, les secteurs où la part des MP utilisées est la plus élevée par rapport aux autres matériaux, sont les trois secteurs industriels soumis actuellement à réglementation en ce qui concerne la gestion et la mise en place de filières de valorisation et l'atteinte de taux de recyclage pour leurs produits (JOUE 2000, JOUE 2003a, JOUE 2004).

I-3. Répartition des différentes résines

Les MP utilisées se composent d'une diversité de résines. Sans entrer dans le détail des processus de mise en forme de ces matières, car tel n'est pas le sujet ici, connaître leurs spécificités est essentiel pour pouvoir choisir les filières de valorisation adaptées à chacune mais également comprendre la complexité et les enjeux de leur recyclage.

Les MP sont regroupées en deux grandes familles dont les propriétés vont conditionner les applications et leurs traitements en fin de vie. Ce sont les thermoplastiques (TP) et les thermodurcissables (TD). La principale différence repose sur leur mode de production. Ainsi simplement, les TP sont des matières dont le processus de mise en forme est réversible[37]. Au contraire les TD ont un processus de mise en forme irréversible[38]. Ces différences vont donc conditionner les applications : les TD pour des cadences moindres et usage typique dans le secteur naval et l'aéronautique sous forme de composites et les TP pour des pièces de série et une grande flexibilité dans les formes (de la bouteille au mobilier de jardin).

La consommation de TP en Europe représente pratiquement 80% du flux de MP. Ils sont composés d'une grande diversité de matières regroupées en différentes familles : les polyoléfines (Polypropylène (PP), Polyéthylène (PE)), les polystyréniques (Polystyrène (PS), Polystyrène Expansé (PSE), Acrylonitrile Butadiène styrène (ABS))… Les principales MP utilisées sont le PP, le PE et le PVC (cf. Figure 16).

[37] En augmentant la température les liaisons physiques établies entre les chaînes sont détruites et une nouveau composant peut-être obtenu.
[38] Des liaisons chimiques ont été créées entre les chaînes conduisant à un réseau réticulé.

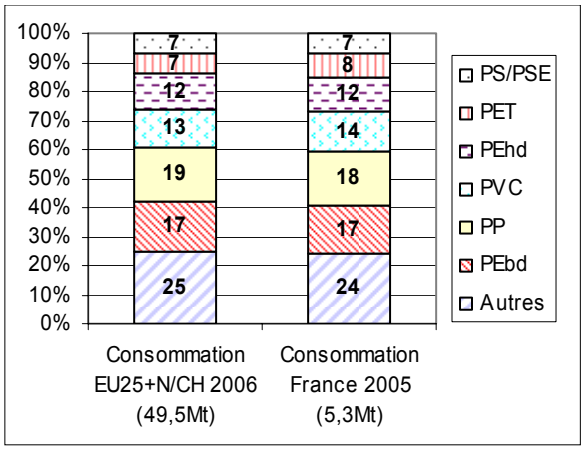


Figure 16:Répartition de la consommation de différentes MP en Europe et en France adaptée de (ADEME 2006, PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008)

Les MP sont également classées en fonction de leurs propriétés ou technicités répondant à des applications de plus en plus exigeantes (cf. Figure 17):

- Les MP de commodité : MP à usage courant comme le PP, le PE…
- Les MP techniques : MP aux propriétés plus élevées pour des applications de haute qualité: PA, PC…
- Les MP hautes performances : MP pour des applications locales au niveau de propriétés très élevé : PEEK, Polyethers sulfones…

Ces groupes sont liés non seulement aux propriétés des MP mais également à leur volume de production et à leur prix (cf. Figure 17). Ainsi, les MP aux prix élevés présentent des performances techniques de hauts niveaux s'adressant à des applications de niches avec des volumes moindres, une mise en œuvre plus complexe justifiant leurs prix importants. A l'opposé, des matières comme le PP et le PE au prix et propriétés plus faibles, sont adaptés à des productions de masse. Pour ces derniers, un effet d'économie d'échelle s'applique. Ainsi la Figure 17 met bien évidence la relation entre le prix des MP, la taille de chaque marché mais également leur technicité (Peck 2003). Pour chaque matière, il y a une fourchette de prix dépendant de leur technicité, de leur mise en œuvre, de leur composition, l'énergie demandée par les moyens de production… D'autre part, le choix d'une matière pour une application ne fait pas intervenir que le prix, ce choix est plus complexe basé sur une combinaison de facteurs et propriétés que nous avons résumés dans l'Annexe 1.

Compte-tenu de la multiplicité de leurs propriétés, de leurs applications et des avancées qu'elles ont permises que ce soit en termes économiques, techniques et sociétaux les MP sont aujourd'hui des matières techniquement incontournables dans la société. Mais, de part leur croissance et les questionnements actuels vis-à-vis de l'environnement, l'utilisation des MP et leur devenir si ils ne peuvent être totalement remis en question incitent cependant à s'interroger sur le bien fondé de cet usage jusqu'ici non limité.

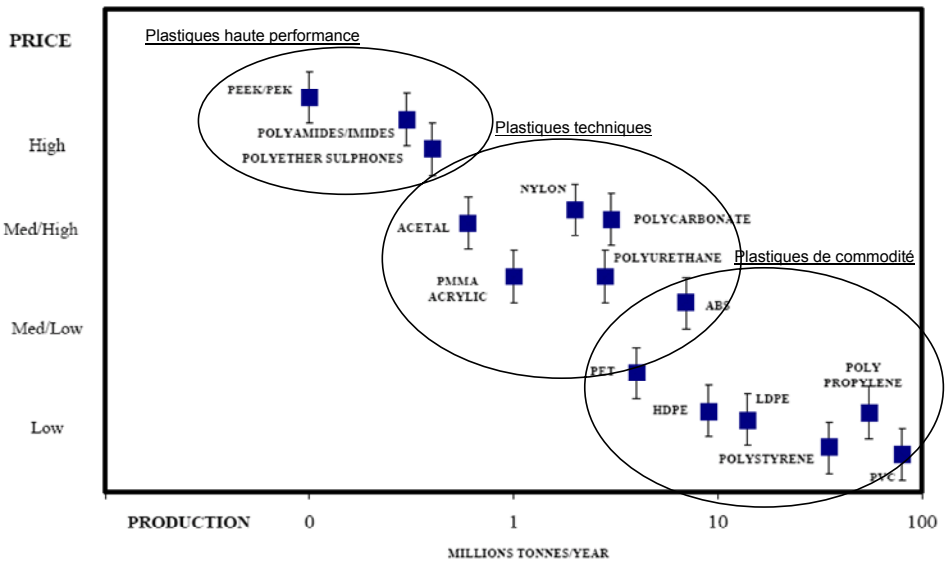


Figure 17: Prix indicatifs et places sur le marché mondial des principales MP (Peck 2003)

II- Les enjeux pour la société du devenir des MP : de la ressource au produit en fin de vie

L'observation des objets qui nous entourent montre que les MP sont devenues incontournables quelque soit le domaine d'applications considéré, et nous ne pouvons imaginer l'arrêt de leur emploi. Cependant elles font l'objet de nombreuses polémiques concernant leur impact sur la santé (dangers liés aux rejets des industries chimiques, aux possibles transferts dans les aliments…), l'environnement (consommation de ressources non renouvelables) mais également en raison des diverses pollutions qu'elles génèrent en fin de vie (visuelles, déchets, émissions dans les décharges, incinérateurs…). Cette évolution contribue à inciter les industriels utilisateurs de ces MP à prendre en compte la question de la fin de vie de leurs produits (cf. Ch1 partie 1 II-).

Cette partie exposera les diverses problématiques gravitant autour des MP ; de la ressource qu'est le pétrole à la fin de vie du produit utilisateur de MP. Cette analyse conduira à présenter les diverses solutions envisagées pour répondre aux problèmes soulevés - qu'il s'agisse de l'épuisement des ressources ou de l'augmentation des volumes de déchets - mais également à identifier les conséquences de leur prise en compte trop tardive.

II-1. Les ressources de pétrole : matière première et source énergétique

II-1-1. La ressource : le pétrole

Le pétrole est devenu, suite à l'industrialisation du XXième siècle, une ressource nécessaire à de multiples applications : énergie, transport, pétrochimie, MP…. (Duval 2004) Il fait partie de ces ressources devenues essentielles pour garantir le mode de vie actuel. C'est, entre autres, une ressource indispensable aux MP. En effet, il est la source principale de synthèse des monomères, éléments de base de la production des polymères conduisant aux MP. Sur 100T de pétrole extraites, 4T sont consacrées à la synthèse des monomères ((Duval 2004). Pour les principales MP, les polyoléfines, l'élément de base de fabrication est le naphta issu du pétrole (cf. Figure 18). Pour faire une tonne de MP, il faut en moyenne 1,6T de pétrole (matière première et énergie confondues) (Duval

2004). Donc pour la consommation des 5,3Mt fabriquées en France en 2006, 8.5MT de pétrole ont été nécessaires.

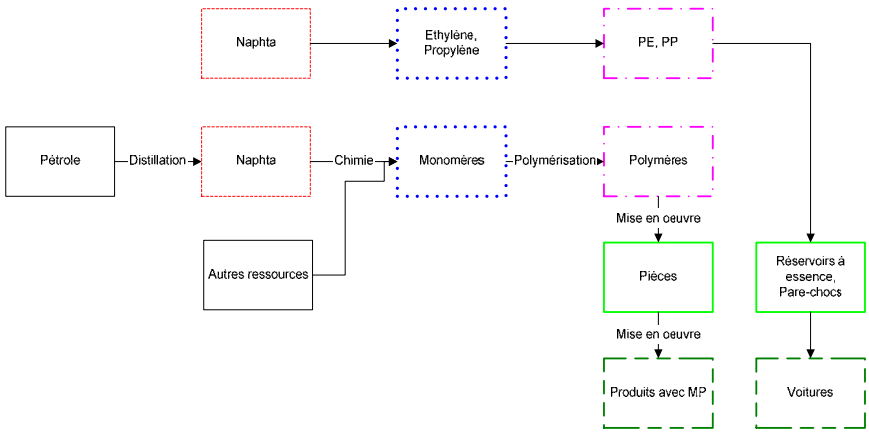


Figure 18: Etapes de transformation des MP des matières premières au produit fini

II-1-2. De la diminution vers la raréfaction des ressources pétrolières

Le pétrole est une ressource non renouvelable[39] à l'échelle de la vie humaine mais renouvelable à l'échelle des temps dits « géologiques ». Ainsi, le processus de formation de cette ressource à base de sédiments est très complexe et cette formation nécessite une dizaine de millions d'années. Les ressources pétrolières ont donc une quantité finie (Manicore 2003, Durand 1987). Se pose alors la question de la disponibilité de cette ressource et de ses réserves. La quantification de ces dernières par les experts passe par la recherche de deux points fondamentaux pour prévoir l'évolution de leur consommation (cf. Annexe 2):

- Le pic pétrolier ou pic de Hubbert : il correspond statistiquement au moment où la moitié des ressources aura été consommée. C'est le moment à partir duquel la production entamera un processus de décroissance. Elle ne pourra plus répondre à la demande.
- Le nombre d'années restant de consommation : ce sont les réserves[40]. Elles sont évaluées à partir d'une année donnée et tiennent compte de l'évolution du taux de consommation.

L'occurrence de ces points est particulièrement redoutée car ils sont synonymes de raréfaction des ressources, de transformation des systèmes économiques de production et de consommation et de tensions géopolitiques.

Les prévisions obtenues par les différents experts « optimistes » ou « pessimistes » varient d'une quarantaine d'années ; soit une variation entre 2010 et 2050 (cf. Annexe 2). L'Annexe 2 montre qu'après 2020, quelque soit la courbe prévisionnelle, la production ne pourra répondre à la demande.

[39] La renouvelabilité d'une ressource est liée à la vitesse de renouvellement et à la vitesse de consommation. Une ressource est dite non renouvelable lorsque l'échelle de temps de son renouvellement est très supérieure à l'échelle de temps humaine (définition issue de LE POCHAT, S. *Intégraton de l'éco-conception dans les PME: Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits*. p. 279).

L'évaluation de réserves

Les réserves actuelles de pétrole sont difficiles à estimer. Leur quantité varie selon les experts induisant des difficultés pour obtenir une idée précise sur l'épuisement de cette ressource. Les divergences dans la quantification viennent notamment de la prise en compte, ou non, des diverses sources de pétrole, de l'évolution de la consommation, des progrès techniques, de la découverte de ressources non encore connues, les justes définitions des limites physiques des réservoirs, le coût du baril rendant rentable des gisements non conventionnels non encore exploités, les déclarations des producteurs (déclarations qui ont une forte incidence sur les cours en bourse des actions de ces mêmes producteurs) (Laherrère 2007)…

Les réserves prouvées[41] ont été estimées par l'IFP (Institut Français du pétrole) (Manicore 2005, IFP) à 40 années de consommation au rythme actuel de croissance (2% par an). Selon les experts elles varient entre 30 et 40 ans[42] et ont peu évoluées ces dernières années. Les réserves globales[43] de pétrole répondraient à 100 années de consommation au rythme actuel de croissance.

Cette diminution des ressources est d'autant accélérée que se développent rapidement des pays émergents comme la Chine et l'Inde, grands consommateurs de matières et d'énergie[44]. Aujourd'hui seulement 16 % de la population mondiale se partage 70 % de la consommation mondiale de pétrole. L'AIE prévoit une croissance de la demande pétrolière mondiale de l'ordre de 60% dans les trente années à venir[45].

Cette croissance de la consommation de pétrole est également due à l'augmentation de l'utilisation de MP que ce soit dans l'industrie des pays industrialisés ou dans les pays émergents dont les besoins en matières sont importants (cf. Annexe 1). Par exemple, la croissance annuelle de la consommation de MP par l'Europe de l'Est est estimée à 7% jusqu'en 2010.

Tous les indicateurs montrent une augmentation de la consommation énergétique et de la consommation des MP liées, notamment, aux besoins croissants des pays émergents et à une consommation toujours plus importante de nos sociétés. Cette croissance de la consommation est associée une diminution des réserves et une crainte d'un épuisement prématuré des ressources pétrolières. Face à l'urgence de la situation, des actions s'imposent pour trouver des solutions alternatives car sans anticipation, l'épuisement de cette ressource conduirait à des conséquences catastrophiques.

---

[40] Une réserve est une déclaration de l'opérateur, qui correspond à ce que ce dernier est certain de pouvoir extraire de terre compte tenu des informations géologiques, techniques, et économiques du moment.

[41] Ce sont les quantités de pétrole dont l'existence est physiquement prouvée sans considération sur la possibilité d'une récupération future. Elles sont récupérables dans les conditions techniques et économiques du moment. Leurs chances de récupération sont d'au moins 90 %. Les réserves prouvées sont les réserves publiées par les producteurs qui ne correspondent pas à ce qui reste sous terre mais seulement à une fraction. La constante croissance de la consommation pétrolière est compensée par l'amélioration des taux d'extraction, l'exploitation de nouveaux gisements de pétrole non exploités auparavant MANICORE, J. M. *Qu'est-ce qu'une réserve de pétrole? en avons-nous pour longtemps?*.

[42] BP statistical review, United States Geological Survey (USGS) (Oil and Gas Journal)

[43] Elles correspondent à l'addition des réserves prouvées, probables et possibles. Les réserves probables sont les quantités de pétrole susceptibles d'être produites à partir des réservoirs prouvés ou probables aux conditions économiques et techniques d'un futur proche. Ces quantités ont une probabilité supérieure à 50 % d'être économiquement exploitables Les réserves possibles sont les quantités de pétrole dont l'existence sous terre est considérée comme seulement possible. Elles sont récupérables aux conditions économiques et techniques dans un futur non déterminé. Leur probabilité d'être économiquement exploitables est de 10%.

[44] La Chine utilise désormais la totalité de sa production de raffinage et est devenue importatrice d'essence avec une croissance de 7 à 10% de sa demande selon le type de carburants SILVA, C. *Raffinage et pétrochimie*. p. 9.

[45] IFP. La Notion De Réserves Pétrolières.

II-1-3. Les solutions alternatives

En réponse à la perspective d'une pénurie pétrolière, des pressions réglementaires et sociétales se sont établies incitant les producteurs, les collectivités locales, les différents acteurs de l'industrie des MP (chimiste, plasturgistes, laboratoires de recherche…) à mettre en place des solutions alternatives à l'utilisation du pétrole. Deux voies de recherche sont étudiées : un remplacement du pétrole par une autre ressource en tant qu'énergie ou bien un remplacement des matières utilisatrices de pétrole par d'autres matières. L'économie de pétrole ainsi générée permettra de réserver son utilisation à des applications spécifiques laissant le temps à des solutions de remplacement de se mettre en place.

Les solutions pour tenter de réduire à long terme l'indisponibilité du pétrole en tant qu'énergie sont présentées dans l'Annexe 2 à titre d'information pour le lecteur. Nous ne présenterons dans cette partie que les solutions pour le pétrole en tant que ressource, solutions directement liées aux MP.

Solutions pour un remplacement du pétrole comme matière première

Les MP « renouvelables »[46]

Il existe peu de solutions satisfaisantes de remplacement des MP par des matières n'utilisant pas de ressources fossiles et disposant du même niveau de technicité. Une des solutions proposées sont les plastiques naturels aussi appelés bioplastiques et parfois plastiques renouvelables. Les bioplastiques sont issus de biopolymères. Ils sont dits biodégradables[47]. Deux sources sont possibles[48] : les organismes vivants (cellulose, amidon) pour des plastiques à usage commercial ou des molécules provenant de ressources naturelles renouvelables (acide lactique issu de betterave, pomme de terre…). Ils représentent moins de 1% du marché des MP.

Solution	Avantages	Inconvénients	Statut	Economie
Bioplastiques	-Renouvelable.	-Caractéristiques mécaniques insuffisantes. -Ressources insuffisantes pour toutes les applications. -Procédé énergivore -Equilibre avec la culture alimentaire -Prix élevé	<1% des MP	100%

Tableau 5: Les alternatives au pétrole en tant que matière première des MP

En synthèse, un faisceau de solutions alternatives à l'indisponibilité future des ressources pétrolières en tant qu'énergie ou MP se construit. Compte-tenu des avantages et inconvénients des diverses solutions proposées, une solution unique n'est pas envisageable. Chacune doit tenir compte des

[46] Le terme MP renouvelable est souvent utilisé à mauvais escient. Ainsi ce terme réfère dans certains cas à l'utilisation de matière renouvelable avec une matrice polymère synthétique. Dans ce cas, le terme renouvelable n'est pas approprié car la matrice reste non-renouvelable et consommatrice de pétrole.

[47] Le terme biodégradable porte dans de nombreux cas à confusion pour le consommateur, biodégradable étant parfois utilisé à la place de biofragmentable. La biodégradation est la dégradation du polymère par un système biologique. Un matériau est biodégradable si au stade ultime de sa décomposition, les molécules résiduelles sont assimilées par les micro-organismes dans un temps donné. Se dit pour des matières naturelles tels les sacs en amidon de mais. Un matériau est biofragmentable si la dégradation consiste à une fragmentation de celui-ci. Le polymère devient alors invisible à l'œil nu mais les fragments ne sont pas assimilés par un système biologique. C'est le cas de la plupart de MP « renouvelables » car ils contiennent une part de matrice synthétique uniquement biofragmentable.

[48] http://www.greenplastics.com/ How Green Are Green Plastics? Août 2000; Scientific American Magazine; by Tillman U. Gerngross, Steven C. Slater; 6 Page(s).

spécificités géographiques locales et être dans la majorité des cas, développée à l'échelle d'un pays voire même d'une région.

En conclusion, la solution globale sera constituée d'un croisement de solutions satisfaisantes d'un point de vue technique, économique et environnemental et chacune répondant à une problématique spécifique soit pour une industrie, une application ou une population. Même si l'utilisation de MP n'est pas déterminante dans l'épuisement des ressources pétrolières, cet épuisement quant à lui impacte directement le devenir des MP. L'économie de pétrole, en tant qu'énergie, peut permettre de réserver son utilisation à des applications spécifiques comme les MP dont le remplacement s'avère complexe et donner ainsi le temps au développement de nouvelles solutions.

II-2. Les déchets de MP

Près de deux milliards de tonnes de déchets MP sont produits chaque année dans l'Europe communautaire et ce chiffre augmente chaque année. Le stockage des déchets dans les CET (principale voie de traitement de ces déchets) n'est pas une solution viable et leur élimination n'est pas acceptable compte-tenu de leurs impacts sur l'environnement. L'Europe préconise la prévention de la production de ces déchets mais surtout favorise leur réintroduction dans le cycle de vie du produit quand des solutions techniquement, économiquement et environnementalement viables existent. Une réglementation sur les déchets a été mise en place depuis 1975 pour établir un cadre d'application commun à la gestion des déchets. Cette réglementation a fortement évolué pour :

- clarifier la définition du terme déchet et fournir une définition commune (JOUE 2006, CCE 2007b)
- mettre en place des stratégies communes pour promouvoir leur recyclage et la valorisation des déchets avec la définition d'objectifs à atteindre (CCE 2005a, JOUE 2008)
- établir des modes d'organisation et de financement pour faciliter le recyclage de certains flux (emballages, DEEE, VHU) (JOUE 2000, JOUE 2003a, JOUE 2004)
- combiner des directives existantes pour n'obtenir qu'un texte de référence dans la gestion des déchets (JOUE 2008).

Dans cette partie, à partir des contradictions liées au terme de déchet présentées dans l'Annexe 3, nous présenterons la définition retenue pour la suite du mémoire et l'implication du cadre réglementaire pour la gestion des déchets MP.

II-2-1. Définition

La nature des déchets, leur composition, est un bon indicateur des conditions et du mode de vie[49] (Duval 2004). Or notre mode de vie s'appuie sur une consommation de masse servie par des moyens de production gigantesques générant de grandes quantités de déchets concentrées par zone géographique. La mise en place de solutions adaptées et efficientes suppose de connaître la nature de ces déchets et donc impose une définition claire et commune de la notion de déchets.

[49] G. Bertolini « déchets et archéologie » dans déchets, sciences et techniques n°25 2002.

L'expérience passée montre que l'ambiguïté et les divergences d'interprétation du terme déchets autorisent les industriels à contourner, si besoin, les réglementations sur la gestion de leurs déchets. En effet, le souci majeur de nombreuses entreprises est aujourd'hui de les éliminer au moindre coût. Dans ce contexte, il est arrivé que certaines entreprises cherchent à transférer leurs déchets dangereux ou non hors des frontières nationales c'est-à-dire vers des pays en voie de développement où ils pourront être stockés dans des conditions sanitaires dangereuses pour les populations locales[50] ou bien traités par ces mêmes populations à des moindres coûts dans des conditions pouvant porter atteinte à l'intégrité physique de ces populations[51].

Une des principales divergences repose sur la détermination du moment à partir duquel le produit devient déchet : quand il y a abandon du bien par le dernier détenteur ou plus d'utilisation économique possible ou en fin d'opération de valorisation… Ces différences expliquent que certains objets soient considérés comme des déchets en Europe mais comme des matières premières là où ils sont exportés. Dans notre étude, nous proposons et utiliserons la définition suivante :

Un déchet (objet dont le dernier détenteur doit se défaire) sera considéré comme matière première ou ressource potentielle tant qu'il pourra faire l'objet d'une valorisation technique et économique respectueuse de l'environnement mais conservera le nom de déchet afin de bénéficier des conditions spécifiques de traitement liées à leur statut. Il devient ressource à partir du moment où un débouché existe. Par contre, compte tenu de sa provenance (objet considéré en fin de vie par le dernier détenteur ou rebuts de production), il sera considéré comme déchets en terme d'export tant qu'il n'aura pas été traité (soit dépollué, trié, lavé, broyé) par les industriels concernés sur un territoire donné. Après traitement, le produit pourra être soumis aux lois du marché. Les produits ne pouvant plus faire l'objet d'un traitement technique et économique sont considérés comme déchets ultimes.

La nature du déchet à traiter et son origine conditionnent le choix des solutions de traitement. Les déchets de production issus des procédés de fabrication ont des propriétés peu dégradées et peuvent facilement être réutilisés directement en production. Les déchets post-consommation ou issus de produits arrivés en fin de vie ont des propriétés souvent dégradées et leur valorisation nécessite des conditions techniques particulières. Ils ne peuvent de ce fait être réutilisés directement dans les sites de production et doivent être traités par des acteurs intermédiaires avant d'être de nouveau intégrés dans la filière de production classique.

Un autre critère de différenciation des déchets est leur dangerosité. On considère ainsi trois classes de matériaux : les déchets inertes[52], banals[53] et spéciaux[54].

Notre recherche se concentre sur l'analyse du devenir des déchets de MP en fin de vie considérés comme déchets banals sur le territoire français.

[50] « Déchets toxiques à Abidjan :des milliers de victimes » 15-09-06 www.notre-planete.info. La convention de Bâle sur le transfert des déchets dangereux n'est pas respectée.

[51] La planète en danger : « Déchets, les recycleurs et les recyclés »- Atlas 2006 du monde diplomatique- Février 2006, www.monde-diplomatique.fr/cartes/atlas-dechets

[52] Déchets n'ayant pas d'action sur le milieu ambiant et non susceptibles d'évolution physico-chimique ou biologique importante au cours du temps : CET de classe 3

[53] Déchets non inertes et non dangereux. Ordures ménagères, déchets entreprises : CET de classe 2

[54] Déchets dangereux. Ils nécessitent des protections particulières vis-à-vis de l'environnement lors de leur collecte, traitement, stockage. Ceux issus de l'industrie ne peuvent être stockés dans des entités recevant d'autres déchets : CET de classe 1

En EU_{25}+NO/CH en 2006 (défini p. 45), la quantité de déchets de MP a augmenté en moyenne de 3% par an en 10 ans (1996-2006) évolution en lien direct avec la croissance de la consommation (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008). La production de déchets de MP post-consommation a été de 23 Mt soit environ 46% de la consommation de produits en MP. Cet écart entre production et déchets est lié à l'export mais surtout aux durées de vie des produits entraînant un décalage temporel entre la production et la fin de vie du produit (cf. Figure 23). En France, la quantité de déchets MP a été de 3,4Mt en 2004 dont 87% de déchets fin de vie (2,9Mt) (Consultic marketing and industrieberatung GmbH 2005).

Les résines les plus présentes dans les déchets MP sont les PE (cf. Annexe 3). Le PE est souvent utilisé pour des applications à faible durée de vie tels les emballages qui, une fois produits, se retrouvent rapidement en déchets (Les produits à courte durée de vie représentent 40% des produits contenant des MP) (cf. Figure 23). Les déchets issus de l'emballage représentent 61-64% du flux global et l'automobile à peine 6-7%. La quantification précise des flux de déchets de MP reste cependant difficile en raison d'une information peu disponible et diffuse et du manque de traçabilité des flux de déchets (ADEME 2008b).

II-2-2. Les solutions alternatives et leurs résultats

Les mentalités ont évolué face à la notion de déchets, notamment vis-à-vis des impacts de leur élimination sur la santé et l'environnement.

Les quantités de déchets produites chaque année et leur augmentation constante imposent de mettre en place des solutions de traitement plus satisfaisantes que la mise en décharge ou l'enfouissement.

Tout d'abord, des mesures réglementaires ont été créées et appliquées afin de responsabiliser les producteurs face au devenir de leur produit et de les inciter à mettre en place des solutions de valorisation (directive VHU (JOUE 2000), directive DEEE (JOUE 2000) et la directive emballages (JOUE 2004)). Ces mesures induisent, entre autres, de déployer des politiques d'éco-conception qui favorisent l'extraction et le retraitement des plastiques usés en fin de vie du produit fini au travers de l'obligation pour les producteurs d'atteindre les objectifs de valorisation (cf. Figure 19). Comme nous l'avons démontré dans la partie 1 et de la même façon pour les DEEE et les emballages, la gestion des MP en fin de vie doit être prise en compte afin de respecter ces objectifs.

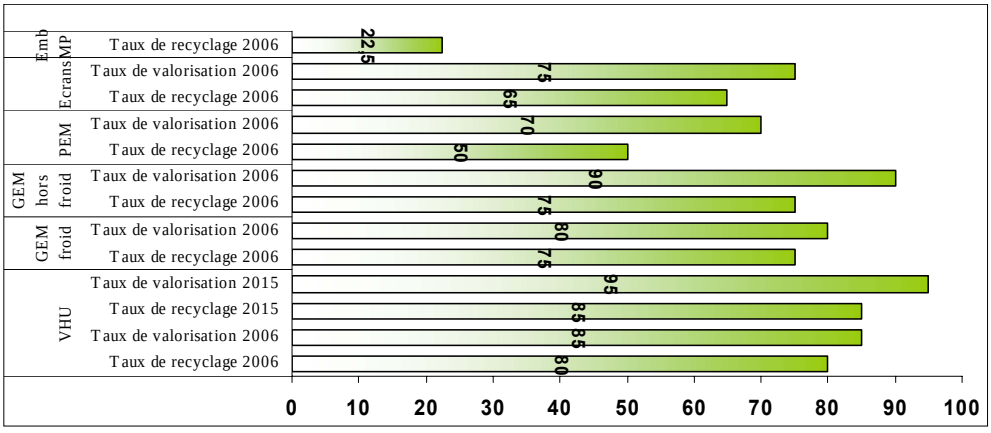


Figure 19: Objectifs exigés par les directives VHU, DEEE et emballages en MP

D'autre part, dans un cadre plus général de la gestion des déchets, l'UE affiche une stratégie dont le but est de réduire les impacts environnementaux générés par les déchets depuis leur production jusqu'à leur élimination (CCE 2005a). Cette stratégie s'inscrit dans une approche plus globale orientée cycle de vie des ressources (CCE 2005b). Le principal objectif de cette stratégie est la promotion du recyclage des déchets (diminution des quantités mises en décharge)

Les solutions alternatives à la mise en décharge ou CET proposées notamment par l'UE sont :

- Le recyclage matière: « retraitement dans un processus de production des déchets soit en vue de la même utilisation que celle d'origine soit à d'autres fins mais à l'exclusion de la valorisation énergétique » (JOUE 2000). Pour les MP, la valeur ajoutée de la résine est conservée. Le recyclage peut-être mécanique[55] ou chimique[56].

- La réutilisation : « toute opération par laquelle les composants (usagés) servent pour le même usage que celui pour lequel ils ont été conçus » (JOUE 2000), dans le cadre de la rénovation de produit[57].

- La valorisation matière : utilisation des déchets comme charge dans un nouveau produit ou comme matières secondaires pour un procédé. Dans ce cas il n'y a pas de recyclage matière proprement dit. La valeur ajoutée de la résine MP est perdue. Ce procédé est principalement utilisé pour les TD, matières non recyclables.

- La valorisation énergétique : « utilisation de déchets combustibles en tant que moyen de production d'énergie, par incinération directe avec ou sans autres déchets, mais avec récupération de la chaleur. » (JOUE 2000). Ce procédé est largement utilisé pour l'élimination des déchets ménagers.

- le développement de MP biodégradables, biofragmentables: Parmi ces MP, il existe des polymères à durée de vie contrôlée. La MP se fragmente sous l'effet par exemple de la photooxydation au bout d'un temps donné. Ils sont utilisés notamment dans le secteur agricole (films entourant les racines des plantations). Ces MP ont notamment été développées pour permettre la dégradation des déchets en CET. Ces matières interfèrent dans le recyclage des autres MP (Températures de traitement différentes, détérioration de la qualité des MP, risque d'inflammation de la matière dans les procédés).

Le principal avantage du recyclage matière et de la réutilisation est l'économie de ressources réalisée en utilisant une matière recyclée[58]. Mais ces procédés s'avèrent coûteux que ce soit pour l'obtention d'une matière de qualité dans le cadre du recyclage mécanique ou de mise en œuvre dans le cadre

[55] Selon Goldmann GOLDMANN, G. *Plastics recovery from ASR: The VW-SiCon process*, p. IDENTIPLAST- Identify the opportunities of plastics recycling, ce sont les procédés de transformation des matériaux fin de vie en matière utilisable pour la production de nouveaux produits à l'aide de moyens physiques (procédés mécaniques, dissolution)

[56] Selon Goldmann GOLDMANN. *Plastics recovery from ASR: The VW-SiCon process*, p. IDENTIPLAST- Identify the opportunities of plastics recycling, ce sont les procédés de transformation des matériaux en éléments chimiques de base (ou monomères pour les plastiques) par des moyens chimiques ou thermiques. Les experts sont en désaccord sur l'association des procédés comme la pyrolyse (obtention de gaz après traitement) aux solutions de recyclage chimique. Nous regroupons les procédés thermiques (pyrolyse, gazéification) sous le terme de valorisation chimique ou thermique et non de recyclage matière.

[57] La réutilisation de sera pas abordée dans cette partie car elle concerne les composants en MP. Nous traiterons ici uniquement le devenir des déchets MP en tant que matière.

[58] Matière ayant connu au moins un cycle d'utilisation.

du recyclage chimique et de la réutilisation. En ce qui concerne la valorisation énergétique, l'attrait réside dans l'utilisation du potentiel énergétique élevé des MP et dans la possibilité de traiter un important volume de déchets. Mais cette économie est réalisée au détriment de l'utilisation d'une matière secondaire et ne donne pas de réponse au problème de pénurie de ressource qui impacte directement la matière vierge. La valorisation matière quant à elle permet l'économie de charges dans un produit ou de matières secondaires dans un procédé. Elle entraîne une perte directe du potentiel matière et énergie de la matière d'origine. Il paraît évident que réduire les quantités de déchets n'est pas possible avec une seule solution mais demande l'application d'un faisceau de solutions, solutions adaptées à chaque type de déchets fin de vie.

Ces dix dernières années, le recyclage matière et la valorisation énergétique des déchets de MP ont connu un accroissement moyen de 10% par an (cf. Figure 20). Le taux de valorisation moyen en EU_{25}+NO/CH est de l'ordre de 50% dont 19% de recyclage mécanique[59]. Cette évolution démontre les moyens mis en œuvre pour promouvoir la valorisation des déchets de MP et diminuer de façon significative la part de ces matières mises en décharge. Mais des efforts restent à faire, la part de MP non recyclés et non valorisées est encore trop élevée (cf. Annexe 3).

Les taux de recyclage et de valorisation ainsi que leur répartition varient en fonction de la zone géographique considérée (cf. Annexe 3) et par conséquent des choix politiques inhérents à chaque gouvernement.

Le tissu industriel existant conditionne les choix de valorisation. Compte-tenu de sa forte capacité industrielle en termes d'incinérateurs, l'incinération a été fortement développée en France ces dernières années comme solution principale à l'élimination des déchets ménagers. De même, un accroissement de la pression des industries pétrochimiques, très représentées en Allemagne, favorise le développement de la valorisation énergétique dans le but de maintenir le marché des MP vierges. Faire de l'incinération une voie à privilégier ne semble pas satisfaisant à long terme compte tenu des potentiels énergétique et matière des déchets MP.

En dehors des nouveaux pays membres, la dispersion des taux de recyclage est faible et ces taux correspondent principalement au développement du recyclage des déchets d'emballage obtenus par la collecte sélective (ex : bouteilles en PET) et des films agricoles (cf. Figure 21).

Nous allons détailler les résultats pour les trois principales applications soumises à réglementation (Automobile, emballage, électrique et électronique) dans les pays les plus producteurs de déchets MP (Consultic marketing and industrieberatung GmbH 2005).

Globalement en Europe de l'Ouest, les MP automobiles sont faiblement valorisées, notamment en raison des difficultés d'extraction des composants plastiques dans les produits pluri-matériaux et du manque d'installations industrielles (cf. chapitre 1 partie 1). En Allemagne, plus de 7% des déchets MP automobiles sont recyclés chimiquement, contrairement aux autres pays où ce type de procédé est quasi-inexistant au stade industriel. Le traitement des déchets MP d'emballage est le secteur bénéficiant des plus forts taux de valorisation permettant à certains pays de répondre aux exigences de la directive 2004/12/CE (JOUE 2004). Leur valorisation présente un challenge en termes de diversité des MP en présence, mais également de contamination. Pour les MP issues de DEEE, le

[59] Dans la suite de ce mémoire, nous parlerons principalement du recyclage mécanique car le recyclage chimique est très peu développé en Europe (cf. Figure 20). Même si il apparaît très attractif par l'obtention du monomère de

recyclage mécanique est faible compte-tenu de la complexité de mettre en place des circuits de traitement, complexité liée directement à la grande diversité dans les catégories de DEEE (SCRELEC 2004).

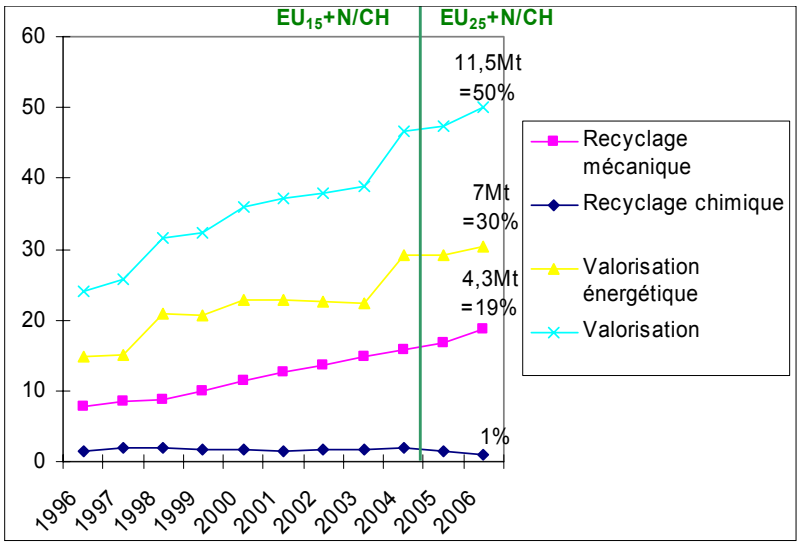


Figure 20: Evolution des voies de traitement des déchets de MP en Europe de 1996 à 2006 adaptée de (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008, APME 2004)

Concernant plus particulièrement la France, les résultats sont assez élevés puisque les taux de valorisation dépassent 40% sauf pour l'industrie automobile où le taux est très faible correspondant uniquement à du recyclage mécanique (cf. Figure 21). Le domaine le plus performant est l'agriculture avec un taux de recyclage de 40% et de valorisation de 78% en 2004. Ainsi la collecte des films agricoles est bien établie et économiquement viable. Pour la construction, la part du recyclage mécanique correspond aux nombreuses grandes pièces en MP (type fenêtre en PVC).

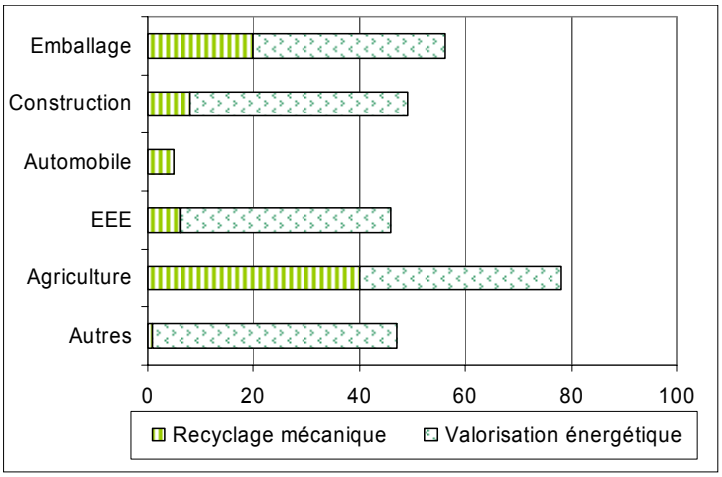


Figure 21: Taux de recyclage et de valorisation énergétique de déchets MP post-consommation en fonction de leur application pour quelques pays d'Europe de l'Ouest en 2004 (Consultic marketing and industrieberatung GmbH 2005)

Les taux de recyclage et de valorisation par résine MP sont délicats à évaluer et les valeurs données sont souvent approximatives. Ainsi, la compilation d'informations pour établir ces taux se heurte au

base équivalent au vierge et que des techniques fonctionnelles ont été mises en place, ses coûts de mise en œuvre restent trop élevés ADEME. *Recyclage chimique des matières plastiques*.

manque de traçabilité sur le devenir des résines en fonction du circuit de traitement suivi et sur la difficulté à obtenir des informations directement auprès des opérateurs. Les bilans de flux réalisés par des organismes comme l'ADEME (ADEME 2008b) et PlasticsEurope (Consultic marketing and industrieberatung GmbH 2005) permettent cependant d'obtenir des ordres de grandeur (cf. Figure 22). Les résines TP présentant le plus fort taux de recyclage en France sont : le PET (bouteilles), le PE (emballages, sacs, big-bags), le PP (containers, produits ménagers).

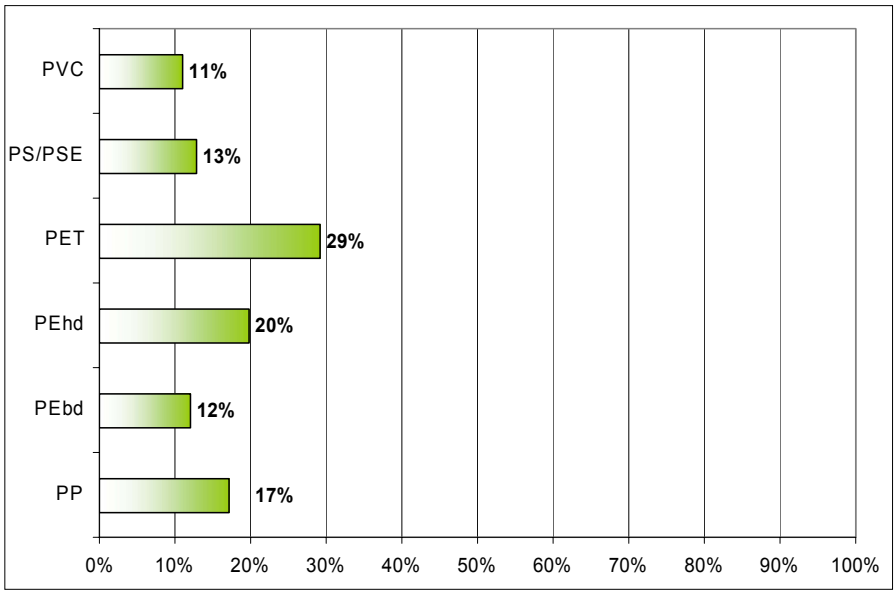


Figure 22: Taux de recyclage[60] matière par MP TP[61] en France en 2005

Obtenir une gestion efficiente des déchets de MP ne se limite pas à une solution unique mais à la mise en œuvre concourante de différentes stratégies de valorisation. Même si ces dernières années l'augmentation des différents taux de valorisation démontrent les efforts réalisés pour une meilleure gestion des déchets, l'exploitation du potentiel matière de ces déchets reste à promouvoir.

En conclusion, nous disposons de déchets MP, sources potentielles de matières premières pour lesquelles des solutions de valorisation alternatives à la mise en décharge et à l'incinération doivent être mises en place. D'un autre côté, les industriels et la société actuelle sont confrontés à un épuisement des ressources pétrolières et donc à une pénurie future des MP. Une des solutions à privilégier pour minimiser l'utilisation de pétrole, assurer la position des MP dans la société et réduire la quantité de déchets enfouis et incinérés est donc de favoriser le développement du recyclage matière des MP (cf. Figure 23).

[60] Dans ce graphique, le taux de recyclage de la matière MP_x est défini comme suit : $\text{Taux de recyclage de } MP_x = \frac{\text{Quantité de } MP_x \text{ recyclée}}{\text{Quantité totale de dechets post - consommation de } MP_x}$

[61] Seules résines recyclables.

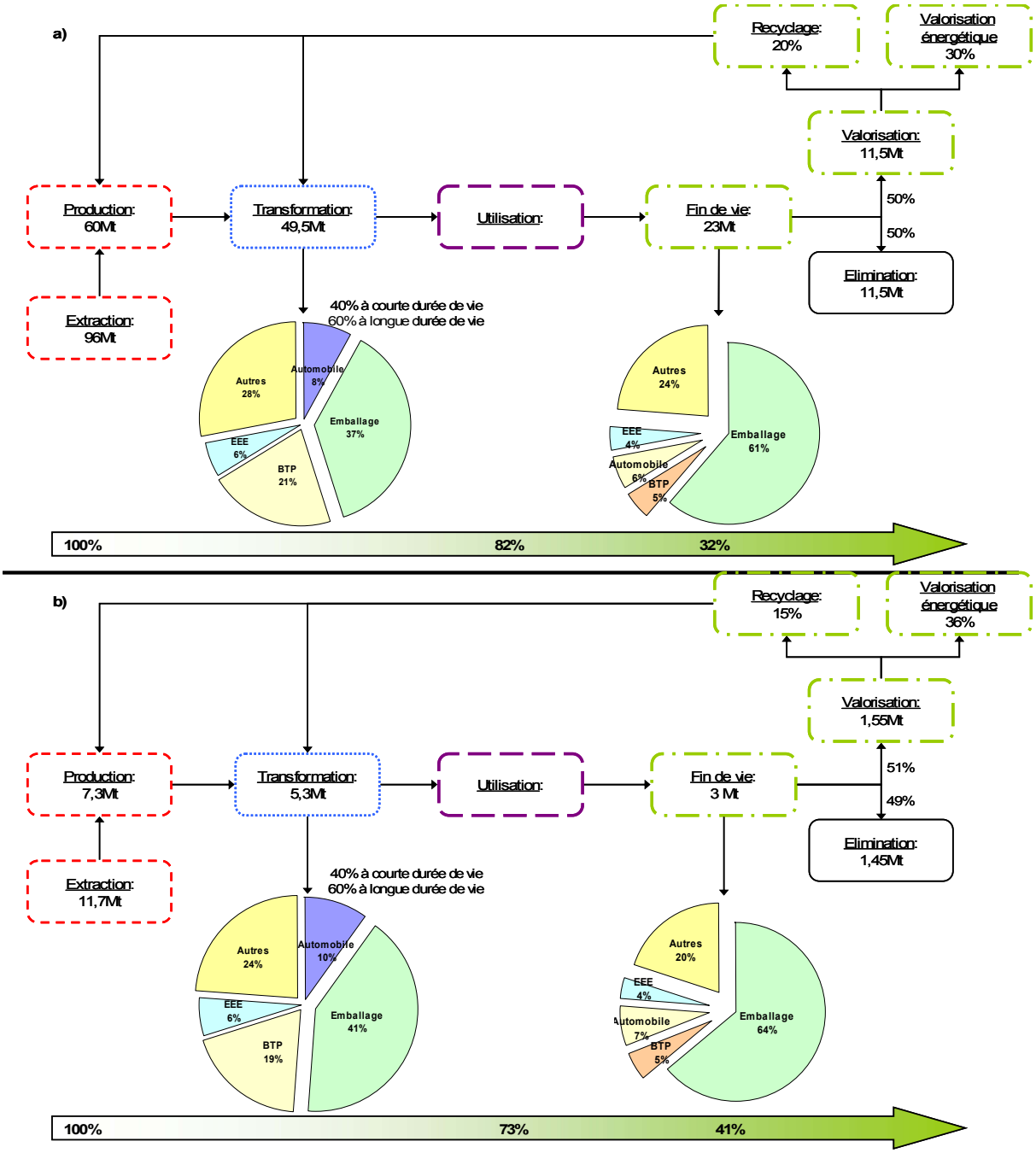


Figure 23: Cycle de vie des MP de l'extraction à la fin de vie: a) en EU25+NO/CH en 2006, b) en France en 2004-2005

II-3. D'un enjeu technique et économique à un enjeu sociétal

II-3-1. L'enjeu socio-économique des MP

Sous l'influence de la croissance de la demande pétrolière, les cours du pétrole sont de plus en plus soumis à des évolutions brusques. Les variations du prix du baril ont des répercutions directes sur la situation économique des divers utilisateurs de cette ressource. Par exemple, les fluctuations de prix sont directement perçues par les automobilistes au travers d'une augmentation du prix du carburant. Celle-ci amène ces derniers à modifier naturellement leurs comportements afin de réduire le coût de leur voiture par rapport à leur budget global. De la même façon, le cours des MP vierges est directement tributaire des variations du prix du pétrole (cf. Figure 24). Ainsi, le prix du naphta (molécule de base des MP) est indexé sur le prix du baril (Beller et al. 2000). Ces prix dépendent également de la relation entre l'offre et la demande et donc des niveaux des stocks, de la concurrence entre pays producteurs et de la conjoncture économique qui influe sur la demande {Beller, 2000 #308}.

Les transformateurs de MP, comme les équipementiers, sont tributaires du manque de stabilité des cours des matières premières. Ils sont soumis à la fois aux pressions des groupes pétrochimiques qui freinent toute négociation des prix d'achat et aux pressions des donneurs d'ordres de l'automobile qui limitent toute augmentation. Ils doivent dans certains cas réduire leur marge (The association of german plastics manufacturers et al. 2004) car face à la flambée du pétrole ils ne peuvent pas traduire la totalité de l'augmentation au client.

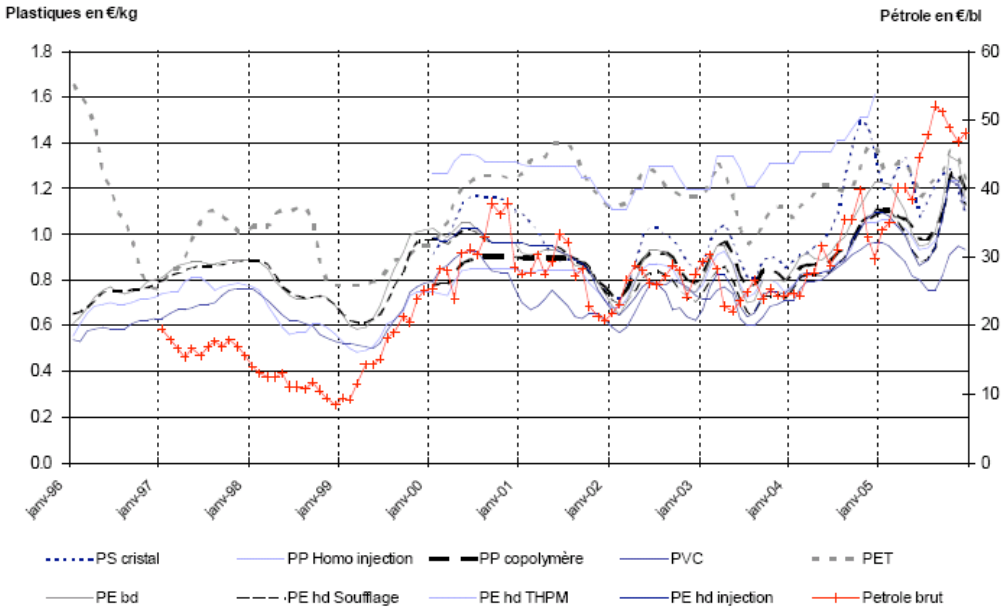


Figure 24: Evolutions comparées du cours du pétrole et des principales résines MP de 1996 à 2006 (ADEME 2006)[62].

[62] Source MP : Chambre Syndicale des Emballages en Matière Plastique (CSEMP), source pétrole brut :INSEE.

II-3-2. L'enjeu sociétal

En 2006, l'industrie des MP française employait environ 162000 personnes pour 1366 sociétés, dont 9 sur 10 sont des PME de moins de 250 salariés, en 2006 (SESSI 2008). Il apparaît évident qu'une pénurie de pétrole conduisant à une pénurie de MP serait la source, en plus d'une crise économique et énergétique forte, d'une crise sociétale importante.

La perception des MP par la société est un enjeu pour leur.devenir Tout d'abord l'image négative du secteur de la chimie ressentie par la société, les pressions sociétales et réglementaires associées aux pollutions tout au long du cycle de vie des MP sont susceptibles de remettre en cause leur utilisation à terme dans la société. En effet, la société perçoit le domaine industriel de la chimie comme un secteur à risques. Les accidents chimiques et leurs conséquences ont marqué les esprits : les dégagements gazeux nocifs pour la santé humaine, les marées noires, l'explosion d'AZF en 2001, Bhopal en 1984. L'appréhension de la société civile est renforcée par les nombreux débats et revendications sur les impacts des produits chimiques pour la santé humaine (maladies liées au benzène, au styrène, l'appel de Paris en 2004 « cancer, environnement, société »[63]). Dans de nombreux cas, les impacts à long terme d'une nouvelle substance chimique ne sont ni connus ni maîtrisés. Dans le cadre des risques associés aux substances et selon le principe de précaution, la directive européenne REACH[64] (Registration, Evaluation and Autorisation of Chemicals) donne une cadre réglementaire pour l'enregistrement des substances chimiques, l'évaluation des risques associés à leur utilisation, l'identification des molécules dangereuses et la demande de substitution en cas de risques importants. Son application est complexe et nécessite l'obtention et le traitement d'un grand nombre d'informations ainsi qu'une forte coopération entre les acteurs de l'industrie chimique, du producteur de la molécule au producteur du produit final. Sa mise en vigueur est datée du 1er Juin 2007.

Ces bouleversements affectent directement les MP ainsi que leurs utilisateurs car de nombreux adjuvants sont utilisés lors de leur synthèse pour améliorer une propriété pour une application spécifique. Se pose également le problème de transfert ou migration de ces molécules lors de l'utilisation de produits en MP (ex : substances nocives émises lors de l'utilisation d'ustensiles utilisant un revêtement téflon, les phtalates, le bisphénol A).

L'image négative des MP est également alimentée par l'ère du jetable. Même si cette particularité des objets en plastique comme les gobelets, les sacs plastiques peut séduire au premier abord par sa praticité, il s'accompagne ensuite de critiques associées à l'augmentation du poids des déchets ménagers et du coût pour le contribuable pour les éliminer. Les consommateurs s'orientent désormais vers une possibilité de les réutiliser.

Enfin, il apparaît que la forte pression sociétale exercée à l'égard des MP est également due au manque de connaissances précises des consommateurs sur ce sujet. Un exemple parlant est celui des sacs plastiques. Ces derniers font l'objet de polémiques au sujet de leur action polluante aussi bien visuelle qu'environnementale (temps de dégradation de 100 à 400 ans). Pour pallier à cette pollution, les chercheurs et gouvernements ont proposé des solutions alternatives comme les plastiques biodégradables. Mais cette notion de biodégradabilité est à considérer avec précaution[47]. Ainsi ces plastiques ne sont pas complètement dégradés au cours du temps contrairement à des

[63] signature d'une pétition au sujet notamment des pollutions chimiques dans le but de disposer d'un moyen d'orienter les décisions au niveau européen

[64] Il concerne les substances avec un tonnage de 10T/an/producteur pour celles mises sur le marché avant 1981 et 10kg/an/ producteur après 1981.

molécules naturelles. Or la commercialisation de nouveaux sacs plastiques « biodégradables » non synthétisés à partir de molécules naturelles type amidon a « *un effet rebond* [65]» sur le comportement des consommateurs qui ne se préoccupent plus du devenir de ces déchets compte-tenu de leur biodégradabilité (ce phénomène est similaire à celui observé lors de la mise en place des AirBags dans les automobiles : les statistiques sur les accidents avaient montré une augmentation de leur nombre ainsi que des vitesses des conducteurs liés à un sentiment de sécurité accru…). Les discussions autour des sacs plastiques mettent en évidence le manque de transparence et d'interprétations « intelligentes » des informations transmises aux consommateurs nécessaires à des choix de consommation et de comportement éclairés vis-à-vis des déchets.

A l'opposé de l'image négative des MP et de leurs pollutions, la société doit prendre conscience, au fur et à mesure, de leurs applications bénéfiques pour la santé et l'environnement (Duval 2004). Ces matières s'avèrent dans certains cas difficilement remplaçables. Un arrêt de leur fabrication entraînerait des conséquences graves dans des domaines où pour le moment il n'existe pas de solutions de remplacement satisfaisantes (comme dans les domaines de santé). Les MP ont également permis le remplacement du plomb, de l'utilisation de ressources naturelles issues notamment d'organismes animaux ou végétaux (le cuir, l'ivoire, le bois pour les forêts non gérées durablement…). Enfin, leur remplacement par une autre matière ne réglerait probablement pas le problème des ressources mais le transférerait certainement vers une autre ressource.

II-4. Bilan de l'implication des différentes parties prenantes

Au fil du descriptif des différents enjeux des MP tout au long de leur cycle de vie, différents acteurs appelés dans la suite du mémoire parties prenantes[66] sont apparus en raison du rôle qu'ils ont à jouer dans la gestion des enjeux présentés dans les parties précédentes.

Ces parties prenantes sont (cf. Figure 25) (Dillon 2001):

- Les acteurs de la supply chain des MP : industrie pétrochimique, transformateurs de MP,
- Les acteurs de la valorisation des MP (cf. Figure 26 et Annexe 3) : ils peuvent être des acteurs de la supply chain productrice du produit (rénovateur, logisticien…) ou bien des acteurs dédiés à la valorisation des MP (broyeurs, recycleurs…) (Fleischmann et al. 1997).
- Les acteurs de la supply chain du produit fini : producteur, équipementier,
- La société civile : les collectivités, les consommateurs, les législateurs, les laboratoires de recherche…

La mise en place d'un faisceau de solutions en réponse à la problématique des MP va impliquer des changements de la part des parties prenantes comme par exemple pour la société que ce soit en termes de consommation, d'utilisation ou bien de production. Tout les changements nécessaires ne seront possibles sans une volonté forte des gouvernements et dans certains cas leur intervention.

[65] Traduction de l'expression anglaise the « rebound effect », expression communément reconnue et usuellement employée.
[66] Ce sont tous les acteurs influençant directement ou indirectement le développement des solutions de valorisation des déchets fin de vie.

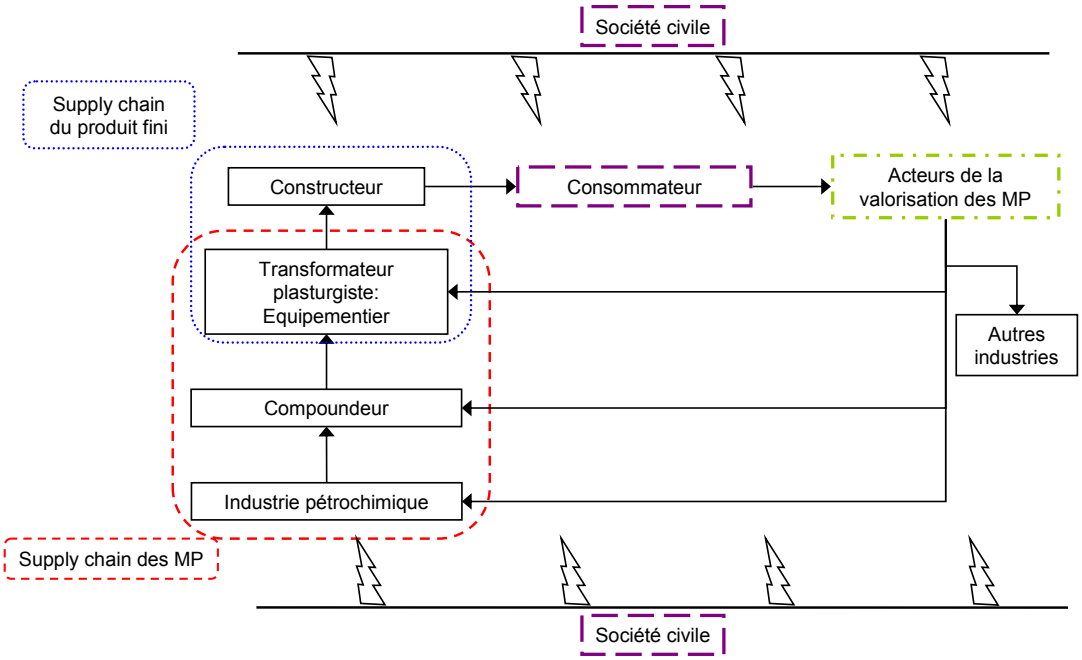


Figure 25: Les différentes parties prenantes impliquées dans la gestion des MP

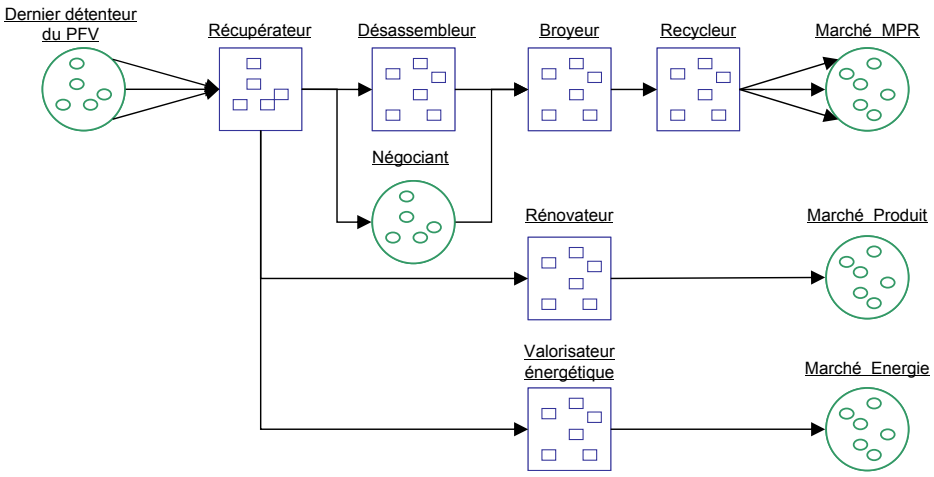


Figure 26 : Représentation des acteurs de la valorisation des MP

Les parties prenantes ont des implications de nature différente dans le devenir des MP (cf. Tableau 6). Mais toutes ces implications démontrent de fortes interactions entre tous ces acteurs. Malgré les différences entre les besoins des parties, il ressort une nécessité d'aide à la décision à leur apporter pour répondre de façon efficiente aux enjeux des MP.

Partie Prenante	Implications	Attentes/besoins
Société civile	Pressions réglementaires Pressions sociétales : choix de consommation, image des MP, place prépondérante des MP dans la société Augmentation des déchets MP Epuisement des ressources pétrolières : augmentation des coûts	Comment obtenir des solutions efficientes pour répondre aux enjeux ressource et déchets associés aux MP ? Quelles réglementations mettre en place ? Quelles informations mettre à disposition des consommateurs ?
Supply chain des MP	Epuisement des ressources pétrolières : augmentation des coûts Remise en cause du devenir des MP vierges Incidences de l'industrie pétrochimique sur la santé humaine	Quelles solutions alternatives développer ? Quelle place pour les MP vierge et les MPR sur le marché ?
Supply chain du produit fini	Choix du type de matériaux en conception : MP vierge, MPR… Adapter la conception pour favoriser une voie de valorisation Promouvoir le développement de solutions pour la valorisation des MP afin de répondre aux enjeux réglementaires	Comment favoriser le remplacement des MP vierges par des MPR? Comment choisir les voies de valorisation les plus adaptées aux composants MP ? Quelles actions mettre en place pour le déploiement de ces solutions ?
Acteurs de la valorisation des MP	Valorisation des déchets MP : une réponse aux enjeux des MP de la ressource au produit en fin de vie Vente de MPR	Comment favoriser le développement du recyclage ? Quelle place pour les MPR sur le marché des MP vierges ? Comment devenir des acteurs de la supply chain ?

Tableau 6: Implications et attentes des parties prenantes dans la gestion des enjeux des MP

III- La problématique de recherche

A la vue des éléments du contexte de recherche synthétisés sur la Figure 27, nous pouvons conclure que la gestion des enjeux tant techniques, qu'économiques, environnementaux et sociétaux des MP passe par :

- l'implication de toutes les parties prenantes associées au cycle de vie des MP,

- la prise en compte des besoins de chacune de ces parties,

- la mise en place d'une aide pour une gestion efficiente des déchets de MP, gestion passant par le recyclage.

La problématique de recherche à laquelle nous proposons de répondre se formule de la façon suivante :

Quels sont les outils à mettre en œuvre pour aider les différentes parties prenantes impliquées dans le devenir des MP :

-à définir les actions à mener pour développer un recyclage efficient des MP fin de vie pour faire de ces matières une ressource tout en répondant aux besoins des parties prenantes, notamment celles d'un équipementier automobile?

- à faire des acteurs de la valorisation des MP une partie à part entière de la Supply Chain automobile?

La problématique industrielle s'intègre directement dans cette problématique au travers de la prise en compte des besoins de la Supply Chain automobile (cf. Figure 27).

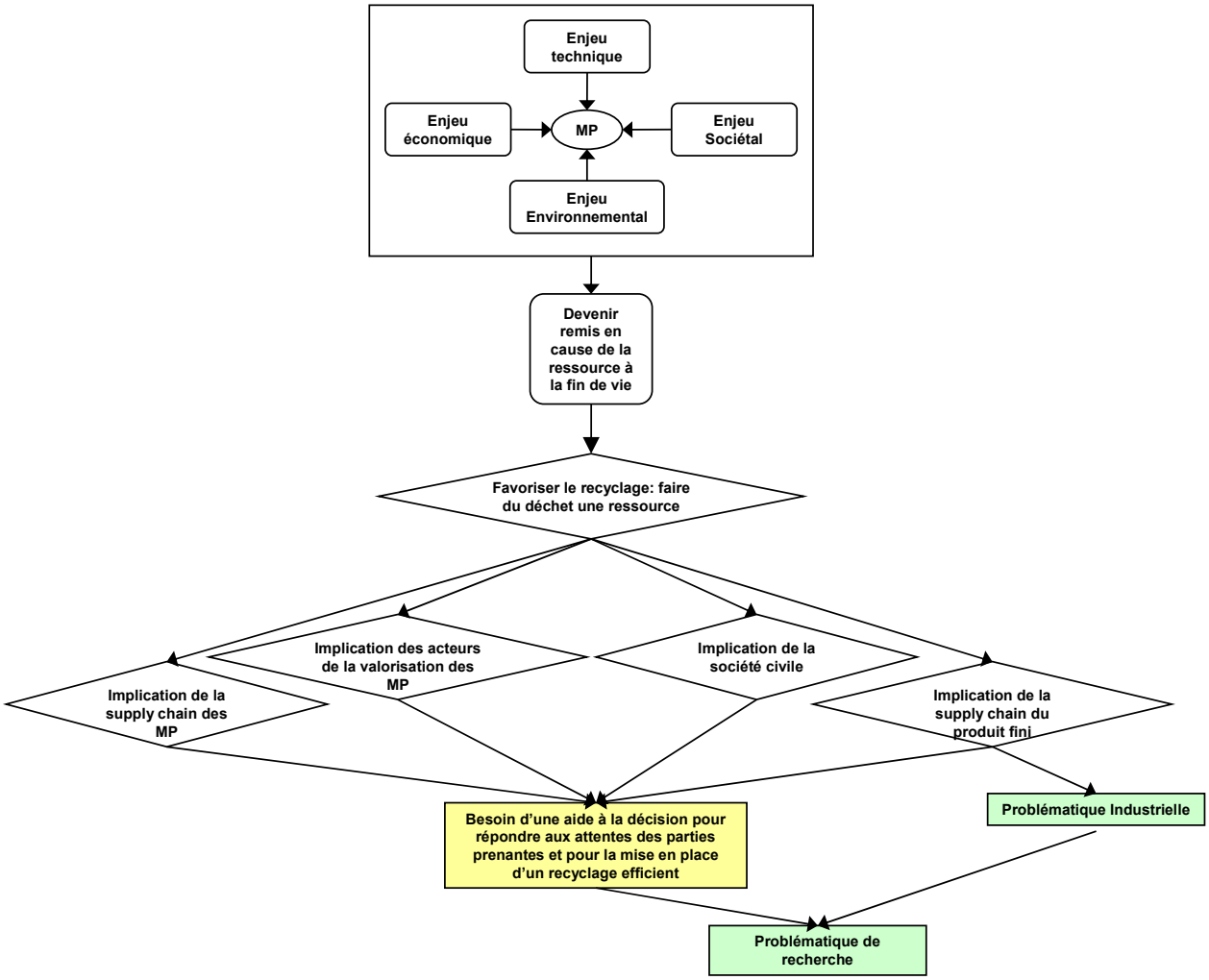


Figure 27: Synoptique du Chapitre 1

Chapitre 2
Problématique et Hypothèses

I- Positionnement de la question de recherche

L'analyse de la problématique de recherche met en exergue trois points distincts:

- définir les actions à mener soit mettre en place une aide à la décision,
- répondre aux besoins des parties prenantes soit déployer des organisations industrielles répondant aux attentes notamment de la Supply Chain,
- favoriser l'émergence des filières comme partie à part entière de la Supply Chain soit intégrer l'utilisation de matière recyclée dans le processus de conception de la Supply Chain.

Ces différentes thématiques font appel aux domaines de recherche suivants (cf. Figure 28) :

- les organisations industrielles au travers des termes performance, émergence…
- la Supply Chain au travers des termes intégration, système d'information, automobile, aide à la décision,
- le processus de conception au travers des termes changement, connaissances, outils de Conception pour X (CpX).

Le cœur de notre questionnement se positionne au croisement de ces domaines de recherche (cf. Figure 28). Il est illustré par le terme filières de valorisation imbriquant chacune des interactions entre les domaines. Nous expliciterons cette terminologie dans la partie qui suit.

La diversité des domaines de recherche impliqués démontre la transversalité et la complexité de notre thématique de recherche mais surtout son adéquation avec les problématiques du Génie Industriel.

Répondre à notre problématique implique donc de caractériser chaque domaine de recherche vis-à-vis de la notion de filières de valorisation, soit dans un premier temps de définir cette notion, dans un second temps d'examiner ces systèmes dans une logique d'organisations industrielles et enfin d'identifier et de comprendre les conséquences de la prise en compte de ces systèmes au sein de la Supply Chain automobile au travers du processus de conception.

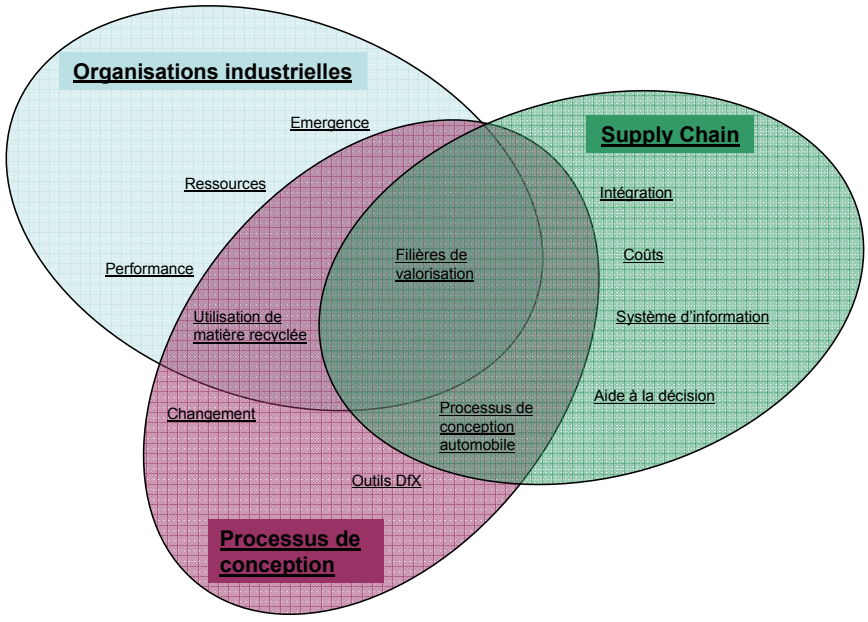


Figure 28: Positionnement de la problématique de recherche au sein du domaine du génie industriel

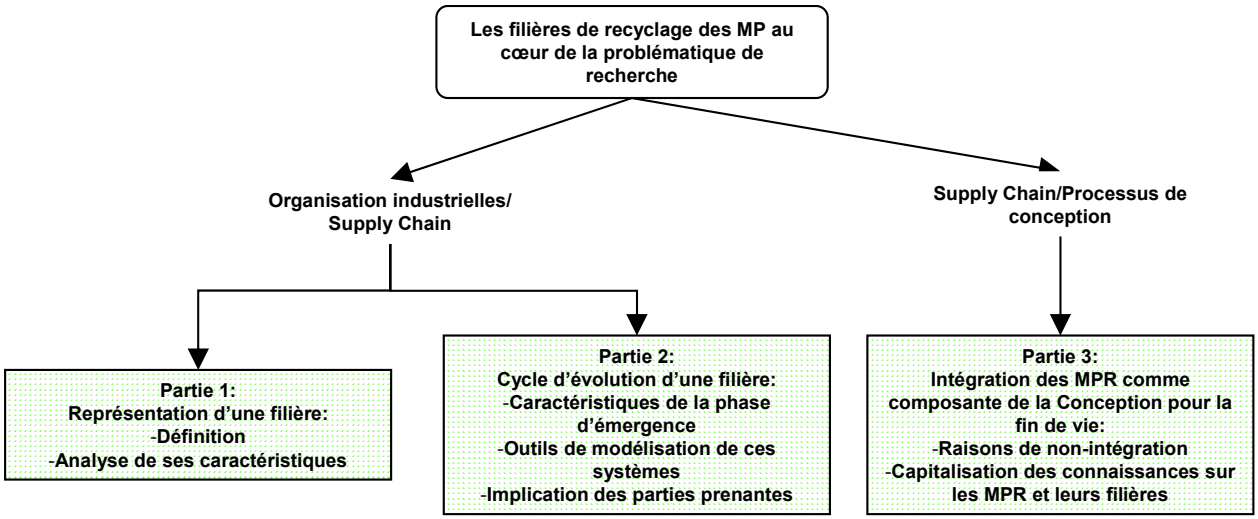


Figure 29: Synoptique du chapitre 2

II- *Caractérisation des filières de valorisation*

A l'issue des constats effectués dans le chapitre 1, la stratégie de développer des filières de recyclage de MP est apparue comme une solution adéquate pour transformer les déchets en ressource et proposer dans un même temps une solution aux enjeux liés aux ressources pétrolières. Le déploiement de cette stratégie nécessite l'implication d'un ensemble de parties prenantes réunies autour d'une organisation nommée dans la suite de ce mémoire filière. Mais la notion de filière en elle-même doit être explicitée. Ainsi dans le tissu industriel actuellement en place, cette notion est dans de nombreux cas une vue de l'esprit dans le sens où il existe des acteurs de la valorisation mais la plupart ne peuvent pas justifier de liens stables entre eux légitimant le terme de filière (Maudet et al. 2007). L'analyse de ces filières nécessite donc, d'établir un cadre précis avec un ensemble de critère caractérisant cette notion. Ce cadre donnera au lecteur tous les éléments nécessaires pour appréhender les enjeux et la complexité de tels systèmes.

II-1. La notion de filière

Les parties prenantes concernées par le développement des filières -que ce soit les gouvernements par les mesures législatives, la société civile par ses gestes quotidiens, les collectivités et les industriels par l'élimination des produits en fin de vie- souvent non expertes d'un tel domaine. Il leur est de ce fait difficile de se positionner pour décider d'une obligation réglementaire applicable au monde entrepreneurial. Ces parties doivent donc accéder à des informations claires et suffisantes sur ces systèmes pour faire leur choix dans les meilleures conditions possibles. Développer une filière non adaptée aux besoins serait lourd de conséquences sur la viabilité des opérateurs du système mais également sur l'efficience de celui-ci. La connaissance de ces filières est notamment rendue difficile par la diversité des définitions employées dans la littérature pour caractériser ces systèmes (filière, scénarios pré ou post broyage, filière produit ou matière…). Nous résumerons ici les principales caractéristiques communes à ces propositions afin d'établir nos propres définition et caractérisation d'une filière.

II-1-1. Eléments constitutifs

Etablir une définition pour la notion de filière passe par le questionnement suivant : quoi (le type de produit traité), comment (les formes de valorisation) et par qui (les acteurs et leur rôle) (Fleischmann et al. 1997). A partir de ces éléments, Gaucheron (Gaucheron 2000) propose la définition suivante : une filière de valorisation regroupe nécessairement :

- Quoi : Un gisement de produit fin de vie ou entrant répondant à un cahier des charges en adéquation avec celui du circuit de valorisation choisi.
- Comment : Un circuit de valorisation correspondant à une succession de procédés permettant de transformer l'entrant et de lui apporter une valeur ajoutée pour obtenir un sortant en accord avec le marché.
- Pour qui : Un débouché soit un sortant avec un cahier des charges correspondant aux exigences d'un marché donné.

Dans cette proposition, le circuit de valorisation permettant la transformation des entrants est défini par : un scénario de valorisation et un mode de valorisation. De la même façon, Mathieux (Mathieux 2002) définit une filière ou système de valorisation comme un ensemble de scénarii de valorisation

applicables à un Produit Fin de vie (PFV), scénarii qui sont dans ce cas une association structurée de procédés de valorisation qui mènent au traitement total du PFV.
Plusieurs scénarios de valorisation sont possibles et adaptés à chaque type de PFV à traiter (VHU, DEEE) :

- Un scénario post-broyage souvent appelé filière post-broyage: les PFV sont directement broyés, les matières récupérables sont triées.
- Un scénario pré-broyage souvent appelé filière pré-broyage : il correspond au scénario démontage. Les composants pouvant être rénovés ou réutilisés ou contenant des matières disposant de solutions de recyclage sont démontés avant broyage du produit.
- Un scénario de valorisation énergétique : le PFV est directement incinéré et l'énergie récupérée.

Le scénario le plus commun est un mélange de ces trois scénarii.
A chacun de ces scénarios est associé un mode de valorisation : réutilisation, recyclage matière, valorisation matière et valorisation énergétique (définitions cf. II-2-2). Les choix du scénario et du mode sont interdépendants. Un scénario démontage est réalisé par exemple pour privilégier un recyclage matière pour une meilleure qualité de l'entrant.

Enfin, le cahier des charges des sortants dépend du circuit de valorisation choisi. Ce cahier des charges correspond aux caractéristiques du produit issu du traitement. Par exemple, ce sont les exigences du marché d'une Supply Chain produit fini dans le cadre du recyclage matière (propriétés matières, prix, volume), ce sont les besoins énergétiques d'une localité ou bien le besoin de pièces d'occasion sur le marché de la rénovation… La nature des sortants est donc dépendante des technologies et du marché.

Fleischmann et al. (Fleischmann et al. 2000), à l'origine de nombreuses études sur la logistique des systèmes de valorisation, viennent étoffer chacune des parties de la proposition de Gaucheron (Gaucheron 2000) en précisant les caractéristiques du produit à traiter, les procédés intégrés au circuit de valorisation mais surtout les opérateurs associés, élément manquant de son analyse.
Tout d'abord, les caractéristiques physiques et économiques définissant l'objet en entrée du circuit de valorisation, comprennent : l'origine du produit, sa nature (produit, composant, matière), sa composition (complexité, diversité des matières…), sa localisation, son aptitude à être valorisé (démontabilité, recyclabilité…), son gisement (âge, poids, volume, toxicité, valeur économique)… (Fleischmann et al. 2000). Ces caractéristiques doivent être définies précisément car elles conditionnent le choix du circuit de valorisation et sa future efficacité.

D'autre part, les activités principales associées au circuit de valorisation (Fleischmann et al. 2000, Krikke et al. 2001) sont présentées dans le Tableau 7.
Enfin, une filière n'est pas seulement une succession de processus destinés à valoriser un produit. C'est avant tout une succession d'acteurs associés à chacune des activités décrites. Les acteurs de la valorisation décrits par Fleischmann et al. (Fleischmann et al. 1997) sont les opérateurs présentés dans le Chapitre 1.

Les composantes élémentaires d'une filière sont donc le produit entrant, le circuit de valorisation et les opérateurs associés. Nous appellerons ces composantes *caractéristiques internes d'une filière* dans la suite de ce mémoire. Ils sont nécessaires mais non suffisants au descriptif de la filière à analyser.

Activité	Définition
Collecte	Toutes les activités rendant les PFV accessibles et les acheminant au lieu de traitement adapté (achat, transport, stockage)
Inspection/Réparation	Toutes les étapes permettant de définir si le produit est apte à être valorisé et de quelle façon. Ces étapes sont la dépollution (sécurisation et enlèvement de produits toxiques), démontage, broyage, tri, test de composants, stockage.
Remise en forme	Transformation d'un objet usagé en un objet utilisable de nouveau Elle inclut le désassemblage, le recyclage, la rénovation, le remanufacturing.
Mise en décharge	Elle s'applique aux déchets ultimes et à tout objet ne pouvant être valorisé pour des raisons techniques ou économiques.
Re-distribution	Elle correspond à la vente sur un marché potentiel des objets réutilisables ou des matières recyclées en sortie du circuit de valorisation.

Tableau 7: Définition des activités principales d'un circuit de valorisation

II-1-2. Les différents types de filières

Les caractéristiques du produit en entrée vont conditionner les valeurs des autres composantes de la filière. Ainsi dans la littérature, les filières sont nommées en fonction du produit traité et en fonction du mode de valorisation associé. La dénomination du produit se fait en fonction de son origine et de sa nature. Pour l'origine, Krikke et al (Krikke et al. 2003) définissent un certain nombre de types d'entrants dont celui qui nous intéresse : le PFV ou produit qui ne peut plus être utilisé. Son traitement est souvent lié soit à des obligations contractuelles de reprise, soit à des obligations réglementaires de valorisation (VHU, DEEE, piles…). Pour chaque type de produit, on a une filière spécifique.

Pour la nature du produit, la littérature a mis en évidence trois types de filières (Krikke et al. 2003, ADEME 2003b) :

- la filière produit : elle correspond à la valorisation du produit complet et se limite à la collecte au démontage ou broyage (ex : la filière VHU). Dans le cadre de produits complexes, deux autres filières découlent de cette dernière :
    - o la filière pièce ou composant : elle s'intéresse au traitement du composant issu du démontage du produit. Elle fait souvent référence à la réutilisation, rénovation (ex : la filière toner d'imprimantes) mais peut conduire au recyclage.
    - o La filière matière : elle est associée au traitement de la matière et se limite au tri des RB, recyclage (ex : la filière de recyclage des MP). Elle ne prend pas en compte les étapes précédentes issues des autres filières. Elle dépend du mode de valorisation.

Ces filières sont illustrées dans l'Annexe 4.

II-1-3. Les différentes formes d'organisation

Au-delà des caractéristiques internes, à dominante technico-économique, les filières se définissent en fonction de leur organisation. Le terme organisation recouvre bien évidemment l'agencement des acteurs évoqués dans le chapitre 1 mais surtout l'organisation financière du système soit son mode de financement.

Trois grands modes d'organisation se distinguent (cf. Figure 30):

- Une gestion directe, par le producteur du PFV, de l'ensemble de la filière.
- Une gestion et un financement par un organisme extérieur appelé éco-organisme[67] ou un organisme privé assumant la responsabilité des producteurs en ce qui concerne la gestion de leurs produits (ADEME 2003d). La gestion par les producteurs est alors collective (Glachant 2005).
- Une gestion en marché libre : équilibre de la filière sans intervention financières directe du producteur ou de l'état.

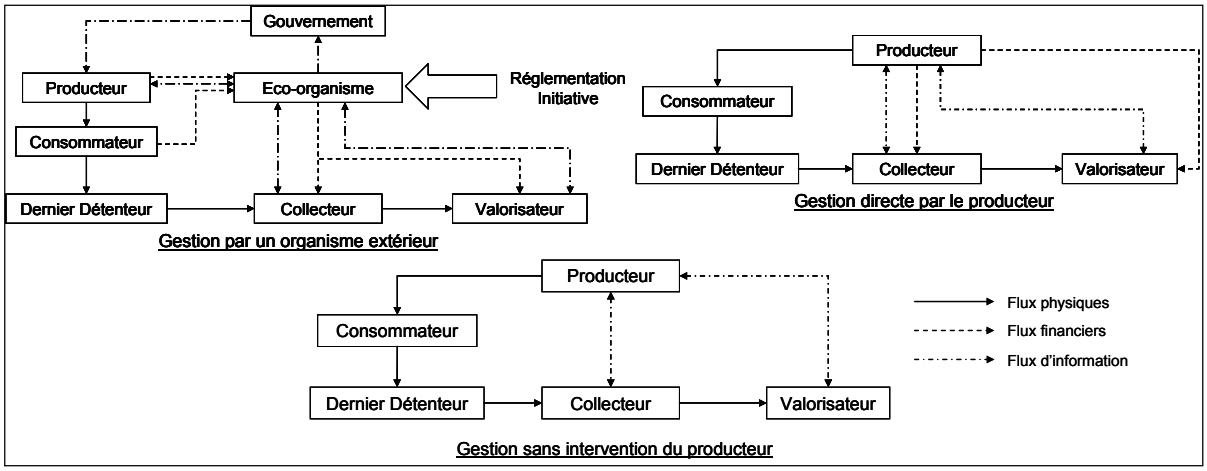


Figure 30: Schémas simplifiés des trois grands modes d'organisation des filières

Les caractéristiques de ces modes d'organisation diffèrent principalement sur (inspiré de (Kim 2002)) :

- La responsabilité élargie du producteur[68] au travers des directives et lois nationales,
- Le mode de gestion des responsabilités : intervention directe du producteur ou transfert des responsabilités à un organisme extérieur, partage des responsabilités et rôle des différents acteurs pour la mise en place des différentes étapes de traitement,
- Le mode de financement et sa durabilité: subvention, taxe sur le produit payé par le consommateur, financement par le producteur, reprise gratuite, paiement individuel ou collectif, tarification incitative…
- La participation de l'état : outils réglementaires nationaux et communautaires (lois, accords, décrets, directives),
- Le mode de suivi de l'évolution organisationnelle des systèmes : obligation ou non de transmettre les informations techniques et économiques aux organismes concernés.

Tous ces facteurs conditionnent les caractéristiques organisationnelles de la filière mise en place et leur diversité illustrent la complexité de définir une organisation (cf. Annexe 4).

[67] «Les éco-organismes sont définis comme toute structure privée ou publique assumant la responsabilité financière et/ou organisationnelle, totale ou partielle, de la gestion des produits en fin de vie, en lieu et place des producteurs ou metteurs sur le marché. » ADEME. *Panorama européen des éco-organismes ou structures assumant la responsabilité des producteurs pour la gestion des produits en fin de vie*. p. 150.

[68] La responsabilité élargie du producteur (REP) est un concept définit par l'OCDE comme « un instrument de politique de l'environnement qui étend les obligations du producteur à l'égard d'un produit jusqu'au stade de son cycle de vie situé en aval de la consommation. ». Elle correspond au principe pollueur-payeur. La responsabilité conventionnelle du producteur est en général limitée aux phases de production et d'usage, la REP permet d'étendre cette responsabilité à la fin de vie des produits. Cette responsabilité organisationnelle et/ou financière a été mise en œuvre pour la gestion des produits en fin de vie dans le cadre des directives européennes. Elle transfère la responsabilité du détenteur de déchets au producteur de déchets. La responsabilité est souvent partagée entre les fabricants, les metteurs sur le marché, les distributeurs, les consommateurs et les collectivités.

Le mode de gestion qui nous intéresse plus particulièrement dans ces travaux est le marché libre. L'objectif est de laisser la filière trouver naturellement un équilibre. Cependant l'intervention du producteur peut être sollicitée sous certaines conditions. Ainsi dans le cadre du traitement des VFV, les constructeurs ne sont pas disposés à intervenir financièrement dans la filière ni à imposer une taxe aux consommateurs (comme pour les DEEE) et souhaitent une mise en place naturelle de ce système. Mais ils sont tenus d'intervenir dans le cas d'une économie négative des broyeurs (JORF 2003).

II-1-4. Notre représentation

Etablir une définition adaptée d'une filière repose donc sur :

- des caractéristiques internes techniques: le produit entrant, le circuit de valorisation et les opérateurs associés,
- des caractéristiques économiques comme le marché,
- des caractéristiques organisationnelles : mode d'organisation et de financement.

Au-delà de ces caractéristiques existent des caractéristiques externes à une filière qui sont :

- la structure de la filière (Fleischmann et al. 2000) : la dispersion géographique des installations (intégration horizontale), le nombre d'installations qui traitent un même flux (intégration verticale), l'interaction avec des systèmes existants (nouveau, extension), le niveau de coopération dans un même secteur industriel…
- le contexte lié à la valorisation (Fleischmann et al. 2000) : les ressources matérielles et humaines, les relations et comportements de la Supply Chain du produit fini.
- la variabilité géographique (Mathieux 2002): les choix technologiques, de filières dépendent du pays considéré. La stratégie de démontage des VFV est beaucoup plus développée aux Pays-Bas qu'en France (le Blanc et al. 2004). Ces différences géographiques sont liées à une réglementation spécifique à chaque pays (Kim 2002) et cela malgré une base communautaire des textes applicables à la protection de l'environnement, des stades de déploiement variables et inégaux des tissus industriels, des variations dans le type de matériaux extraits et la composition des flux de déchets, une différence dans le comportement des citoyens (Wolf et al. 2000)….
- la variabilité temporelle (Mathieux 2002) : le développement d'une filière diffère en fonction de la durée de vie du produit. Les produits à durée de vie courte, type emballages, se distinguent des produits à durée de vie longue type VFV. Ainsi pour les produits à durée de vie courte, ils se retrouvent rapidement à l'état de déchets, l'efficacité du système mis en place est rapidement testée et permet des retours rapides en conception. Par contre pour un produit à durée de vie longue, l'efficacité du système n'est visible qu'à plus long terme, le temps d'avoir un gisement disponible. Par ailleurs, il faut « imaginer » l'évolution des technologies dans les années à venir, leur transfert aux acteurs de la valorisation et leur adéquation avec les évolutions des produits (Boks 2002).

Les caractéristiques externes démontrent que les filières sont dépendantes du contexte, contexte qui doit donc être défini avant toute analyse. La diversité de ces caractéristiques illustre la complexité d'établir une définition d'une filière de valorisation. Elle doit être la combinaison de cet ensemble de caractéristiques orienté à la fois produit, process, acteurs et associé à des limites géographiques et temporelles. Cette complexité nous conduit à proposer notre caractérisation d'une filière (cf. Figure

31), caractérisation qui fournit les éléments à prendre impérativement en compte pour définir la filière à développer. Compte-tenu de la diversité des combinaisons de valeurs de caractéristiques possibles, une analyse ne peut être spécifique qu'à un type de filière.

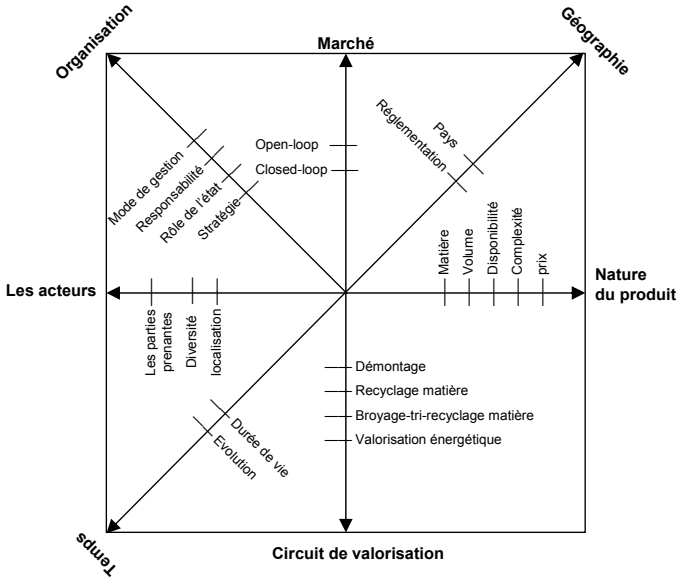


Figure 31: Notre proposition d'axes de caractérisation d'une filière de valorisation

II-2. Valeurs des principales caractéristiques des filières de MP issues de produits complexes

Dans la suite de ce mémoire nous nous en tiendrons au devenir de produits complexes[69] type VFV, et DEEE et au devenir des MP dans ces filières. Dans cette partie, les principaux résultats de ces filières ainsi que des scénarios de valorisation associés sont présentés. Cette présentation n'est aucunement exhaustive[70] et n'a pour objectif que de donner au lecteur les éléments nécessaires pour identifier les dysfonctionnements actuels des filières de recyclage des MP issues de produits complexes comme les VFV.

II-2-1. Les résultats

II.2.1.a. Résultats technico-économiques

La première étape primordiale et essentielle au bon fonctionnement d'un scénario est la collecte du produit. Elle conditionne les divers cahiers des charges des opérateurs constituant la filière. Son efficacité et son coût dépendent du produit à collecter, de la localisation de son gisement, de son accessibilité, de sa concentration et de la nature de son dernier détenteur. Ainsi le produit peut être déposé dans des installations agréées bien définies induisant une concentration des gisements et par conséquent une réduction des coûts. Dans d'autres situations, celui-ci est difficilement captif car

[69] Produit complexe=produit multi-composant et multi matière résultant d'un assemblage complexe.
[70] L'ADEME a réalisé un bilan des filières de recyclage françaises de 1996 à 2005 en donnant des informations détaillées pour différents types de filières ADEME. *Bilan du recyclage 1996-2005*. De même FEDEREC (Fédération de la Récupération, du Recyclage et de la Valorisation) diffuse chaque trimestre les résultats des diverses filières de recyclage matières liées à leurs adhérents au travers de l'Observatoire de la récupération, du recyclage et de la valorisation FEDEREC. *Observatoire de la récupération, du recyclage et de la valorisation-résumé de l'évolution du premier trimestre 2008*. p. 1-17.

dispersé chez les particuliers qui ne déposent pas obligatoirement ces produits dans les circuits de collecte adaptés au moment de leur fin de vie (ex : DEEE réutilisés, stockage à long terme chez les particuliers) (SCRELEC 2004).
Pour les VHU, le taux de collecte[71] est estimé à 60% sur un flux moyen de 1500 000 véhicules arrivant en fin de vie par an en France.

Pour les DEEE, le flux est estimé à 1,5 Mt dont 50% d'origine professionnelle et 50% issus de particuliers (ADEME 2009). Ce dernier représente 13 kg/habitant. Une opération pilote menée par SCRELEC (SCRELEC 2004) à Nantes[72] a mis en évidence la possibilité de collecter 4,68 kg/hab/an de DEEE (la directive DEEE impose un taux de collecte d'au moins 4kg/hab/an) moyennant un système de collecte complexe faisant intervenir une grande variété d'opérateurs. Selon un bilan ADEME de la filière DEEE, l'extrapolation sur un an des données de collecte d'août 2007 conduit à un taux de 3,4 kg/hab/an (ADEME et al. 2007). Pour les DEEE professionnels, les producteurs n'ont pas d'autre choix, compte-tenu du contexte réglementaire, que de mettre en place leur propre système de reprise de leurs produits. Ces systèmes sont soit propre à un producteur (HP) ou à un secteur regroupant plusieurs producteurs (association ELEN[73]).

Pour les MP, le taux de collecte est difficilement estimable, estimation rendue complexe par :

- La variabilité de la durée de vie des produits,
- La variabilité de la composition en MP des modèles pour un même produit et entre les produits.

L'efficacité de la collecte des composants en MP est conditionnée par son coût. Ainsi les MP ayant une faible densité, transporter ces pièces induit un surcoût par rapport à des pièces métalliques influençant dans de nombreux cas la rentabilité des étapes suivantes.

Bilan technique des scénarios de valorisation selon les produits

La répartition des produits complexes en fonction des différents scénarios est difficile à estimer en raison des nombreux acteurs concernés, des différentes sources…Pour les VFV, environ 85% du flux collecté suit un circuit de valorisation. 40% sont orientés vers des démolisseurs certifiés. Le reste du flux est traité par des démolisseurs non certifiés ou des broyeurs. Comme nous l'avons explicité dans le chapitre 1, répondre aux objectifs de la directive VHU passe par le déploiement du recyclage des MP. Selon une étude comparant les différents scénarios et l'efficacité des technologies de traitement (Amaral et al. 2006), seul un scénario mixte peut conduire à l'atteinte des objectifs de la directive c'est-à-dire en favorisant à la fois le démontage de pièces en MP de grande taille et l'amélioration des techniques de tri de MP issues de RB (cf. Tableau 8). Les taux de recyclage et de valorisation obtenus à l'issue de ces scénarios sont donnés dans le Chapitre 1.

Les filières de DEEE et leurs scénarios présentent une problématique différente de celle des VHU compte-tenu de la grande diversité des DEEE existants (SCRELEC 2004). L'opération pilote

[71] $\text{Taux de collecte} = \frac{\text{Quantité collectée}}{\text{Quantité arrivant en fin de vie}}$

[72] SCRELEC (société assurant la collecte et le recyclage des piles et accumulateurs usagés) a conduit une étude pilote sur la faisabilité technique de la collecte et du recyclage de DEEE ménagers entre 2002 et 2004 dans la ville de Nantes.

[73] Electricité Environnement. Association loi 1901 créée en 2000 pour promouvoir la gestion des DEEE professionnels. Elle a pour objectif d'harmoniser les différents modes de gestion en concertation avec les partenaires de la filière électrique.http://www.elen.fr

SCRELEC a démontré la possibilité d'atteindre les objectifs réglementaires pour la majorité des catégories de produits (Gros et Petit Electroménager, écrans...).

Le développement des scénarios dépend de la nature, de la complexité et de la diversité des produits mais également de l'efficacité de l'étape de collecte. Dans le cadre des MP issues de produits complexes comme les VFV, l'étape de collecte se révèle coûteuse et impacte la rentabilité de la chaîne de valeur globale de la filière.

En ce qui concerne les modes de valorisation (taux de recyclage, taux de valorisation), les résultats obtenus pour les MP sont donnés dans la partie 2 du chapitre 1.

Scénario de valorisation	Forces	Faiblesses
Démontage	- Qualité du produit obtenu - Réutilisation - Adapté à de larges pièces (Jenseit et al. 2003)	Coût
Broyage et tri des RB	- Coût - Volume - Diminution mise en décharge	- Qualité matière - Efficacité des techniques de tri de matières en mélange

Tableau 8: Avantages et inconvénients des différents scénarios

II.2.1.b. Résultats organisationnels

Le choix du mode d'organisation a un impact direct sur la rentabilité de la filière, la non rentabilité étant quasi générale. Pour les DEEE ménagers français, la filière de valorisation est en place depuis le 15 novembre 2006. Son organisation est basée sur le principe de responsabilité élargie du producteur. La gestion de la valorisation de ces déchets est réalisée par 4 éco-organismes[74] créés par les producteurs et agréés par les pouvoirs publics. Les opérateurs de valorisation sont rémunérés par les éco-organismes via les adhésions des producteurs. Ces éco-organismes ont fondé une structure coordinatrice OCAD3E[75] chargée de l'indemnisation des collectivités locales qui ont mis en place une collecte sélective et sont rattachées par contrat à cette structure. Le financement de la filière est assuré par l'éco-contribution[76]. Elle sert notamment au financement des indemnités versées aux différents opérateurs de la filière, à la communication sur les résultats de la filière et au financement d'études pour le développement de ces systèmes.

Dans le cadre des VFV français, les constructeurs ne souhaitent pas intervenir financièrement dans la mise en place de la filière contrairement aux choix d'autres pays européens. Ceci implique une gestion financière autonome de la filière. Mais l'ADEME a mis en évidence que les démolisseurs ont en moyenne une économie négative ou tout juste équilibrée (ADEME 2003c). Par contre l'activité des broyeurs est positive. Mais de même que pour les démolisseurs, la diminution de la composition en MF/MNF des véhicules tend à diminuer le bilan économique des structures. On notera que les constructeurs sont tenus d'assurer une économie positive uniquement vis-à-vis des broyeurs (JORF 2003), obligation qui oriente les investissements en recherche sur le seul tri des RB.

[74] Ces éco-organismes sont Ecologic, Eco-Systèmes (73% du marché), ERP, Récyclum. Ces organismes ont des contrats avec différents opérateurs pour assurer un traitement en conformité avec la réglementation.
[75] Organisme Coordonateur Agréé pour les DEEE
76 Elle est calculée en fonction des coûts réels de fin de vie affectés à chaque famille de produit en fonction de leur durée de vie, de leurs coûts de traitement et du système propre à chaque éco-organisme. Pour un micro-ordinateur portable (poids inférieur à 3kg), elle s'élève entre 0,3 à 1€ ADEME and MEDAD. *Dossier de presse: Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). un an après le démarrage de la filière pour les équipements ménagers: Quel bilan?*, p. 1-17.

Pour les filières de valorisation des MP issues de ces produits complexes et plus particulièrement leur recyclage, l'activité liée uniquement aux déchets fin de vie est pour le moment non rentable. Nous expliciterons plus en détail cette situation dans la partie 2 de ce chapitre. Seule la filière pneus issus de VFV, organisée par Aliapur[77] bénéficie d'une aide financière des producteurs de pneus par le biais d'une taxe de recyclage imposée lors de l'achat de nouveaux pneus.

Globalement sur l'ensemble des filières de produits complexes du démontage du produit au recyclage des MP, leur économie est négative en l'absence d'intervention financière extérieure. L'option d'un financement par le biais d'une taxe induit l'hypothèse que les filières ne peuvent être autonomes financièrement ou qu'elles ont besoin d'une aide au démarrage pour s'équilibrer (Beaurepaire 2003). La question se pose donc de savoir s'il existe une structure organisationnelle capable de déployer une filière sur le principe du marché libre.

II.2.1.c. Résultats environnementaux

Les filières ont été développées pour minimiser les impacts environnementaux des produits et permettre le déploiement de solutions acceptables pour la gestion des produits en fin de vie afin que le scenario choisi soit le moins impactant. Cet aspect n'est que trop peu abordé dans le choix de solutions pour la fin de vie des produits. Ainsi certaines technologies peuvent présenter un impact plus négatif que celui qu'elles permettent de minimiser. Une étude menée par l'APME (Jenseit et al. 2003) a permis de classer les modes de valorisation selon leur éco-efficacité pour des MP issues de VFV en fonction des impacts environnementaux suivants : consommation de ressources minérales, consommation de pétrole, contribution au réchauffement de la terre, atteintes à la couche d'ozone, toxicité pour l'homme, écotoxicité aquatique, smog, acidification, nitrification, déchets ultimes formés, déchets dangereux formés, énergie consommée... Globalement pour les différentes pièces en MP étudiées (pare-choc, réservoirs lave-glace, siège, rétroviseur, phare …) la mise en décharge apparaît comme la moins éco-efficace. Le recyclage mécanique apparaît le plus éco-efficace pour des pièces de grandes tailles, monomatière et accessibles, le coût de démontage limitant cette éco-efficacité.

L'impact environnemental d'une filière de valorisation d'un produit peut donc être :

- favorable: Mc Laren établit par exemple que la valorisation des téléphones portables peut conduire au final à une économie de ressources (Mc Laren et al. 1999).
- défavorable : Hundal fait remarquer que la production de matières recyclées suite au démontage d'une pièce peut consommer plus d'énergie et générer plus de pollutions que la production de la matière vierge (Hundal 2000).

La prise en compte de cet aspect souvent négligé devrait devenir prioritaire. Ainsi les effets favorables des filières pourraient minimiser les impacts environnementaux d'une autre phase du cycle de vie des produits (Mathieux 2002).

Les impacts environnementaux d'une filière dépendent de critères comme les caractéristiques du PFV, le circuit de valorisation, l'économie de ressources engendrée… Le recyclage matière peut minimiser dans certains cas les impacts environnementaux du cycle de vie du produit à condition que l'économie de ressources réalisée par rapport à la production de matière vierge ne soit pas annihilée par un procédé de recyclage plus impactant que la production de matière vierge.

77 C'est une société anonyme dont les membres fondateurs sont Bridgestone, Continental, Dunlop Goodyear, Kléber, Michelin et Pirelli. Elle assure la collecte et le traitement des produits de ses clients.

II-2-2. Bilan

Les résultats associés aux filières de valorisation de produits complexes contenant des MP présentés dans le Chapitre 1 et au début de ce chapitre révèlent un certain nombre de dysfonctionnements qui sont :

- une non rentabilité du système sans intervention financière extérieure, fonctionnement allant à l'encontre d'une régulation par le libre marché,
- une quantité de matière accessible au recyclage faible, synonyme d'une efficacité réduite de l'organisation de la filière en vue des enjeux réglementaires.
- un déploiement insuffisant de ces filières pour répondre tant aux enjeux réglementaires des PFV qu'aux enjeux des MP énoncés dans le chapitre 1,
- l'existence d'une diversité de possibilités technologiques et organisationnelles pour structurer une filière. Cette diversité induit une forte difficulté dans le choix d'une filière adaptée au produit concerné,
- la définition complexe d'une filière implique la prise en compte d'un grand nombre de caractéristiques pour évaluer l'adéquation de sa structure avec les flux à traiter et les marchés à satisfaire.

L'ensemble de ces dysfonctionnements autorise la conclusion suivante :

Les filières de valorisation sont des systèmes embryonnaires, instables, complexes de par leurs caractéristiques. Ce sont des systèmes nécessitant un certain nombre d'actions pour améliorer leurs résultats tant techniques qu'organisationnels.

Identifier des leviers d'actions pour le déploiement des filières implique donc d'analyser le processus d'évolution de ces filières dans un premier temps et d'identifier les outils adaptés pour définir et quantifier ces leviers d'action.

III- *De l'émergence à la stabilité*

L'analyse des résultats technico-économiques et organisationnels des filières a mis en exergue que ces dernières sont des systèmes embryonnaires et éprouvent des difficultés à évoluer vers des situations plus stables. La question se pose donc d'identifier les raisons de non-développement de ces systèmes et de définir leurs critères de développement afin d'établir les actions à mener. Dans cette partie, nous exposerons les causes de dysfonctionnements actuels de ces systèmes, puis les critères nécessaires pour faire transiter ces systèmes dits « émergents » vers des systèmes industriels stables.

III-1. Les filières de recyclage, des systèmes dits « émergents »

Les dysfonctionnements des filières actuelles sont le résultat d'une combinaison de causes intrinsèques ou non à ces systèmes. Nous évoquerons, en premier lieu, les causes communes à toutes les natures de filières puis celles spécifiques aux filières de recyclage des MP. Cette analyse nous permettra d'énoncer un certain nombre de critères d'évolution que nous définirons comme maîtrisables (et donc activables) ou non.

III-1-1. Les freins au développement des filières

III.1.1.a.Les causes communes aux filières

Les éléments à l'origine de leur création

Dans un certain nombre de cas ce n'est pas la logique économique des marchés qui a présidé à la création de la filière. Elles ne se sont pas installées de façon dite naturelle (Le Dortz 1995). Une part importante des actions mises en œuvre pour développer ces filières (De Brito et al. 2003) est principalement destinée à répondre à des objectifs réglementaires. La plupart des filières visant au traitement de la fin de vie de produits complexes (types DEEE, VHU) sont apparues en réponse à des contraintes réglementaires telles les directives sur les produits en fin de vie. La mise en place est alors contrainte et les lois de l'économie de marché ne s'appliquent plus. De la même façon la mise en place de filières pour des secteurs non soumis à réglementation est dite non naturelle car elles sont en fait dues à une anticipation de cette même réglementation.

Un autre aspect propre au développement non naturel de ces systèmes est l'absence de volonté commune de l'ensemble du réseau d'acteurs impliqués. Ainsi ces filières n'offrent pas un intérêt commun ou réparti à chacune des parties tel que défini classiquement dans une chaine de valeur. La nature, ou l'origine de la valeur, que chacun des acteurs peut alors trouver dans la chaine, n'est pas obligatoirement compatible avec les objectifs des acteurs amont ou/et aval. Ces contradictions conduisent inévitablement à l'instabilité de ces chaines de valeurs que constituent les filières. Ainsi, ces filières sont structurées non pour offrir un compromis optimal aux attentes divergentes des acteurs du réseau mais pour satisfaire au mieux à ceux, particuliers, de leur commanditaire principal, à savoir celui soumis à la réglementation (De Brito et al. 2003).

Par ailleurs, leur mise en place ne répondant pas à la demande d'un marché, le produit obtenu en fin de filière n'est pas envisagé non plus sous l'angle classique de la mise sur le marché d'un nouveau produit ou d'un nouveau matériau. Il est plus généralement considéré comme une conséquence que comme un objectif.

Cette vision des filières, et de leurs origines, explique les difficultés des différents acteurs des réseaux à projeter des systèmes économiquement viables et à s'organiser sans intervention financière extérieure

Les éléments propres à leur fonctionnement

La structure organisationnelle des filières se caractérise par un manque de professionnalisme et de coopération entre les acteurs (Garcia 2000). En effet, les interactions entre acteurs de la valorisation ne sont pas structurées sur le schéma d'une Supply Chain classique c'est-à-dire qu'il n'existe pas de relations contractuelles entre chacun des acteurs permettant d'assurer la stabilité et la traçabilité des entrants en volume, qualité et prix fixes sur une période donnée. Ainsi les acheteurs de matières recyclées des industries manufacturières ne disposent pas des garanties qu'offrent habituellement les matières (assurance de livraison sur une période prédéfinie de volumes à qualité et prix stables). Cet état est renforcé par l'hétérogénéité de la maturité industrielle des acteurs de la filière. Ce manque de coopération est également présent entre les acteurs de la Supply Chain pour le choix des actions à mettre en place pour le déploiement des filières alors que chacun d'entre eux à son rôle à joueur du producteur de matières premières au producteur du produit fini (Garcia et al. 2003).

Les éléments propres au périmètre couvert par les filières

La contrainte réglementaire à conduit à la structuration de filière par gamme de produit plus que par flux de matériaux Les filières actuelles sont donc structurées pour répondre à une logique « produits » (cf. partie 1 p.9) à valoriser. Ainsi les producteurs cherchent des solutions pour traiter leurs produits en fin de vie et s'intéressent aux premières étapes des filières- la collecte, le démontage et le broyage- soit aux opérateurs en amont qui fonctionnent en flux poussés (cf. Figure 32). L'analyse des outils de modélisation des filières met en exergue la concentration des analyses sur des filières produits (cf. Chapitre 2 IV-2). Or les opérateurs en aval de la filière sont structurés pour satisfaire à une logique matière à commercialiser et s'intègrent dans des filières dites filières matière. Ces dernières fonctionnent en flux tirés par le marché (cf. Figure 32). Par conséquent, cette vision cantonnée au traitement du PFV et non d'une matière première à valeur ajoutée limite le développement des filières.

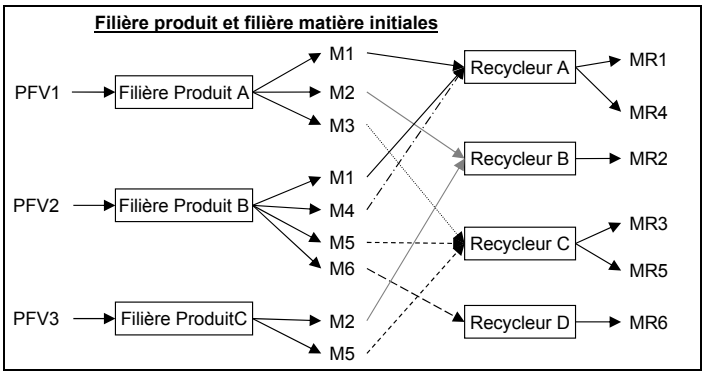


Figure 32: Structure d'une filière en fonction de sa logique produit et matière

Au début de ce chapitre, nous avons démontré la difficulté d'obtenir dans la littérature une définition commune d'une filière et avons proposé notre propre caractérisation. Cependant, certaines des caractéristiques proposées rencontrent des divergences de définition au sein des acteurs de la valorisation. Ainsi, au niveau des modes de valorisation, certains désaccords apparaissent sur le terme valorisation matière (définitions cf. chapitre 1 II-2-2). Certains acteurs cherchent à associer cette valorisation au recyclage matière. Or ces deux modes sont bien différents puisque que le recyclage conserve la valeur ajoutée de la matière initiale (refonte par le même procédé que matière vierge) contrairement à la valorisation. Par exemple, pour atteindre les objectifs de la directive VHU (JOUE 2000), des constructeurs comme Volkswagen ont soutenu l'idée de faire passer le procédé Si-con[78] procédé très efficace de valorisation des RBA, en procédé de recyclage. Cependant, le lecteur percevra le biais de ce type d'association. Si on étend ce procédé à différents produits, l'objectif de traiter les PFV tout en respectant les objectifs réglementaires sera atteint sans effort supplémentaire vis-à-vis des systèmes de recyclage. Une fois les marchés issus de ce type de procédé saturés, d'autres alternatives devront être développées.

[78] Le procédé Si-Con sépare les résidus de broyage en différentes fractions en fonction de leur taille (sable, granulés, fibres). Chacune des ces fractions est destinée à une application particulière en tant que matière secondaire dans un procédé. http://en.sicontechnology.com

III.1.1.b.Les causes spécifiques au recyclage des MP

Freins globaux

Les causes de dysfonctionnements ci-dessus s'appliquent directement aux filières de recyclage des MP. Ainsi la vision des filières centrée sur le traitement du produit va à l'encontre du déploiement pérenne de ces systèmes puisque les MPR ne sont pas considérées comme des matières premières représentant un produit à valeur ajoutée pour un marché donné. Leurs extractions des produits complexes sont généralement de mauvaises qualités. Les flux à traiter en entrée des recycleurs sont donc de qualité et quantité variables car ils n'ont pas la possibilité de faire respecter un cahier des charges sur les flux qui lui sont adressés. De même que précédemment, ces filières souffrent d'un manque de professionnalisme se traduisant par un manque de contrat client-fournisseur habituel dans une Supply Chain classique.

D'autre part, les désaccords rencontrés sur le terme de valorisation matière concernent directement les enjeux liés au recyclage des MP. Cette remise en cause du terme de valorisation matière est également un enjeu important pour le devenir des matériaux composites à matrice TD dans des industries comme l'industrie automobile (cf. Figure 33). Associer la valorisation matière au recyclage conduirait à maintenir la position des TD dans cette industrie. Résoudre cette question n'est pas simple, puisque ces discussions sur la terminologie vont à l'encontre du développement des filières de recyclage des MP mais favorise le développement d'une industrie.

Dans la suite de ce mémoire, nous conserverons la distinction entre recyclage et valorisation matière.

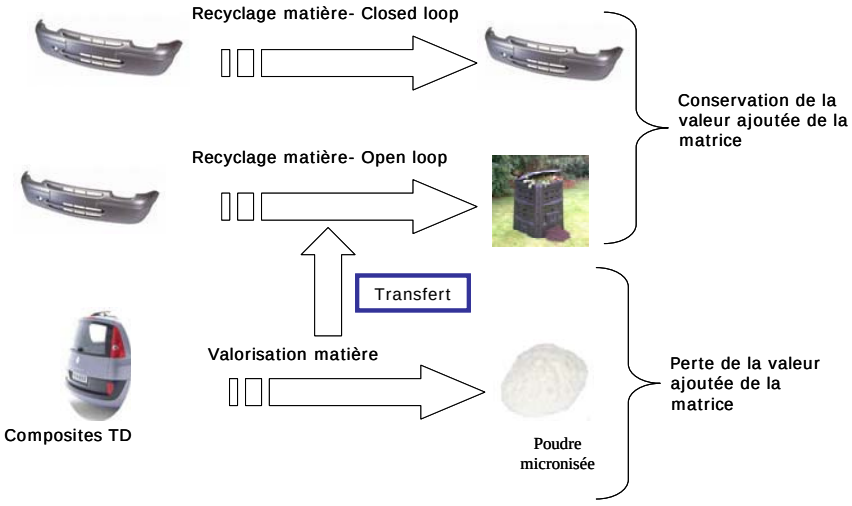


Figure 33: Opposition recyclage matière- valorisation matière

Au-delà des causes de dysfonctionnements, les freins au déploiement des filières de recyclage des MP s'expliquent autant par la nature même du matériau par rapport à des matériaux comme les MF, MNF, que par la nature des opérateurs en charge du recyclage. Ainsi avant d'expliciter plus en avant ce point, il est important de donner un descriptif de cette filière et de ces spécificités liées aux MP. La partie 1 du contexte nous a permis de mettre en évidence que la filière de recyclage des MP issues de VFV est une filière non industrielle, instable en termes techniques, économiques et vis-à-vis des caractéristiques des matières qu'elle fournit. D'un point de vue plus global, le recyclage des MP est une activité méconnue et complexe.

Description de l'activité du recyclage et du recycleur

Le recyclage des MP est une activité récente établie à partir de la mise en place de filières produits au début des années 90. Les recycleurs sont des PME dites artisanales (ADEME 2008b). Contrairement au recyclage des MF et MNF où les recycleurs sont les producteurs de matières premières (sidérurgistes et affineurs), les recycleurs de MP ne sont pas issus du monde de la plasturgie ou de la chimie, mais sont plutôt des entreprises ayant saisi une opportunité économique sur des marchés basse qualité. Cette particularité est à l'origine de nombreux dysfonctionnements de cette filière.

D'autre part, recycler une MP comprend un ensemble d'étapes exigeant chacune un cahier des charges spécifique (cf. Annexe 5) dont la maîtrise va conditionner les coûts du recyclage. Une étape primordiale est la formulation de la MPR qui conduit à la remise à niveau de la matière en fin de vie afin d'atteindre les exigences du cahier des charges en sortie. Ainsi les MP en fin de vie sont des matières dont les propriétés ont été altérées par leur utilisation, il est donc nécessaire d'ajouter un ensemble d'additifs à la matière en fonction des propriétés à atteindre. Cette formulation sert également à homogénéiser la diversité des sources en entrée du recycleur (cf. Annexe 5). Cette étape exige des compétences spécifiques sur la physico-chimie de la matière.

L'ADEME a réalisé une enquête sur la filière de recyclage des MP toutes sources confondues en France en 2005 (ADEME 2008b). En 2005, la filière française de recyclage comprenait environ 489 établissements (recycleurs, broyeurs, récupérateurs…) dont 24% de recycleurs. L'activité liée aux MP de 68% des recycleurs représente plus de 90% de leur activité globale. Deux catégories de recycleurs ressortent de cette étude : ceux produisant de grands volumes de matières de basse qualité pour tenter d'atteindre une économie d'échelle et ceux se situant plutôt sur des marchés à plus faibles volumes mais pour des applications de haute qualité. Les flux traités par les recycleurs sont multimatières, regroupés cependant par famille de MP, et multifilières soit des entrants de sources provenant de produits différents. Les VFV et DEEE représentent en 2005 6% des flux de MP traités par la filière.

Mais dans tous les cas, le développement actuel des filières et le peu de gisements accessibles ne permettent pas aux recycleurs d'atteindre pour le moment un rendement de dimension industrielle. Ainsi même si la quantité de MPR n'a cessé d'augmenter ces dernières années, l'activité de recyclage est actuellement économiquement non viable.

Au-delà du manque de matières en entrée, les recycleurs de MP fin de vie sont principalement cantonnés à des marchés de faible valeur ajoutée (40% des applications de MPR sont des produits de distribution types palettes, fûts...) (APME 2004) que ce soit pour l'industrie automobile ou les autres grandes industries manufacturières. Cependant dans ce type d'industries, c'est l'industrie automobile qui est la plus grande utilisatrice de MPR.

Le marché des MPR est un marché hésitant, qui a du mal à émerger. Il en est à ses balbutiements malgré le bénéficie environnemental associé au recyclage des MP. La répartition des résines vendues sur le marché des MPR est directement liée à la répartition en volume et en prix des résines sur le marché des matières vierges (cf. Figure 17). Ainsi un grand volume de matières disponible est synonyme d'une potentielle économie d'échelle, des produits à courte durée de vie de matières rapidement collectables, un gain élevé en utilisant de la MPR.

III-1-2. Bilan de la filière de recyclage des MP

A partir des éléments décrits au cours des parties précédentes, nous concluons que les filières de recyclage des MP présentent les dysfonctionnements suivants :

- Une économie négative liée notamment à un manque de débouchés pour des applications de plus haute qualité notamment dans les grandes industries manufacturières,
- Un manque d'accessibilité des gisements de MP issues de PFV,
- Une grande diversité de sources en entrée entraînant des fluctuations de propriétés en sortie.

Cette situation s'explique par un ensemble de facteurs à la fois économiques, techniques informationnels, structurels et organisationnels spécifiques à la structure du recyclage des MPFV (Garcia 2000).

Finalement, la cause principale et la plus importante de ces dysfonctionnements est la structure même du marché (Aggeri 1998). Dans un premier temps, la production de MPR n'est pas venue en réponse à une demande de clients soit pour un marché donné mais elle est la conséquence directe d'une réglementation imposant aux producteurs d'atteindre des taux de recyclage et de valorisation donnés. Les MPR ont dû créer leur place sur un marché non demandeur. Dans un deuxième temps, ces matières se positionnent sur un marché déjà existant, le marché des MP vierges, un marché ancien et mature maîtrisé par les industries pétrochimiques (cf. Figure 34). Il n'y a pas de besoin de remplacement de ce marché par un autre. Enfin, les recycleurs sont des entreprises artisanales face à des industries pétrochimiques de dimensions internationales. Donc de par leur structure, les recycleurs ne peuvent concurrencer ces industries pour gagner des marchés aux contraintes élevées. D'autre part la majorité des fournisseurs de MP vierges ne prennent pas position[79] sur le devenir des MPR, le recyclage apparait pour la plupart d'entre eux comme non stratégique (Garcia 2000, Patel et al. 2000).

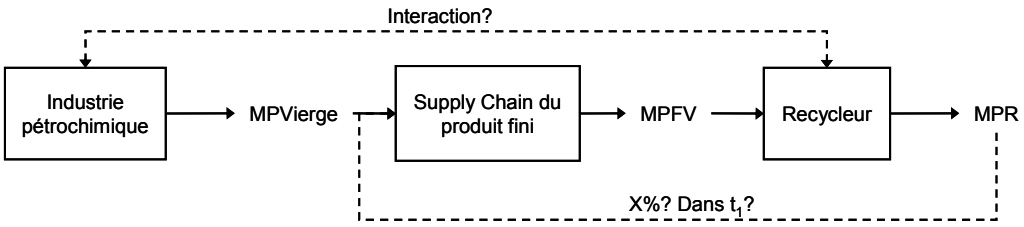


Figure 34: Position des recycleurs face au marché de la matière vierge

En ce qui concerne la nature des débouchés, dans un premier temps, le recyclage des MPR est en cascade descendante encore appelé en boucle ouverte (open-loop). Ainsi, la MPR est utilisée pour une application de qualité moindre et dans une autre industrie que celles d'origine (cf. Figure 33). Les MPR se positionnent donc sur des marchés peu rémunérateurs, dont les volumes viennent à saturation. Ceci limite par conséquent le développement économique des recycleurs. Cependant ce positionnement est aussi lié aux propriétés de la MPR en elle-même. En effet, la formulation d'une MPR demande des compétences sur la physico-chimie des matières dont ne disposent pas ou peu les recycleurs. Sans ces compétences, les propriétés des MPR fluctuent en sortie et ne peuvent être maîtrisées dans le temps. D'autre part, ces fluctuations sont aggravées par la diversité des sources en entrée du recycleur. Ainsi par manque de volume et pour continuer à produire, les recycleurs sont tenus d'accepter des sources de qualité non maîtrisée. Cette situation associée aux difficultés de la

[79] Certains ont pris position comme par exemple SOLVAY en développant le procédé Vinyloop pour le recyclage du PVC.

formulation ne peuvent permettre aux recycleurs de produire une MPR en adéquation avec un marché de plus haute qualité. Ceci conduit à un manque de confiance du marché dans la production (Chick et al. 2002).

Compte-tenu des résultats des filières et des causes de leurs dysfonctionnements, nous pouvons conclure que les filières sont des systèmes qui demeurent au stade de l'émergence. Au-delà de cette émergence, un changement d'approche de finalités de ces systèmes est primordial pour promouvoir leur développement. Ainsi ce n'est pas simplement un moyen pour traiter un déchet mais une industrie à part entière permettant de transformer une matière première (le déchet) en un produit à valeur ajoutée (la matière recyclée) à l'aide d'un ensemble de PME qui doivent être considérées. Avant toute tentative de définition des moyens à mettre en œuvre pour amener ces filières vers plus de stabilité, la notion d'émergence doit être explicitée afin d'identifier les critères de passage entre celle-ci et la stabilité.

III-2. Les caractéristiques de l'émergence d'une industrie

L'analyse de la phase d'émergence se déroule en deux étapes :

- la définition et les caractéristiques de l'émergence d'une industrie
- le positionnement de cette phase au sein des théories expliquant le processus d'évolution d'une industrie.

III-2-1. La phase d'émergence d'une industrie

L'émergence s'opère à la fois au niveau d'un produit (Jullien 1995), d'une technologie (Hall et al. 2003, Halal et al. 1998) ou d'une entreprise (Capiez et al. 1998). Une industrie est composée d'un ensemble organisationnel et technologique dans l'objectif de proposer une gamme de produits répondant à un marché donné. L'émergence d'une industrie est donc une combinaison des émergences de ces différents éléments et représente la première étape dans la chronologie du développement d'un tel système.

La définition de l'émergence d'un système, type Supply Chain, proposée par Goldstein dans Zimmerman et al.[80] et reprise par Choi et al. (Choi et al. 2001) est formulée dans ces termes : « *apparition de nouvelles structures parfois inattendues ou de nouveaux concepts ou de nouvelles propriétés ou de nouveaux procédés dans un système auto-organisé… Le phénomène d'émergence semble avoir sa propre vie avec ses propres règles, lois et possibilités* ». Ils (Choi et al. 2001) démontrent également que la mise en place d'une Supply Chain est un phénomène d'émergence mais qu'il est essentiel de déterminer le moment où les parties prenantes du système doivent le laisser émerger et le moment à partir duquel son développement doit être contrôlé. Cette action de contrôle s'effectue au travers des interactions des entreprises impliquées avec les autres entreprises du système. **Les parties impliquées et leurs interactions dans le système représentent un premier critère d'émergence**.

Pour Le Dortz (Le Dortz 1995), l'émergence est irréversible et représente le moment de structuration d'une industrie : «*moment particulier où les savoirs technologiques sont créés, sélectionnés et stabilisés »*. Selon Abernathy et al.[81] (Le Dortz 1995), le stade de l'émergence se caractérise par une innovation radicale issue d'une ou plusieurs ruptures scientifiques ou technologiques. Elle est une

[80] Zimmerman, B., Lindberg, C., Plsek, P., 1998. Edgeware. VHA, Irving, TX. P.265

phase de changement au niveau des structures de marché caractérisée par de fortes incertitudes sur les caractéristiques des produits ou technologies et par l'apparition de petites firmes innovatrices (Le Dortz 1995).

Le Dortz (Le Dortz 1995) propose à partir de plusieurs exemples un ensemble de caractéristiques d'émergence, que nous nommerons par la suite **critères d'émergence**, et mentionnés par l'auteur comme facteurs explicatifs de l'émergence. Ces critères sont les facteurs institutionnels, socio-économiques, politiques ou stratégiques. A ces facteurs s'ajoutent le rôle des structures préexistantes à l'émergence d'une industrie dont l'activité est proche des technologies et compétences déjà existantes. Ceci implique qu'une rupture technologique radicale n'est pas forcément nécessaire à l'émergence et que l'émergence n'implique pas forcément de nouveaux acteurs ou de nouvelles compétences. Le Dortz (Le Dortz 1995) parle de facteurs de continuité. L'activité d'une industrie existante peut donc être en harmonie ou en conflit avec l'activité émergente. Une harmonie peut présenter des avantages certains pour la nouvelle industrie en utilisant des compétences déjà existantes (cas de l'industrie de téléphonie mobile qui s'est appuyée sur les compétences tant techniques qu'économiques des firmes spécialisées dans les télécommunications). Selon Le Dortz (Le Dortz 1995), cette analyse des proximités avec les structures existantes porte sur les compétences des industries (approche sectorielle) et les systèmes technologiques (le niveau de rupture technologique avec la technologie existante).

L'émergence présente également des caractéristiques technologiques propres en fonction de l'industrie considérée. Ainsi une typologie des industries émergentes peut-être établie en fonction de régimes technologiques, théorie développée par Malerba et Orsenigo[82] (Marsili 1999). Ils formulent l'hypothèse que « *le modèle d'innovation prédominant dans une industrie est déterminé en grande partie par les caractéristiques intrinsèques de la technologie sous-jacente et, plus généralement, par la nature des processus d'apprentissage associés à cette technologie*. » (Larrue 2000). Un régime technologique est donc défini par une combinaison de facteurs (cf. Tableau 9) incluant les conditions d'opportunité technologique, les conditions de cumulativité entre différentes technologies, la facilité d'accès aux opportunités technologiques par de nouvelles entreprises (appropriabilité) et les conditions d'acquisition des connaissances (Larrue 2002, Marsili 1999). La connaissance du régime technologique est essentielle. Ainsi ils permettent de définir un ensemble de propriétés communes à l'émergence d'une industrie basée sur un produit ou une technologie (Marsili 1999). L'identification de ces propriétés pour une industrie donnée peut conduire à l'identification de certains points favorisant ou bloquant son émergence.

Deux régimes « idéaux » extrêmes sont définis (Le Dortz 1995, Larrue 2002, Marsili 1999):

- le régime entrepreneurial : forte opportunité, faibles appropriabilité et cumulativité. Ceci sous-tend l'arrivée de nouvelles entreprises en permanence, la disparition de nombre d'entre elles, stratégies d'exploration de nouvelles technologies. Ce régime est caractéristique des industries traditionnelles type industries mécaniques (régime réversible).
- le régime routinier : fortes opportunité, appropriabilité et cumulativité. La structure du marché est figée et ce régime comprend de grandes entreprises combinant exploration et exploitation. Il est représentatif des industries chimiques, électriques et électroniques (régime irréversible).

[81] Abernathy, W.J., Utterbach, J.M., 1978. Patterns of industrial innovation. Technology review. voL80, n°7

[82] Malerba, F., Orsenigi, L., 1997, Technological regimes and sectoral patterns of innovative activities. Industrial and corporate change, 6, 83-118.

Caractéristiques des régimes technologiques	Définitions
Conditions de cumulativité	Degré avec lequel de nouvelles technologies se construisent sur la base de technologies existantes
Conditions d'opportunités	Facilité d'accès à l'innovation par des innovateurs potentiels
Conditions d'appropriabilité	Capacité des innovateurs à protéger leurs innovations de l'imitation
Caractéristiques principales de la base de connaissances	Spécificités (connaissances tacites/spécifiques codifiées/génériques) Complexité (nombres de corps scientifiques et technologiques différents, variété des compétences nécessaires)

Tableau 9: Les différentes caractéristiques des régimes technologiques issue de (Larrue 2002, Marsili 1999)

Marsili (Marsili 1999) propose à partir de classifications proposées dans la littérature une nouvelle typologie de régimes technologiques basée sur la différentiation entre produits et procédés et sur les barrières d'entrée technologiques plutôt que sur l'appropriabilité. L'auteur introduit de nouveaux facteurs d'émergence (cf. Tableau 10). Ils se regroupent en trois thématiques :

- Les propriétés spécifiques des technologies émergentes : opportunité technologique, barrières…
- Les sources de connaissances : externe, interne…
- La nature des bases de connaissance : degré de différentiation…

	Opportunité technologique[83]	Barrières technologiques d'entrée[84] (diminue la facilité d'accès)	Persistance de l'innovation	Diversité inter-entreprise	Différentiation de la base de connaissances[85]	Sources externes de connaissances	Liens avec la recherche académique	Nature de l'innovation	Exemples
Scientifique	Elevé	Elevé (connaissances)	Elevé	Faible	Faible	Institutions publiques Joint venture	Fort et direct	Produit	Bioingénierie Télécommunications Ordinateurs Produits électriques
Procédés fondamentaux	Moyen	Elevé (échelle)	Elevé	Moyen	Faible	Entreprises affiliées et utilisateurs	Assez importante et directe	Procédé	Chimie Pétrochimie
Systèmes complexes	Moyen	Moyen/Elevé	Elevé dans les technologies mais pas dans les produits	Moyen	Elevé	Système complexe des sources	Assez importante mais indirecte	Produit	Moteurs de véhicules Avion
Produit d'ingénierie	Moyen/Elevé	Faible	Moyen/Faible	Elevé	Elevé	Utilisateurs	Pas très importante	Produit	Produits plastiques Electroménagers
Procédés continus	Faible	Faible	Elevé dans les procédés métallurgiques et dans les matériaux de construction sinon faible	Elevé	Elevé mais faible dans l'alimentaire	Fournisseurs	Pas très importante Plus importante et directe dans l'alimentaire	Procédé	Procédés métallurgiques Procédés chimiques (Papier, bois…)

Tableau 10: Principaux régimes technologiques rencontrés pour des systèmes industriels adapté de (Marsili 1999)

[83] Quantité de solutions technologiques à disposition d'une entreprise pour résoudre son problème et la facilité d'accès à ces solutions.
[84] Facilité d'accès à un ensemble d'opportunités technologiques par des entreprises extérieures.
[85] Le degré de différentiation s'exprime par la quantité d'informations différentes nécessaire pour caractériser une connaissance.

En conclusion, l'analyse de l'émergence d'une industrie et des régimes technologiques conduit à la détermination d'un ensemble de critères dit critères d'émergence, facteurs nécessaires pour comprendre cette phase et pour qu'une industrie puisse émerger. Ces critères sont :

- des critères liés au contexte : critères socio-économiques, politiques, stratégiques…
- des critères de continuité : activité ou acteurs existants,
- des critères technologiques : technologies existantes, opportunités technologiques, nature de la technologie ou du produit….
- des critères de connaissances : connaissances et compétences nécessaires, appropriabilité, diversité…
- des critères d'acteurs : acteurs concernés (firmes, gouvernements au travers des politiques technologiques et industrielles, institutions financières, consortiums…) et degré d'implication…

L'émergence d'une industrie, émergence dite naturelle, est induite par un intérêt commun entre un ou plusieurs acteurs ou entreprises réunies autour d'un produit ou d'une technologie (Larrue 2000).
La réalisation de la phase d'émergence est centrée sur une opportunité technologique ou d'un produit et sur l'acquisition d'un ensemble de connaissances et compétences par les entreprises concernées par l'industrie émergente.

Il apparaît donc comme essentiel après, avoir défini les causes de non-développement des filières, d'établir les caractéristiques de leur phase d'émergence et le régime technologique associé afin d'entrevoir des voies d'amélioration.

III-2-2. La phase d'émergence d'une filière de recyclage

Les filières de recyclage sont des systèmes industriels transformant une matière première en produit à valeur ajoutée, la matière recyclée, à l'aide d'un ensemble d'entreprises. Pour obtenir ce résultat, ces systèmes font appel à un ensemble de technologies. Une filière peut donc être assimilée à une industrie.

L'émergence des filières est une émergence non naturelle mais dite provoquée comme le démontrent les éléments suivants:

- Leur développement n'est pas le résultat d'un intérêt commun entre plusieurs entités mais la réponse à des dispositions réglementaires
- Elles ne sont pas définies pour fournir un produit en réponse à un marché connu et défini mais pour traiter un déchet sans vision de son devenir
- Leur émergence n'est pas centrée autour d'une innovation liée à la matière recyclée et d'un ensemble de connaissances associées
- Leur émergence est caractérisée par des facteurs de continuité élevés et non par une innovation radicale : l'apparition de l'industrie du recyclage des MP entre en conflit avec l'existence de l'industrie pétrochimique. Il n'y a pas d'appropriation des compétences de l'industrie existante par la nouvelle industrie. L'industrie pétrochimique est spécifique d'un régime routinier où la structure du marché est figée.
- Cette industrie s'est développée à partir d'acteurs de la valorisation déjà existants.

Du point de vue du régime technologique, les conditions de cumulativité sont élevées. Ainsi le degré de développement technologique est élevé. Par exemple, des procédés de tri des MP issues de résidus de broyage de produits complexes n'ont cessé d'apparaître ces 10 dernières années (cf.

Tableau 11) et ont fait l'objet de nombreux projets de recherche[86] (ADEME 2002, ADEME 2003b). Mais la plupart d'entre eux sont restés au stade du laboratoire. De la même façon, les procédés de démantèlement et de recyclage liés au VFV ont fait l'objet d'un grand nombre de brevets ces dernières années, notamment hors Europe (Viot 2004) (cf. Figure 35). Le pays déposant le plus est le Japon et les procédés de démontage pour le recyclage concernent plus de 50% des brevets. L'évolution des dépôts de brevets (cf. Figure 35) illustre clairement l'impact de la réglementation sur le développement de ces technologies.

Technologies de tri	**Statut** (Larrue 2002)	Recherche
Tri densimétrique	Technologie confirmée	Laboratoire et industrialisé
Tri par Flottation	Technologies confirmées sur d'autres applications	Laboratoire et pilote
Dissolution sélective	Technologies concluantes au stade de la recherche	Pilote
Triboélectrique	Technologies confirmées	Industriel
Comportement en Température	Technologies avec résultats peu concluants	Pilote
Optique	Technologies confirmées	Industriel
Marquage des plastiques	Technologies confirmées et « exotiques »	Industriel et laboratoire

Tableau 11 : Développement des technologies de tri de MP (ADEME 2003b)

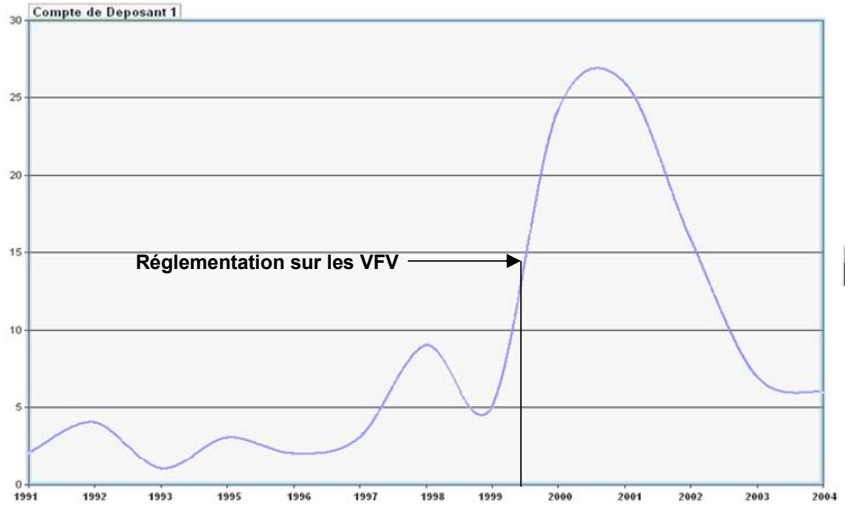


Figure 35: Evolution du nombre de dépôts de brevets concernant le démantèlement et le recyclage des VFV de 1991 à 2004 (Viot 2004)

Compte-tenu du nombre important de dépôts de brevets ces dernières années, les conditions d'opportunités pour les filières des VFV sont relativement élevées. Cette conclusion concerne la filière produit et non les filières de recyclage des MP. Ainsi ces dépôts concernent essentiellement de grandes entreprises (producteurs, équipementiers) dont les conditions d'appropriabilité sont élevées. Mais concernant les PME du recyclage des MP structurant les filières ces conditions sont faibles.

Enfin les bases de connaissances nécessaires à l'émergence de ces systèmes sont complexes compte-tenu de la diversité des métiers concernés (du producteur au recycleur) induisant des compétences variées. L'appropriation des compétences essentielles au recyclage est faible de la part des recycleurs (cf. III.1.1.b).

[86] L'ADEME chaque année propose des appels d'offre pour subventionner des projets de développement de technologies de tri.

A partir de tous ces éléments résumés dans le Tableau 12, nous pouvons conclure que le régime technologique des filières est **un régime combinant le produit d'ingénierie et le système complexe** (cf. Tableau 10**)**.

Les valeurs des critères d'émergence des filières (cf. Tableau 13) induisent les conclusions suivantes :

- Les filières sont des systèmes en perpétuelle émergence dans un système industriel robuste.
- Créer des connaissances, notamment sur les technologies et la matière, est un critère essentiel pour les faire évoluer.

Opportunité technologique	Barrières technologiques	Persistance de l'innovation	Diversité inter-entreprise	Base de connaissances	Sources externes de connaissances	Liens avec la recherche académique	Nature de l'innovation
Elevé	Faible	Faible	Elevé	Elevé	Partenaires Laboratoires	Important Indirect	Produit

Tableau 12: Régime technologique des filières de recyclage

Critères	Contexte	Continuité	Technologique	Connaissances	Acteurs
Valeur	Réglementaire Non naturel	Opposition à l'industrie chimique existante	Entre produit d'ingénierie et système complexe **Non définition du produit**	Complexe **Manque important de connaissances et compétences**	Toutes les parties sont concernées mais **non impliquées par un intérêt commun**

Tableau 13: Profil de l'émergence des filières

Au regard de ce constat, les conditions de passage de l'émergence à une phase dite stable doivent être définies afin d'identifier des critères d'évolution adaptés aux filières. Une quantification de ces conditions paraît primordiale pour, d'une part, connaître les valeurs à atteindre, et d'autre part créer les connaissances nécessaires pour l'atteinte de ces valeurs.

III-3. Les critères de passage de l'émergence à la stabilité

III-3-1. Les théories de l'évolution associées aux systèmes industriels

La phase d'émergence d'un système s'intègre dans un processus de développement. C'est la première étape avant d'atteindre, ou non, un état plus stable. Au travers de la littérature, plusieurs théories traitent des implications de l'émergence dans ce processus de développement et des conditions d'évolution du système au-delà de cette phase. L'objectif de cette partie n'est pas de réaliser un état de l'art exhaustif de ces théories, ni d'en proposer une nouvelle. Il ne s'agit pas non plus de discuter la pertinence et les manques de ces dernières mais de proposer au lecteur un cadre explicatif des conditions d'évolution d'un système. Nous nous proposons d'établir dans cette partie les conclusions de ces théories les plus adaptées à notre questionnement, soit les conditions de passage d'une filière vers un état plus « stable ». Dans la suite ces conditions seront dénommées critères d'évolution.

Ces théories concernent différents niveaux constitutifs d'une industrie :

- L'industrie en elle-même en tant que succession de firmes aux ressources propres : Théorie des ressources,
- L'organisation : Théorie des organisations. Elles doivent permettre de déterminer ce qui doit évoluer dans les organisations pour sortir de la phase d'émergence.
- Le produit : lois d'évolution du produit. Elles déterminent les critères du marché auxquels doit répondre le produit pour qu'il perdure sur ce marché.
- L'économie : Théories évolutionnistes. Elles conduisent à la caractérisation de la phase d'émergence d'une industrie donc du point de passage entre l'émergence et la stabilité.

Lois d'évolution du produit

Les lois d'évolution des produits dénommées cycles de vie du produit (CVP) représentent dans ce contexte l'évolution des ventes d'un produit, donc du marché, en fonction du temps (Fenneteau 1997). Il est centré sur la demande. Il existe différents modèles de CVP spécifiques au type de produit[87]. Le modèle classique (S-curve) reste un schéma de référence pour de nombreux marchés. Ce modèle comprend quatre phases (Fenneteau 1997):

- L'introduction : elle correspond à une faible augmentation des parts de marché pour le produit.
- La croissance : elle marque l'accélération du développement des ventes.
- La maturité : elle commence lorsque la croissance ralentit. Elle se termine lorsque la diminution des ventes s'accélère. Cette phase se caractérise globalement par une stagnation des ventes.
- Le déclin : elle correspond à une diminution continue des ventes.

L'évolution des ventes en fonction des différentes phases est conditionnée par la diffusion de ce produit aux acheteurs.

Théories évolutionnistes

Les théories évolutionnistes sont des théories économiques dont le concept repose sur les théories d'évolution de la biologie (variation, sélection, hérédité). Ainsi les auteurs précurseurs de cette théorie cités dans (Marsili 1999) proposent un modèle évolutionniste d'une industrie basé sur les changements technologiques et l'évolution des marchés. Ces théories intègrent directement la notion de cycle de vie technologique d'une industrie (Le Dortz 1995) et se réfèrent à la phase d'émergence d'une industrie reposant sur la définition d'un régime technologique (cf. III-2-1). Elles ne sont pas orientées uniquement sur le produit mais sur l'ensemble des éléments qui constituent l'industrie en charge de sa production.

Au cœur de ces théories, le cycle de vie technologique (CVT) d'une industrie[88] (Le Dortz 1995): est caractérisée par trois grandes phases :

- l'émergence : l'objectif est de maximiser les performances, le degré de nouveauté est élevé.
- apparition des caractéristiques dominantes de la technologie ou des produits : diminution du nombre de possibilités,
- maturité-déclin : dans la phase de maturité (produit standardisé), l'objectif principal est de réduire les coûts de production.

[87] Il existe six grands types de courbe qui rendent compte de la diversité des formes de cycle.
[88] Abernathy, W.J., Utterbach, J.M., 1978. Patterns of industrial innovation. Technology review. voL80, n°7

Le CVT donne donc une relation entre la maturité de la technologie et le taux d'innovation sur un produit (cf. Figure 36). L'appropriation et la diffusion des connaissances entre les acteurs au cours des différentes phases ainsi que leurs interactions (collaboration, consortiums…) sont des facteurs clé pour une évolution vers la phase de maturité (Larrue 2000).

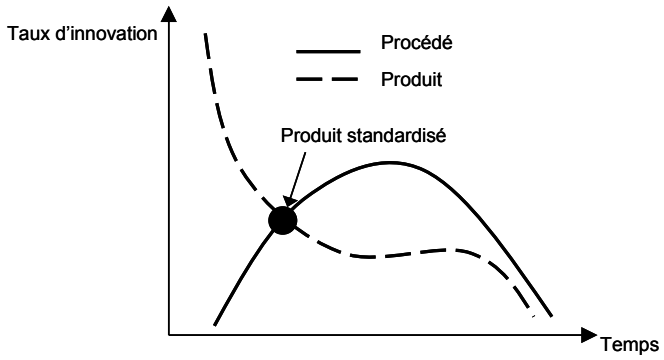


Figure 36: Illustration du cycle de vie technologique selon Abernathy (Le Dortz 1995)

Théorie des ressources

La théorie des ressources propose un modèle robuste de l'entreprise en considérant cette dernière comme un réservoir de ressources. Elle repose sur la prise en compte du rôle déterminant des compétences accumulées au cours du développement de l'entreprise. Elle se concentre donc sur un élément de la théorie des organisations. Ces ressources comprennent notamment les compétences et capacités de l'entreprise qui sont primordiales pour permettre à celle-ci de s'adapter aux changements de son environnement. Elles ont à la fois une dimension individuelle (informations, connaissances, savoir-faire…), une dimension formelle (guides, procédures….) et une dimension tacite et informelle (codes, routines, confiance…) (Durand et al. 1997). Cette théorie permet notamment de déterminer si une entreprise dispose des compétences suffisantes pour répondre à un marché donné. Elle émet l'hypothèse que ce n'est pas uniquement le marché qui conditionne les possibilités d'évolution d'une entreprise.

Théories	Avantages	Inconvénients	Auteurs
Evolutionnistes	Evolution d'une industrie de la phase d'émergence à la stabilité	Innovation produit et procédé non toujours existantes Non prise en compte des caractéristiques des entreprises	(Le Dortz 1995, Durand et al. 1997)
Lois d'évolution du produit	Caractéristiques du marché en fonction de la phase du CPV	Axe marché Non prise en compte de l'évolution technologique et de l'organisation de l'industrie associée	(Fenneteau 1997)
Des ressources	Prise en compte des compétences et capacités d'une entreprise comme facteur clé de sa croissance au même titre que le marché	Centré sur les compétences	(Durand et al. 1997, Durand 2000)

Tableau 14: Avantages et inconvénients des différentes théories d'évolution d''une industrie

L'évolution d'une industrie dépend donc:

- d'un marché, d'un produit,
- d'une ou plusieurs technologies ou procédés de fabrication du produit,
- d'une organisation d'entreprises,
- de compétences, de connaissances et de leur diffusion entre les entreprises.

Ces éléments représentent des critères d'émergence que nous appellerons par la suite critères d'évolution qui traduisent les capacités d'un système à faire évoluer ces différents éléments constitutifs vers plus de stabilité. Comprendre les conditions de passage de l'émergence vers un état plus stable nécessite de définir et de quantifier ces critères d'évolution.

III-3-2. Les critères d'évolution de l'émergence à un état plus stable et leur quantification

Les critères d'évolution sont les critères caractérisant la capacité d'un système industriel à évoluer d'un état d'émergence vers la stabilité. De notre analyse de la littérature, nous avons retenu et classé ces critères en deux grandes catégories :

- Les critères non maîtrisables : ce sont des éléments sur lesquels les acteurs impliqués dans le système n'ont pas de degré d'action sur eux, des évènements imprévisibles liés à l'environnement extérieur, spécifiques ou non au secteur industriel étudié (ex : arrivée de nouveaux concurrents, évolution des besoins de la société…).
- Les critères maîtrisables (cf. Tableau 15): ce sont des éléments sur lesquels les acteurs ont une possibilité d'action et qui trouvent leurs origines dans les décisions d'un ou de plusieurs des acteurs.

A partir de ces définitions et l'analyse des théories d'évolution, un ensemble de critères d'évolution spécifiques aux filières ont pu être identifiés donnant une première image des actions possibles à engager par les différents acteurs:

- des critères non maîtrisables :
    - Evolution des cours du pétrole : leurs fluctuations difficilement prévisibles ont un impact direct sur les cours des MP vierges donc sur le prix des MPR.
    - Export des déchets vers des pays comme la Chine. Ces pays sont fortement demandeurs de matières premières d'où l'intérêt de récupérer ces déchets. Mais ces alternatives ne devraient plus être envisageables puisqu'un pays est responsable du traitement de ces déchets.
- Des critères maîtrisables :
    - Définition d'un marché pour les MPR : favoriser la mise en place de filière en boucle fermée. Utiliser la matière dans l'industrie d'origine faciliterait notamment le déploiement du recyclage vers des applications à plus haute valeur ajoutée.
    - Participation de la Supply Chain et des acteurs de la valorisation dans le développement de technologies pour faciliter le transfert des laboratoires aux filières.
    - Implication de l'industrie pétrochimique dans le développement du recyclage : elle dispose notamment des compétences physico-chimiques nécessaires au recyclage. Leur position tend à évoluer vers une participation directe dans les filières. Cette participation sous-entend une modification organisationnelle importante des filières.

Processus de quantification des critères d'évolution

Déterminer le point de passage de la phase d'émergence à la phase de croissance/ stabilisation passe par la définition, pour ces différents critères, (cf. Tableau 15) de la valeur à partir de laquelle nous pourrons dire que le système tend vers la stabilité, appelée valeur objectif (cf. Tableau 16). La détermination de l'atteinte de cette valeur par le système passe donc par la quantification des valeurs actuelles de ses critères d'évolution. Si les valeurs mesurées des critères d'évolution approchent les valeurs objectifs, alors le système sera considéré comme évoluant vers plus de stabilité. La quantification des valeurs de critères est la mesure des performances[89] (cf. Figure 37) d'une structure industrielle (Tahon 2003, Berrah et al. 2005), l'objectif étant de comparer différentes structures par rapport aux résultats qu'elles peuvent fournir et notamment l'objectif à atteindre.

Critères	Mode d'actions	Acteurs (Supply Chain classique)
Technologiques	Optimisation des procédés	Fournisseurs Laboratoires de recherche
	Choix des procédés	Producteurs Fournisseurs
Produit	Nouveaux marchés	Producteurs Consommateurs
	Fidélisation des clients	Producteurs
	Choix matière	Producteurs Fournisseurs
Economiques	Prix	Producteur Fournisseur
	Taxes	Gouvernements
	Subventions	Gouvernements
Organisationnels/Ressources	Norme, modification de la politique gouvernementale	Gouvernements Producteurs
	Nombre d'acteurs	Supply Chain
	Contrat fournisseur	Producteurs Fournisseurs
	Nouvelles compétences	Toutes les parties
	Diffusion des informations, et connaissances	Toutes les parties
	Partenariats	Toutes les parties
Environnementaux	Choix des matériaux	Producteurs Fournisseurs
	Choix des technologies	Producteurs Fournisseurs
	Respect des réglementations environnementales	Toutes les parties

Tableau 15: Illustration des critères d'évolution maîtrisables (Tahon 2003, Fenneteau 1997, Porter 1985)

Le point de passage de l'émergence à un état plus stable est donc quantifiable par la mesure des performances, donc **les critères d'évolution deviennent des critères d'évaluation des performances**.

[89] La performance est définie soit comme un résultat soit comme un ensemble des étapes logiques pour conduire au résultat. TAHON, C. *Evaluation des performances des systèmes de production. traité IC2 productique*. p. 302.

Ces critères sont définis par un ensemble d'indicateurs (cf. Eq 1)

$$\textbf{Eq 1}\quad P_n = f(I_1,.....,I_n)$$

Avec Pn= Performance à mesurer

(I1,…In)=l'ensemble des indicateurs du système intervenant dans la mesure de la performance.

La détermination des performances représente donc une aide à la décision pour faire évoluer un système industriel. Une mesure efficiente de l'atteinte du point de passage passe par l'évaluation simultanée des différentes performances.

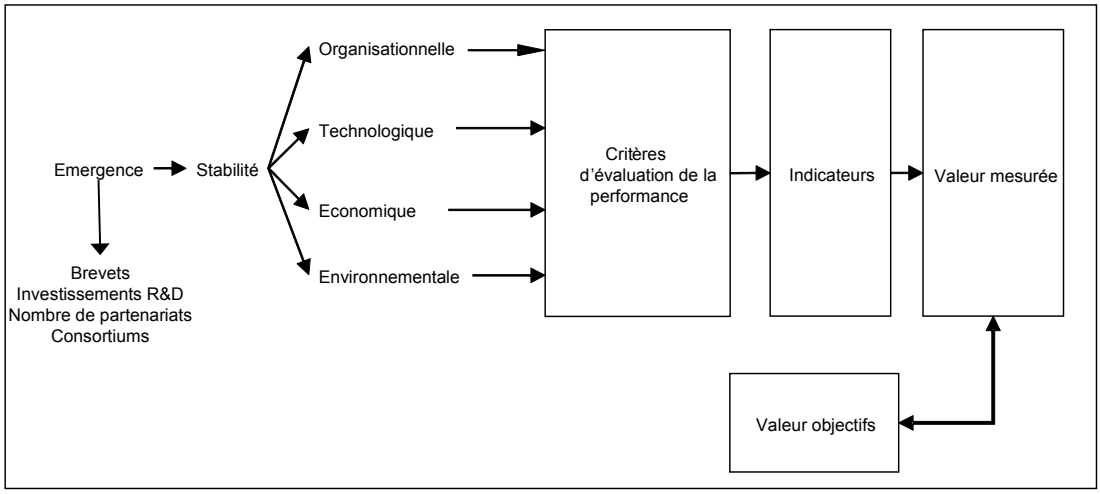


Figure 37: La mesure du passage de l'émergence à la stabilité par la mesure des performances

III-3-3. Enoncé de la première problématique

L'identification des critères de passage de l'émergence vers la stabilité pour un système donné permet la caractérisation de l'évolution des filières, la compréhension des raisons du blocage de ces systèmes mais surtout l'identification des voies d'amélioration.

Une filière est à la fois :

- un ensemble de technologies nouvelles ou existantes : technologie de tri, de démontage, de recyclage…
- la production du produit et la création d'un marché: la matière recyclée…
- une organisation et des ressources : des entreprises, des compétences spécifiques…

Les filières sont des systèmes en perpétuelle émergence caractérisés par des disparitions/apparitions d'entreprises du fait que la MPR n'est pas un produit à valeur ajoutée et que les lois classiques des marchés ne s'appliquent pas (cf. Tableau 16). Cette situation s'explique par le fait que la création de ces filières a été imposée par des réglementations. Notre bilan a donc mis en évidence que le développement technologique n'est pas le frein majeur à leur évolution.

L'évolution des filières implique une modification de l'organisation actuelle possible seulement s'il y a apparition d'un intérêt commun aux différents acteurs concernés, situation non présente actuellement. Pour cela il faut que la MP traitée soit un produit à valeur ajoutée, répondant à un cahier des charges satisfaisant un marché donné et ainsi apporter aux différents acteurs l'assurance d'une valeur économique élevée.

Critères d'évolution	Valeur actuelle	Valeurs objectifs	
		Acteurs	Valeurs
Technologiques	Manque de technologie de tri des MP efficientes au niveau industriel Nombreux développements en laboratoire	Acteurs de la valorisation	Augmentation des flux accessibles
Produit	Non définition des caractéristiques du produit Non définition de marchés	Supply Chain	Augmentation de l'utilisation de Matière recyclée
Economiques	Economie négative du recyclage	Acteurs de la valorisation Supply Chain	Economie positive Marché libre
Organisationnels/Ressources	Manque de professionnalisation des acteurs Manque de compétences spécifiques aux traitements des MP	Acteurs de la valorisation Supply chain	Acquérir des compétences de compoundeur Augmenter le nombre de contrats client-fournisseurs
Environnementaux	Alternative à l'augmentation de la quantité de déchets et à l'épuisement des ressources	Société civile Gouvernements Supply Chain Acteurs de la valorisation	Augmenter le taux de recyclage des produits

Tableau 16: Valeurs actuelles et valeurs cibles des critères d'évolution de la filière de recyclage des MP

A partir de ces constats nous posons la problématique suivante :

Problématique 1 *: le passage de la situation actuelle d'émergence à une situation plus stable suppose un certain nombre de changements tant au niveau technologique, économique qu'organisationnel pour être au plus proche des conditions « idéales ». La réalisation de ce passage nécessite un ensemble de connaissances et de compétences à destination des différentes parties afin de prendre les décisions adéquates au développement des filières. Ces connaissances concernent notamment la quantification des critères d'évolution.*

Ces conclusions nous conduisent à proposer l'hypothèse suivante :

H1 *: La création des connaissances essentielles au choix des actions à mettre en place pour faire évoluer les filières vers une configuration stable s'obtient par la mesure de leurs performances techniques, économiques, organisationnelles et environnementales.*

IV- Les outils d'analyse des filières

Comme pour la prise en compte de la fin de vie en conception où la notion de CpX[90] a été développée, l'analyse des filières s'inscrit dans le XCM[91] (X Chain Management) ou GCX (gestion de la chaîne de X). Ainsi leur analyse fait appel aux caractéristiques de la gestion des chaînes logistiques ou Supply Chain management (SCM) déclinée ces dernières années en gestion « verte » de la chaîne logistique (GrSCM), de la gestion de la chaîne produit ou Product Chain Management (PCM) décliné en Green PCM (GPCM) et de la gestion de la chaîne de valeur ou Value Chain Management (VCM) décliné en Environmental VCM (EVCM). Les principales caractéristiques des domaines d'origine sont présentées dans l'Annexe 6.

Au sein de ce domaine de recherche, la logistique inverse ou reverse logistics (RL) dispose d'une place prédominante dans la littérature pour l'étude des filières. Nous proposons dans cette partie de clarifier ces terminologies afin de positionner l'analyse des filières au sein de ces domaines de recherche pour ensuite présenter les différents outils développés dans ces thématiques.

IV-1. Les domaines d'analyse adaptés aux filières

IV-1-1. Green Supply Chain management (GrSCM)

De nombreux concepts permettant la prise en compte de l'environnement au sein de systèmes industriels ont vu le jour ces dernières années. Ils incluent notamment le management environnemental de la Supply Chain, la gestion du cycle de vie du produit, l'écologie industrielle… Cette partie a pour but de donner des éléments pour clarifier ces notions et d'identifier leurs interactions afin de positionner l'analyse des filières de valorisation au sein de ces concepts.

IV.1.1.a. Définition

Face aux enjeux liés à la dégradation de l'environnement, les acteurs de la Supply Chain s'intéressent de façon croissante à leurs responsabilités dans cette dégradation et cherchent les moyens de minimiser leurs impacts. Cette prise de conscience est désormais au cœur des domaines de recherche liés à la Supply Chain et ces dernières années ont vu apparaître des domaines comme le management environnemental de la chaîne logistique ou Environmental Supply Chain Management (ESCM) (Walker et al. 2008) (Srivastava 2007) et le Green Supply Chain Management (GrSCM) une des composantes du ESCM. Cette composante s'intéresse notamment à la gestion opérationnelle des déchets produits par la Supply Chain donc aux processus liés aux filières de valorisation. Walker et al. (Walker et al. 2008) ont recensé les différentes motivations au déploiement du GrSCM évoquées dans la littérature. Ces motivations sont à la fois internes à l'organisation (volonté de réduire les coûts, améliorer la qualité du produit, engagement des salariés…) et externes (réglementation, pression des consommateurs, disposer d'un avantage compétitif, augmenter la performance de l'entreprise, pression sociétale, améliorer l'image de l'entreprise, implication des fournisseurs…). Les pratiques de GrSCM incluent par exemple la réduction du nombre d'emballages et des déchets, l'éco-conception de produits, la réduction des émissions de CO_2 associées au transport, soit toutes les actions entreprises par la Supply Chain pour intégrer la composante environnementale dans ces choix.

[90] Conception pour X, X= valorisation, démontage, recyclage, remanufacturing

Ce domaine de recherche couvre donc un large panel d'actions. Srivastava (Srivastava 2008, Srivastava 2007) a établi une classification de la littérature liée au GrSCM afin de positionner les différentes actions et terminologies par rapport au domaine global (cf. Figure 38).
Le GrSCM, tout comme le SCM, se décline en Green PCM (GrPCM) incluant l'éco-conception et la production durable et en Environmental VCM (EVCM) (cf. Figure 38). Dans cette classification, la Reverse Logistics (RL) ressort comme un domaine adapté à l'étude des filières de valorisation.
Nous nous proposons dans la suite de ces travaux, de développer les principes de la RL, du GrPCM et de l'EVCM pour identifier les éléments constitutifs d'un outil d'analyse efficient.

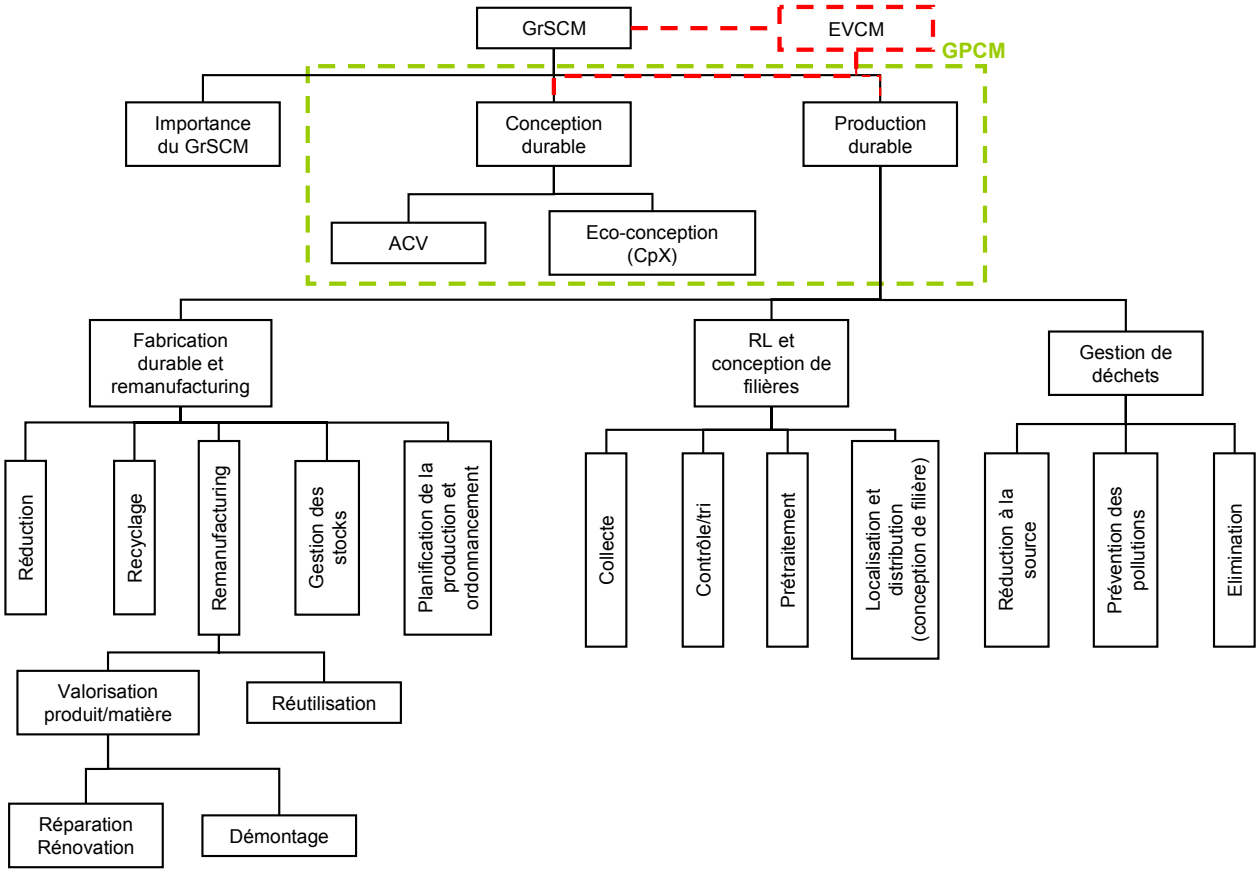


Figure 38: Classification de la littérature existante sur le GrSCM adaptée de (Srivastava 2008)

IV.1.1.b. la Reverse Logistics (RL)

Le concept de RL est apparu il y a une trentaine d'années dans la littérature. Cette approche reconnue désormais comme un domaine de recherche à part entière (De Brito et al. 2002), a bénéficié d'une attention croissante depuis le début des années 90 en relation directe avec une plus forte prise de conscience des impacts environnementaux des produits (Fleischmann et al. 1997) mais également en raison des gains économiques associés à cette approche (place compétitive sur le marché, économie de matières…) (Fernandez 2003). Le développement de la RL est d'abord lié en Europe à la pression réglementaire sur les producteurs. La RL a été définie pour la première fois au début des années 1990 par le Council of Logistics Management (De Brito et al. 2004) comme étant *«un terme régulièrement utilisé pour faire référence au rôle de la logistique dans le recyclage, le traitement des déchets et la gestion des matières dangereuses ; une vision plus large inclut tout les*

[91] X représente fournisseur, produit, fin de vie ou valeur.

éléments relatifs aux activités logistiques menées dans le cadre de la réduction des déchets à la source, le recyclage, la rénovation, la réutilisation de matières… ». Mais il n'existe pas de consensus dans la littérature pour l'acceptation d'une définition de la RL (Fernandez 2003).

De Brito et al (De Brito et al. 2004), Fernandez (Fernandez 2003), Alvarez-Gil et al (Alvarez-Gil et al. 2007) et Fleischmann et al (Fleischmann et al. 2000), discutent différentes définitions de la littérature, à la fois partielles et controversées. Celles-ci différent sur l'étendue des activités et acteurs considérés, sur les limites du système à analyser ainsi que sur son objectif (commercial, économique, environnemental…) et mettent en œuvre les principes suivants :

- La RL est orientée par des principes marketing, par les flux qui transitent du consommateur au producteur et par le bais d'une chaîne d'approvisionnement.
- La RL conduit à la prise en compte des flux de bien et d'information en sens inverse des flux des activités logistiques standards.
- La RL est une gestion de l'organisation des flux de ressources matières issues des clients.
- La RL réfère à la gestion logistique des compétences et activités dans la réduction et la gestion de déchets issus de l'emballage et produits.
- La RL comprend les processus liés à la planification, à la mise en place et au contrôle de flux efficient de produits (matières, biens, informations) de la consommation à la production dans le but de récupérer la valeur contenue dans le produit ou pour sa simple élimination.
- La RL est un processus qui permet à une entreprise de devenir plus éco-efficiente au travers du recyclage, de la réutilisation et de la réduction de matières utilisées.

Malgré la confusion régnante, deux définitions résument bien selon nous les concepts associés à ce domaine de recherche. De Brito et al (De Brito et al. 2004) ont proposé, au travers du groupe de travail RevLog[92], la définition suivante : « *le processus de planification, de mise en place et de contrôle des flux de matières et produits finis de la production, distribution ou utilisation à un point de valorisation ou point de traitement propre* ». Fernandez (Fernandez 2003) conceptualise la RL de la manière suivante : « *la gestion de tous types de produits (usagés ou non, produits finis ou composants, pièces ou matières), qui, pour différentes raisons, sont envoyés par un membre de la Supply Chain à tout autre membre de la même chaîne. D'autre part, les flux issus de cette chaîne et dirigés vers une autre chaîne sont également inclus à condition qu'ils soient la conséquence des activités de réutilisation et de valorisation de la valeur ajoutée du produit ou de la matière.* ».Les processus et acteurs impliqués dans ces définitions sont illustrés sur la Figure 39 et la Figure 40.

[92] RevLog est un projet de recherche européen sur la RL (1997-2002) regroupant l'Erasmus University de Rotterdam (Pays-Bas), l'Aristoteles University of Thessaloniki (Grèce), l'Eindhoven University of Technology (Pays-Bas), INSEAD business school (France), l'Otto-von-Guericke University Magdeburg (Allemagne), l'University of Piraeus (Grèce). L'objectif de ce projet est d'analyser les enjeux de la RL en fonction de leur impact sur l'industrie et la société afin de donner une image structurée et compréhensible de ce domaine pour les pratiques industrielles. RevLog a permis le développement de modèles et méthodes pour résoudre des problèmes décisionnels venant enrichir la thématique de la RL.

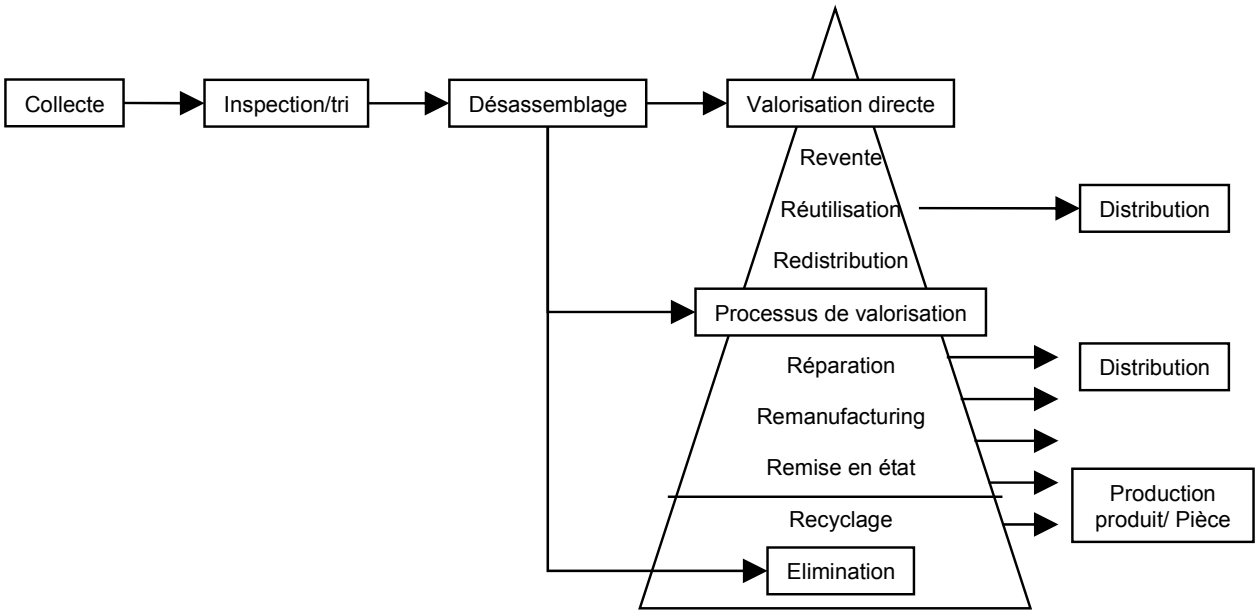


Figure 39: Processus inclus dans la notion de RL adapté de (De Brito et al. 2004) et (Srivastava 2008).

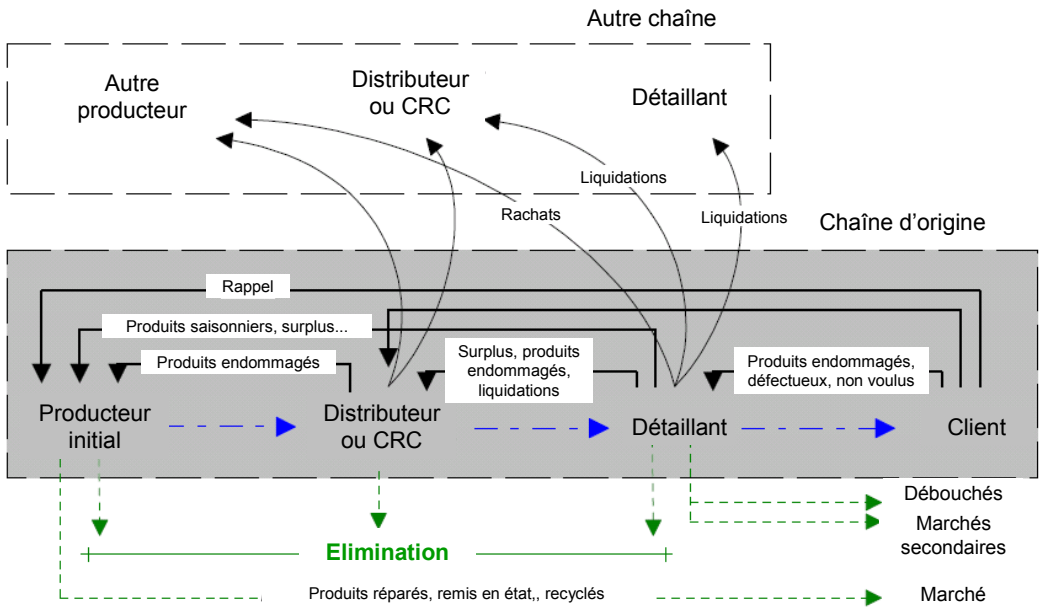


Figure 40: Acteurs et flux concernés par la chaîne de RL traduit de (Fernandez 2003).

Les outils de RL représente une aide à la décision aux niveaux (De Brito et al. 2004, Fleischmann et al. 1997):

- stratégique (stratégie de l'entreprise à long terme): stratégie de valorisation, éco-conception, conception et capacité d'une chaîne, outils stratégiques (compétitivité sur le marché)…
- tactique (moyens pour répondre à la stratégie): intégration des retours produit dans l'organisation globale, gestion intégrée de l'approvisionnement, distribution inverse, planification de la production, gestion des stocks, marketing, support informatique pour le traitement et la transmission de l'information…
- opérationnel : ordonnancement et contrôle de la production, gestion de l'information…

Pour illustrer ces propos, Le Blanc et al (Le Blanc et al. 2004) ont reconçu la filière de recyclage des réservoirs GPL fin de vie des véhicules à l'aide de la RL. Cette étude a été réalisée pour ARN[93] dans le but d'optimiser le transport entre le centre de dégazage des réservoirs et les démolisseurs afin de rendre plus attractif économiquement le traitement de ces produits auprès des démolisseurs. Ainsi compte-tenu du coût élevé du transport vers le centre de dégazage (au moins 50% des coûts) les démolisseurs revendent directement ces produits sans passer par cette étape ce qui rend l'opération de valorisation dangereuse. Pour mettre un terme à cette situation, les auteurs, à l'aide d'un modèle de localisation-répartition[94] des structures, ont déterminé le nombre optimal de structures de dégazage et leur localisation géographique pour minimiser les coûts globaux. Dans cette étude, l'aide à la décision se situe à un niveau stratégique pour ARN et à un niveau opérationnel pour les démolisseurs.

IV.1.1.c. le Green Product Chain Management (GrPCM)

L'intégration des aspects environnementaux d'un produit tout au long du son cycle de vie donne lieu au GrPCM. Il comprend notamment tous les processus liés à l'élimination du produit en fin de production ou après utilisation soit la valorisation et le recyclage du produit (Boons 2002). Le GrPCM devient alors la Recovery PCM (RPCM) ou Recycling PCM (RePCM). La chaîne produit est construit en fonction d'un réseau d'acteurs, d'hypothèses sur leur comportement au sein de la chaîne et sur les solutions retenues pour réduire l'impact environnemental du produit (Boons 2002). Boons (Boons 2002) ajoute ces solutions aux phases principales de la Product Chain (cf. Annexe 6). Il définit six types de GrPCM : réduction de la quantité de matière utilisée, substitution de matières, recyclage matière, substitution de production, recyclage du produit, élimination finale.

D'autre part le GrPCM inclut également toutes les analyses concernant la mesure des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie du produit, soit l'ACV, outil utilisé notamment dans les stratégies d'éco-conception (cf. Figure 38).

IV.1.1.d. l'Environmental Value Chain Management (EVCM)

L'Environmental Value Chain Management (EVCM) est une combinaison des concepts de VCM et de SCM avec une prise en compte des notions environnementales. Cette combinaison illustre les relations entre les parties prenantes représentées par les valeurs attendues par ces dernières. Cette analyse ne se limite donc plus à la valeur du produit attendue par le client final (Ishii et al. 2000, Rose et al. 2000). L'analyse de la chaîne environnementale s'appuie sur l'identification des différents flux (information, économique, physiques) participant à la définition de la valeur environnementale du produit.

L'analyse de ces flux conduit à définir les programmes (nouveaux produits, services, modifications au sein de l'organisation) à mettre en place au sein des organisations pour améliorer la valeur environnementale du produit afin qu'elle corresponde aux attentes de chaque partie prenante.

---

[93] Auto Recycling Nederland. C'est une organisation, type éco-organisme, prenant en charge la collecte et le recyclage des VFV aux Pays-Bas. Elle organise, contrôle et fiance la chaîne complète. Toute personne achetant un nouveau véhicule paie une taxe de traitement su produit (environ 45 euros) destinée à financer les activités de collecte et de recyclage non viables économiquement.

[94] Modèle utilisé pour établir la localisation optimale des structures. Il prend en compte les clients, la capacité des installations, les coûts opérationnels et de transport. Il permet le calcul du nombre d'installations nécessaires, leur taille et leur localisation.

L'EVCM inclut deux analyses environnementales de la chaîne de valeur :

- Une analyse interne à une organisation industrielle : elle consiste à analyser les interactions entre les métiers composants l'organisation (Ishii et al. 2000) (cf. Figure 41)
- Une analyse externe à une organisation industrielle : elle s'applique aux interactions entre les producteurs, consommateurs, gouvernement et recycleurs soit à l'ensemble des parties prenantes impliquées dans le cycle de vie du produit (Rose et al. 2000). (cf. Figure 42)

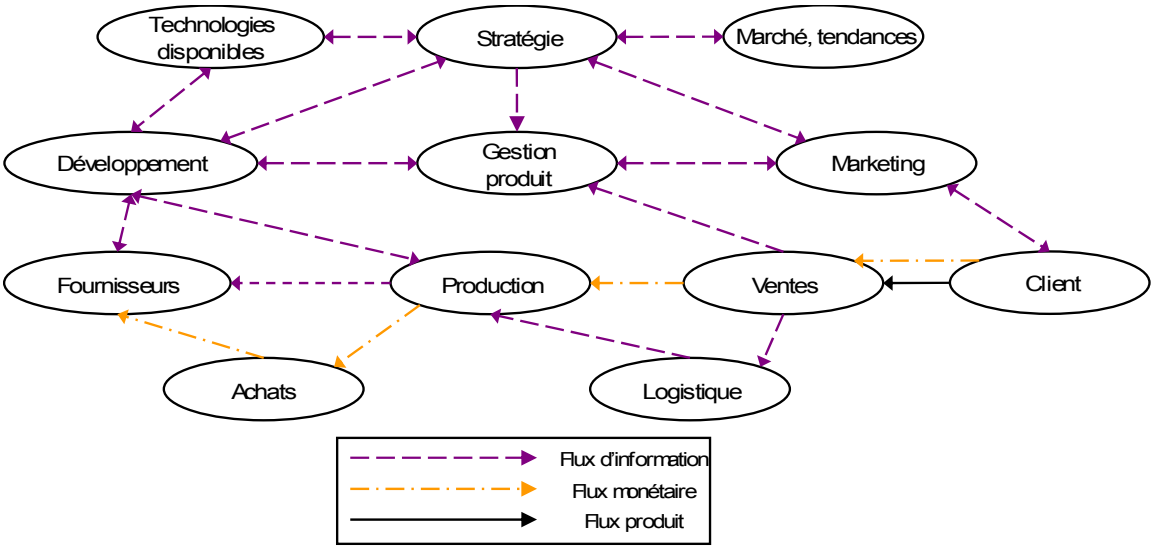


Figure 41: Bilan des flux intervenant dans un EVCM interne à une organisation industrielle traduit et adapté de (Ishii et al. 2000)

La Figure 41 et la Figure 42 mettent en évidence la prédominance des flux d'informations dans l'atteinte de la valeur environnementale. Ces flux s'apparentent à des échanges d'information, des réclamations, des informations descendantes, des retours d'informations…

L'association de l'EVCM à une approche d'éco-conception conduit à la mise en place de stratégies de fin de vie du produit plus robustes puisqu'elles associent à la minimisation des impacts environnementaux du produit les attentes environnementales (Rose et al. 2001). Cette association favorise l'adéquation produit avec son traitement en fin de vie.

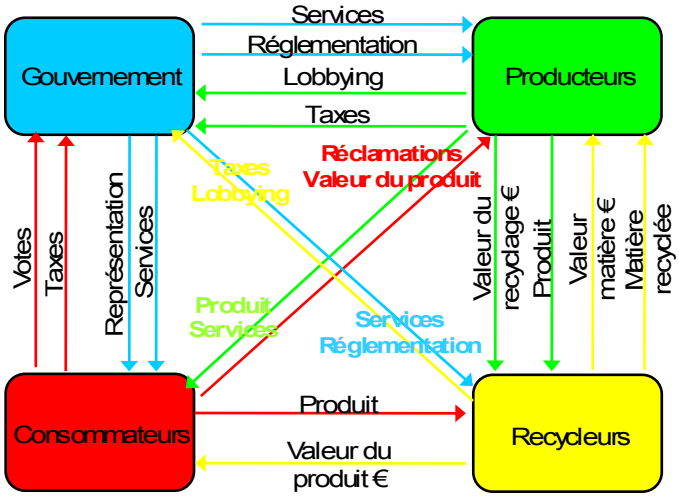


Figure 42: Exemple d'un EVCM externe traduit de (Rose et al. 2000)

IV-1-2. Bilan

L'ensemble de ces concepts présentent un certain nombre de différences. Seuring (Seuring 2004) a mis en exergue que les critères de différentiation portaient principalement sur le réseau d'acteurs pris en compte, les limites du système analysé et les limites temporelles. Aux concepts présentés ci-dessus, ce dernier a associé des domaines spécifiques à l'environnement soit l'écologie industrielle[95] et la gestion intégrée de produit (cf. Tableau 17). Malgré leurs spécificités, tous ces concepts sont liés les uns aux autres que ce soit par les types d'acteurs considérés, les flux ou les étapes de production prises en compte.

L'analyse de ces différents domaines de recherche et la caractérisation d'une filière proposée dans ce mémoire (cf. II-1-4) révèlent qu'une analyse efficiente des filières de valorisation se situe à l'intersection de ces concepts de recherche (cf. Figure 43).

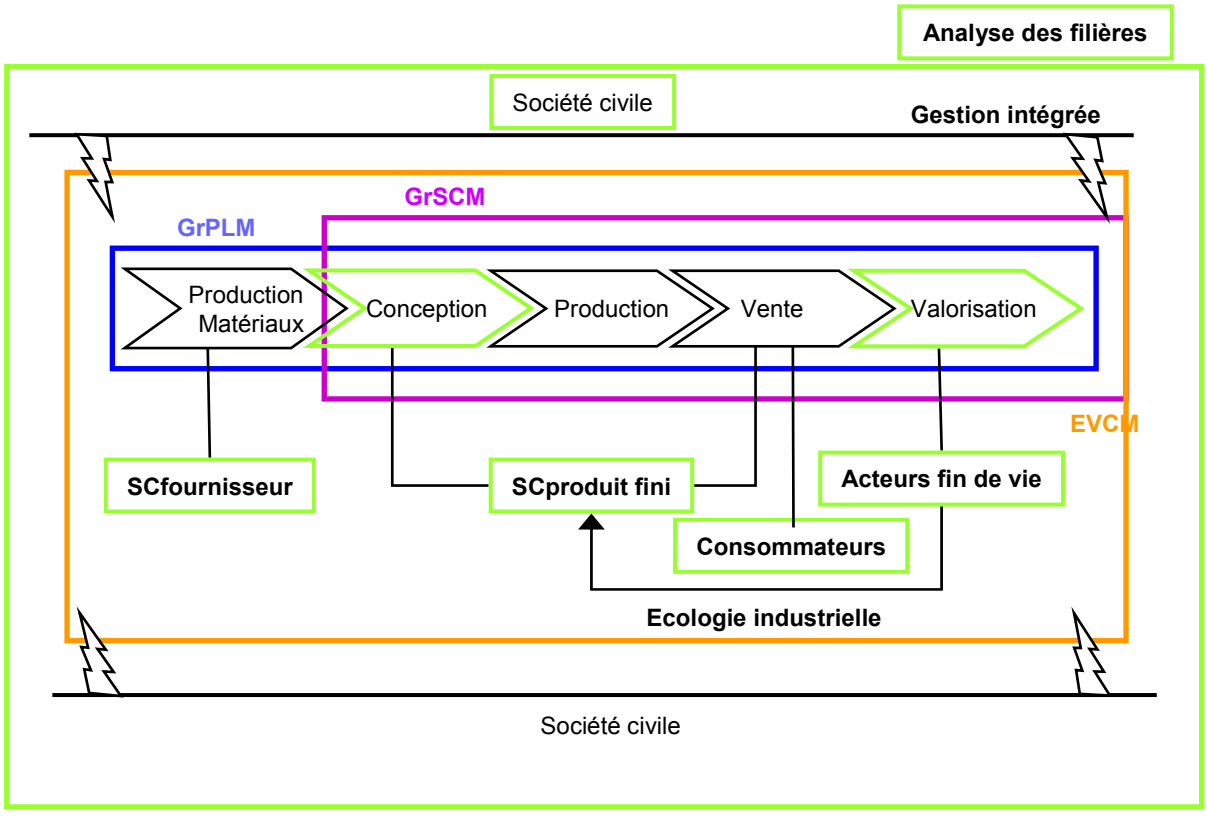


Figure 43: L'analyse des filières, un domaine à l'intersection des domaines de recherche sur la gestion de l'environnement

[95] L'écologie industrielle s'intéresse aux systèmes industriels en tant qu'éco-systèmes particuliers (configuration de flux et de stock de matières, d'énergie et d'informations). En s'inspirant des connaissances sur les écosystèmes et la biosphère, elle a pour objectif de déterminer les transformations susceptibles de rendre les systèmes industriels compatibles avec le fonctionnement des écosystèmes naturels. C'est une approche de l'environnement qui dépasse le périmètre du produit seul ou de l'entreprise seule SEURING, S. *Industrial ecology, life cycles, supply chains: Differences and interrelations*. p. 306-319. Elle propose quatre axes de changement JACQUESON, L. *Intégration de l'environnement en entreprise: Proposition d'un outil de pilotage du processus de création de connaissances envionnementales*. p. 173 :valoriser les déchets comme ressource, boucler les cycles de matière et minimiser les émissions dissipatives, dématérialiser les produits et les activités économiques, décarboniser l'énergie.

Concept	Spécificité	Réseau d'acteurs	Limites du système	Limites temporelles
GrSCM	Besoin d'activités managériales entre les acteurs	Toutes les étapes de production impliquées pour répondre aux demandes du client	Flux de matières et d'information nécessaires pour répondre à la demande du client	Développement de la Supply Chain (de mois à années) Cycles de livraison (heures à semaines)
GrPLCM	Conception du produit comme la phase la plus importante pour la prise de décision	Toutes les étapes nécessaires à la conception et la production de produits et services	Flux de matières relatifs au cycle de vie du produit	Cycle de vie du produit (mois à années)
ELVCM	Intégration de la valeur environnementale des Supply Chain externes	Toutes les chaînes impliquées dans la conception, la production, la valorisation du produit	Flux d'informations et monétaires pour atteindre la valeur attendue par les différentes chaînes	Cycle de vie des chaînes (années à dizaines d'années)
Ecologie Industrielle	Approche géographique Application régionale	Toutes les entreprises impliquées dans la mise en place ce concept	Flux de matières à une échelle régionale	Cycle de vie des entreprises (années à dizaine d'années)
Gestion intégrée de produits	Intégration des parties prenantes	Entreprises directement impliquées et toutes les parties prenantes impactées par les flux de matière	Flux de matières au sein de leurs limites sociétales et légales	Systèmes légaux et sociétaux (dizaines d'années)

Tableau 17: Comparaison des différents concepts prenant en compte la valorisation des produits adaptée de (Seuring 2004)

L'analyse des filières implique donc la prise en compte :

- de toutes les parties prenantes (Gestion intégrée),
- des étapes de production liées à la fin de vie du produit de la Supply Chain d'origine pour répondre à la demande du client (GrSCM par le biais de la RL),
- de la valeur, environnementale ou non, attendue par les chaînes externes (dont les filières) à la Supply Chain d'origine (EVCM),
- de toutes les étapes liées à la conception et au traitement en fin de vie du produit (GrPCM),
- de limites géographiques régionales et de la matière fin de vie comme une ressource pour la Supply Chain d'origine (approche s'intégrant dans la notion d'écologie industrielle).

Ces considérations sont essentielles pour que les filières soient idoines aux attentes des parties prenantes.

En conclusion, l'analyse des filières de recyclage des MP implique :

- ***une analyse de la Supply Chain du produit fini étendue par l'intégration de la filière,***
- ***une prise en compte dans le cycle de vie du produit des caractéristiques du recyclage de MP issues de produits complexes,***
- ***une analyse de la valeur attendue par toutes les parties prenantes avec une implication de tous les acteurs constituants la filière.***

Réussir cette analyse nécessite donc un outil intégrant une approche globale afin de piloter l'organisation de la filière.

IV-2. Les outils d'analyse des filières identifiés dans la bibliographie

IV-2-1. Les critères de classification des outils

Pour déterminer l'efficacité des outils identifiés dans la littérature à modéliser les filières de recyclage des MP, il importe dans un premier temps de les caractériser en fonction d'un ensemble de critères comme par exemple des critères propres à la filière considérée, le type de méthodes de modélisation qu'ils mettent en œuvre… L'objectif de notre classification est d'identifier leurs lacunes.
Les premiers critères de classification sont les caractéristiques internes et externes d'une filière, telles qu'énoncées dans le paragraphe II-1-4.

A ces critères nous ajoutons les critères issus des propositions de De Brito (De Brito et al. 2003), Fleischmann (Fleischmann et al. 2000) Krikke (Krikke et al. 2001, Krikke et al. 2003), critères qu'ils utilisent pour comparer un ensemble d'outils de modélisation des filières. Ces critères sont :

- la structure de la filière et le contexte lié à la valorisation (Fleischmann et al. 2000)). Trois grands groupes de filières sont ainsi identifiés : les filières de bulk recycling[96], les filières de rénovation de produits assemblés[97], les filières de réutilisation.
- le type de modélisation (modèles économiques, analyse du cycle de vie), le type d'optimisation (orientées coûts, environnement, process…), le type de Supply Chain (prise en compte ou non de la Supply chain produit, retour du produit dans la chaîne d'origine ou non) (Krikke et al. 2001, Krikke et al. 2003).
- l'objectif de l'étude (analyse des étapes constitutives de la chaîne (collecte, recyclage), relations entre les différents acteurs de la RL, gestion des stocks, planification et contrôle des activités de valorisation, technologies de l'information dans la RL), les raisons de mise en place de la filière (De Brito et al. 2003).

Nous avons ajouté aux différents critères présentés le domaine de recherche (présenté ci-dessus) afin de positionner les outils par rapport à ces domaines illustrés sur la Figure 43.

[96] Elles sont caractérisées par un volume collecté de faible valeur, un besoin de grands volumes pour être rentable, une sensibilité aux incertitudes de gisements liées à leur disponibilité, une structure open-loop facilitant la coopération entre les acteurs de la valorisation, peu de diversité dans les modes de valorisation.
[97] Elles sont caractérisées par la réutilisation des produits ou pièces de valeurs élevées issus de produits d'assemblage complexe, une prise en charge fréquente par le producteur et une structure closed-loop.

IV-2-2. Bilan de la classification des outils

Pour effectuer ce bilan, nous avons étudié une vingtaine d'outils, axés sur l'analyse de produits complexes type VHU, des MP et sur l'EVCM, en fonction des critères présentés dans le Tableau 18. Notre analyse vient en complément des bilans réalisés par De Brito et al. (De Brito et al. 2003), Krikke et al. (Krikke et al. 2001) et Fleischmann et al. (Fleischmann et al. 2000) représentant plus de 80 outils axés essentiellement sur la RL. Les résultats obtenus en fonction des critères de classification présentés ci-dessus sont résumés sur la Figure 44 et sur le Tableau 19 (cf. Annexe 7).

Critères	Définition
Domaines d'analyse	GrSCM, ELVCM, RL, RPCM, RePCM…
Objectif de l'outil	aide à la décision, optimisation de systèmes existants, conception de nouveaux systèmes
Type d'outil/ de modélisation	Dynamique, statique, modèles économiques, ACV, MFA[98]…
Type de filière	Filières de recyclage, de réutilisation, circuit de valorisation…
Type de produit	Complexité, VHU, DEEE, matière, durée de vie…
Parties prises en compte	Acteurs, attentes, type de Supply chain, type de marché…
Type d'optimisation	Coûts, conception, environnement…
Paramètres pris en compte	Techniques (volume, rendement des procédés…), économiques (prix de vente, coût de production…), organisationnels (nombre d'installations, raisons de mise en place, mode de financement...), temporels…
Résultats de l'outil	Résultats théoriques, résultats réels, quantitatif, qualitatif…
Géographie	Pays, Réglementation

Tableau 18: Bilan des critères de classification des outils

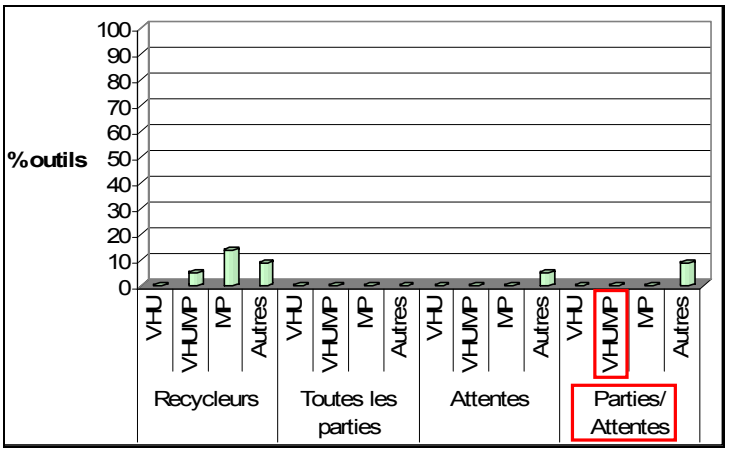


Figure 44: Bilan de notre classification des outils de la littérature en fonction du produit traité et du type d'acteurs pris en compte (critères les plus discriminants)

[98] Material Flow Analysis

De Brito et al. (De Brito et al. 2003) ont étudié une soixantaine d'outils de RL, répartis de 1986 à 2003 (critères d'étude cf. Tableau 18). 60% de ces outils sont orientés remanufacturing et 30% traitent du recyclage de matières (métaux, papier, MP, bois…). 50% concernent des produits métalliques, de matériel et outillage et peu de MP. La majorité sont des outils avec un périmètre européen. L'analyse montre également un manque d'informations sur la manière dont les valeurs de paramètres technico-économiques ont été attribuées, un manque de prise en compte de toutes les parties et l'absence d'intégration de leurs attentes hormis celles de l'initiateur, public ou privé, de l'outil.

Krikke et al. (Krikke et al. 2001) ont étudié une vingtaine d'outils de RL répartis entre 1969 et 1999 pour mettre en évidence le type d'optimisation prédominant (cf. Tableau 18). Ces outils ont pour principale vocation de minimiser les coûts en optimisant l'implantation et la répartition des acteurs sur un territoire. Peu d'entre eux font état d'un lien avec la conception du produit. Certains portent sur l'optimisation de paramètres environnementaux, critère représentant la principale originalité de ce bilan vis-à-vis de celui de De Brito et al. (De Brito et al. 2003). De même que précédemment, les attentes de chaque partie ne sont pas associées aux résultats des acteurs de la valorisation.
Le Blanc et al. (le Blanc et al. 2004) ont de leur côté analysé 16 outils de RL basés sur des modèles d'allocation pour une minimisation des coûts. Plus de 50% d'entre eux concernent des filières de bulk recycling (cf. IV-2-1).

Les outils développés sont donc principalement orientés vers la RL (cf. Tableau 19) et le remanufacturing mais peu vers le RePCM et encore moins sur les filières de recyclage de MP issues de produits complexes. Cette orientation s'explique notamment par l'implication des producteurs dans ces filières dans le but d'associer celles-ci aux filières de retour produits pour des raisons commerciales.

Le type d'outil choisi démontre le manque d'outils dynamiques nécessaires à la prise en compte des interactions entre toutes les parties et non des acteurs passifs vis-à-vis de leur environnement. L'approche de Van Schaik et al. (Van Schaik 2004, Van Schaik et al. 2004) illustre cette nécessité avec la prise en compte de l'impact de l'évolution technologique sur le traitement des MF/ et MNF issus de VHU. Ils ont mis en évidence l'influence de ces facteurs sur le calcul du taux de recyclage, paramètre de référence pour évaluer le respect ou non de la directive VHU (JOUE 2000).

La majorité des outils concernent des produits, ou composants, soumis à réglementation type DEEE, VHU et modélisent les premières étapes techniques de la filière telles que la collecte, le démontage et le broyage en se concentrant principalement sur les flux techniques et économiques. Nous avons identifié deux études qui traitent du cycle de vie complet des matériaux issus de PFV : une orientée MF/MNF (Van Schaik 2004, Van Schaik et al. 2004) centrée sur l'efficacité des procédés de traitement, l'autre orientée MP centrée sur les flux de matières (Mellor et al. 2002). Les dimensions structurelle et organisationnelle des réseaux d'acteurs ne sont pas modélisées. D'autre part, même si les outils s'intégrant au domaine EVCM prennent en considération les attentes des différentes parties, l'association de ces attentes aux objectifs technico-économiques des filières n'est pas étudiée.

Les objectifs des outils identifiés dans la bibliographie sont principalement de fournir une aide à la fois à l'optimisation de la logistique des filières, demande initiée par les producteurs (RL de DEEE) et à la conception de nouvelles filières. Très peu d'outils ont pour vocation d'améliorer les filières existantes hormis dans le cadre d'une extension de la Supply Chain pour de la réutilisation ou du

remanufacturing (cf. Tableau 19) et la plupart (hors VHU) se limitent à des données théoriques et non à des données provenant des systèmes en fonctionnement.

IV-2-3. Enoncé de la deuxième problématique

Les outils de la littérature ne conduisent pas une analyse efficiente des filières pour les raisons suivantes :

- Une non prise en compte de tous les acteurs de la valorisation (dernier détenteur au marché de la matière recyclée). De ce fait, le devenir, notamment, de la matière recyclée qui conditionne la dynamique économique de la filière n'est pas considéré. L'aide à la décision est la plupart du temps destinée aux producteurs,
- Une non prise en compte simultanée de la diversité des attentes des parties (cf. Figure 44), d'où une impossibilité d'utiliser ces outils en vue d'une optimisation globale ultérieure de la filière,
- La juxtaposition de deux catégories d'outils sans se compléter : des outils visant l'amélioration techniques des procédés ou flux et les outils d'amélioration organisationnelle (essentiellement optimisation logistique),
- De nombreuses études sur les premières étapes de la filière de traitement des VFV mais non des filières matière type filières de recyclage des MP issues de VFV,
- Peu d'outils intégrant les conséquences des filières sur la conception du produit et les impacts environnementaux de ces dernières.

Le bilan que nous venons de conduire sur les outils disponibles pour analyser et améliorer le fonctionnement des filières de recyclage nous permet d'écrire la problématique suivante:

Problématique 2 : aucun des outils analysés ne prend en considération, que ce soit de façon qualitative ou quantitative, toutes les caractéristiques internes et externes caractérisant une filière et jugées indispensables pour une analyse efficiente de ces dernières. Par ailleurs, cette analyse a montré la nécessité de nouvelles propositions permettant une représentation dynamique des filières complètes. Elle a également éclairé la nécessité de se reposer la question de la pertinence d'une approche produit des filières.

Ces conclusions nous amènent à émettre l'hypothèse suivante :

H2 : Une représentation dynamique et systémique des filières intégrant un ensemble précis de caractéristiques internes et externes à la filière est essentielle pour un outil d'analyse efficient de ces systèmes indispensable pour susciter l'énonciation de voies d'amélioration.

Critères / Références	Domaines d'analyse					Type de filières				Type de produit			Parties					
	RL	GrPCM	GrSCM	ELVCM	IE	Démontage Réutilisation	Broyage	Recyclage	Valorisation	VHU	DEEE	MP	Acteurs de la valorisation	Recycleurs	Producteurs	Société civile	Toutes	Attentes
(Robotis et al. 2005)	✓					✓					✓		✓		✓			✓
(Nagurney et al. 2005)	✓		✓					✓			✓		✓	✓	✓			
(Pochampally et al. 2004a) (Pochampally et al. 2004b)	✓		✓			✓		✓									✓	✓
(Ueda et al. 2003)		✓						✓					✓			✓		
(Rose et al. 2000)				✓				✓			✓						✓	✓
(Schultmann et al. 2006)	✓		✓					✓		✓		✓	✓					
(Ferrao et al. 2006a)		✓				✓	✓			✓			✓					
(Amaral et al. 2006)		✓				✓	✓			✓			✓					
(Amaral et al. 2002)					✓	✓	✓			✓			✓					
(Van Schaik 2004)		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			✓		
(le Blanc et al. 2004)	✓	✓				✓				✓		✓	✓		✓			
(Mellor et al. 2002)		✓			✓			✓	✓		✓	✓						
(ADEME 2003c)		✓				✓	✓			✓			✓					
(le Blanc et al. 2004) (16 outils)	✓							✓			✓		✓	✓				
	✓					✓					✓		✓					

Critères / Références	Domaines d'analyse					Type de filières				Type de produit			Parties					
	RL	GrPCM	GrSCM	ELVCM	IE	Démontage Réutilisation	Broyage	Recyclage	Valorisation	VHU	DEEE	MP	Acteurs de la valorisation	Recycleurs	Producteurs	Société civile	Toutes	Attentes
(Krikke et al. 2001) (20 outils)	✓					✓		✓			✓		✓		✓			
	✓					✓		✓										
	✓					✓		✓										
(De Brito et al. 2003) (60aine d'outils)	✓	✓				✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓			
	✓	✓				✓		✓			✓	✓	✓	✓		✓		
	✓	✓				✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓			
	✓	✓				✓		✓				✓	✓	✓	✓			

Tableau 19: Extrait de la classification des outils en fonction de différents critères (60% des outils sont issus de la RL)

Les deux premières parties nous ont permis de caractériser différents outils développés pour concevoir une filière adaptée à des objectifs donnés. Cette analyse a révélé que le développement des filières nécessitait notamment l'existence de débouchés à haute valeur ajoutée, cette existence induit un lien direct entre la filière et la conception de produit susceptible d'utiliser de la MPR. Après la mise en évidence des implications de la filière vers l'industrie utilisatrice de MPR, nous allons étudié le comportement de cette industrie envers ces filières au travers de la conception. Dans ce cadre les équipementiers plasturgistes de l'industrie automobile cherchent à déployer l'utilisation de ce type de matériau dans des pièces de structure pour des raisons tant économiques que stratégiques mais sont confrontés à un ensemble de freins limitant leur utilisation. L'utilisation de MPR s'intègre dans une plus large mesure dans la thématique des outils de conception pour la fin de vie où plus précisément de conception pour le recyclage (CpR). Ainsi dans cette partie, nous allons présenté dans un premier temps le positionnement des MPR dans les outils de CpX (Mathieux 2002), puis les limites à l'utilisation des MPR tant au niveau de la conception que de l'organisation de l'industrie automobile. Enfin, nous montrerons que l'intégration réussie de MPR en tant que composante à part entière de l'éco-conception ou de la conception pour la fin de vie (CpFV), induit un ensemble de changements organisationnels

V- *L'utilisation de MPR : une composante non définie des outils de Conception pour la fin de vie*

V-1. Les outils de conception pour X (CpX)

Au cours de ces dernières années, des nombreux outils d'aide à la conception pour la fin de vie (CpFV) ont été développés au même titre que les réglementations sur le sujet et la prise de conscience des impacts environnementaux au sein des entreprises. La forme de ces outils ainsi que le degré de prise en compte de la fin de vie se sont modifiés au cours des années laissant une plus grande place aux enjeux liés aux interactions entre conception et acteurs sur le terrain, notamment dans l'industrie automobile (cf. Figure 45).

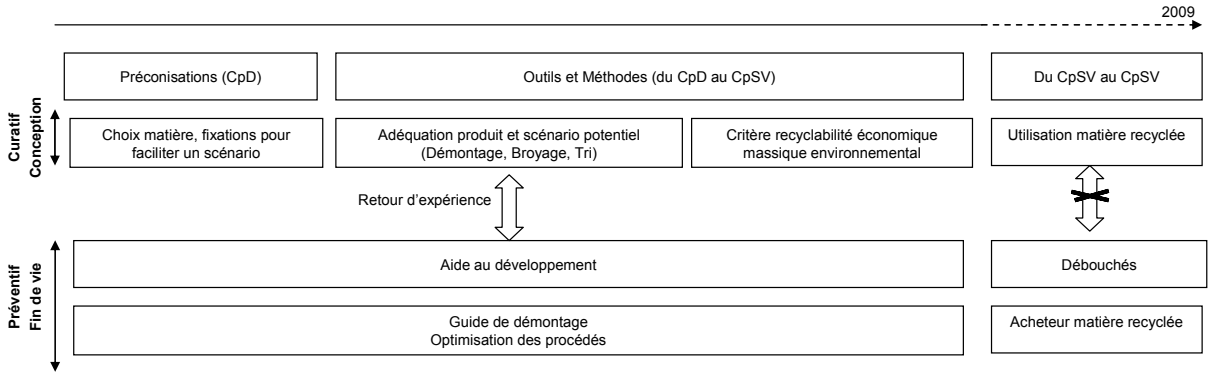


Figure 45: Bilan de l'évolution des approches de CpFV dans l'industrie automobile (Mathieux 2002, François 2003, Coppens 1999, Villalba et al. 2004, Tonnelier 2002, Ferrao et al. 2006b, Renard 2001)

Mathieux (Mathieux 2002) regroupe tous les types d'outils de CpX sous la terminologie « éco-conception pour la valorisation » (ECOV), terme regroupant toutes les approches ayant pour objectif l'intégration de la valorisation en fin de vie du produit dès sa conception.

Mathieux (Mathieux 2002) a défini plusieurs axes de classification pour ces approches (cf. Tableau 20):

- Le type d'outils,
- Les aspects du produit considérés,
- les caractéristiques du système de valorisation[99] considérées,
- l'aptitude à intégrer le caractère incertain des systèmes de valorisation,
- les critères de recyclabilité (cf. Annexe 8),
- l'aptitude à être utilisée au cours du processus de conception.

A ces critères, nous associons ceux liés directement à l'intégration de la matière recyclée afin d'étudier sa prise en compte dans les outils existants (cf. Tableau 20):

- le critère filières (CpFiVa)
- l'aptitude à intégrer la matière recyclée dans des applications de haute qualité (CpMR)

La classification des outils de (Mathieux 2002) (cf. Figure 46) ainsi que l'analyse des travaux sur de nouveaux outils de conception pour la fin de vie (Villalba et al. 2004, Ferrao et al. 2006b, Haoues 2006, LopezOntiveros 2004) montrent qu'ils sont principalement axés sur une étape du processus de valorisation et peu d'entre eux adoptent une approche systémique. Dans notre cas, seuls les outils intégrant une vision systémique des filières sont pertinents pour une intégration réussie des filières et notamment les outils adaptés à la problématique automobile (cf. Figure 46).

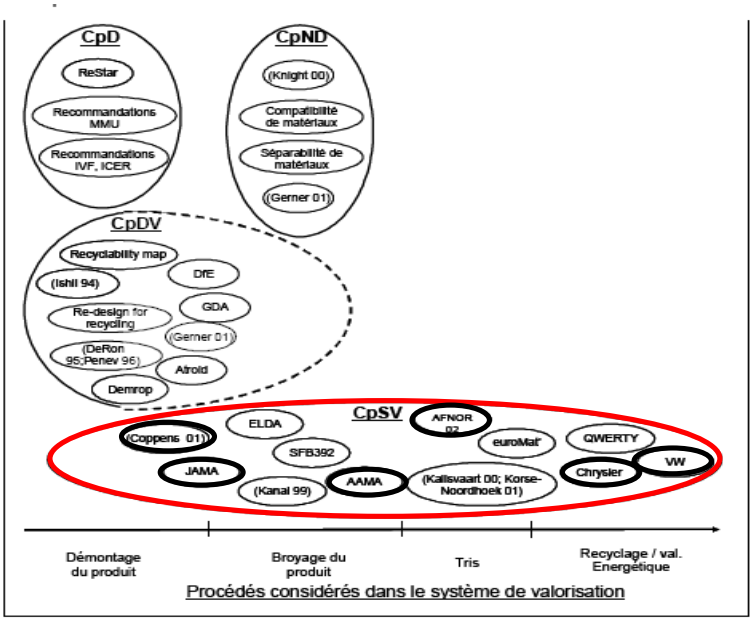


Figure 46: Classification des outils et méthodes de CpFV en fonction du procédé pris en compte (Mathieux 2002) : ⬭ outils de l'industrie automobile.

[99] Mathieux MATHIEUX, F. *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit- une méhode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception.* p. 1-286 définit un système de valorisation comme un ensemble des scénarii de valorisation applicables à un produit en fin de vie

L'analyse des outils de CpSV réalisée par Mathieux (Mathieux 2002) révèle notamment les lacunes méthodologiques suivantes en fonction des critères de classification qu'il a défini (cf. Tableau 20):

- la prédominance des indicateurs de recyclabilité massique et économique, peu de considération multicritère associant l'indicateur environnemental aux deux premiers,
- le peu d'évaluation quantitative de la recyclabilité,
- la faible articulation entre méthodes et processus de conception.

Pour combler ces lacunes méthodologiques, Mathieux (Mathieux et al. 2008) a développé un outil ReSICLED[100] qui :

- permet une évaluation quantitative de l'aptitude d'un produit à être valorisé selon un ensemble de critères pertinents,
- est basé sur la modélisation de l'ensemble des activités de valorisation des produits et matière en fin de vie,
- intègre les incertitudes temporelles et géographiques liées au choix de différentes voies de valorisation,
- est utilisable par les équipes de conception pour une aide à la décision.

Cet outil repose sur (Mathieux et al. 2008):

- un modèle produit : définition de l'architecture produit, des matériaux et des fixations entre pièces,
- un indicateur de recyclabilité comprenant un critère massique, économique et environnemental,
- un modèle multi-process des scénarios de valorisation[101] : agrégation de procédés élémentaires.

Cet outil présente l'intérêt de prendre en compte tous les flux élémentaires des étapes du démontage à la valorisation du produit et d'explorer tous les scénarios de valorisation possibles dans le but définir le plus adapté au produit.

Cependant, même si cet outil ainsi que les autres outils de CpSV ont une approche systémique des scénarios de valorisation, ils ne prennent pas en considération le devenir des matières recyclées dans le cas d'une orientation du produit vers le recyclage. Ainsi les concepteurs ne se positionnent pas comme utilisateur potentiel de matière recyclée et d'autant moins que cela concerne des pièces de haute qualité. La conception est définie pour un recyclage en cascade et non en boucle fermée. L'utilisation de matière recyclée se borne en général à une préconisation dans les guides ou outils (Maudet et al. 2006) à disposition des concepteurs dans le but d'améliorer l'indicateur de recyclabilité et l'impact environnemental du produit. Hors l'utilisation de MPR dans des pièces de haute qualité est une problématique de conception à part entière puisqu'au même titre que l'utilisation d'une nouvelle matière vierge elle nécessite des changements dans les pratiques de conception.

[100] Recovery systems modelling and Indicator Calculation Leading to End-of-life-conscious Design

[101] Mathieux MATHIEUX. *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit-une méhode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception.*, p. 1-286 définit un scénario de valorisation comme une association structurée de procédés menant à la valorisation d'un produit en fin de vie.

D'autre part ces outils mesurent des indicateurs de recyclabilité, synonyme d'efficacité théorique des filières et non d'efficacité réelle- réponse directe à la situation actuelle représentée par la notion de recyclé.

Ces outils permettent donc de concevoir un produit en adéquation avec les spécifications en entrée d'une filière mais pas en adéquation avec les spécifications en sortie de celle-ci.

Axes de classification	Définition
Type d'outils	Guide, méthode, logiciel, norme…
Caractéristiques du système de valorisation	CpD : méthodes de conception pour le désassemblage[102] CpDV : méthodes de conception pour le désassemblage en vue de la valorisation[103] CpND : méthodes de conception pour le non désassemblage[104] CpSV : méthodes de conception considérant le système de valorisation comme une combinaison de procédés de démontage, de broyage, de tri, de recyclage.[105] Elles combinent les méthodes CpD, CpDV, CpND.
Aspects du produit	Composant, matériaux, architecture
Aptitude à intégrer le caractère incertain	Existence d'une approche prospective sur le système de valorisation
Critères de recyclabilité	Critère massique, économique, législatif (respect des taux de recyclage et valorisation), environnemental Temps de démontage, nombre de filières en aval
Utilisation en conception	Eco-conception, planification de désassemblage, définition d'une stratégie produit ou d'entreprise
Critères filières	Critère organisationnel, intégration des recycleurs, conception pour l'intégration des filières de valorisation dans la Supply Chain (CpFiVa)
Intégration de la matière recyclée	Critère de conception, prise en compte du recycleur comme fournisseur potentiel, conception pour l'intégration de la Matière recyclée (CpMR)

Tableau 20: Axes de classification des méthodes de CpFV adaptés de Mathieux (Mathieux 2002)

[102] Faciliter l'identification des éléments à démonter, à améliorer leur accessibilité, à faciliter leur séparation…
[103] Le démontage n'est plus l'unique étape de valorisation mais la première précédant des étapes de réutilisation ou de recyclage. L'étape de démontage est alors adaptée en fonction de l'étape suivante. A ces méthodes sont associées toutes celles pour le remanufacturing.
[104] Ces méthodes concernent tous les travaux pour le déploiement du broyage de produit et le tri de matières suivant le broyage. La conception est alors optimisée pour un broyage et non pour un démontage manuel. Les méthodes de choix de matériaux compatibles ou au contraire facilement séparables pour favoriser le tri sont une des possibilités de CpND.
[105] L'étape finale de recyclage est fonction des résultats technico-économiques des étapes précédentes. Ces méthodes ont une vision systémique et associent à chaque composant d'un produit une voie de valorisation. Elles regroupent notamment les méthodes de conception pour le recyclage- CpR.

De même, la dimension organisationnelle des filières – soit le fait qu'une filière est une succession d'entreprises- n'est pas intégrée. La vision systémique propre aux outils de CpSV se limite à une succession de procédés donc à une vision technico-économique. L'impact de la conception sur le coût de traitement concerne l'économie des procédés et non la viabilité au niveau des acteurs et de leur évolution structurelle dans le temps. Cette vision ne peut donc inclure l'intégration des entreprises de recyclage comme fournisseur potentiel, situation directement liée à la non intégration de la MPR. Cet état de fait freine l'intégration des filières dans la Supply Chain du produit fini.

La question se pose de comprendre pourquoi l'utilisation de MPR dans l'industrie automobile n'est pas prise compte comme un critère de conception pour la fin de vie du produit (CpFV). L'intégration de MPR en conception de produits à haute valeur ajoutée représente pourtant un facteur clé pour atteindre une CpFV complète et réussie.

V-2. Intégration de MPR en conception de produits automobiles

Les MPR sont peu ou pas utilisées dans des applications à haute valeur ajoutée de l'industrie automobile. Pour répondre à la volonté des équipementiers d'augmenter leur utilisation et à terme la pérenniser, il est nécessaire d'identifier et de comprendre les limites à leur utilisation.

Les limites à l'utilisation de ces matières dans les pratiques de conception sont de trois natures (Maudet et al. 2006) :

- les limites techniques liées directement aux propriétés des MPR,
- les limites industrielles liées directement au statut des filières de recyclage,
- les limites humaines liées aux modes d'utilisation de la MPR dans le processus de conception.

Les limites humaines concernent principalement les modes de fonctionnement des équipes projet lors du processus de conception d'un équipementier automobile. Tout d'abord, les MPR ne sont pas considérées au même titre que les MPV dans le processus de conception. Ainsi elles ne sont pas intégrées dès les premières phases du processus comme pour toute autre matière (cf. Figure 47). Les moules de fabrication des pièces sont donc conçus pour les MP vierges. Des différences de propriétés entre une MP vierge et sa MPR peuvent induire des erreurs de calcul au cours des simulations de fabrication des pièces et par conséquent des erreurs en production. Les MPR sont en effet utilisées directement sur les sites de production notamment pour des questions de réduction de coûts. Cette utilisation, compte-tenu que les outils de production sont conçus pour les MP vierges, conduit à des difficultés comme des retraits matières importants. Dans certains cas, des arrêts de production sont provoqués par des ruptures d'approvisionnement des recycleurs.

Ensuite, même si il apparaît que les concepteurs seraient plus enclins à utiliser des MPR (Chick et al. 2004), ils conservent un manque de confiance dans leurs caractéristiques matières[106] mais également dans leur marché soit par conséquent un manque de confiance vis-à-vis des recycleurs. L'enquête menée par Chick et al. (Chick et al. 2004) auprès de concepteurs a montré que les principaux obstacles à l'utilisation de matière recyclée sont le manque d'informations, la non connaissance de ces matière, le manque de garantie sur la qualité et l'approvisionnement. Cette situation explique que

[106] Article du journal de l'environnement : « Les matières recyclées ont mauvaise presse : entretien avec Frédéric Viot Responsable de l'éco-conception et du recyclage chez PO » du 17 Février 2006.

les MPR soient facilement utilisées pour des applications de basse qualité où des fluctuations matière ne comporteraient que peu de risques pour les propriétés de la pièce finale contrairement aux pièces de haute qualité type pièces de structure où le risque est trop important. Pour des pièces type passage de roue, les équipementiers ont créés des standards en matière recyclée, leur cahier des charges variant peu d'un constructeur à l'autre et ne nécessitant pas de nouveaux développements d'un projet à l'autre.

Enfin, les pièces utilisant des MPR sont faites uniquement en 100% MPR et non avec un mélange de MPV et de MPR appelé compound recyclé. Il a été montré qu'à hauteur de 20% de MPR dans le compound, il n'y avait pas de perte de propriétés vis-à-vis de la matière vierge (Duval 2004). L'utilisation d'un compound pourrait faciliter l'intégration de MPR mais dans l'industrie automobile, cette pratique est peu acceptée. Même si certains constructeurs ont démontré sa faisabilité dans des pièces de structure (Winslow 2002), son utilisation n'a pas été pérennisée.

Les limites techniques sont toutes celles induites en production par les caractéristiques matière non maîtrisées. Elles sont directement liées aux limites humaines.

Les limites industrielles concernent l'inadéquation entre les exigences automobiles concernant les pièces à haute valeur ajoutée et le potentiel actuel des filières de recyclage. Tout d'abord, les acheteurs choisissent leurs fournisseurs en fonction de critères précis identiques pour les recycleurs et les fournisseurs de matière vierge. Ce sont (Maudet et al. 2006) :

- un critère économique : le fournisseur doit respecter le prix matière fixé sur toute la durée du projet.
- Un critère de localisation : les coûts logistiques doivent être les plus faibles.
- Un critère de capacité : le fournisseur doit avoir le potentiel pour fournir l'ensemble du volume de matière sur toute la durée du projet.
- Un critère environnemental : la certification ISO 14001 représente un avantage non négligeable.
- Un critère qualité : le fournisseur doit être certifié ISO 9001.
- Un critère de solvabilité : le fournisseur doit être solvable.

Un contrat avec le fournisseur est signé pour la durée globale du projet automobile (3-4 ans) et stipule des volumes, qualité et prix. Pour le moment, les recycleurs ne sont engagés que pour une durée de un an car ils ne disposent pas des ressources suffisantes pour répondre aux exigences sur toute la durée du projet. D'autre part, face aux fournisseurs de matière vierge, les recycleurs spécialisés dans des références automobiles présentent des difficultés pour atteindre tous ces critères notamment en termes de solvabilité économique et de continuité dans l'approvisionnement. L'inadéquation entre le marché automobile et les recycleurs s'expliquent notamment par leurs caractéristiques structurelles, exposées dans la partie 1 de ce chapitre, à l'origine d'une inadéquation technique (manque de compétences en MP), économique (coûts de production élevés) et organisationnelle (manque de traçabilité Matière, déséquilibre entre la taille de la Supply Chain automobile et celle des filières de recyclage). Les équipementiers ont un rôle clé à jouer dans l'intégration des recycleurs.

Toutes ces limites induisent un ensemble de risques, de niveau trop élevé pour qu'un équipementier s'engage dans une démarche d'intégration des MPR dans des pièces de structure sans changements

des pratiques actuelles. Ils ont besoin notamment de moyens pour pallier à ces différentes limites notamment sur un apport de connaissances sur les caractéristiques matières et sur les filières de recyclage.

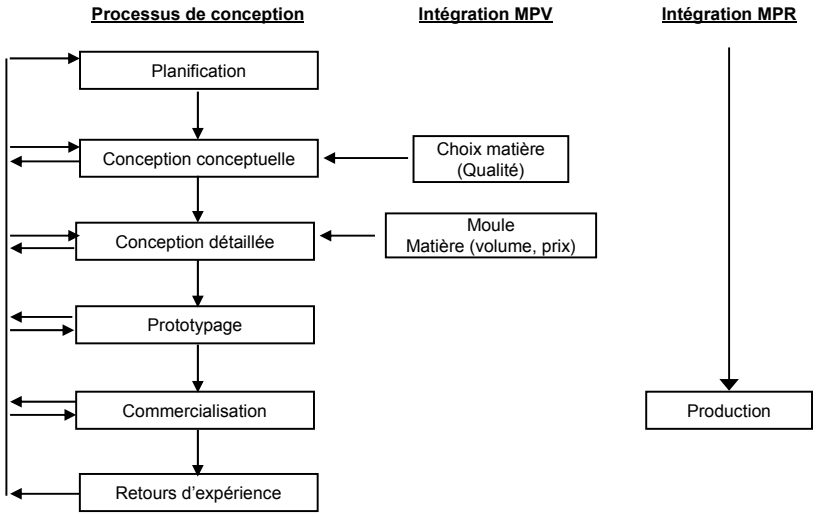


Figure 47: Intégration des MP vierges et MPR dans le processus de conception d'un équipementier automobile

Intégrer les MPR dans la conception de pièces à haute valeur ajoutée est essentiel tant pour le développement des filières que pour compléter la démarche de CpFV (cf. Figure 48).

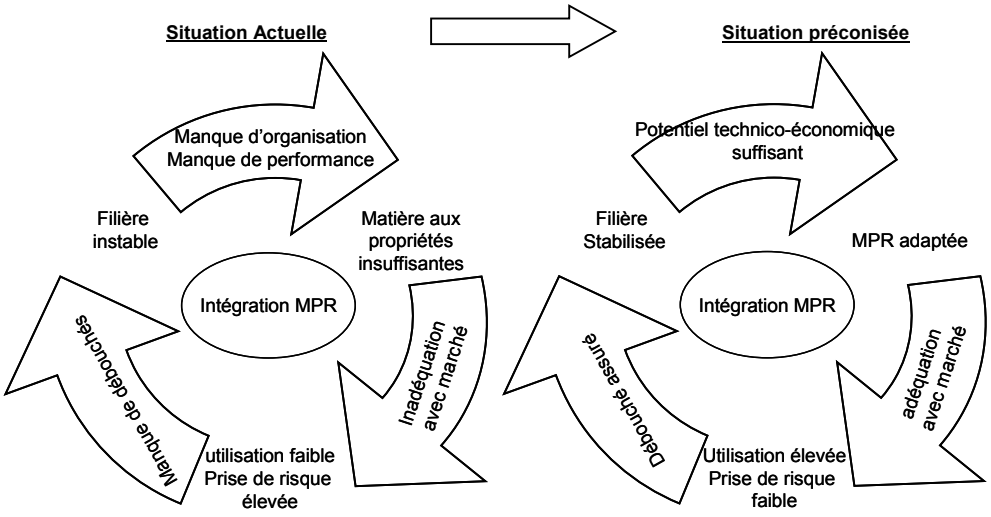


Figure 48: Evolution préconisée pour l'utilisation de MPR dans l'industrie automobile

VI- Changement organisationnel et acquisition de connaissances

Une intégration réussie des MP dans un processus de CpFV suppose une évolution des pratiques actuelles.

Le Pochat (Le Pochat 2005) a démontré qu'une intégration réussie de l'éco-conception au sein de l'entreprise requiert un changement organisationnel à tous les niveaux de l'entreprise, changement soumis à des risques d'échec. Les modifications nécessaires à ce changement sont obtenues au travers d'un processus global d'apprentissage basé sur l'acquisition de connaissances et compétences environnementales.

L'intégration des MPR étant une composante à part entière de la stratégie d'éco-conception d'une entreprise, nous partons du principe qu'elle induit également des changements organisationnels au sein du processus de conception et des équipes projet afin de répondre aux facteurs actuels limitant leur utilisation.

Dans cette partie, nous allons identifier les changements inhérents à l'intégration des MPR puis les connaissances et compétences directement liées à ces changements.

VI-1. Intégration de la MPR : un changement organisationnel

VI-1-1. La notion d'intégration de la MPR

Comme pour l'intégration d'une composante comme l'éco-conception, l'utilisation de MPR signifie un changement d'état de l'organisation passant d'un état X à un état Y (Le Pochat 2005). A partir de différents types d'intégration proposé par Millet (Millet 2008) dans le cadre de l'analyse de l'intégration informationnelle dans les organisations industrielles, Le Pochat (Le Pochat 2005) considère que l'intégration de l'éco-conception dans une organisation comme l'entreprise est de type fonctionnel c'est-à-dire que cette intégration consiste à relier « *deux ou plusieurs parties en partageant des ressources communes informationnelles ou matérielles. Chaque élément garde son autonomie et l'intégration harmonise la collaboration ou l'enchaînement des tâches entre les différentes parties dans le but d'atteindre des objectifs communs.* » (Millet 2008).

Millet (Millet 2008) ajoute que «*l'intégration est l'effort d'une organisation pour des relations interindividuelles, inter-fonctionnelles et inter-entreprises plus étroites. Elle se fonde sur une coordination plus étroite des tâches, sur la coopération et sur le partage des informations et des prises de décisions. La gestion de cette interdépendance organisationnelle au niveau intra ou inter entreprise devient ainsi une intégration « informationnelle ».* »

Ceci nous permet de conclure que l'intégration de l'utilisation de MPR dans les pratiques de conception d'une entreprise est un changement tant au niveau de l'organisation en elle-même que des flux d'informations et relations entre les différentes personnes impliquées par ce changement.

Ce changement organisationnel est soumis à des risques d'échec (Le Pochat 2005) notamment caractérisés par une forte résistance au changement tant au niveau des modifications des pratiques que sur l'ensemble des éléments concernant les MPR. Répondre à ces risques pour mener à bien ce changement nécessite un ensemble d'informations inhérentes aux MPR.

VI-1-2. Les flux d'informations concernés par cette intégration

Le Tableau 21 recense les différents types d'informations que les acteurs doivent acquérir en fonction du métier et du processus concerné.

Les informations liées aux MPR sont de deux natures distinctes et interdépendantes (cf. Figure 49) :

- les informations inhérentes à la nature même du matériau : caractéristiques mécaniques, prix, volume…
- les informations inhérentes aux filières productrices de ce matériau : capacité, solvabilité…

D'autre part, ces flux d'informations concernent les différents métiers (conception, qualité, matière…) et processus (conception, projet…) impliqués dans le développement d'un projet véhicule au sein d'un équipementier (cf. Figure 50). Les projets automobiles sont réalisés par les différents équipementiers selon une configuration relativement similaire. Les constructeurs font des appels à projet pour les différentes pièces de leur nouveau véhicule (Midler 2004). Chaque équipementier est à même de proposer sa propre solution. Les principales caractéristiques sont spécifiées par le constructeur (référence matière, liste de fournisseurs matière, cahier des charges fonctionnel…). Une fois la proposition de l'équipementier retenue, le projet et la conception des pièces commencent (Midler 2004). Les étapes de la conception du produit sont celles d'un procédé classique (cf. Figure 47). Quand tous les choix de conception sont établis (choix matière, calculs structuraux…), l'étape de fabrication d'un prototype assure la validation de la correspondance entre les propriétés pièce et les spécifications du projet. Les résultats sont ensuite validés par le constructeur, la production série des pièces est lancée.

Chaque projet est mené par une équipe projet incluant une grande variété d'acteurs (cf. Figure 50). Au cœur de cette équipe est défini le cercle premier du projet constitué d'un ensemble de responsables, chacun représentatif d'un métier lié à la conception du produit (usine, peinture achats…) (Midler 2004). A côté de ces métiers, le projet fat appel à un autre ensemble de métiers transversal à tous les projets (expert matière, concepteurs, acheteurs peinture…). Ces métiers transversaux représentent le second cercle. Ils conduisent toutes les analyses nécessaires à la validation des spécifications pièce.

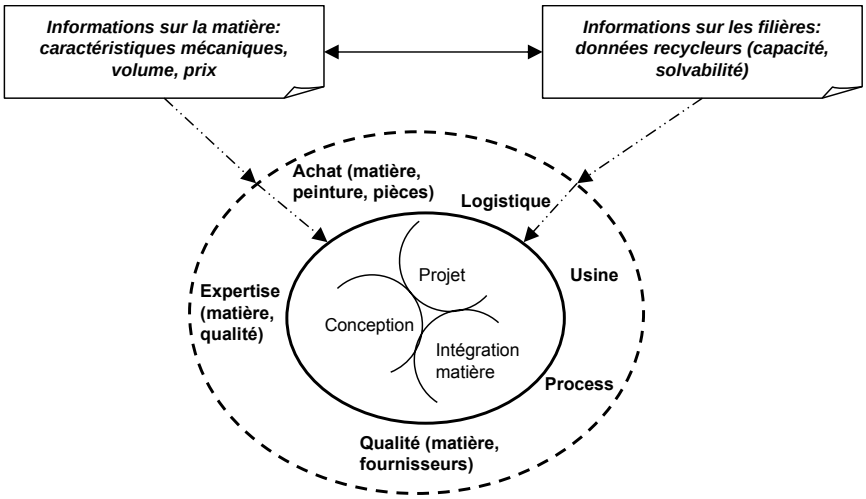


Figure 49: Les différents niveaux (métier, processus) des flux d'informations et nature de ces flux pour l'intégration de la MPR en conception Flux de connaissances formelles et informelles, Cercle processus, Cercle métier.

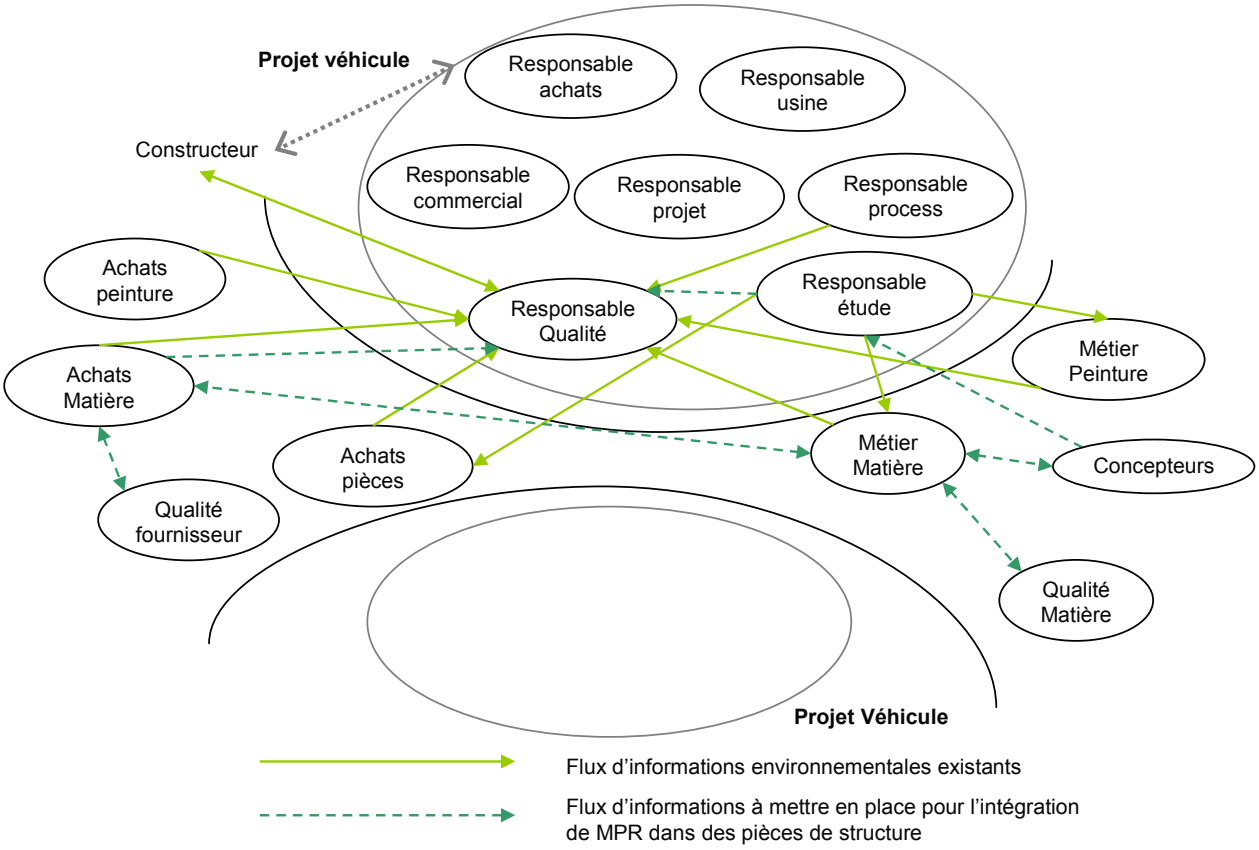


Figure 50: Flux d'informations environnementales entre les différents métiers impliqués dans un projet automobile.

Pour respecter les différentes réglementations environnementales et mettre en place leur stratégie d'éco-conception, les équipementiers ont mis en place un certain nombre de flux d'informations environnementales pour mener à bien leur projet. Ces informations sont (cf. Tableau 21) :

- des contraintes environnementales établies dans le cahier des charges : contraintes notamment liées aux réglementations environnementales,
- un reporting des substances réglementées, interdites,

- des préconisations environnementales : matériaux recyclables,
- des préconisations fin de vie : démontabilité, recyclabilité, …

L'intégration de ces données environnementales ont conduit les constructeurs et équipementiers à modifier l'organisation du projet mais également leurs relations. La relation client-fournisseur peut favoriser le développement de la prise en compte de l'environnement en conception. Le constructeur peut contraindre l'équipementier à réaliser des changements dans ces processus au travers du cahier des charges. De même, l'équipementier peut-être également force de proposition et obtenir un avantage concurrentiel au travers d'améliorations environnementales. La Figure 50 met en évidence que le responsable qualité est au centre de l'intégration de l'information environnementale. Le responsable projet lui transmet toute l'information compilée au cours du projet et le responsable qualité centralise cette information et communique directement les informations, d'éventuels changements au client.

Informations	Par qui ?	Vers qui ?	Où trouver les informations ?
Contraintes environnementales	Constructeur	Responsable Etude	Cahier des charges constructeur
	Responsable Etude	Métier Matière Métier Peinture Achats pièce	Spécifications conception
Reporting substances	Achats pièce Achats matière Achats peinture	Responsable Qualité	Base de données substances Réglementation
Préconisations environnementales	Métier Matière Métier peinture	Responsable Qualité	Fournisseurs Acteurs filières
Préconisations fin de vie	Responsable process	Responsable Qualité	Acteurs filières Expert
	Responsable étude	Responsable qualité	Acteurs filière Expert Matière Expert Environnement

Tableau 21: Types d'informations environnementales transitant entre les différents métiers adaptés de (Jacqueson 2002) et (Maudet et al. 2006)

Les informations concernant l'utilisation de MPR doivent s'intégrer directement à ces flux. La Figure 50 propose une illustration des flux liés aux MPR au sein des métiers impliqués dans les projets. Cette proposition découle des flux lié au MP vierges. Dans ce cadre l'expert Matière joue un rôle clé. Le lecteur pourra noter l'intervention d'acteurs comme les experts qualité fournisseur (directement lié au recycleurs) et les experts qualité matière.

L'analyse des informations nécessaires à l'intégration des MPR suppose que les acteurs doivent disposer d'une quantité minimale de connaissances et compétences liées à ces matières. Ces

connaissances et compétences vont devoir être créées pour une intégration efficiente dans les stratégies de CpFV. Tout comme Jacqueson (Jacqueson 2002) qui affirme que les connaissances environnementales sont le vecteur de l'intégration de l'éco-conception, les connaissances liées aux MPR et filières associées sont le vecteur d'intégration de l'utilisation de ces matières dans des pièces de structure. Les différents métiers impliqués vont donc devoir acquérir et capitaliser les connaissances. Les changements pour l'intégration vont donc se concentrer sur cette acquisition.

L'intégration de ces flux nécessite donc des changements dans les relations intra-entreprises mais également inter-entreprises (relation avec les clients et les fournisseurs de matière) mais également aux différents niveaux de l'organisation industrielle décrite par Livian (Livian 2001). A partir de l'analyse réalisée par (Le Pochat 2005) sur les modifications apportées par l'éco-conception sur les 4 composantes de l'organisation et l'étude des flux d'informations liés aux MPR, nous concluons que l'intégration des MPR va modifier les mêmes composantes que celles de l'éco-conception mais à un niveau de profondeur moindre (cf. Tableau 22).

L'intégration d'une nouvelle dimension environnementale se heurte notamment aux difficultés liées à l'utilisation de nouveaux outils, et de nouvelles méthodes. L'intégration de MPR et l'évolution vers la situation décrite sur la Figure 48 nécessitent la capitalisation de nouvelles connaissances tout en s'associant aux outils d'éco-conception déjà développés par l'entreprise afin de minimiser la résistance au changement inhérente à toute modification dans les pratiques communes de l'entreprise.

VI-2. Création et capitalisation de connaissances

L'accomplissement des changements demandés par l'intégration de MPR requiert :

- La création de connaissances,
- Leur diffusion entre les différents métiers,
- Leur capitalisation.

Cette partie a pour but d'identifier les moyens (outils ou actions) pour réaliser ces différentes étapes à l'aide d'élément du domaine de la gestion des connaissances et de positionner l'utilisation actuelle de MPR au sein de ces étapes pour mieux identifier les actions à réaliser.

VI-2-1. Processus de création

Les connaissances et les informations sont étroitement liées. Citant Gardoni[107], Minel (Minel 2003) écrit que « *les connaissances sont matérialisées par les informations traitées. Elles peuvent être considérées comme un raffinage des informations* ». Selon (Grundstein 1998, Nonaka et al. 1997), il existe deux grandes catégories de connaissances (cf. Figure 51).

- **les connaissances explicites ou savoirs**: elles correspondent aux savoirs formalisés. Elles peuvent être exprimées dans le cadre d'une représentation commune (livres, plans, bases de données…). Elles sont transmissibles. **La gestion des connaissances dans le cadre des MPR va essentiellement concernées ce type de connaissances**.

[107] Gardoni M., Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation du savoir et du savoir-faire en ingénierie intégrée – Cas d'études Aérospatiale Matra, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz, 1999.

- Les connaissances tacites ou savoir-faire: elles correspondent aux savoirs qui ne peuvent être explicités (savoir-faire, intuitions). Elles sont difficilement transmissibles.

Eléments modifiés par l'intégration de MPR	Composantes de l'organisation affectées		Exemples
	Composantes Principales	Sous- composantes	
Flux d'informations	Système de gestion	Systèmes d'informations	Nouveaux flux liés aux MPR
	Structure	Circuits d'informations	Outils d'acquisition
Relations intra entreprise	Humaine	Compétences	Liées aux caractéristiques des MPR
	Système de gestion	Informations et communication	Diffusion sur les filières
	Structure	Circuits d'informations	Outils d'acquisition
Relations inter entreprise	Humaine	Compétences	Liées aux caractéristiques des MPR
	Système de gestion	Informations et communication	Diffusion sur les filières
	Structure	Circuits d'informations	Outils d'acquisition
	Physique	Equipements	Recycleurs
Processus de conception	Humaine	Compétences	Liées aux MPR et filières
	Système de gestion	Informations	Liées aux MPR et filières
	Structure	Répartition des tâches	Entre les métiers
Stratégie : **- CpFV**	Humaine	Motivation	Image de la MPR et des filières
	Système de gestion	Informations	Liées aux MPR et filières
	Structure	Répartition des tâches	Entre les métiers
Communication interne et externe	Humaine	Compétences	Liées aux MPR et filières
	Système de gestion	Système de communication	Capitalisation de l'information
	Structure	Circuits de communication	Outil de capitalisation
Connaissances et compétences	Humaine	Compétences	Liées aux MPR et filières
	Système de gestion	Informations	Liées aux MPR et filières
	Structure	Répartition des tâches	Entre les métiers

Tableau 22: Correspondance entre les éléments de l'entreprise modifiés par l'intégration de la MPR et les 4 composantes de l'organisation de Livian, adaptée de (Le Pochat 2005)

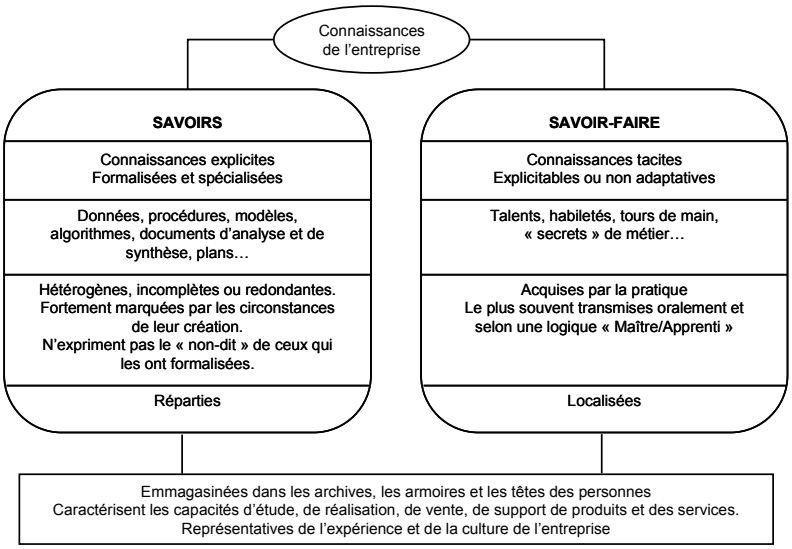


Figure 51: Les deux grandes catégories de connaissances de l'entreprise selon (Grundstein 1998)

Ces connaissances opèrent à deux niveaux en même temps:

- au niveau individuel c'est-à-dire au niveau d'un acteur de l'entreprise
- au niveau collectif c'est-à-dire au niveau de l'entreprise en elle-même.

Les connaissances sollicitées par l'utilisation des MPR concernent principalement des connaissances nouvelles à formaliser donc des connaissances explicites à formaliser au sein des différents métiers.

(Nonaka et al. 1997), dont les travaux sont reconnus mondialement pour leur apport dans le domaine de la gestion des connaissances, ont proposé un modèle de création de connaissances représentant la transformation des connaissances individuelles vers des connaissances collectives au travers des interactions entre connaissances tacites et explicites. Ce modèle comporte quatre étapes de conversion (cf. Figure 52):

- la socialisation : création des connaissances tacites collectives à partir de connaissances tacites individuelles,
- l'extériorisation : transformation des connaissances tacites collectives en connaissances explicites collectives,
- la combinaison : création de nouvelles connaissances explicites à partir de connaissances explicites,
- l'intériorisation : transformation des connaissances explicites en connaissance tacites.

La caractérisation détaillée de ces quatre modes réalisée par (Le Pochat 2005) est donnée dans l'Annexe 9.

Compte-tenu de la nature des connaissances qui nous intéressent, les deux phases de création prépondérantes pour la gestion des connaissances liées aux MPR sont la combinaison et l'intériorisation.

A partir des analyses de différents auteurs tels (Nonaka et al. 1997)et Lopez[108] propose une interprétation de l'évolution dynamique de la création des connaissances dans l'entreprise (cf. Figure 52), évolution centralisée sur le mode d'intériorisation qui permet le passage à un niveau de savoir plus élevé.

La communication entre les acteurs des différents métiers afin de permettre la diffusion des informations au sein des différents processus est un pré-requis à la création de connaissances pour intégration réussie de la MPR au sein de l'entreprise.

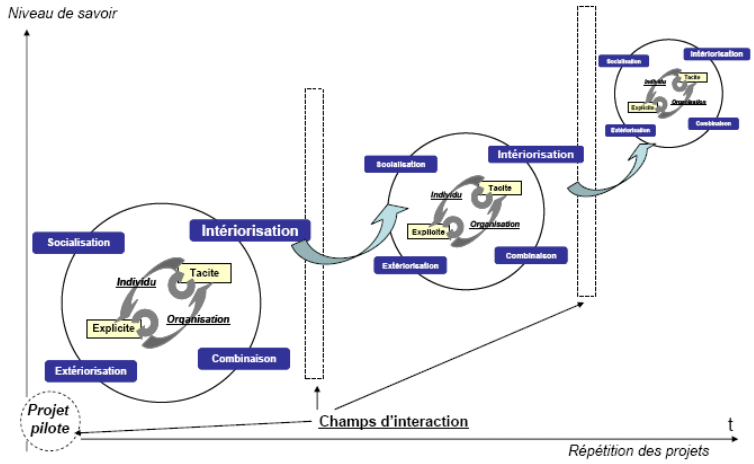


Figure 52: Evolution dynamique des connaissances (Le Pochat 2005)

VI-2-2. Processus de capitalisation

La création de connaissances explicites dans le cadre de l'intégration des MPR suppose de capitaliser ces connaissances à l'aide d'outils existants ou non dans l'entreprise. Ceci sous-entend de formaliser ces connaissances. L'objectif est de capitaliser ces connaissances dans les outils d'éco-conception existants afin que cette intégration devienne une pratique courante des équipes projets. La réussite de l'intégration de l'éco-conception repose sur un apprentissage organisationnel pour mener à bien les changements inhérents à cette intégration (Le Pochat 2005). Cependant la réussite de l'intégration des MPR considérée seule repose sur la capitalisation des connaissances au sein de métiers au cœur d'une stratégie plus globale s'appuyant sur un apprentissage organisationnel pour l'intégration des méthodes de CpFV.

Selon Grundstein (Grundstein 1998), « *Capitaliser sur les connaissances de l'entreprise, c'est considérer les connaissances utilisées et produites par l'entreprise comme un ensemble de richesses constituant un capital, et en tirer des intérêts contribuant à augmenter la valeur de ce capital* ». Cependant, capitaliser toutes les connaissances n'est pas envisageable. Seules celles qui sont jugées stratégiques pour l'atteinte des objectifs feront l'objet d'une capitalisation (Barthes 1997). Si des connaissances tacites associées au domaine d'activités choisies existent déjà, elles devront être associées à cette capitalisation –notamment les connaissances d'un expert.

[108] Lopez, R., Gardoni, M., Tollenaere, M. (2002). « Retour d'expérience sur la création de connaissances et la compétence collective – Approche appliquée au cas de l'entreprise PECHINEY à St Jean de Maurienne »

Le processus de capitalisation est composé de différentes étapes centrées sur les connaissances stratégiques (cf. Figure 53). Ce processus est caractérisé par la possibilité de travailler et stocker l'information pour une future interprétation et utilisation (Gardoni et al. 2005). Pour chacune des ces étapes est associé un ensemble de méthodes, d'outils, textes structurés ou partiellement structurés. En fonction des objectifs fixés, il faut définir à chaque étape du processus et en fonction du métier la forme des outils la plus adaptée pour l'intégration de MPR (outil informatique, base de données, documents…).

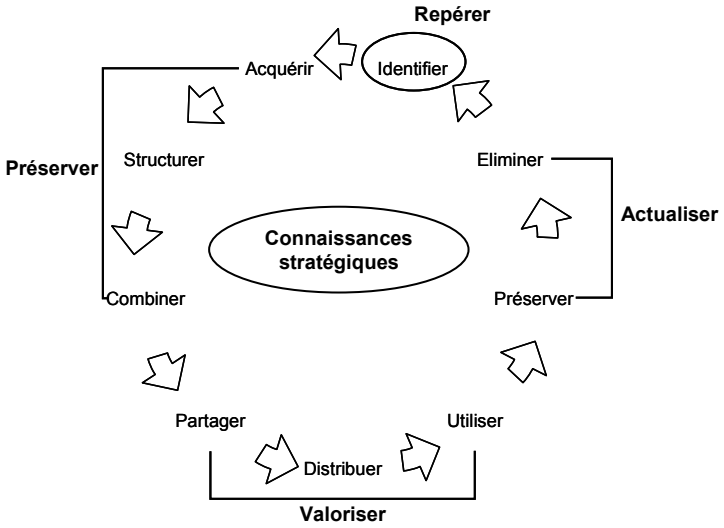


Figure 53: Processus de capitalisation des connaissances adapté de (Grundstein 1998, Gardoni et al. 2005).

VI-2-3. Enoncé de la troisième problématique

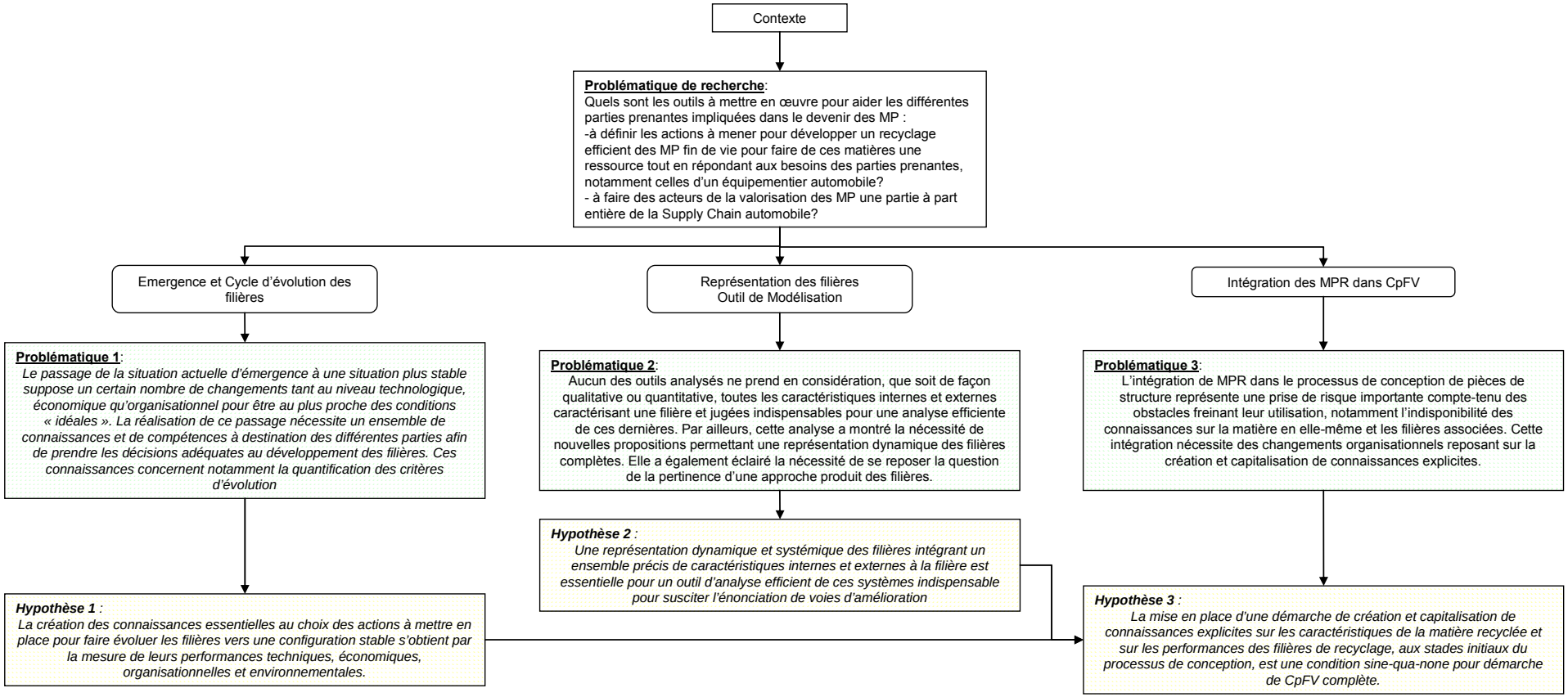
La synthèse des outils de CpX et l'analyse des processus de gestion des connaissances lors de la mise en place de nouvelles pratiques en conception, nous permettent d'énoncer une troisième problématique pour répondre à la question de recherche sur le besoin de créer des connaissances explicites pour obtenir l'intégration des filières de recyclage au travers des recycleurs dans la Supply Chain automobile.

Problématique 3 : L'intégration de MPR dans le processus de conception de pièces de structure représente une prise de risque importante compte-tenu des obstacles freinant leur utilisation, notamment l'indisponibilité des connaissances sur la matière en elle-même et les filières associées. Cette intégration nécessite des changements organisationnels reposant sur la création et capitalisation de connaissances explicites.

Pour répondre à cette problématique, nous énonçons l'hypothèse suivante :

H3 : La mise en place d'une démarche de création et capitalisation de connaissances explicites sur les caractéristiques de la matière recyclée et sur les performances des filières de recyclage, aux stades initiaux du processus de conception, est une condition sine-qua-none pour une démarche de CpFV complète.

VI-2-4. Synoptique de l'analyse de la question de recherche



Chapitre 3 :
Proposition d'une démarche et outil pour l'intégration des filières de recyclage de MP dans la supply chain

L'analyse de la question de recherche a mis en exergue trois sous-problématiques en lien avec les raisons de non-maturité du système, de l'évaluation des conditions d'évolution pour approcher une filière « idéale », du besoin d'information sur ses capacités et sur les caractéristiques matières pour une utilisation de MPR dans des applications automobiles à haute valeur ajoutée. Pour répondre à ces problématiques, nous proposons trois hypothèses : les hypothèses 1 et 2 portent sur les moyens à mettre en œuvre pour faire évoluer les filières et la troisième sur les moyens à déployer pour pérenniser l'utilisation de MPR dans le processus de conception automobile.

Les trois problématiques sont connectées les unes aux autres. Les deux premières ne peuvent aboutir sans la réalisation de la troisième. En effet, l'assurance d'un marché pour les MPR dans des applications à haute valeur ajoutée est une des premières conditions à l'émergence des filières. La mise en place de solutions associées à ces différentes hypothèses concerne donc les conditions de fermeture de la filière de recyclage pour l'intégration de cette filière dans la Supply Chain automobile. Favoriser le développement des filières françaises de recyclage des MP apparaît donc aujourd'hui comme l'élément déterminant pour permettre une réelle politique d'éco-conception des composants plastiques notamment automobiles (une CpFV complète).

Dans ce chapitre, nous expliciterons les moyens que nous avons développés pour valider ces hypothèses et ainsi apporter une réponse à la fois à la problématique de recherche et à la problématique industrielle. Dans un premier temps, nous exposerons notre démarche d'intégration de matière recyclée basée sur l'acquisition de connaissances explicites en réponse aux limites de non-utilisation de cette matière dans les applications de haute qualité (H3). Dans un deuxième temps, nous présenterons un outil de modélisation des filières conduisant à la mesure de leurs performances par le biais d'une simulation de flux, symbole des interactions entre les acteurs (combinaison de H1 et H2).

I- Une démarche globale d'intégration de la matière recyclée en conception

I-1. Réponse à l'hypothèse 3 : Hypothèse d'intégration par la création et la capitalisation de connaissances explicites

L'analyse de la problématique nous a conduit à mettre en relation les composantes structurelles d'une organisation applicables à la gestion d'un projet automobile avec les modifications à apporter à celles-ci pour l'intégration de la matière recyclée. De la même façon - soit que l'intégration de l'éco-conception requiert un changement organisationnel de l'entreprise tant au niveau de ses valeurs directrices et de sa stratégie s'inscrivant dans une démarche de gestion du changement (Le Pochat 2005) -, toute démarche d'intégration d'une matière recyclée doit non seulement s'accompagner de changements organisationnels au niveau de la conception, mais également de l'acquisition et capitalisation des connaissances associées à ces matières.

Les connaissances concernent :

- les caractéristiques des matières recyclées (fournisseurs, propriétés, conditions d'acceptation dans la filière automobile),
- les performances technico-économiques des filières et leur niveau d'adéquation avec le cahier des charges automobile.

Cette démarche d'acquisition des connaissances s'accompagne des changements organisationnels suivants :

- une intégration au plus tôt dans le processus de conception comme cela est pratiqué pour la matière vierge,
- une capitalisation des connaissances à l'intérieur des outils de conception déjà existants au sein de l'entreprise.

Il y a donc deux niveaux d'apports des connaissances explicites:

- un au niveau des processus: conception, projet,
- un au niveau humain : les acteurs métier et projet.

Nous stipulons que les modifications organisationnelles à mettre en place par le biais de l'apport de connaissances explicites induisent la mise en place d'une démarche d'intégration s'inspirant de la démarche pour les matières vierges tout en intégrant les spécificités liées aux MPR.

I-2. DAIMRE[109] : une démarche d'intégration de la matière recyclée basée sur l'acquisition de connaissances explicites

A partir du postulat énoncé ci-avant, nous avons développé une démarche, DAIMRE, basée non seulement sur la mise à disposition, aux différents métiers et processus, des connaissances sur la matière recyclée et sur les filières et basée également sur le partage de ces informations au sein des processus.

Cette démarche a été conçue pour le processus de conception de pièces de haute qualité et l'organisation des équipementiers de la supply chain automobile mais se veut adaptable à d'autres industries. C'est une démarche d'acquisition initiant les modifications organisationnelles et humaines nécessaires à une intégration pérenne de la matière recyclée et au déploiement réussi d'une démarche d'éco-conception globale.

I-2-1. Principe

Pour résoudre les limites à l'intégration des MPR, notre méthode se base sur une mise à disposition aux personnes concernées de ces informations par le bais :

- d'une fiche matière incluant les caractéristiques matière et les résultats des filières associées en termes de volume, qualité, prix, résultats obtenus à l'aide de l'outil de modélisation présenté dans le chapitre 3 partie II-2.

[109] Démarche d'Acquisition de connaissances explicites pour l'Intégration de la Matière REcyclée dans le processus de conception.

- de la formulation d'un compound[110] recyclé pour aider à briser la résistance au changement liée à l'utilisation de matière recyclée,
- d'une collaboration avec les recycleurs.

DAIMRE induit autant des modifications dans le processus de conception que des modifications dans le processus de transmission des connaissances au sein des différents métiers de l'équipementier automobile. L'objectif final de DAIMRE est de capitaliser ces connaissances et d'établir une note de recyclage (présentée ci-dessous) représentant l'aptitude à pouvoir utiliser une MPR en fonction d'une vision systémique de la filière.

I-2-2. La démarche

I.2.2.a. Cadre d'application de la démarche

Tout d'abord, il est important de mettre en exergue que la mise en œuvre de la démarche proposée s'opère dans un premier temps dans le cadre d'un projet pilote afin de valider sa pertinence et son adéquation avec le processus de conception d'un produit automobile avant tout déploiement dans l'entreprise. L'intérêt de cet apport doit être validé avant de mettre en place les changements organisationnels dans les pratiques existantes et de standardiser l'utilisation de matière recyclée en conception. Cette intégration est une étape supplémentaire dans la démarche d'éco-conception et s'opère donc sur un projet déjà inscrit dans cette démarche pour que les choix en relation avec la fin de vie soient en accord avec les choix de matière recyclée. Le déploiement de DAIMRE doit être initié par un expert disposant des connaissances spécifiques aux matières recyclées et aux filières de recyclage associées. Enfin la réussite de l'intégration nécessite l'intervention de tous les acteurs que ce soit ceux intervenant directement dans le projet ou bien ceux dans les métiers périphériques (cf. Figure 50).Pour cela, ils doivent avoir été sensibilisés sur les enjeux environnementaux de l'utilisation de MPR. Sont également impliqués dans le ce processus les acteurs extérieurs à l'entreprise tels que les fournisseurs de matières recyclées et les constructeurs automobiles.

I.2.2.b. Description des phases

(1) Synoptique

Le synoptique de DAIMRE est présenté sur la Figure 54 : étapes de la démarche, acteurs impliqués, étapes dans l'acquisition des connaissances. Le déroulement de chacune des phases est explicité dans les parties suivantes avec notamment la description des flux de connaissances créés entre les acteurs.

[110] Un compound est une matière composée d'un mélange de matière. Dans notre analyse, nous entendrons par compound recyclé un mélange composé en matrice principale de matière vierge et en matrice secondaire de matière recyclée.

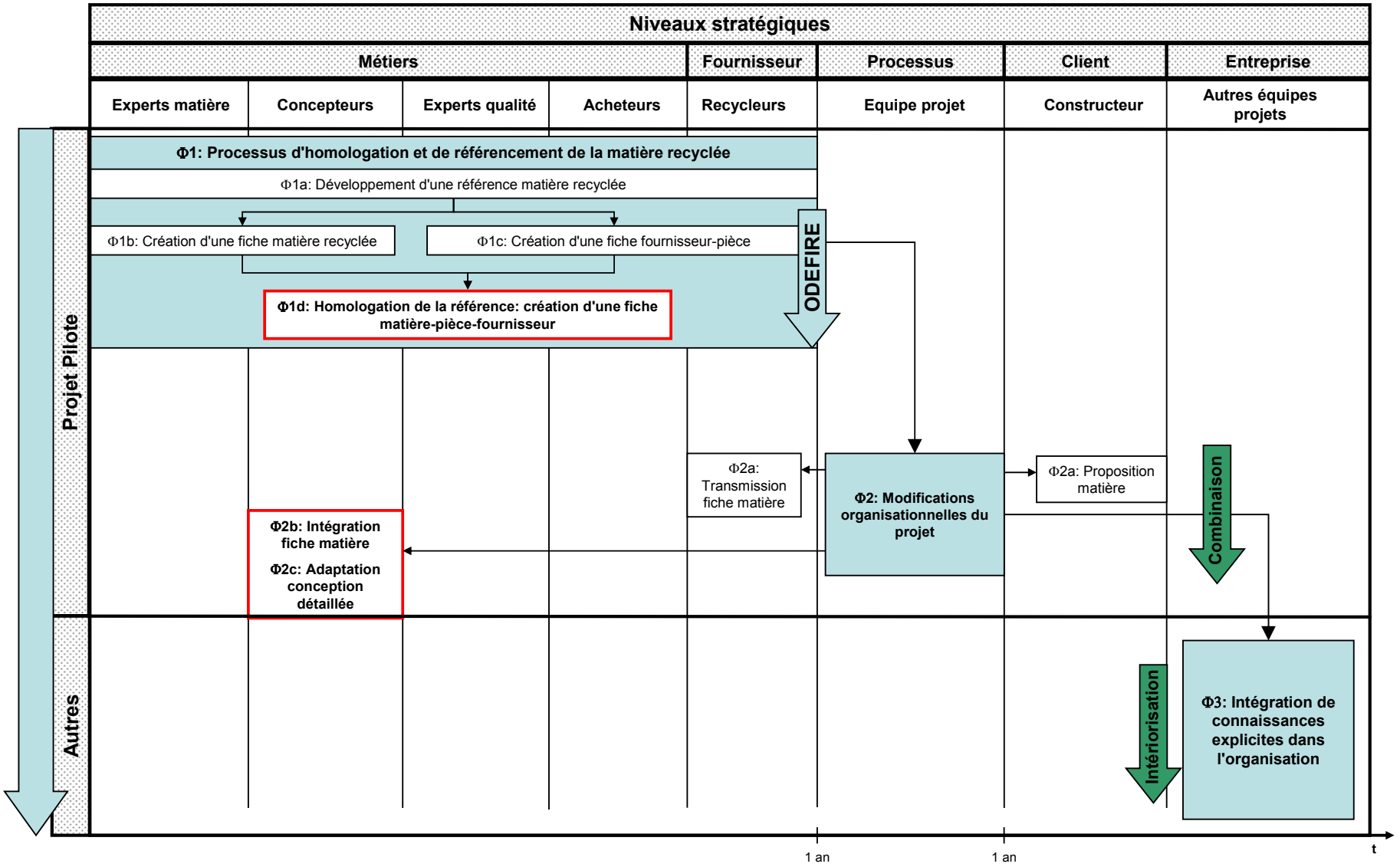


Figure 54: Synoptique de la démarche proposée pour une intégration réussie de la matière recyclée par acquisition de connaissances induisant les changements organisationnels nécessaires

(2) Φ1 : Processus d'homologation et de référencement de la matière recyclée

Cette étape est une étape primordiale dans la réussite de l'intégration de MPR. Elle n'était pas réalisée auparavant et sa non existence est une des raisons d'échec de l'utilisation de matière recyclée dans des applications hautes performances.

Elle a pour objectif :

- l'acquisition de connaissances sur la matière recyclée : l'évaluation de l'adéquation propriétés matière avec le cahier des charges de l'application visée et avec les caractéristiques fournisseurs en lien avec les critères de l'entreprise
- la capitalisation de ces connaissances au niveau des métiers de l'entreprise par le référencement de la matière par le biais d'une fiche.

Le référencement ou homologation de la matière est établi afin d'amener les utilisateurs à considérer les matières recyclées comme tout autre nouvelle matière susceptible d'être utilisée dans les produits.

La prise en compte des spécificités de la matière recyclée liées aux filières de recyclage est réalisée au travers de :

- la participation des recycleurs au développement de la matière,
- l'évaluation des capacités techniques et économiques des recycleurs à répondre aux attentes de l'entreprise en termes de caractéristiques matière et fournisseurs.

Le référencement représente une étape de création de connaissances pour une rupture avec l'existant, soit modifier le savoir erroné des utilisateurs sur les MPR.

D'autre part, les acteurs de l'organisation sont résistants au changement et sans un facteur déclencheur, conserveront leurs routines de connaissances. L'expert est l'élément perturbateur initiant ce changement. Il sensibilise les personnes des corps de métier concernés par le biais de réunions pour formuler concrètement le statut actuel des matières recyclées et initier ces derniers au processus d'homologation de la matière

Cette étape d'homologation est cruciale pour la création d'un standard pièce matière au même titre que la matière vierge, essentielle.

Φ 1a : Développement d'une matière recyclée : évaluation de la possibilité de la recycler

Le synoptique de cette étape est présenté sur la Figure 55. Elle fait intervenir les différents experts métier (matière, achat, qualité) ainsi que les fournisseurs potentiels de matières recyclées soit les recycleurs. Le développement de la matière repose sur un choix judicieux réalisé en fonction des possibilités actuelles et futures de recyclage de cette matière et sur la formulation d'un compound recyclé. Nous entendons par là les capacités techniques et économiques des recycleurs qui se traduisent en volume, qualité, prix pour l'utilisateur tout en assurant une viabilité au fournisseur (Maudet et al. 2006).

La première sous-étape consiste au choix de la matière, à substituer par de la matière recyclée. Ce choix est réalisé par les experts matière et les concepteurs reposant sur :

- la possibilité de la matière à être industriellement recyclée: matière déjà recyclée ou technologie de recyclage en cours d'industrialisation,

- son prix : intérêt économique, comparaison par rapport au prix de la matière vierge,
- son volume disponible: disponible ou potentiel en comparaison avec les besoins d'un projet,
- ses caractéristiques physico-chimiques après recyclage : niveaux des propriétés et stabilité de ces propriétés,
- son origine: une préférence pour des origines automobiles dans un premier temps car la qualité matière est alors connue et donc plus favorable à une mise en confiance des équipementiers.

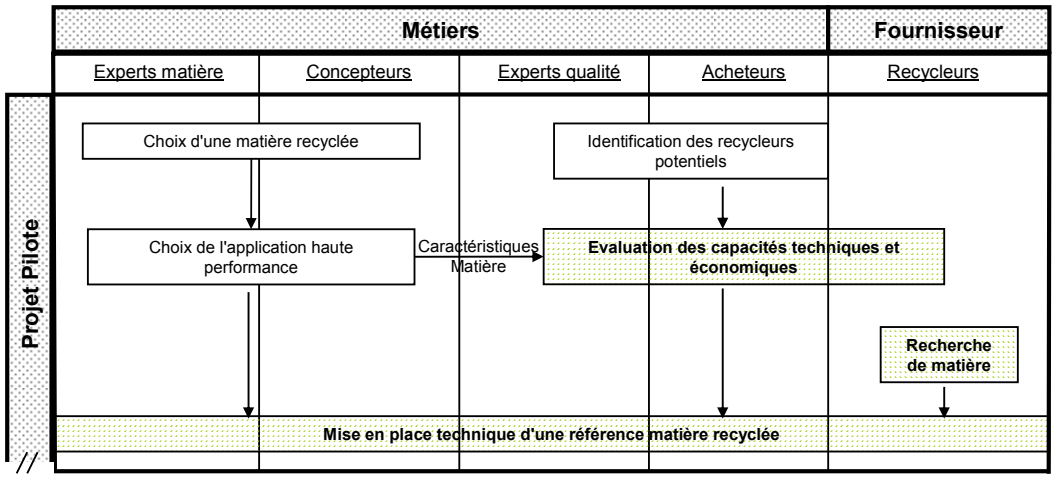


Figure 55: Synoptique de Φ1a **Apport de DAIMRE**

Ensuite un composant susceptible d'être fabriqué avec ce matériau est identifié et sélectionné par les experts matière et concepteurs. Le choix repose sur :

- des composants à hautes valeurs ajoutées impliquant des marchés économiquement intéressants pour les recycleurs,
- une application pour laquelle un scénario de recyclage est envisagé pour une réutilisation éventuelle de la matière recyclée dans la même application (recyclage en boucle fermée).

En parallèle, les experts qualité fournisseurs et les acheteurs ont comme rôle d'identifier des fournisseurs potentiels pour ces matières selon les critères de choix des fournisseurs explicités dans le chapitre 2. Ce sont en priorité des recycleurs fournissant déjà l'automobile car au fait des habitudes de fonctionnement de cette industrie.

En fonction des caractéristiques matière demandées par l'application choisie, l'adéquation avec les capacités du recycleur est évaluée qualitativement en fonction du volume, de la qualité et du prix des références qu'il produit ou peut produire. Mais ce choix doit reposer sur une connaissance précise et juste de ces acteurs pour pouvoir assurer la confiance qui manque actuellement dans les produits qu'ils fournissent.

C'est pourquoi dans cette étape, nous proposons l'intervention des recycleurs dans le développement de la matière pour montrer ses capacités pour la production d'une référence produit avec des caractéristiques stables. Une fois les recycleurs identifiés, les caractéristiques matières leurs sont

transmises pour réaliser les formulations et notamment leur laisser le temps de trouver des sources de matière pour répondre à la demande sur le long terme.

Les experts métiers en relation directe avec le recycleur développent une formulation et un procédé d'obtention pour un compound recyclé La confiance dans la matière recyclée étant faible, l'utilisation d'un compound recyclé (20% MPR/80%MP vierge) facilite dans un premier temps son acceptation. Mais cette pratique n'est pas usuelle en conception automobile d'où l'importance d'informer les utilisateurs sur ces implications et d'adapter les outils de production (cf. Φ2). D'autre part, la formulation d'un tel compound demande un moindre volume aux recycleurs donc facilite l'atteinte des objectifs en terme de volume nécessaire pour la production d'une pièce. Une telle approche participe à réduire les problèmes de rupture d'approvisionnement dans le temps car il est impossible de demander à ces structures fragiles d'approvisionner brutalement les flux requis pour la totalité d'une référence automobile à fort volume de flux matière. Au fur et à mesure de l'acceptation de la matière et du développement des filières, la part de MPR pourra être augmentée.

D'autre part, le partenariat équipementier-recycleur peut conduire à un transfert de compétences sur la formulation du compound entre les acteurs, à une évolution de la structure du recycleur par le développement de références standard associées à des marchés stables.

Φ1b : Création d'une fiche matière recyclée

Cette étape concerne les experts matières et les concepteurs directement impliqués dans la validation de l'utilisation de nouvelles références matière : validation des propriétés et correspondance avec le cahier des charges demandé. Elle suit le même processus que celui de la matière vierge décrit dans l'Annexe 10. Les propriétés obtenues sont comparées à celles de la matière vierge pour s'assurer de la non-perte de propriétés et valider le processus de formulation et de fabrication établi par le recycleur.

En cas de correspondance entre caractérisation matière et pièce, la possibilité d'utiliser le compound développé pour la pièce de structure sélectionnée est validée. La fiche matière est alors créée. Elle est ajoutée au panel matière des experts matière et peut être considérée comme une référence utilisable au cours des projets. Mais pour qu'elle devienne un standard au même titre que la matière vierge, il reste à associer à cette sécurité technique la sécurité de l'approvisionnement et surtout la validation dans le cadre d'un projet pilote.

Φ 1c : Création d'une fiche fournisseur-matière (choix de recycleurs)

La fonction de cette étape est de permettre l'identification ou non d'un fournisseur pour le compound développé ainsi que l'adéquation de ses capacités aux caractéristiques technico-économiques de la matière souhaitées (cf. Figure 56). L'objectif final est d'établir une fiche fournisseur donnant les capacités des fournisseurs (volume, qualité, prix), soit les informations permettant d'établir l'assurance ou non d'un approvisionnement stable pour la matière en vue de son intégration dans un projet. Cette étape est primordiale pour accéder à une nouvelle vision du compound recyclé. C'est une des originalités apportées par la démarche apportant une première pierre vers une standardisation de l'utilisation de matière recyclée.

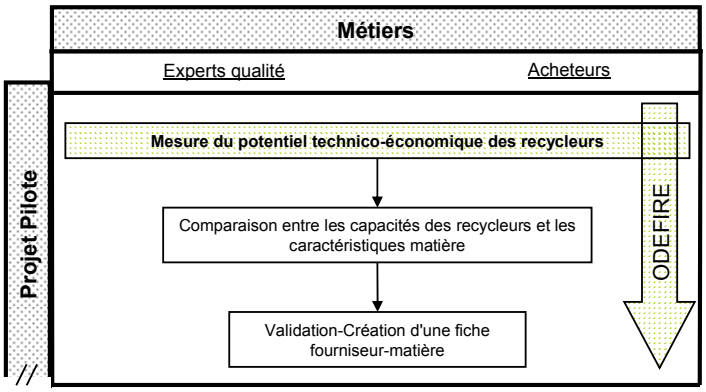


Figure 56: Synoptique de Φ1c Apport de DAIMRE

Les métiers directement impliqués sont les experts qualité et les acheteurs matière.

Le principe de la création de la fiche fournisseur repose sur la mesure des performances technico-économiques actuelles et futures des fournisseurs afin d'évaluer leur adéquation avec les caractéristiques matière attendues (cf. Figure 57).

Cette évaluation est réalisée à l'aide du modèle de filière présentée dans le chapitre 3 II- et dénommé ODEFIRE (cf. Figure 57). Dans ce cadre, son utilisation permet d'évaluer les possibilités des systèmes existants de répondre à la demande du marché automobile (cahier des charges de l'équipementier) en terme non seulement de qualité mais également en terme de volume et de prix. En données d'entrée, les caractéristiques matière et la nature du compound sont renseignées. En sortie, la fiche fournisseur-matière est obtenue comportant le nombre de recycleurs sélectionnés, leurs caractéristiques et les propriétés de leurs références en termes de volume, qualité, prix obtenues en partie à l'aide de l'outil ODEFIRE.

En fonction des résultats obtenus, existence ou non de fournisseurs, la possibilité d'obtenir industriellement le compound est validé. Suite à la validation, le ou les fournisseurs sélectionnés peuvent être ajoutés au panel fournisseur existant par les acheteurs et expert fournisseur.

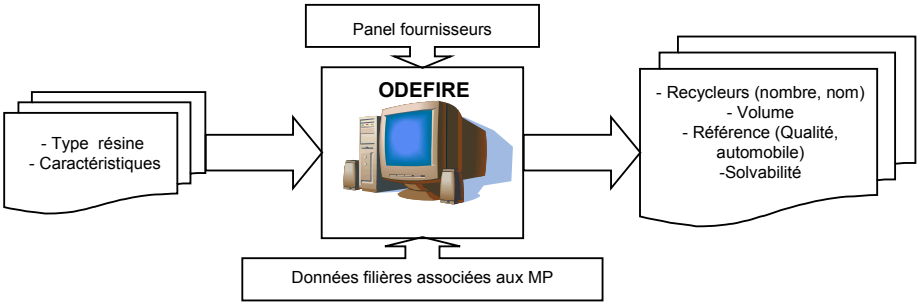


Figure 57: Evaluation des capacités des recycleurs et comparaison avec les caractéristiques matière-Processus de création de la fiche fournisseur-matière

Φ 1d : Homologation de la matière : création d'une fiche Mx-pièce-fournisseur

L'homologation de la matière donne à la matière recyclée choisie le statut de référence standard au même titre que la matière vierge. Elle sera ainsi référencée dans les outils de conception.

Cette dernière étape consiste à associer la fiche matière recyclée à la fiche fournisseur matière afin d'obtenir une fiche unique Mx-pièce-fournisseur base du référencement de la matière.

La création de cette fiche passe par une notation de l'adéquation entre critère fournisseur et cahier des charges pièce-matière afin d'établir une note de recyclage représentant la possibilité pour les personnes impliquées dans des projets d'utiliser cette matière recyclée. De même qu'il existe des notes de démontabilité et de recyclabilité pour un produit, nous y associons une note de recyclage représentant entre autre les capacités actuelles et potentielles de filières à fournir une matière donnée. La fiche finale correspond donc à la fiche matière associée à une application donnée combinée aux caractéristiques des fournisseurs et à la note de recyclage. Cette note traduit finalement la prise de risque associée à l'utilisation de matière recyclée en évaluant l'adéquation entre les caractéristiques de la matière et de la pièce et les capacités des recycleurs.

La Figure 58 donne les principales étapes de la séquence de notation. Elle est basée sur la notation des critères présentés dans le Tableau 23 en fonction de leur valeur par rapport à la valeur attendue par les acteurs de l'entreprise. Les notes sont ensuite pondérées en fonction du poids, poids correspondant à la possibilité ou non d'utiliser la matière recyclée. Ensuite la note globale est calculée en combinant les notes des différents critères (somme pondérée). Les notes pour les critères varient entre 1 et 3 et les poids entre 1 et 5. La note de recyclage est comprise entre 0 et 5.

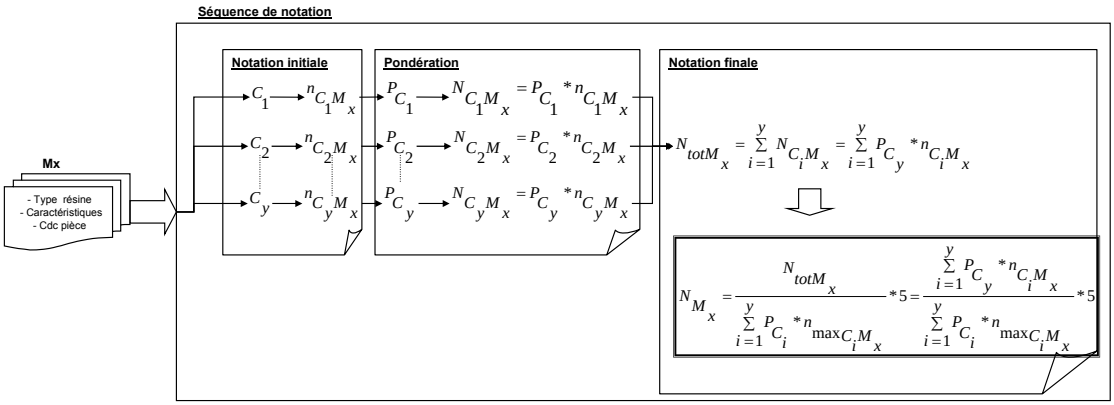


Figure 58: Procédure de calcul de la note de recyclage associée à une matière donnée (M_x). C_y=critère de notation y lié aux caractéristiques de la matière recyclée, nC_yM_x=note attribuée au critère en fonction de sa valeur réelle par rapport aux propriétés attendues pour une intégration de Mx, PCy=le poids de chaque critère en fonction de l'objectif sur la possibilité d'utiliser la matière recyclée. NtotMx= note totale obtenue pour la matière, NMx=note de recyclage finale.

Les critères choisis pour la notation sont des critères descriptifs de la situation des filières de recyclage de la matière, des critères fournisseurs exigés par l'entreprise, des spécificités de la matière et les contraintes pièce associées à un projet (cf. Tableau 23). Le choix des critères, de leurs valeurs et de leurs poids ont été réalisés à partir d'entretiens auprès des acteurs directement concernés par l'utilisation de matière recyclée[111], entretiens complétées par une analyse bibliographique (Chick et al. 2002). Le critère potentiel (C8) est directement lié aux résultats donnés par l'outil de modélisation des filières (cf. Chapitre 3 II-). Sa valeur est directement liée aux valeurs de paramètres comme le volume, la marge, la qualité obtenues à l'aide de l'outil. Les critères solvabilité (C5), certification (C6) font référence aux critères fournisseur. Par exemple, si un fournisseur fait partie du panel fournisseur, la note maximale lui est attribuée.

[111] Ces critères ont été obtenus suite à des entretiens réalisés auprès des concepteurs, acheteurs, expert matières et experts qualité fournisseurs de POAE. Les poids affichés ont été établis suite aux conclusions de ces entretiens.

Indice critère	Nom critère	Désignation	Poids	Valeur	Note
C1	Volume	Volume de matière disponible auprès des recycleurs	3	0	1
				<Volume projet pièce	2
				>Volume projet pièce	3
C2	Nfournisseurs	Nombre de fournisseurs fournissant déjà la matière ou susceptible de la fournir	5	0	1
				[1-3]	2
				>3	3
C3	Prix	Prix de la matière recyclée	3	Non produit	1
				>=Prix matière vierge	2
				<Prix matière vierge ou 15%<Prix matière vierge	3
C4	Qualité	Production de référence de haute qualité et destinée au marché automobile	4	0	1
				Haute qualité	2
				Haute qualité=Qualité du projet automobile	3
C5	Solvabilité	Critère fournisseur nécessaire pour faire partie du panel fournisseur	5	Marge<0	1
				Equilibre	2
				M>0 (ordre de 10%)	3
C6	Certification	Certification qualité et environnementale nécessaire au panel fournisseur	3	Aucune	1
				Qualité	2
				Toutes	3
C7	Localisation	Eloignement du fournisseur pour la logistique	2	Continent	1
				Pays	2
				Région	3
C8	**Potentiel**	**Potentiel de développement du recyclage de cette matière (volume, qualité, prix, fournisseurs) évalué par ODEFIRE**	**5**	**Nul à faible**	**1**
				Moyen	**2**
				Fort	**3**

Tableau 23: Critères de notation et poids associés- Valeur des critères et notes associées.

L'interprétation de la note finale se fait en comparant le résultat obtenu aux résultats d'une matière de référence, d'une matière « idéale » (la matière vierge) et d'une matière aux propriétés minimales (cf. Figure 59). Les valeurs pour ces matières ont été définies en accord avec les experts matière et les experts qualité fournisseur. La matière de référence (M_{ref}) correspond à la matière dont la note obtenue sert de référence pour estimer la possibilité d'utiliser la matière souhaitée. Cette matière a pour note 3,5. La matière idéale (M_{id}) est la matière obtenant la note maximale et la matière minimale (M_{min}), la note minimale. Si la note attribuée à la matière analysée est dénommée N_{Mx} alors l'interprétation du résultat se fera de la manière suivante:

- Si $N_{Mref}<N_{Mx}<N_{Mid}$ alors la matière recyclée peut être utilisée sans prise de risque importante,
- Si $2,5<N_{Mx}<3,5$ alors la matière ne peut être utilisée mais son utilisation n'est pas totalement exclue, une analyse plus fine des paramètres peut conduire à mettre en évidence les possibilités d'actions pour pallier aux freins à son utilisation.

– Si $N_{Mmin}<N_{Mx}<2,5$ alors l'utilisation de la matière n'est pas possible sans prise de risque importante. Des changements importants sont nécessaires. Ceci peut signifier que la filière n'existe pas, ou bien que la matière n'est pas adaptée au recyclage.

Un exemple M_{ex} est présenté sur la Figure 59. La note obtenue est de 2,9, donc l'usage de cette matière implique une prise de risque à l'utilisation mais si nous analysons plus en détail les valeurs des critères, nous constatons que C5 est au niveau 1 et C1 et C8 au niveau 2. Le potentiel de développement de la filière peut supposer que les volumes et la solvabilité attendus pourront être atteints dans le temps. Donc c'est une matière potentiellement utilisable à moyen terme.

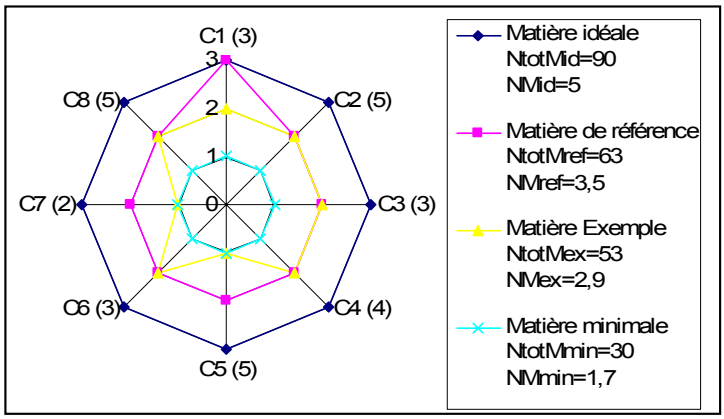


Figure 59: Note de recyclage de différentes matières en fonction des notes de chaque critère. N_{Mid}=Note de la matière idéale, N_{Mref}, note de la matière de référence, N_{Mex}=Note de la matière exemple, N_{Mmin}=Note de la matière nimimale.

La note de recyclage, étape finale de l'homologation de la matière recyclée, est directement retranscrite sur la fiche matière ainsi que les recycleurs, les volumes et qualité, créant ainsi la fiche MX-Pièce-Fournisseur (cf. Figure 60).

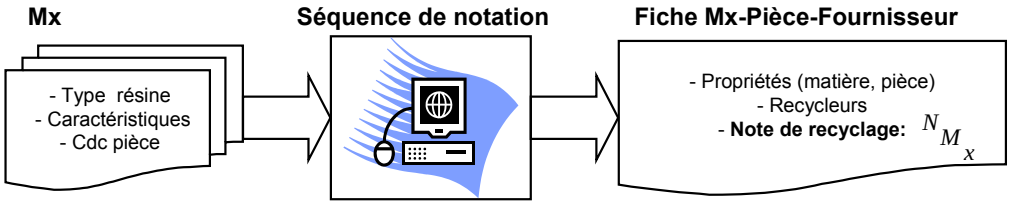


Figure 60: Intégration de la note de recyclage pour le référencement de la matière.

Les flux d'informations transmis au cours de la Φ1

La Figure 61 présente les principaux flux d'informations qui en transitant entre les experts des différents métiers leur permettent d'acquérir les connaissances essentielles aux changements de leurs pratiques d'usage de la matière recyclée.

Tout d'abord, les experts matières, acheteurs matières et concepteurs sont à la base du processus de création des fiches présentées précédemment. Ces informations sont transmises aux experts qualité pour la création de la fiche fournisseur matière et au recycleur par le biais de la fiche matière recyclée. Un transfert efficient des informations entre ces acteurs est primordial pour le bon déroulement des étapes de la démarche. Les points essentiels et significatifs de l'apport de notre démarche dans cette première phase sont la participation directe des recycleurs dans le développement de la matière et la création de la fiche Mx-pièce-fournisseur résultat direct des données transitant entre les acteurs.

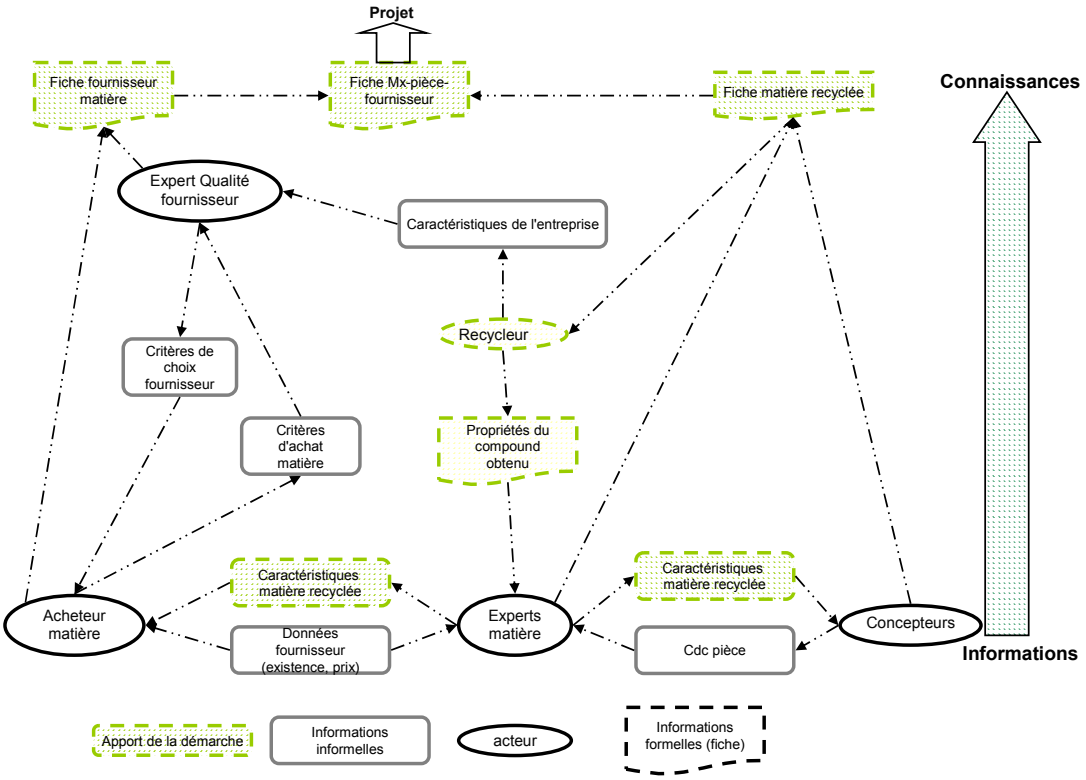


Figure 61: Schéma des flux d'informations entre les acteurs de Φ1.

A l'issue de la validation de cette phase, la matière recyclée devient une matière standard au même titre que la matière vierge dans le sens où elle est disponible dans les références matières proposées par les experts. Il reste cependant à valider son utilisation dans le déroulement d'un projet et notamment l'adaptation de la phase de conception à ce type de matériau.

Cette phase représente l'étape de création de connaissances essentielles à l'utilisation de matière recyclée par le biais de la fiche Mx-pièce-fournisseur.

(3) Φ 2 : Modifications organisationnelles du projet de développement pièce

L'objectif de cette étape est d'initier l'intégration des connaissances (fiche Mx-pièce-fournisseur) sur la matière recyclée non plus uniquement par les métiers mais par les équipes projet réalisant la conception des pièces.

Elle correspond à une phase de combinaison des connaissances soit une création de connaissances explicites nouvelles et une acquisition de ces connaissances au sein des équipes projet de l'équipementier. Cette acquisition passe par des modifications dans le déroulement des phases du projet basées sur (cf. Figure 62):

- le partage de connaissances créées par les métiers dès les premières phases de conception,
- une transmission des informations sur la matière recyclée au plus tôt au constructeur et aux recycleurs,
- l'adaptation des phases de conception à la matière recyclée.

Les acteurs impliqués dans ces modifications sont tous les acteurs intervenant des les différentes phases d'un projet automobile (cf. Figure 50). Le choix du projet est effectué par l'expert en fonction

de la matière et de la pièce choisies lors de Φ1 mais également de la volonté du constructeur à utiliser de la matière recyclée et de l'équipe projet à intégrer un compound recyclé. L'implication de ces différents acteurs renvoie directement à la notion de gestion participative d'un projet automobile développé par Jacqueson (Jacqueson 2002).

Φ 2a : Proposition d'une matière au constructeur et transmission de la fiche au recycleur sélectionné

La première étape de l'intégration consiste à proposer au client dès la phase d'expertise la fiche du compound ainsi que les fournisseurs associés (cf. Figure 62). Cette étape est importante puisqu'elle va décider la poursuite ou non de l'utilisation de la matière. La communication avec le constructeur est établie par le responsable qualité. Mais une première difficulté mais non des moindres peut être la non présence du fournisseur dans le panel du client. La validation du potentiel des fournisseurs à l'aide de la fiche Mx-pièce-fournisseur peut conduire à l'acceptation par le constructeur de nouveaux fournisseurs.

Un point original de cette phase est la transmission, dès l'expertise, du cahier des charges matière au recycleur sélectionné. Le développement d'un projet étant d'un an, ceci lui laisse le temps de s'approvisionner en matière pour produire la référence et répondre à la demande du projet sur sa durée. Cette intégration du recycleur leur permet d'accéder à des contrats sur le moyen terme et participe à leur professionnalisation et à l'établissement de relation client-fournisseur stable dans la filière de recyclage.

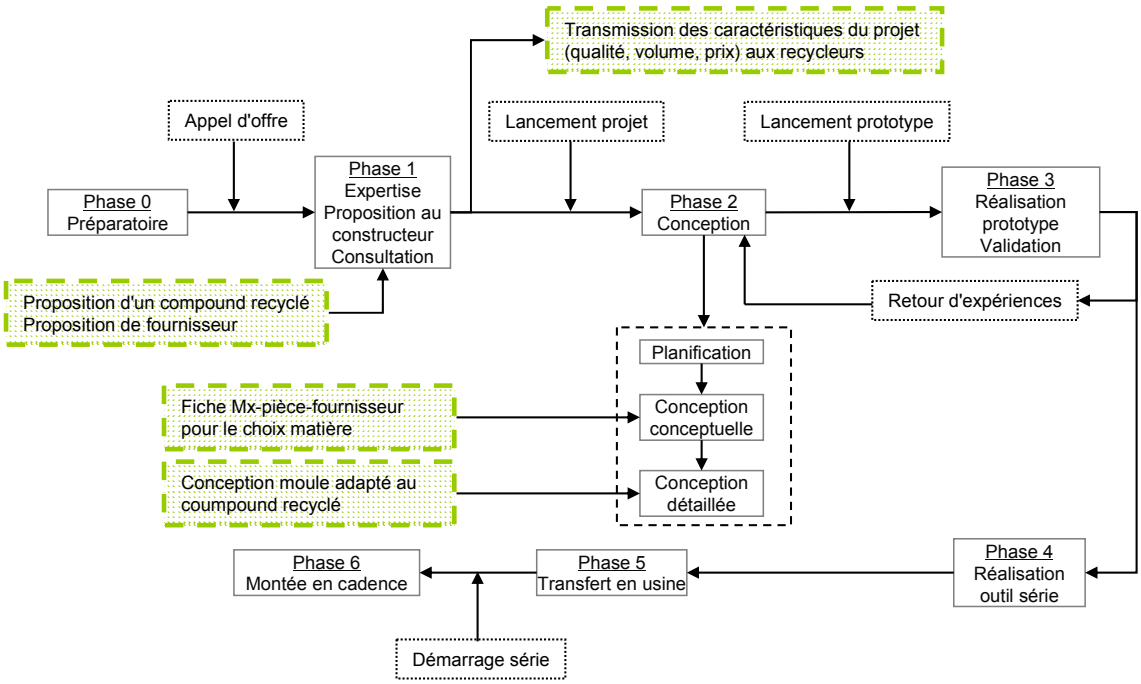


Figure 62: Modification apportées au déroulement du projet automobile par la prise en compte des informations concernant la matière recyclée pour son intégration = apport de DAIMRE en lien avec Φi

Φ 2b : Intégration en conception de la fiche matière

Les modifications liées à l'intégration de la matière recyclée et l'utilisation des informations la concernant doivent être réalisées dès les premières phases du processus de conception, démarche éloignée des pratiques communes. Le choix de la matière s'opère pendant la phase de conception conceptuelle. Un lien direct est effectué avec les experts matière à partir du cahier des charges pièce. Ces derniers mettent à la disposition des concepteurs la fiche Mx-pièce-fournisseur qui vient s'ajouter aux fiches matières déjà existantes. L'apport de cette fiche à ce stade de la conception annihile les limites techniques associées à la matière.

Φ 2c : Adaptation de la phase de conception détaillée à l'utilisation de matière recyclée

DAIMRE repose également sur la prise en compte de la matière recyclée lors de la phase de conception détaillée là où s'opère le choix des outils de production conditionnant la fabrication des outils série en accord avec les données obtenues par simulation. Les moules de mise en forme sont alors conçus pour la MPR et non plus pour la matière vierge. Cette conception répond aux limites industrielles (cf. chapitre 2 V-2). En parallèle, les acheteurs choisissent le fournisseur adapté en fonction de sa capacité à répondre à la demande du projet (résultat fiche Mx-pièce-fournisseur).

Validation de la démarche

La validation de DAIMRE passe par :

- la validation par le constructeur,
- la validation par les concepteurs,
- la validation par le responsable qualité.

L'acceptation de la matière par le constructeur est à la base de la poursuite du projet, les résultats obtenus lors du déroulement du projet (env. 1 an) doivent répondre parfaitement aux exigences du client pour qu'il n'y ait pas de refus. La réalisation de la première phase et la conception d'outillages adaptés viennent assurer la réussite du projet et fortement limiter l'échec de l'intégration en minimisant la prise de risque.

La validation par les concepteurs s'opère par le choix de la matière recyclée répondant à la demande du projet mais également pendant la Φ1 lors de la mise en forme du compound en amont du projet.

La validation finale est celle du responsable qualité qui transmet les informations aux différents interlocuteurs : il vérifie que tous les éléments nécessaires ont été réunis et sont cohérents avec les exigences de qualité fournisseur et matière.

Les flux de connaissances transmis

La Figure 63 présente les flux de connaissances créés au sein du projet. Ces flux sont associés aux flux d'informations environnementales.

Les points essentiels à noter sont:

- le sens de l'information matière recyclée par rapport aux informations environnementales habituelles. Ainsi les contraintes définies par le constructeur sont habituellement traduites dans le cahier des charges par les concepteurs et transmises aux acteurs concernés comme les acheteurs et experts matières. Dans le cadre de l'intégration de la matière recyclée, le

processus est réalisé dans un premier temps en sens inverse. Ce sont les acheteurs et experts au travers du responsable qualité qui transmettent les informations aux concepteurs du projet.

- le responsable qualité devient l'opérateur central de capitalisation et dissémination des connaissances au sein des acteurs de l'équipe projet mais également auprès des clients et fournisseur. Il devient le pilier central du bon fonctionnement de l'intégration des données environnementales.
- les responsables métier au sein du projet, directement concernés par l'intégration de la matière recyclée s'échangent en continu les informations sur les matières (fiche ou données informelles). Il s'établit également un transfert, au responsable process, de l'information pour adapter les outils de production existants à l'utilisation d'un compound recyclé.

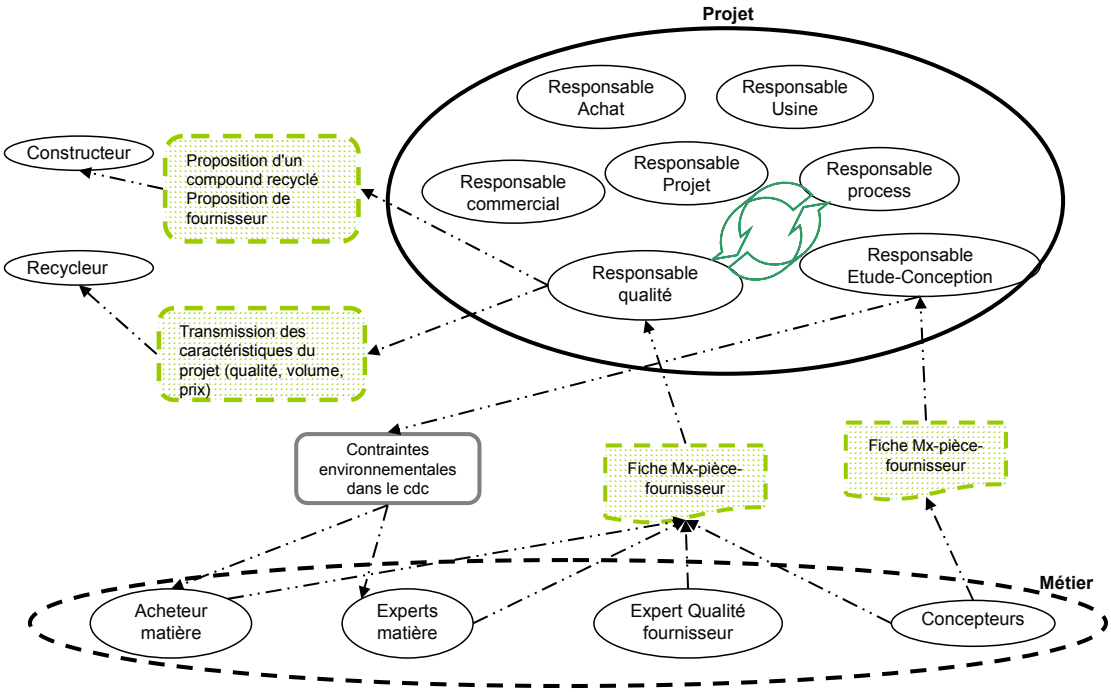


Figure 63: Flux de connaissances créées par l'intégration de la matière recyclée dans le projet

(4) Φ 3 : Intégration des connaissances explicites au sein des équipes projet pour une standardisation de l'utilisation de matière recyclée

Cette étape correspond à la standardisation de l'utilisation de la matière recyclée au sein de l'entreprise par le biais d'une capitalisation et dissémination des connaissances liées à la matière recyclée et aux filières au sein des différents métiers de l'entreprise grâce à une formalisation de ces connaissances. Cette formalisation correspond à la création de bases de données et l'intégration des connaissances dans les outils de conception communs aux différents acteurs de l'entreprise (cf. Figure 64). Cette ultime phase fait référence à la phase d'intériorisation des connaissances et de leur formalisation conduisant à faire de l'utilisation de matière recyclée une pratique usuelle dans l'entreprise au même titre que les pratiques de conception actuelles. Elle concerne tous les niveaux de l'entreprise : métiers ou projet et même les niveaux hiérarchiques les plus élevés pour leur stratégie d'éco-conception.

Les quatre grandes étapes de cette intégration de connaissances au sein de l'organisation sont (cf. Figure 64): Communication-Formation, standardisation, capitalisation, séploiement.

Etape 1 : Communication

Après la validation de la réussite de l'intégration dans le projet pilote, la communication sur le succès du projet et les bénéfices obtenus par cette utilisation vont d'une part naturellement attirer l'attention des autres équipes projet et les motiver pour tenir compte de l'existence de ces matières. D'autre part, le partage de l'information entre les membres de l'équipe projet est caractéristique de ce type de processus {Jacqueson, 2002 #7}.

Etape 2 : Standardisation

Une fois les premières étapes validées (homologation, pilote), l'utilisation de cette matière peut être standardisée au sein des équipes projet comme tout autre matière vierge. La standardisation consiste à intégrer la fiche matière recyclée dans les bases de données matière existantes et de même la fiche fournisseur matière dans les bases de données fournisseur accessibles aux acteurs concernés. Ce sont des outils standards utilisés dans les processus projet des équipementiers.

Etape 3 : Capitalisation-Dissémination

Les connaissances créées précédemment doivent être accessibles par n'importe quel acteur du projet et donc son utilisation intégrée aux outils existants. Ainsi la capitalisation consiste dans un premier temps à intégrer la fiche Mx-pièce-fournisseur dans la base de données pièces contenant les différentes fixations, les matières, les sous-ensemble pouvant être associés à une pièce donnée. Ceci fait référence à une formalisation de l'information matière recyclée dans les outils de choix de conception.
Les connaissances liées à la matière recyclée et plus précisément aux filières de recyclage au travers de l'outil de modélisation ODEFIRE viennent compléter et donner une dimension plus globale à la stratégie d'éco-conception de l'entreprise en venant appuyer les choix d'éco-conception à partir de la note de recyclage. Ainsi, la note de recyclage vient s'ajouter aux autres règles d'éco-conception (démontabilité recyclabilité). Par exemple, le choix d'un scénario recyclage alors que la note associée est 1,7 peut poser des questions sur la pertinence d'envisager un tel scénario ou bien sur la possibilité de mener des actions pour favoriser ce dernier. L'intégration de la MPR complète les préconisations d'éco-conception en proposant une prise en compte parallèle de la matière, des filières et du scénario fin de vie lors de la conception.
Etape 4 : Déploiement des pratiques communes

Le déploiement de la méthode pour d'autres MPR sera initié par la réussite du projet pilote mais surtout par la formalisation des connaissances dans les outils existants créant de nouvelles compétences experts. Pour toute nouvelle matière, seule $\Phi 1$ est nécessaire. Au fur et à mesure les différentes matières seront associées aux diverses bases de données comme toute autre matière vierge. Les risques sont minimisés progressivement entraînant un changement progressif dans les pratiques.

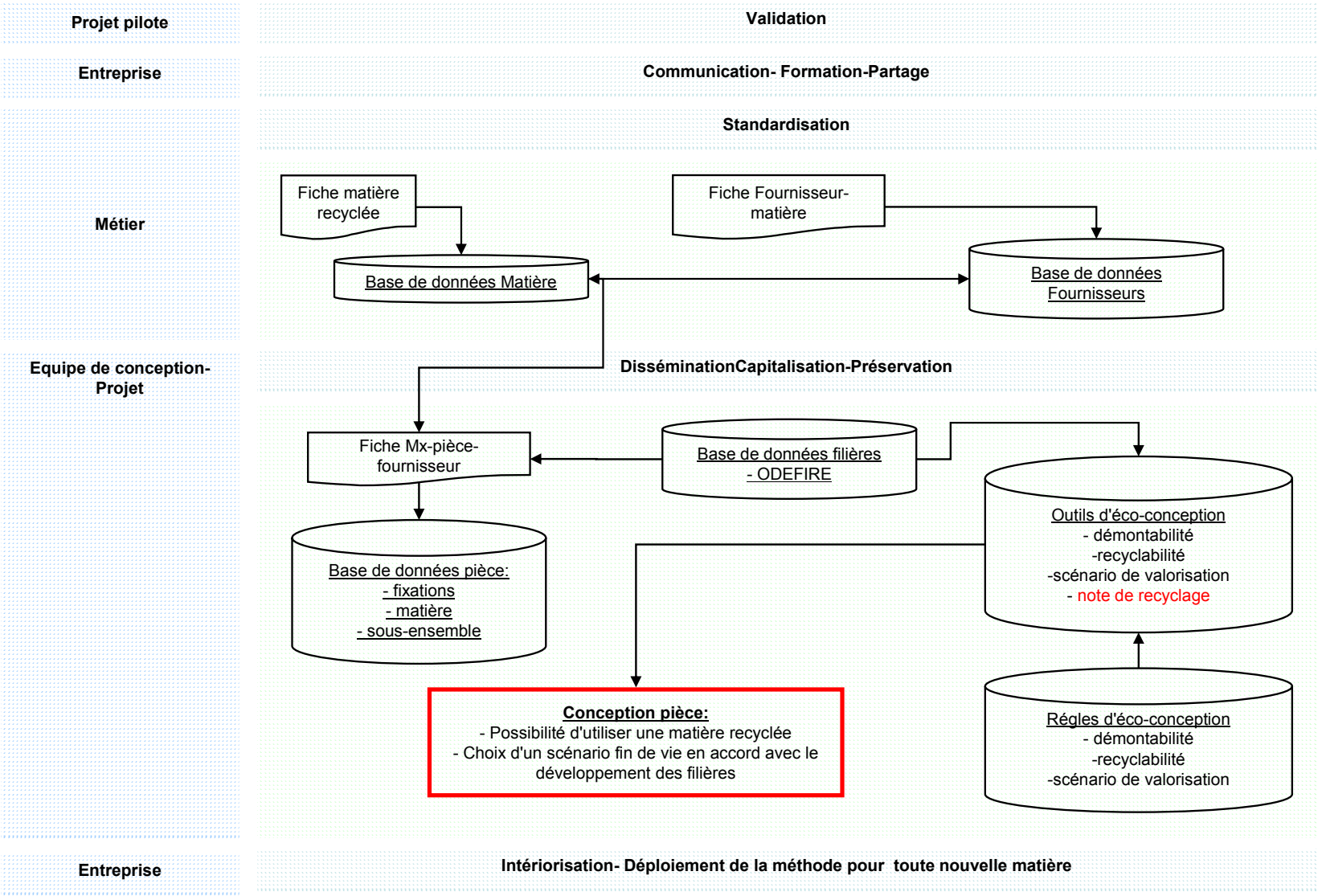


Figure 64: Standardisation de l'utilisation de matière recyclée par l'intégration de connaissances au sein de l'entreprise

II- Un outil d'aide à la décision pour le développement des filières vers un régime stable

II-1. Réponse aux hypothèses 1 et 2 : mise en place d'un modèle dynamique basée sur une vision systémique pour la mesure des performances et une aide à la décision pour l'émergence des filières

La non définition du cahier des charges et la non définition d'un marché rejoint à la nécessité de trouver de nouveaux marchés de qualité pour le développement de ces filières induisant de prendre en compte l'existence de ces marché dans la conception des produits des utilisateurs de matière comme les équipementiers automobiles. La possibilité d'intégrer ces marchés en conception fait le sujet de l'hypothèse 3 en réponse directe à la problématique 3 présentée ultérieurement. Car dit nouveau marché, dit possibilité de l'intégrer chez les utilisateurs et ceci de façon pérenne.

Cette identification passe par la simplification du système existant et la connaissance des spécificités des différents métiers impliqués dans le recyclage. Nous proposons de définir un référentiel d'étude, image simplifiée et adaptée à chaque filière, composé d'un ensemble d'acteurs les plus à même de répondre aux objectifs, besoins de la filière choisie et tenant compte des disparités au sein d'un même métier et entre les acteurs en amont et aval de la chaîne, et les spécificités de ces même acteurs.

L'analyse de la problématique a mis en évidence :

- le besoin de création de connaissances par le biais de la mesure des performances des filières pour aider les parties à prendre les décisions adéquates pour faire passer les filières de l'émergence à la stabilité,
- la nécessité d'utiliser une représentation dynamique et systémique des filières pour une analyse efficiente de leur fonctionnement.

Apporter une solution à ces deux thématiques passe par le développement d'un outil de modélisation des filières conduisant à la mesure des performances du système . Cet outil repose sur une vision matière de la filière, sur la prise en compte de la valeur attendue par chaque partie et sur la combinaison de niveaux d'analyse essentiels pour obtenir une vision systémique complète, combinaison non retrouvée dans les outils de la littérature. Ces niveaux sont (cf. Figure 65):

- le niveau organisationnel par la prise en compte des attentes des parties prenantes,
- le niveau process par la modélisation dynamique des flux (efficacité, flux, caractéristiques, coût, environnementaux),
- le niveau produit par la définition des cahiers des charges en entrée et en sortie (MPR),
- le niveau performances par la mesure des indicateurs de performance par le bais des paramètres de la modélisation dynamique.

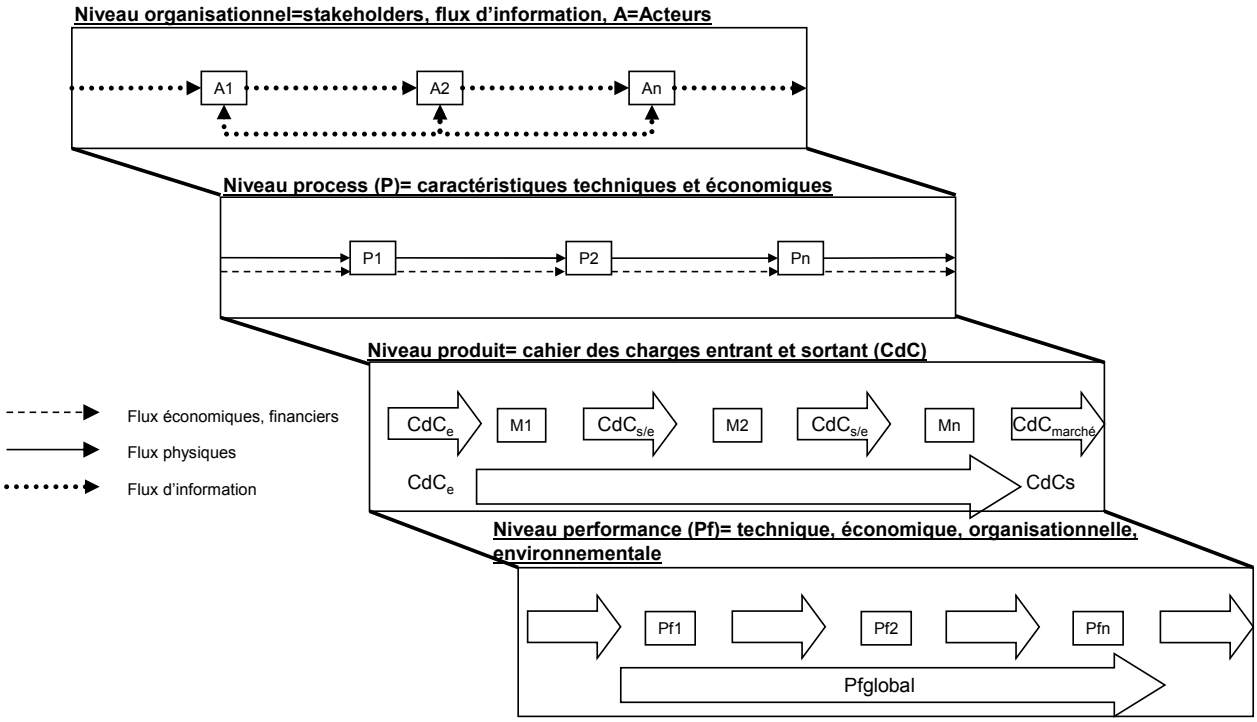


Figure 65: Niveaux d'analyse à prendre en compte dans l'outil d'analyse des performances des filières

II-2. ODEFIRE : Outil d'aide à la Décision pour l'Emergence des FIlières de REcyclage des MP

A partir des hypothèses énoncées précédemment, nous avons mis en place un outil d'aide à la décision, ODEFIRE, reposant sur l'élaboration d'un modèle dynamique et systémique d'une filière de recyclage et d'une simulation de flux entre les acteurs constitutifs de la filière, simulation représentative des interactions établies ou à établir entre chacun d'entre eux.

Cet outil est avant tout un pourvoyeur d'informations sur les performances des filières essentielles pour définir les voies de développement et permettre les passage des filières de l'émergence vers plus de stabilité.

Cet outil a été conçu pour l'analyse des filières de recyclage des MP issues de PFV automobiles à destination de la Supply Chain automobile.

II-2-1. Principe, cadre d'application

II.2.1.a. Objectifs

ODEFIRE sert à la fois à l'évaluation et l'amélioration de filières de recyclage existantes mais également à la mise en place d'une nouvelle filière basée sur les critères d'évolution définis dans le Chapitre 2. Il a été développé en réponse aux besoins des différentes parties prenantes. Cet outil représente donc à la fois:

- un outil d'information sur l'état des lieux des filières pour appuyer les choix de conception,
- un outil d'aide à l'émergence des filières par l'analyse des capacités de chaque acteur à atteindre les conditions « idéales » d'évolution de la filière modélisée,

- Un outil d'aide à l'intégration de l'utilisation de matière recyclée en conception (cf. I-2).

Notre outil permet de répondre à ces objectifs par le bais de (en réponse à leurs besoins) :

- la mesure des performances techniques et économiques de chaque acteur définies par des indicateurs de performance par le biais d'une modélisation dynamique des flux et l'utilisation d'une typologie de la filière choisie,
- les actions à mettre en œuvre pour répondre aux besoins de chaque partie prenante par la comparaison de performances attendues par les acteurs et celles atteignables.

Compte-tenu de l'implication multi-acteurs de l'outil, il doit être développé par une entité « neutre » pour éviter de favoriser un acteur par rapport à un autre. Ainsi le développement par un acteur de la filière pourrait aller à l'encontre des autres acteurs. Par exemple, le développement par un producteur conduirait au développement d'un système répondant aux objectifs réglementaires mais pas forcément un système stable répondant aux attentes de la société civile. Dans notre cas, l'outil a été développé dans le cadre de ce doctorat en collaboration avec divers acteurs (démolisseur, broyeur, recycleur…) de la filière et notamment un équipementier automobile.

II.2.1.b. Synoptique

Le synoptique des principales étapes de la construction d'ODEFIRE est présenté sur la Figure 66. Elles se répartissent en trois grandes phases :

- la création d'un système de référence au travers de la création d'une typologie des filières de recyclage des MP,
- la construction du modèle dynamique des flux à l'aide du logiciel WITNESS@[112],
- la mesure des performances pour la mise en place de l'aide à la décision pour le développement des filières.

Les étapes de construction de l'outil ont été définies en fonction des niveaux d'analyse, requis à l'étude des filières (cf. Figure 66).

[112] Logiciel de simulation dynamique des flux développé et commercialisé par Lanner Group

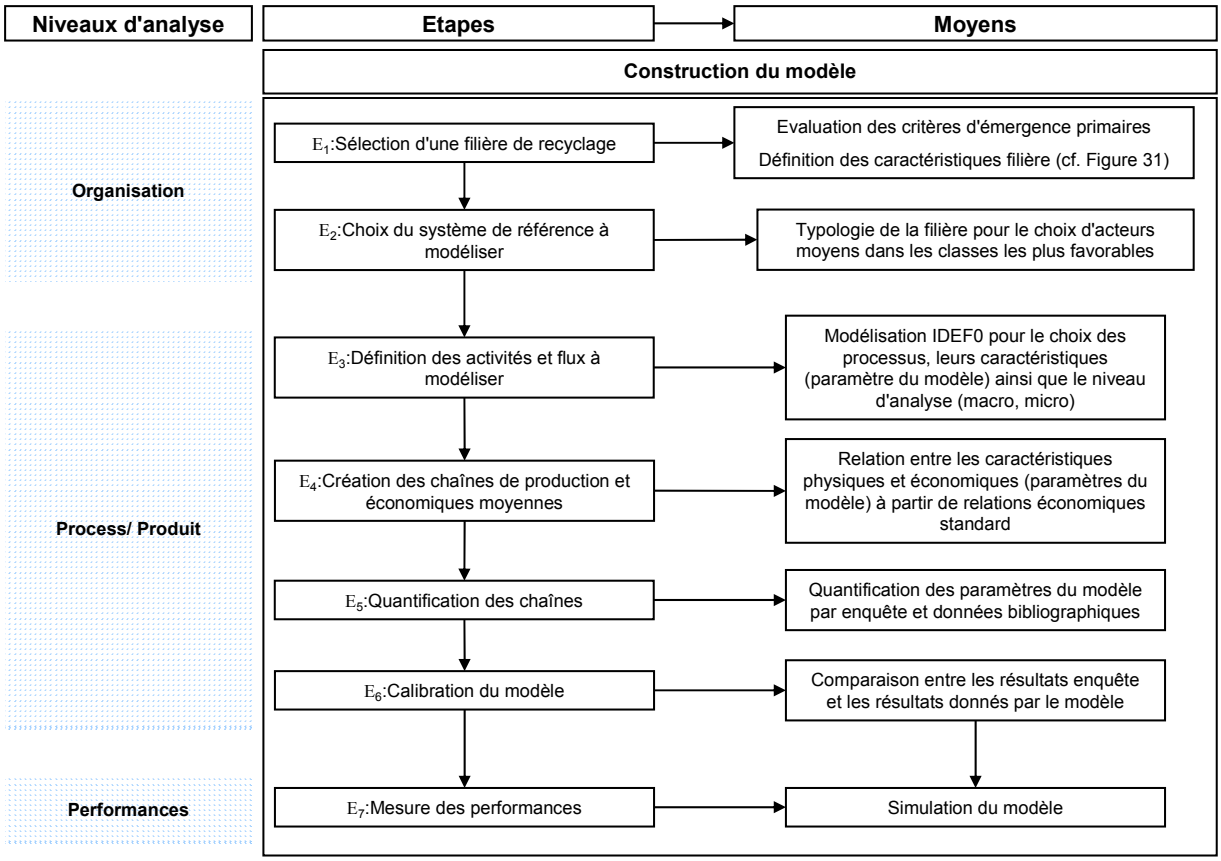


Figure 66: Synoptique de la construction d'ODEFIRE

II-2-2. Le système de référence d'analyse d'ODEFIRE: typologie de la filière

II.2.2.a. Définition et intérêt de la création d'une typologie

Les typologies sont aussi bien utilisées dans le domaine des organisations afin de déterminer leurs différents types les classer et les analyser que dans le cadre des évaluations environnementales des produits pour associer à chaque produit un profil environnemental, constituer des ensembles homogènes de produits selon des caractéristiques propres aux produits et utiliser la typologie à des fins d'analyse (Le Pochat 2005). Des différentes définitions existantes, (Le Pochat 2005) met en évidence que « la typologie est à la fois un domaine (étude, science), une action (action de classifier), et le résultat produit par cette action (la classification, le regroupement). »

De plus, une filière est une organisation, soit le résultat d'une réalité sociale, économique et technique composée de diverses entreprises- forme particulière de l'organisation selon (Livian 2001). Nous sommes donc confrontés à une organisation composée de multiples organisations spécifiques.

A partir de ces deux conclusions, nous proposons la définition suivante de la typologie d'une filière:

La typologie de filière est la démarche qui consiste à créer des classes d'acteurs aux caractéristiques communes dans un même métier par regroupement selon des critères précis et se différenciant des autres classes dans ce même métier sur une ou plusieurs caractéristiques.

Une classe est donc un ensemble d'acteurs d'un même métier dont les caractéristiques répondent aux critères attendus pour le bon fonctionnement d'une filière. Le terme métier regroupe l'ensemble

des acteurs ayant le même rôle et la même position dans la filière. La typologie est une typologie de macrostructure de la filière et non de microstructure.

L'objectif de notre typologie est un objectif d'analyse, comme énoncé par (Livian 2001), permettant de consolider l'analyse systémique que nous proposons pour l'évaluation des performances de ces systèmes. Notre but n'est pas tant de classer les filières mais d'analyser le tissu d'acteurs existant. La création d'une typologie de filières dans note cadre d'étude a pour objectif :

- une identification des acteurs les plus favorables (en terme de structure notamment) à l'évolution d'une filière en fonction des critères définis dans le chapitre 2,
- une simplification de la complexité du tissu existant permettant cependant de tenir compte des disparités au sein d'un même métier et entre les métiers: un des freins au développement,
- établir un référentiel simplifié des activités de la filière afin d'asseoir notre modélisation dynamique pour la mesure des performances.

A chaque filière est donc attribuée un profil d'acteurs (ensemble des classes sélectionnés pour chaque métier) les plus susceptibles de répondre aux critères d'évolution de la filière. La typologie a donc dans ce cas une action discriminante permettant le choix des classes les plus adaptées. (Le Pochat 2005) met en évidence qu'une typologie est un processus itératif reposant sur le principe de l'amélioration continue. Ainsi la typologie peut servir d'outil d'évolution des acteurs pour les faire progresser vers les classes choisies en fonction des critères d'une filière donnée.

Une filière est mise en place pour répondre tant à des objectifs réglementaires, environnementaux ou économiques. La typologie de filières amène à définir pour chaque filière un profil composés de classes d'acteurs - les plus à même de répondre à ces objectifs- certaines classes communes à plusieurs filières (cf. Figure 67).

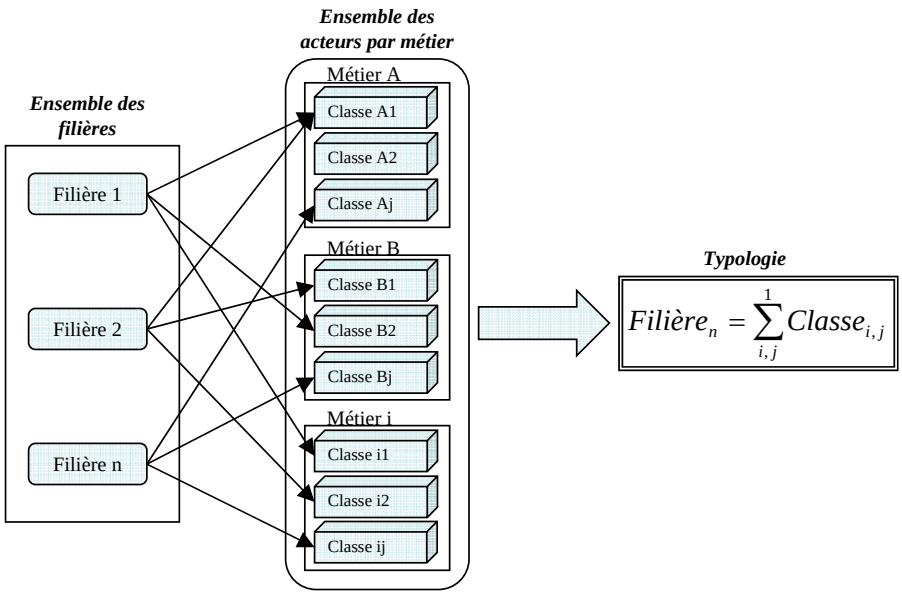


Figure 67: Définition de la typologie de filières, i=le métier considéré, j=le n° de la classe

II.2.2.b. Logique de création de la typologie

Le processus de création de la typologie repose sur une démarche simplifiée des méthodes proposées en analyse discriminante[113] comme les arbres de décision[114.] Dans notre étude, l'analyse est descriptive (cf. Figure 68).

La première étape est la définition des limites et objectifs de la filière (fonction objectif) étudiée, par exemple, quelles sont les capacités souhaitées pour cette filière en terme de volume, prix, à quel marché doit on répondre… Une fois la filière et la fonction objectif associée définies, les métiers et acteurs correspondants sont identifiés. Ce choix peut-être effectué à partir de la littérature sur les filières, ou des bilans réalisés par les organismes de suivi (type :ADEME).

Réaliser une classification nécessite l'identification de critères et caractéristiques permettant de qualifier chaque métier et d'aboutir à un regroupement des acteurs en fonction de caractéristiques choisies (variables discriminantes).

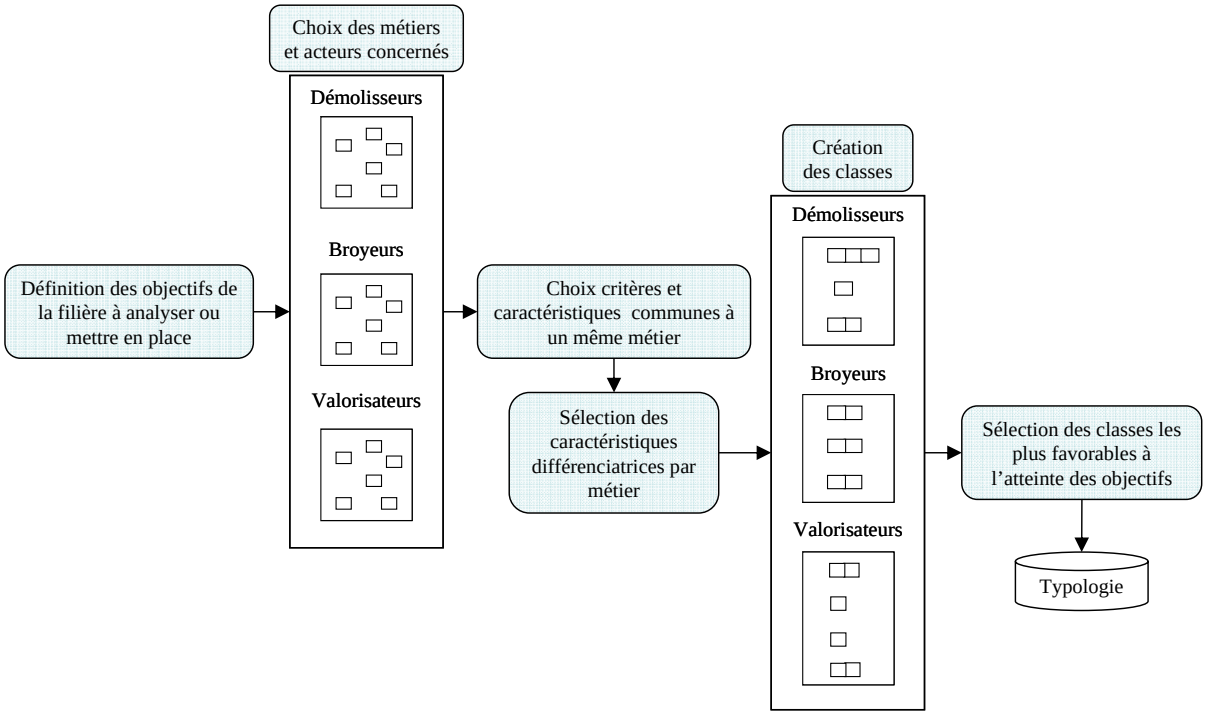


Figure 68: Etapes génériques de création de la typologie d'une filière de valorisation

Tout d'abord, une série de critères techniques, organisationnels, économiques et réglementaires, communs aux différents métiers est établie (Ci,x) (cf. Figure 69). Ensuite pour un métier, une série de caractéristiques communes aux acteurs de ce métier et associées à chacun des critères est définie. Leurs valeurs sont spécifiques à chaque métier mais également à chaque acteur. (Ci,x, Cai,n). Parmi cette liste de caractéristiques, des caractéristiques différenciatrices sont retenues. Nous appelons caractéristique différenciatrice (Cadi,m) toute caractéristique dont la valeur permet de regrouper les acteurs d'un même métier dans des classes différentes. Ainsi la création des classes est basée sur quelques caractéristiques différenciant un ensemble d'acteurs d'un autre ensemble d'un même métier

[113] Technique statistique qui vise à décrire, expliquer et prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis (classes) d'un ensemble d'observations (individus, exemples…) à partir d'une série de variables prédictives. Théorie de l'évolution

par rapport à leurs capacités à répondre à la fonction objectif. Une hiérarchie est donc établie entre les caractéristiques différenciatrices les classant des pénalisantes aux moins discriminantes.

La première classe créée est le groupe d'acteurs le moins favorable par rapport à la fonction objectif. La dernière classe obtenue est par conséquent le groupe d'acteurs le plus à même compte-tenu de leur structure, de leurs capacités techniques et économiques d'être favorables au développement de la filière. Les classes finales sont les classes parmi lesquelles les acteurs de référence pour la modélisation seront choisis.

Il est important de noter que les groupes créés au fur et à mesure ne sont pas exclus définitivement. La typologie est créée pour une filière donnée à une année t. En fonction du nombre d'acteurs de la classe finale, si celui-ci ne correspond pas au dimensionnement requis pour un bon équilibre technico économique des voies d'évolution devront être identifiées pour faire progresser ceux de la classe précédente. Ce sont des systèmes dynamiques en constante évolution.

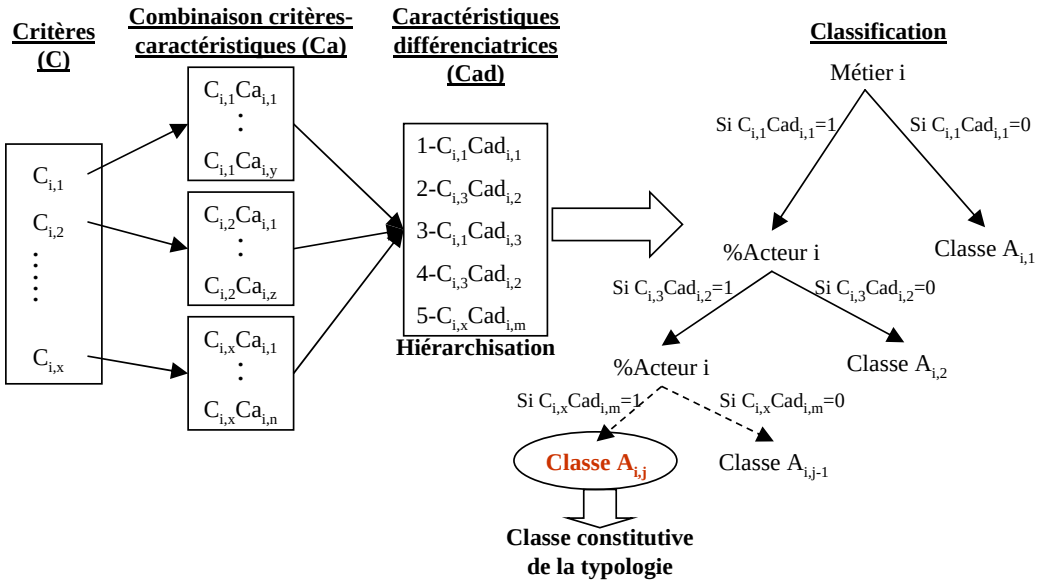


Figure 69: Processus de création des classes pour un Métier i à partir des caractéristiques différenciatrices. x=le nombre de critères, y,z,n=le nombre de caractéristiques par critère, m=le nombre de caractéristiques différenciatrices, 1= Valeur la plus favorable, respect de la valeur 0= Non respect, valeur la plus faible

II.2.2.c. Choix des critères et caractéristiques

Le choix des critères et de leurs caractéristiques (variables descriptives) est une étape délicate et cruciale de la création de la typologie. Ainsi leur pertinence et exhaustivité vont être à l'origine de la validité de la typologie obtenue. Pour accéder à ce résultat, plusieurs sources d'informations (propres ou non au monde du recyclage) théoriques et expérimentales ont été utilisées, les principales sont :

- pour les critères et caractéristiques communes:
    - le formalisme de représentation des organisations, ses composantes et les typologies d'organisation proposées par des auteurs comme (Livian 2001, Mintzberg 1998)

[114] Technique pour répartir une population d'individus en groupes homogènes, selon un ensemble de variables discriminantes en fonction d'un objectif fixé et connu. Elle est notamment utilisée dans l'aide à la décision et data mining.

- les travaux de recherche conduit sur l'émergence des systèmes industriels et les critères associés (cf. Chapitre 2)

- pour les caractéristiques différenciatrices- spécifiques à chaque filière- et la détermination de leur valeur
  - la synthèse d'études sur les filières,
  - réalisation d'enquêtes auprès d'acteurs de la filière (cf. Annexe 18),

De ces analyses, quatre grandes catégories de critères aussi bien qualitatifs que quantitatifs sont retenues : des critères techniques, des critères économiques, des critères organisationnels, des critères réglementaires. Les critères techniques, économiques et réglementaires ont été explicités dans les chapitres précédents. Les critères organisationnels ont été définis à partir du formalisme utilisé par Livian (Livian 2001) (cf. Figure 70).

Les composantes constitutives d'une organisation sont :

- la composante humaine regroupe entre autre les compétences disponibles, les attitudes au travail, les appartenances revendiquées…
- la composante physique englobe des éléments liés : à la distribution dans l'espace (localisation, flux de matières et d'énergie…) et au matériel (équipements techniques, bâtiments).
- la composante système de gestion. Il peut être lui-même décomposé en 4 grandes familles : les systèmes d'objectif, les systèmes de contrôle, systèmes d'information et de communication, les systèmes d'évaluation.
- la composante structure assure la stabilité de l'organisation ainsi qu'une relation entre les éléments.

Un des nombreux facteurs explicatifs d'une structure présentés par Livian (Livian 2001) est l'effet de taille, facteur directement impliqué dans le statut actuel des entreprises de la valorisation. Dans les différentes structures de PME relatées par l'auteur, ces entreprises sont à l'intermédiaire d'une entreprise artisanale et d'une PE centralisée caractérisées par une petite taille, une différenciation des fonctions faible, une différenciation des rôles direction- salariés de faible à forte selon l'acteur, et une formalisation faible. Ce sont autant d'éléments qui viennent s'ajouter aux caractéristiques générales de ces entreprises.

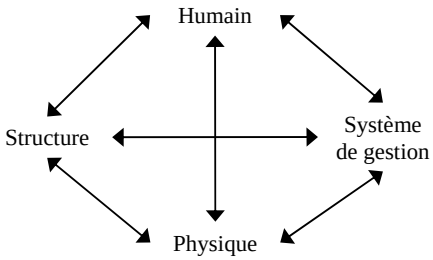


Figure 70: Les quatre composantes d'une organisation selon (Livian 2001)

La combinaison de ces diverses analyses et éléments de la littérature donne la liste des critères et caractéristiques retenus pour décrire les différents métiers présentée dans le Tableau 24.

Catégorie	Critères	Caractéristiques
Qualitatif		
Légal/environnemental	$C_{i,1}$=Réglementation	$C_{i,1}Ca_{i,1}$=Réglementation ICPE
		$C_{i,1}Ca_{i,2}$=Certification qualicert
Organisationnelle	$C_{i,2}$=Coopération	$C_{i,2}Ca_{i,1}$=Partenariats avec acteur amont ou aval
		$C_{i,2}Ca_{i,2}$=Contrats sur les entrants, sortants
Organisationnelle	$C_{i,3}$=Activités	$C_{i,3}Ca_{i,1}$=Activités liées au recyclage
		$C_{i,3}Ca_{i,2}$=Autres activités, diversité
Organisationnelle	$C_{i,4}$=Ressources Humaines	$C_{i,4}Ca_{i,1}$=Compétences
		$C_{i,4}Ca_{i,2}$=Diversité des métiers
Quantitatif		
Technique/économique	$C_{i,5}$=Produits traités	$C_{i,5}Ca_{i,1}$=Caractéristiques entrants= volume, qualité, prix
		$C_{i,5}Ca_{i,2}$=Caractéristiques sortants= volume, qualité, prix
Organisationnelle	$C_{i,6}$=Structure de l'entreprise	$C_{i,6}Ca_{i,1}$=Taille de l'entreprise
Technique/organisationnelle/ économique	$C_{i,7}$=Ressources matérielles	$C_{i,7}Ca_{i,1}$=Capacité de traitement
		$C_{i,7}Ca_{i,2}$=Efficacité
		$C_{i,7}Ca_{i,3}$=Coût de revient

Tableau 24: Exemples de critères et des caractéristiques associées

Le choix d'une caractéristique différenciatrice s'appuie sur sa capacité à maximiser les aptitudes (réglementaires, techniques, économiques) d'un acteur pour répondre à la fonction objectif. Au sein de chaque métier, il existe des classes qui se différencient par les procédés qu'elles utilisent, les flux qu'elles traitent, les caractéristiques des produits obtenus (volume, qualité, coût). Cette partie est la plus délicate à réaliser puisqu'elle nécessite une connaissance précise du domaine et la méthode de choix repose sur une analyse d'expertise. Le processus de réalisation d'une nouvelle typologie d'une autre filière redémarre au niveau des caractéristiques différenciatrices.

Les opérateurs économiques intervenant dans la création de la typologie d'une filière de recyclage des MP sont les démolisseurs, les broyeurs et les recycleurs. La création de classes ne s'avère pas pertinente pour le dernier détenteur et le marché, car non forcément spécifique à une filière donnée. Ils entrent en compte dans le cahier des charges entrée et sortie de la filière.

II.2.2.d. Création de la typologie de la filière de recyclage MP issus de produits automobiles (TypPPauto)

Nous avons utilisé la démarche proposée pour créer la typologie de la filière de recyclage des MP issus de l'automobile (TypPPauto) (cf. Figure 71). Cette typologie est un constituant de base de notre modélisation (cf. II-2-3)

Les principaux métiers identifiés dans la littérature pour cette filière sont les démolisseurs ou déconstructeurs, les broyeurs de MP et les recycleurs. Pour le métier des broyeurs, nous avons pris en compte uniquement les broyeurs de pièces en MP.

Les principales caractéristiques de ces métiers et les caractéristiques identifiées comme différenciatrices sont résumées dans le Tableau 25 et leur processus de choix explicité dans l'Annexe 11.

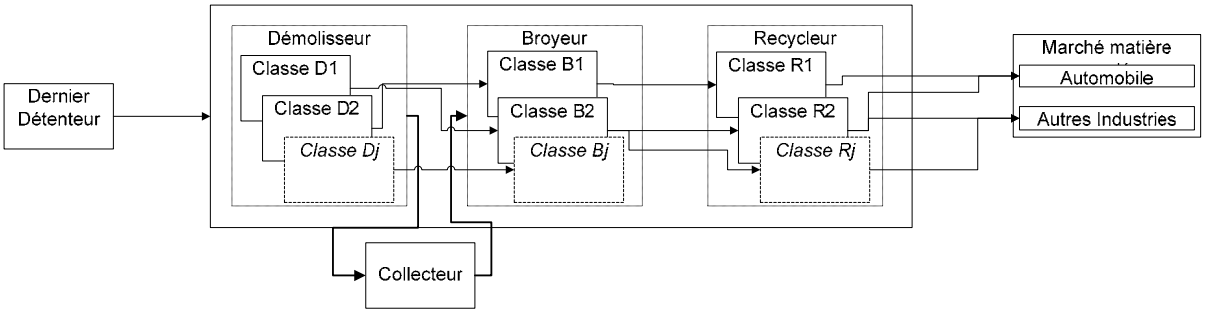


Figure 71: Typologie de la filière de recyclage des MP issus de composants automobiles- TypPPauto

Caractéristiques	Démolisseurs	Broyeurs	Recycleurs
$C_{i,1}Ca_{i,1}$=Réglementation ICPE	$\mathbf{C_{D,1}Cad_{D,1}}$		
$C_{i,1}Ca_{i,2}$=Certification Qualicert	$\mathbf{C_{D,1}Ca_{D,2}}$		
$C_{i,2}Ca_{i,1}$=Partenariats avec acteur amont ou aval			
$C_{i,2}Ca_{i,2}$=Contrats sur les entrants, sortants			
$C_{i,3}Ca_{i,1}$=Activités liées au recyclage			
$C_{i,3}Ca_{i,2}$=Autres activités, diversité			
$C_{i,4}Ca_{i,1}$=Compétences			
$C_{i,4}Ca_{i,2}$=Diversité des métiers			
$C_{i,5}Ca_{i,1}$=Caractéristiques entrants= volume, qualité, prix		$\mathbf{C_{B,5}Cad_{B,1}}$ $\mathbf{C_{B,5}Cad_{B,2}}$	$\mathbf{C_{R,5}Cad_{R,1}}$ $\mathbf{C_{R,5}Cad_{R,2}}$
$C_{i,5}Ca_{i,2}$=Caractéristiques sortants= volume, qualité, prix			
$C_{i,6}Ca_{i,1}$=Taille de l'entreprise			
$C_{i,7}Ca_{i,1}$=Capacité de traitement			$\mathbf{C_{R,7}Cad_{R,3}}$
$C_{i,7}Ca_{i,2}$=Efficacité			
$C_{i,7}Ca_{i,3}$=Coût de revient			

Tableau 25: Carcatéristiques générales et différenciatrices des différents métiers de la filière

La construction des classes à partir des caractéristiques différenciatrices est présentée sur la Figure 72.

Pour les démolisseurs et le broyeurs, 3 classes ont été créées et 4 pour les recycleurs. La typologie de la filière est donc constituée de 10 classes d'acteurs différentes. Les acteurs choisis pour la modélisation appartiennent aux classes représentées en rouge sur la Figure 72. Il est important de noter que seuls deux recycleurs répondent à la fonction objectif sur le territoire français, la marge d'évolution est grande.

La répartition sous forme de classes des acteurs des métiers de la valorisation délivre une image relativement exhaustive des capacités du tissu industriel permettant une meilleure compréhension de son fonctionnement et de la répartition des flux dans le système.

II-2-3. Construction de l'outil dynamique

La construction du modèle dynamique de la filière, première étape à la réalisation d'ODEFIRE, est effectuée à l'aide du logiciel de simulation WITNESS$^{@}$, logiciel utilisé notamment pour le dimensionnement d'ateliers de production sur la base de la simulation des flux physiques entre les diverses étapes de production. Dans un premier temps nous présenterons, les étapes génériques de la construction du modèle, démarche applicable quelque soit la filière de recyclage et le produit et

dans un deuxième temps, le modèle construit pour la filière des MP issus de l'automobile et particulièrement le PP.

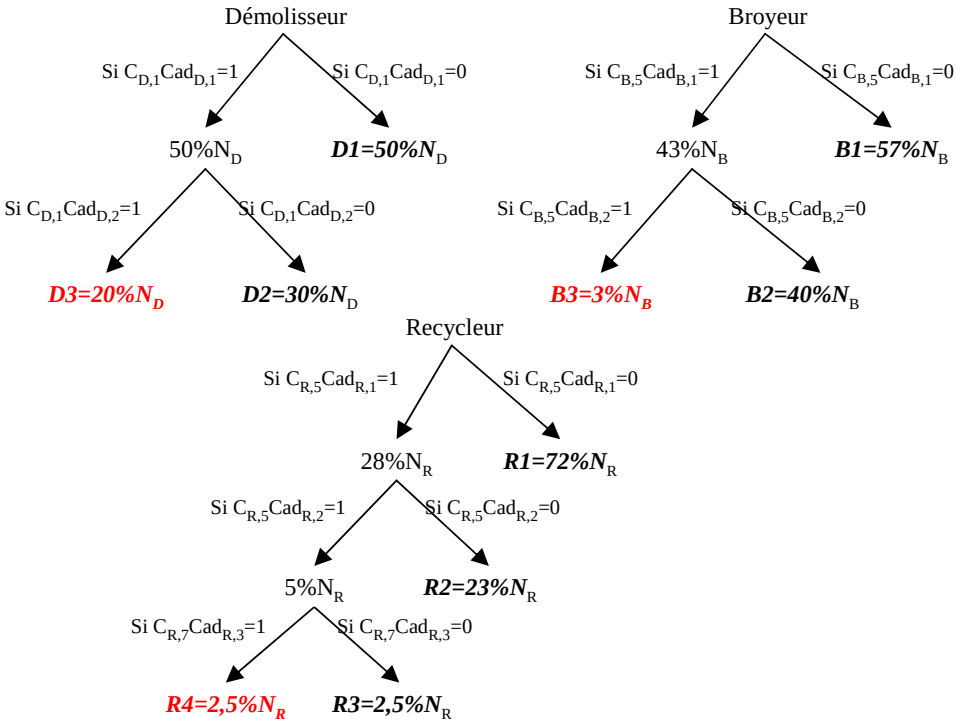


Figure 72: Création des classes pour la filière de recyclage des MP issus de composant automobile, N_D (Nombre de Démolisseurs)=2000 entreprises, N_B (Nombre de Broyeurs)=61 entreprises, N_R (Nombre de Recycleurs)=83 entreprises [ADE, 04].

II.2.3.a. Le choix de la filière à modéliser

E1 : Sélection d'une filière de recyclage

Avant toute création de modèle, il est impératif de définir les limites du système à modéliser pour établir un modèle simple le plus proche de la réalité.

La construction de notre outil concerne :

- les produits complexes à longue durée de vie dans un premier temps les VFV,
- les marchés de composants à haute valeur ajoutée, de préférence en closed loop comme les pièces de structure automobiles,
- le recyclage des MP à partir de scénario démontage,
- toutes les parties prenantes.

Même si la démarche de construction de l'outil se veut générique à toutes les filières de recyclage de MP en France, certaines caractéristiques doivent être affinées selon des critères précis pour la mise en place du modèle:

- la matière : nature de la résine à recycler, sa place sur le marché, son volume,
- les acteurs : nature, nombre, structure.

La matière que nous avons choisie pour l'établissement de notre modèle est le PP pour les raisons suivantes:

- une des résines les plus utilisées dans l'industrie automobile (40-50% de MP utilisées),
- un marché de matière vierge les plus volumineux (cf. chapitre 1),
- des techniques de recyclage industrielles,
- une possibilité pour le recyclage d'atteindre des économies d'échelle compte-tenu du volume de matière potentiellement disponible.

La filière sélectionnée (cf. Figure 73) pour la mise en place de l'outil est donc la filière de recyclage du PP issu de produits automobiles fin de vie en France par scénario démontage et broyage impliquant toutes les parties prenantes de cette chaîne, une filière répondant aux attentes du marché de l'équipementier automobile*.*

Le modèle a donc pour objectif de définir le dimensionnement de la filière en terme technique, économique et structurel pour augmenter les volumes actuellement récupérés et leur qualité pour atteindre la demande automobile dans un premier temps et de définir les conditions de stabilité de chacun des acteurs dans un deuxième temps.

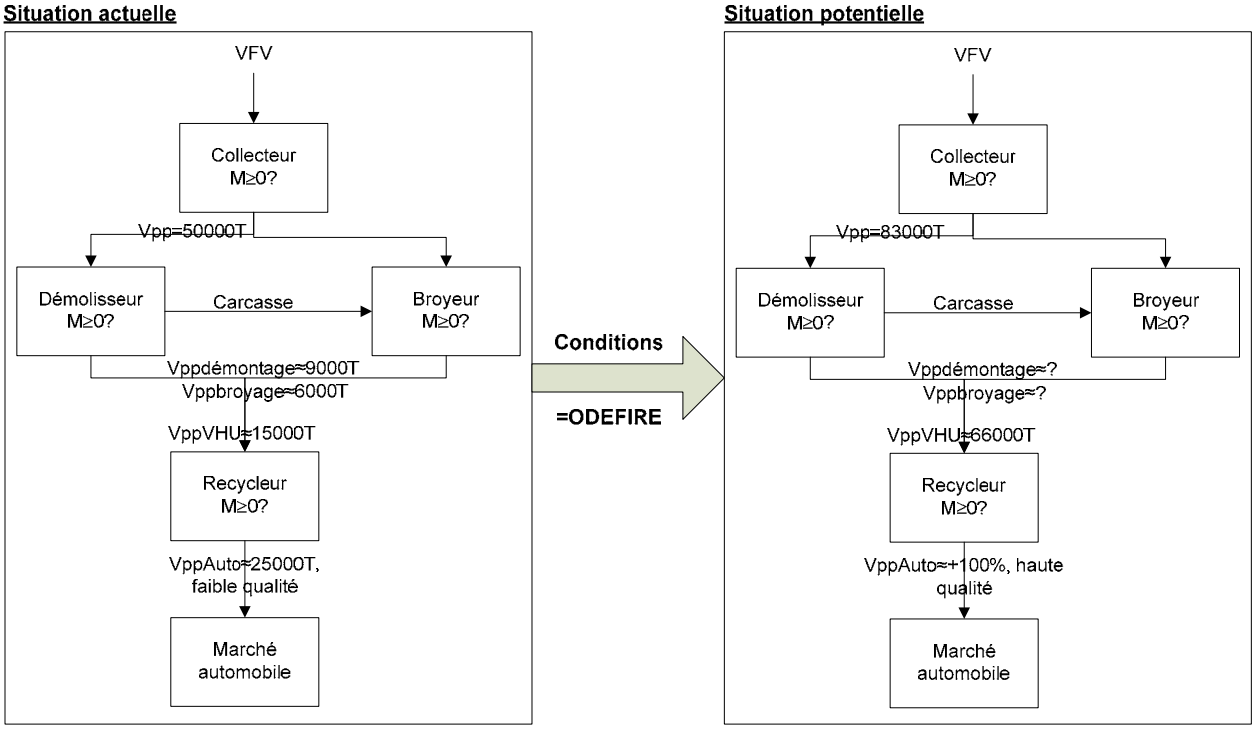


Figure 73: Bilan des caractéristiques de la filière sélectionnée: la filière de recyclage du PP issus de produits automobiles fin de vie en France

E2 : Choix du système de référence en fonction de la typologie

Le choix du système de référence soit les acteurs moyens représentatifs des différents métiers impliqués dans la filière sélectionnée est réalisé à partir de la création de la typologie de cette même filière, dans notre cas TypPPAuto. Ces acteurs sont choisis à partir des classes créées D3, B3, R4 (cf. Figure 72). Il en ressort que peu d'acteurs répondent aux exigences de la filière choisie Dans chacune de ces classes, nous avons sélectionné des acteurs moyens régionaux comme référentiel de base pour le modèle.

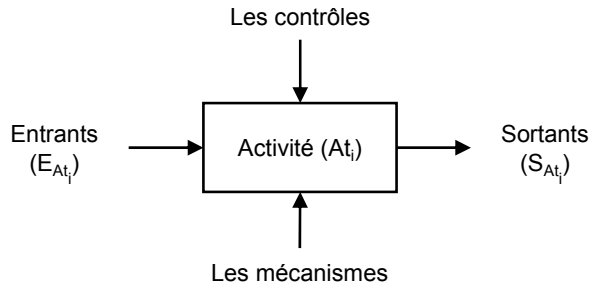
Les résultats de TypPPAuto mettent également en exergue que le scénario le plus favorable pour atteindre le marché choisi est le scénario démontage. Ainsi les matières récupérées par le tri des résidus de broyage présentent pour le moment une qualité insuffisante pour atteindre les propriétés des pièces de structure. Le recycleur en France qui récupère les MP issues de résidus de broyage à un dimensionnement qui assure la quantité mais ne se destine pour le moment à des marchés de niche de haute qualité.

La filière sélectionnée pour la mise en place du modèle : la filière de recyclage du PP issu du démontage de pièces automobiles comme les pare-chocs (FiRePPAutoPC) présente une organisation incluant dans un premier temps un nombre restreint d'acteurs moyens, système de référence de notre modèle.

II.2.3.b. Activités/ process et flux constitutifs du modèle

Modéliser un système implique de définir ses composantes interdépendantes (flux, activités..) pour répondre à un objectif donné dans des conditions d'utilisation données. Les activités modélisées dans le modèle proposé sont les activités principales ou processus associés au système choisi. Cette opération fait l'objet de l'étape : E3 :définition des activités et flux à modéliser. La description des activités à modéliser, de leurs composantes sont réalisées à l'aide d'un formalisme de modélisation issu du formalisme IDEF0[115] (cf. Figure 74).

Ce formalisme permet une modélisation de l'entreprise d'un point de vue fonctionnel axé sur la description de ces activités. Il conduit à la compréhension du fonctionnement des activités et d'en déduire les spécifications des actions techniques ou des informations essentielles à une conduite optimale. Dans le cadre de notre thèse, ce formalisme peut nous permettre au travers de la description des activités de recyclage d'identifier les caractéristiques clés des composantes à modéliser pour obtenir un modèle de base de la filière conduisant à la mesure des performances.
Les composantes d'une activité sont décrites sur la Figure 74.



• Les entrants : les objets (matières ou informations) consommés ou transformés par l'activité.
• Les sortants : les objets consommés ou issus de la transformation.
• Les contrôles : les informations nécessaires au bon déroulement de l'activité mais qui ne subissent pas de modification (règles, standards, réglementations…).
• Les mécanismes : les moyens (ressources humaines et matérielles) nécessaires à l'exécution de l'activité.

Figure 74 : Modèle d'une activité et de ses composantes par le formalisme IDEF0

Ce formalisme facilite la définition du niveau de détail des activités essentielles à la construction du modèle et au choix du niveau de modélisation nécessaire pour atteindre les objectifs attendus par le modèle. Il permet de décrire l'activité dite principale en activités dites secondaires qui permettent de mieux cibler les manques et opportunités d'amélioration dans l'activité. Ceci aboutit à l'obtention d'une définition de niveaux du plus général au plus détaillé. (cf. Figure 75).

[115] Integrated definition methodology : méthode conçue pour modéliser les décisions, les actions et les activités d'un système ou d'une organisation notamment l'entreprise. Elle est dérivée du langage graphique SADT (Structured Analysis and Design Technique)

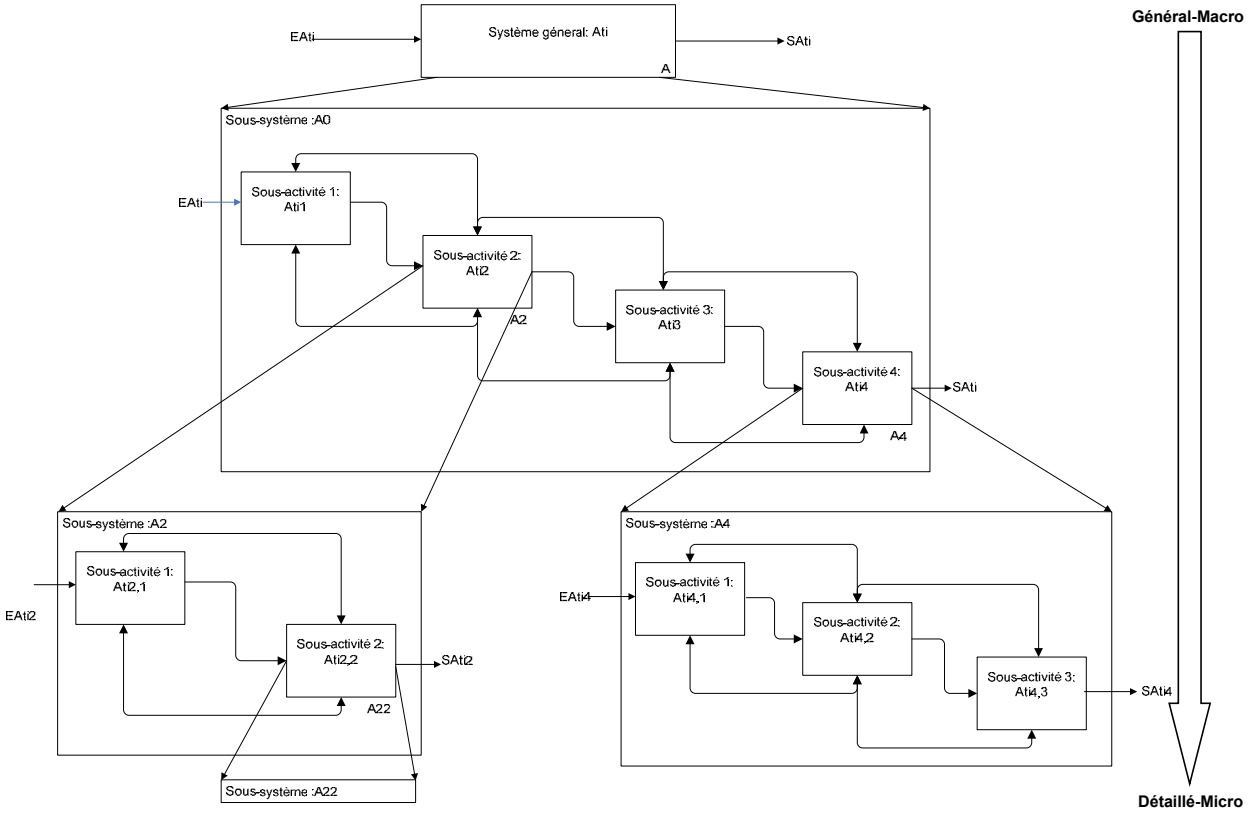


Figure 75: Description des niveaux de modélisation d'un système et des activités associées

La forme du modèle choisi pour le système étudié repose sur une vision de la filière comme une succession d'activités constitutives d'une unique entreprise dont l'objectif est de transformer un PFV pour créer une valeur et obtenir une matière correspondant aux attentes d'un marché donné. Chaque activité est assurée par un acteur donné du système. Compte-tenu de cette hypothèse et des bases du formalisme IDEF0, nous proposons le formalisme suivant (cf. schéma sans le niveau de détail):

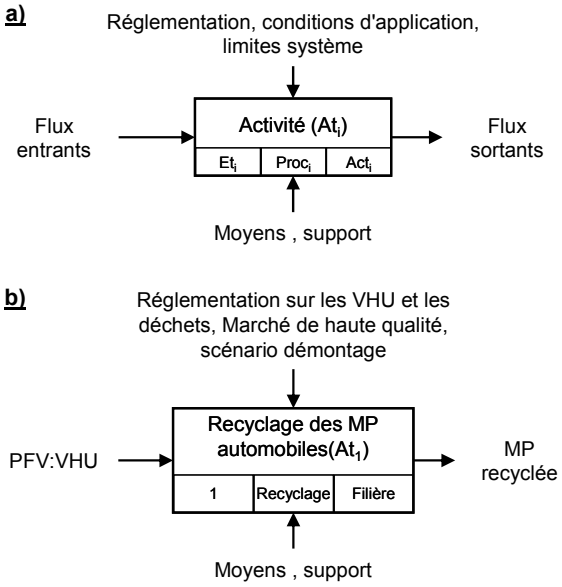
- les activités : chaque étape de la filière de recyclage associée à un acteur donné,
- Les entrants : les flux physiques, économiques et environnementaux,
- Les sortants : les flux physiques, économiques et environnementaux transformés par chaque activité composant le système (ex : la matière recyclée destinée à un marché donnée),
- Les contrôles : la réglementation, les informations techniques nécessaires (ex : manuel de démontage), les conditions d'application,
- Les mécanismes : le personnel, les caractéristiques techniques des procédés.

II.2.3.c. Création des chaînes de production et économiques : Création du modèle sous WITNESS@

Les éléments modélisés

Chaque activité est modélisée à l'aide de différentes caractéristiques (cf. Figure 76):

- les données relatives au produit traité : les flux physiques,
- les données relatives au process : la chaîne de production,
- les données relatives aux coûts : la chaîne économique.



• Etᵢ :n° de l'étape lié à la description de l'activité.
• Procᵢ : le procédé ou outillage utilisé pour réaliser Atᵢ.
• Actᵢ: l'acteur ou système qui réalise Ati, acteur choisi dans les classes obtenues par la typologie.
• Les activités : chaque étape de la filière de recyclage associé à un acteur donné (activité globale ou détail des procédés constitutifs de l'activité).
• Les flux entrants : les flux physiques, économiques et environnementaux dont les caractéristiques sont définies dans le paragraphe suivant.
• Les flux sortants : les flux physiques, économiques et environnementaux transformés par chaque activité composant le système.
• Les limites du système et conditions d'application: la réglementation, informations techniques nécessaires (ex : manuel de démontage), la filière de recyclage automobile, insertion dans un marché de haute qualité (cf définition filière).
• Les moyens, support : le personnel, les caractéristiques techniques des procédés (cf tableau)

Figure 76: a) Composantes du formalisme utilisé pour la construction de modèle de filière de recyclage basé sur IDEF0 (adaptable à tous type de PFV et de MP). b) Composantes du modèle de la filière de recyclage des MP automobiles (seule la composante produit des flux matière est représentée).

Le modèle WITNESS@

Les données relatives au produit/article

Pour chaque activité, chaque acteur moyen, les flux physiques sont quantifiés ou tout du moins caractérisés. Les quantitatifs sont modélisés et évalués et les qualitatifs sont utilisés pour l'interprétation des résultats. Les flux physiques sont directement liés au produit traité. Le terme produit regroupe tout aussi bien le PFV, que la matière sous ces différentes formes tout au long du processus de recyclage.

Chaque flux produit ou matière est défini par un ensemble de caractéristiques résumées dans le Tableau 26. Le produit traité est représenté sous WITNESS@ sous la forme d'un article (cf. Figure 77) dont les caractéristiques sont définies par des attributs. Pour définir de façon générique, les caractéristiques des flux, la notation suivante est utilisée :

Soit $F_{x,A,i,j}$

avec F= la caractéristique du flux, Q=quantité, V=volume, Ql=Qualité….. (cf. Tableau 26)
X=E (entrant) ou S (sortant)
A=acteur ou activité auquel appartient le flux, D=démolisseur, B=broyeur, R=recycleur…
I=le produit associé à la caractéristique
J= origine pour les entrants et destination pour les sortants

La caractéristique totale associée au flux est quant à elle exprimée par :

$$F_{x,A} = \sum F_{x,A,i,j}$$

Par exemple, le volume de PP issus de pare-chocs provenant de démolisseurs et à destination directe des recycleurs sera exprimé de la façon suivante: $V_{R,E,PPpare-choc,D}$.

Flux	Caractéristiques	Acronymes
Physiques pour un produit ou matière	Poids	$Po_{x,A,i,j}$
	Quantité	$Q_{x,A,i,j}$
	Volume	$V_{x,A,i,j}$
	Qualité	$Ql_{x,A,i,j}$
	Prix d'achat	$PA_{x,A,i,j}$
	Prix de vente	$PV_{x,A,i,j}$
Chaînes de production pour un procédé ou activité en fonction d'un produit ou matière	Rendement	$Re_{A,Pr,i,j}$
	Maintenance	$Ma_{A,Pr,i,j}$
	Temps de cycle	$Tc_{A,Pr,i,j}$
	Taux de panne	$Txp_{A,Pr,i,j}$
	Temps d'utilisation	$Tu_{A,Pr,i,j}$
	Nombre de salariés sur la ligne	$NS_{A,Pr,i,j}$
	Temps de travail par salarié	$TTS_{A,Pr,i,j}$
Chaîne économique pour un procédé ou activité en fonction d'un produit ou matière	Coût d'utilisation	$Cu_{A,Pr,i,j}$
	Coût de production	$Cp_{A,Pr,i,j}$
	Coût de revient	$Cr_{A,Pr,i,j}$
	Marge	$M_{A,Pr,i,j}$
	Coût d'élimination	$Ce_{A,Pr,i,j}$
	Coût administratif	$Cad_{A,Pr,i,j}$
	Coût matériel	$Cm_{A,Pr,i,j}$
	Frais généraux	$FG_{A,Pr,i,j}$
	Coût de collecte	$Cc_{A,Pr,i,j}$
	Charges salariales	$CS_{A,Pr,i,j}$
	Chiffres d'affaires	$CA_{A,Pr,i,j}$
	Coût d'achat	$Cach_{A,Pr,i,j}$
	Somme de ventes	$Sv_{A,Pr,i,j}$

Tableau 26: Caractéristiques génériques des différents flux à décliner en fonction de l'acteur, du procédé et de la matière ou produit considéré

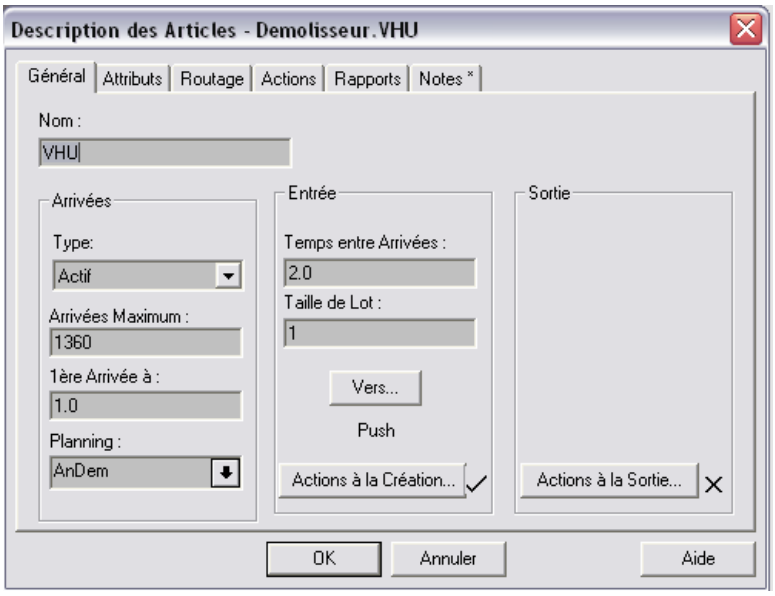


Figure 77: Article sous WITNESS@

Les données relatives au process : la chaîne de production

Les flux physiques sont transformés au travers des différentes activités des acteurs en fonction de caractéristiques spécifiques afin d'obtenir un produit correspondant au marché.

Les différents procédés constitutifs de chaque activité ont des caractéristiques propres. Elles sont résumées dans le Tableau 26. Les éléments de modélisation des procédés sont des machines présentées sous la Figure 78. Un grand nombre d'éléments peuvent être paramétrés, notamment toutes les modifications opérées par le procédé sur les caractéristiques des flux que ce soit la qualité,

la quantité, la forme par exemple le passage à une forme broyée, recyclée… Ces modifications sont paramétrées dans les différentes actions des machines.
L'association des caractéristiques des flux avec les procédés représentent la chaîne de production ou chaîne des machines sous WITNESS@. La notation utilisée pour les paramètres des procédés est la suivante :

$$P_{A,\mathrm{Pr},,i,j}$$

Avec P=paramètre du procédé (Re=rendement, Txp=Taux de panne, …, cf. Tableau 26) A=acteur ou activité auquel appartient le flux, D=démolisseur, B=broyeur, R=recycleur… Pr=le procédé I=le produit transformé par le procédé/activité J= origine pour les entrants et destination pour les sortants

Par exemple, le rendement de l'activité de broyage pour les carcasses en provenance du démolisseur s'écrit :

$$\mathrm{Re}_{B,Broyage,carcasse,D}$$

La valeur des paramètres dépendent de la nature du produit et sont donc directement liées à F $P_{A,\mathrm{Pr},,i,j} = f(F_{x,A,i,j})$.
C'est la chaîne de production.

Les données relatives aux coûts : la chaîne économique

Les flux et les procédés associés sont également caractérisés par des données économiques. Elle est essentielle au suivi des filières comme nous le verrons ci-dessous et leur valeur est directement liée aux caractéristiques des différents acteurs tant en terme du produit traité qu'en terme de procédés. Les données économiques sont modélisées par des variables compte-tenu de leur dépendance vis-à-vis de différents paramètres et de leur variabilité dans le temps. Certaines sont associées au produit traité d'autres aux procédés. Les variables économiques sont notées de la façon suivante :

$$C_{A,\mathrm{Pr},i,j}$$

Avec C=variable économique (CP=coût de production, CR=coût de revient, PA=prix d'achat, PV=Prix de vente, M=Marge… cf. Tableau 26) A=acteur ou activité auquel appartient le flux, D=démolisseur, B=broyeur, R=recycleur… Pr=le procédé I=le produit transformé par le procédé/activité J= origine pour les entrants et destination pour les sortants

Par exemple le coût de revient pour le démolisseur du démontage des pare-chocs à destination du recycleur se note :

$$CR_{D,Démontage,pare-choc,R}$$

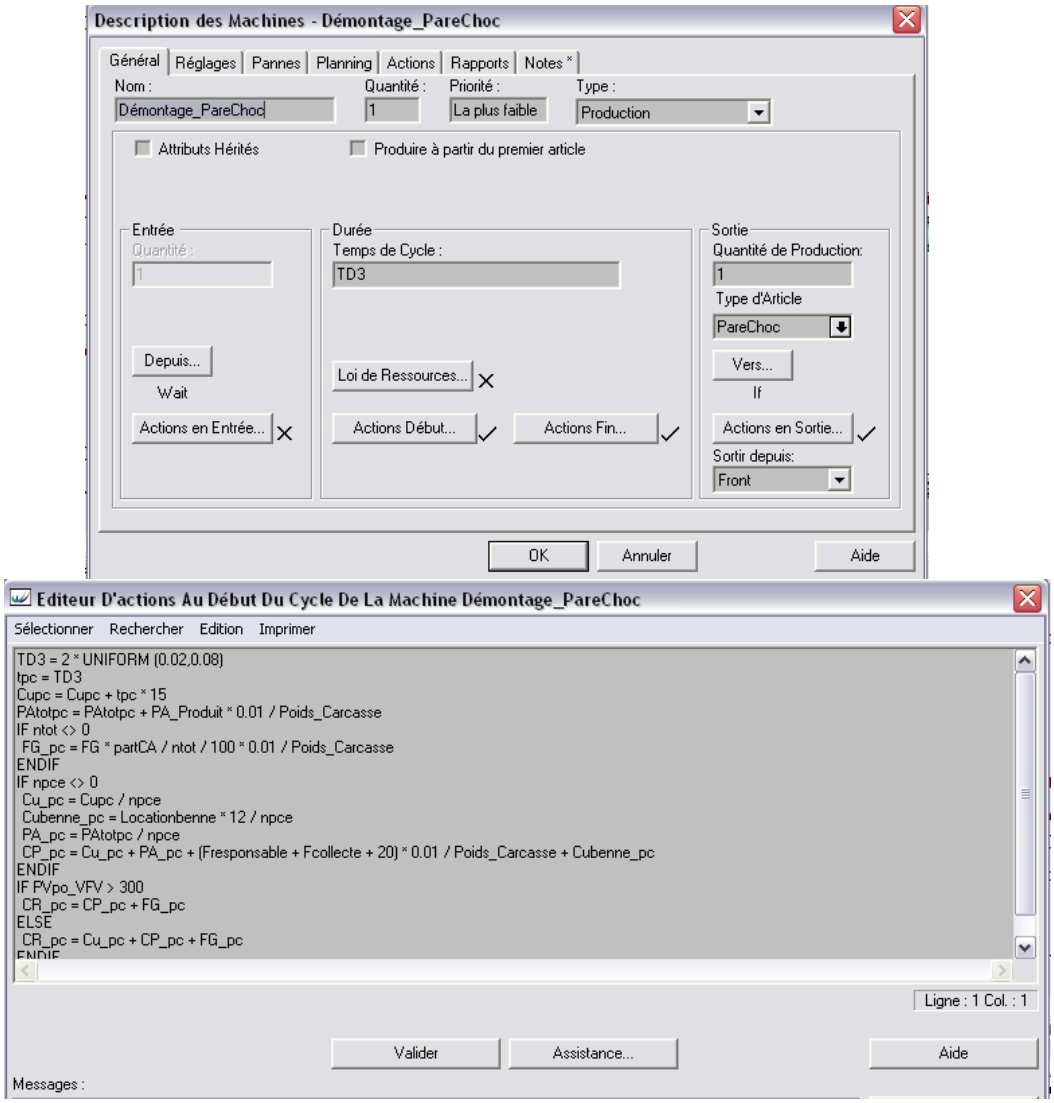


Figure 78: Machines sous WITNESS@

Certaines de ces caractéristiques sont fixées en début de modélisation et d'autres varient en fonction du temps et des paramètres flux et procédés. C'est le cas notamment pour le calcul des coûts de production et de revient. Le descriptif de la démarche de calcul pour ces variables et son illustration sont présentés dans l'Annexe 12.

La variable économique globale traduisant les effets des variations dans les flux physiques et des procédés et dont la valeur dépend directement ou indirectement de la valeur de toutes les caractéristiques citées auparavant est la marge liée à un acteur ou une activité et définie comme suit :

$$M_{A,i} = f(V_{A,i,j}, CR_{A,\mathrm{Pr},i,j}, PV_{A,\mathrm{Pr},i,j})$$

$$M_A = \sum M_{A,j}$$

Les différents calculs sont ensuite rapportés par produit ou par tonne en fonction de l'acteur considéré.

Le calcul des variables en relation avec les caractéristiques produit et procédé représente la chaîne économique.

Le modèle final sous WITNESS@ est constitué simultanément de la modélisation de la chaîne d'acteur, de la chaîne de production et de la chaîne économique (cf. Figure 79).

En Annexe 13 sont présentés les différents paramètres utilisés dans WITNESS@ représentatifs des caractéristiques des flux physiques, de la chaîne de production et économique. Ce sont les mêmes en fonction des différents acteurs ce sont leur nombre et valeurs qui varient.

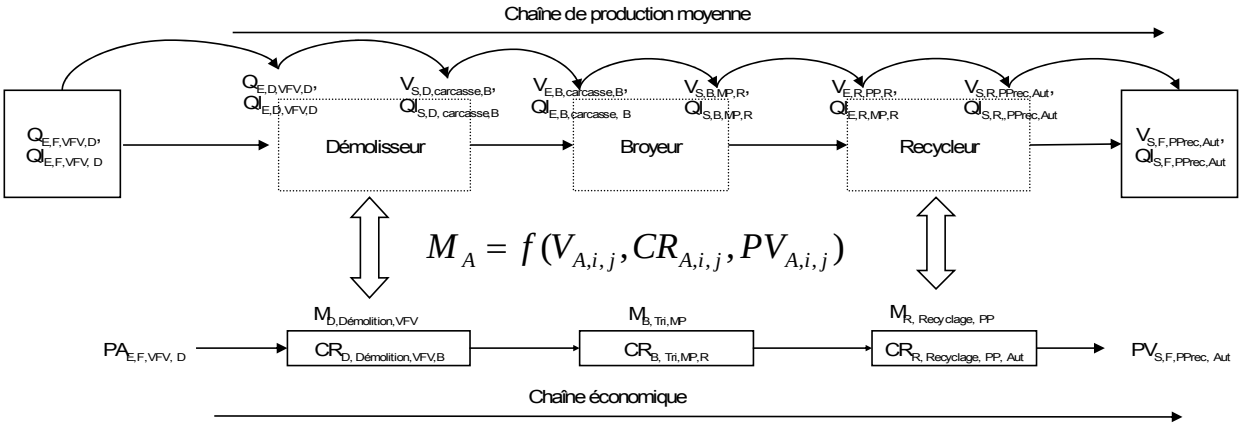


Figure 79: Le modèle final sous WITNESS@

II.2.3.d. Quantification des chaînes

La quantification des différents paramètres du modèle a été réalisée par le biais d'enquêtes (cf. Annexe 19) auprès des différents acteurs représentant les différents métiers. Les acteurs choisis sont ceux les plus représentatifs de l'acteur moyen des classes retenues à la suite de l'étape de sélection des acteurs. Une partie des données est issue de la littérature soit pour compléter des données non accessibles auprès des acteurs soit pour corroborer les données bibliographiques avec les données du terrain.

Une fois les données recueillies pour les différents acteurs et compilées, elles ont été affectées au modèle. Seuls les paramètres ont eu une valeur assignée. Leurs valeurs ne sont pas données par souci de confidentialité avec les partenaires et entre les partenaires.

II-2-4. Mesure des performances

Une fois le modèle construit et calibré, il est utilisé pour mesurer les performances tant techniques qu'économiques du système étudié. Nous ne traiterons ici que des performances techniques et économiques. Les performances à mesurer sont définies en fonction des attentes des acteurs sur la filière modélisée (cf. Chapitre 2 Tableau 16, Chapitre 4 Tableau 34). L'approche systémique du modèle nous permet d'évaluer diverses performances tout en prenant en compte le respect des intérêts de chacun des acteurs impliqués.

L'évaluation d'une performance se fait en fonction d'un acteur et est réalisée au travers d'indicateurs hiérarchisés:

- des indicateurs principaux tels la marge,
- des indicateurs de deuxième et troisième niveau définissant ceux de premier niveau. Ils permettent également d'interpréter les résultats.

Les indicateurs sont des variables du modèle et chacun d'entre eux est défini par un ensemble de paramètres du modèle définis précédemment (cf. Figure 80). Les valeurs des indicateurs de premier niveau sont ensuite comparées aux valeurs attendues par les parties prenantes, comparaison symbolisant le niveau de performance de la filière en réponse aux besoins des parties prenantes. On

notera que derrière les attentes des parties prenantes apparaissent les raisons qui motivent ces parties prenantes à identifier les actions devant favoriser le développement de la filière.

Parmi les indicateurs répertoriés, la marge globale de la filière et de chacun des acteurs, apparaît comme un indicateur récurrent et prépondérant pour chacune des parties prenantes et représente une mesure globale pour la stabilité de ces systèmes. Ainsi, la marge est liée à de nombreux autres indicateurs tant techniques qu'organisationnels.

En d'autres termes un résultat économique positif des différents acteurs est une condition nécessaire pour l'émergence de cette filière. Par ailleurs, la mesure de l'évolution de la marge financière globale de la filière permet de mesurer l'influence des caractéristiques des acteurs, et de leur environnement, sur la robustesse de cette filière.

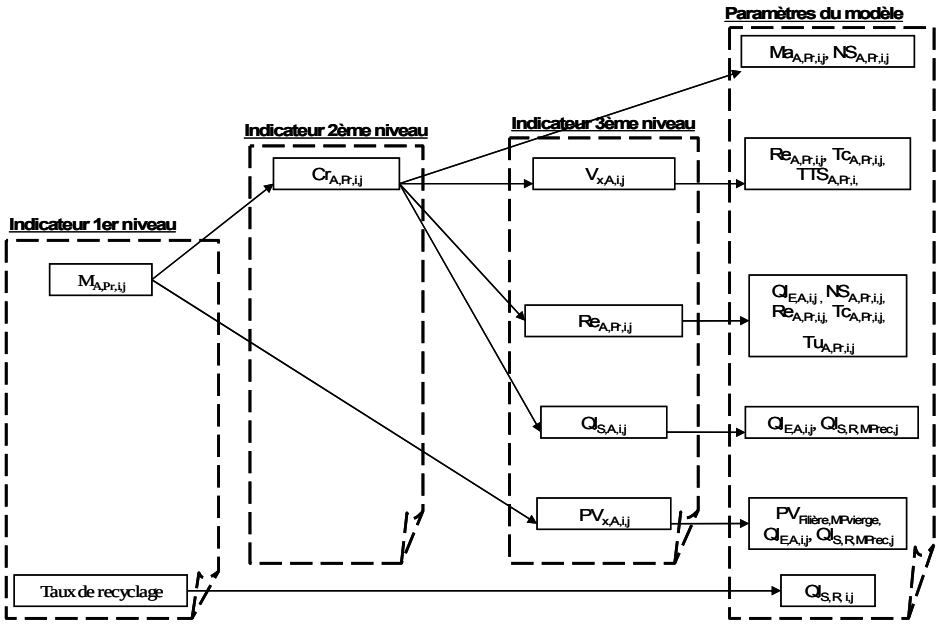
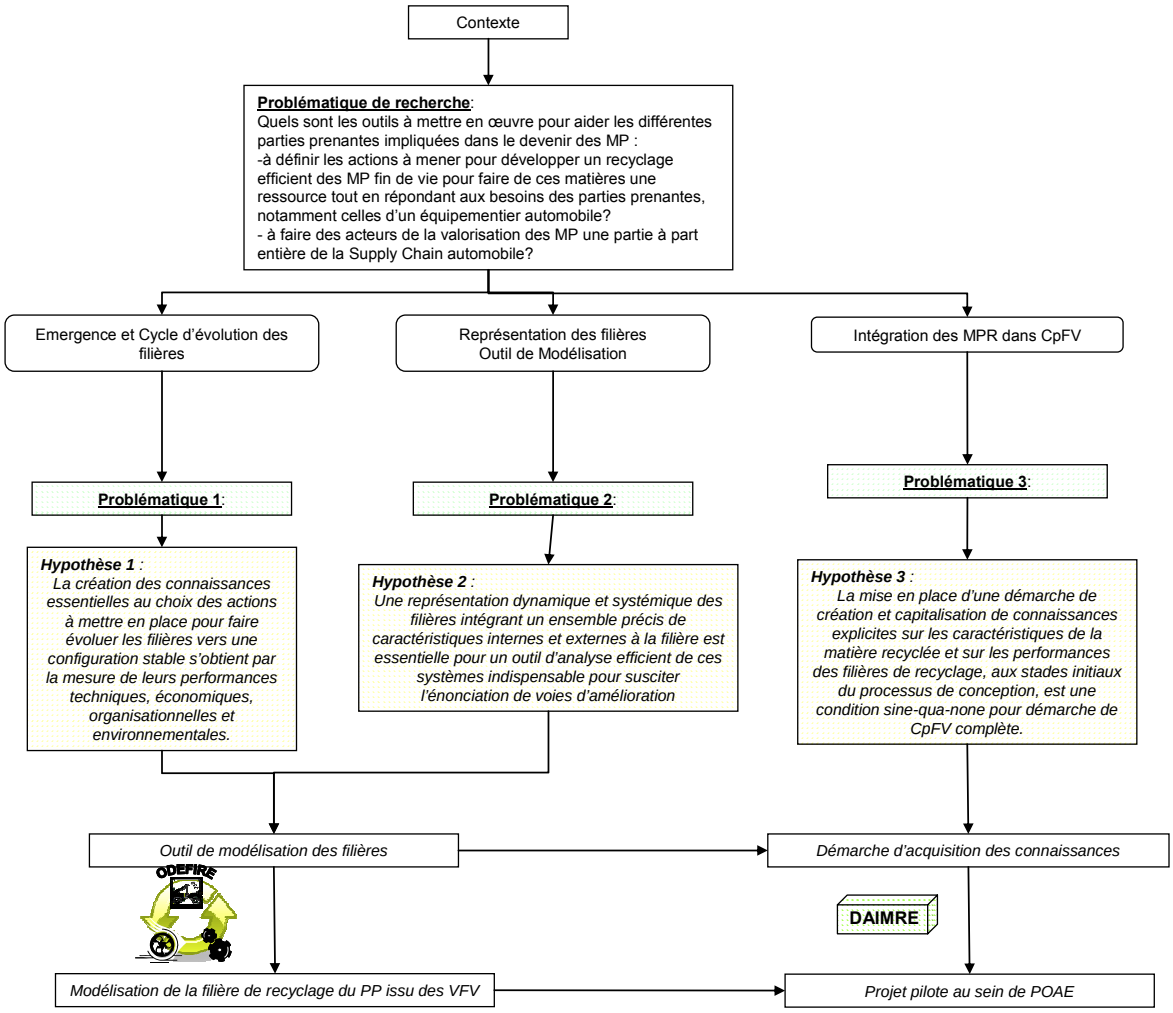


Figure 80: Définition des indicateurs et paramètres du modèle utilisés pour évaluer les performances techniques et économiques (la définition des acronymes est dans le Tableau 26).

II-2-5. Synoptique des réponses apportées à la problématique de recherche



Chapitre 4
Expérimentation

I- *Démarche pour l'intégration des MPR dans des pratiques de conception d'un équipementier automobile*

I-1. Mise en œuvre de la démarche DAIMRE au sein de POAE

I-1-1. Objectifs

DAIMRE est une démarche visant à préparer et pérenniser l'intégration des MPR dans les bases de données matières utilisées par les équipementiers. Son expérimentation de DAIMRE au sein de l'équipementier POAE avait pour objectif principal de valider l'emploi de cette démarche pour une intégration pérenne de la MPR et la pertinence de mettre à disposition des concepteurs des connaissances sur ces matières dès les premières étapes de conception. Du succès de cette expérimentation dépendait l'assurance qu'un marché à haute valeur ajoutée est accessible à ces matières recyclées, ce qui est un critère clé dans l'émergence et la stabilisation des filières.
Le déroulement de l'expérimentation est exposé sur la Figure 81.

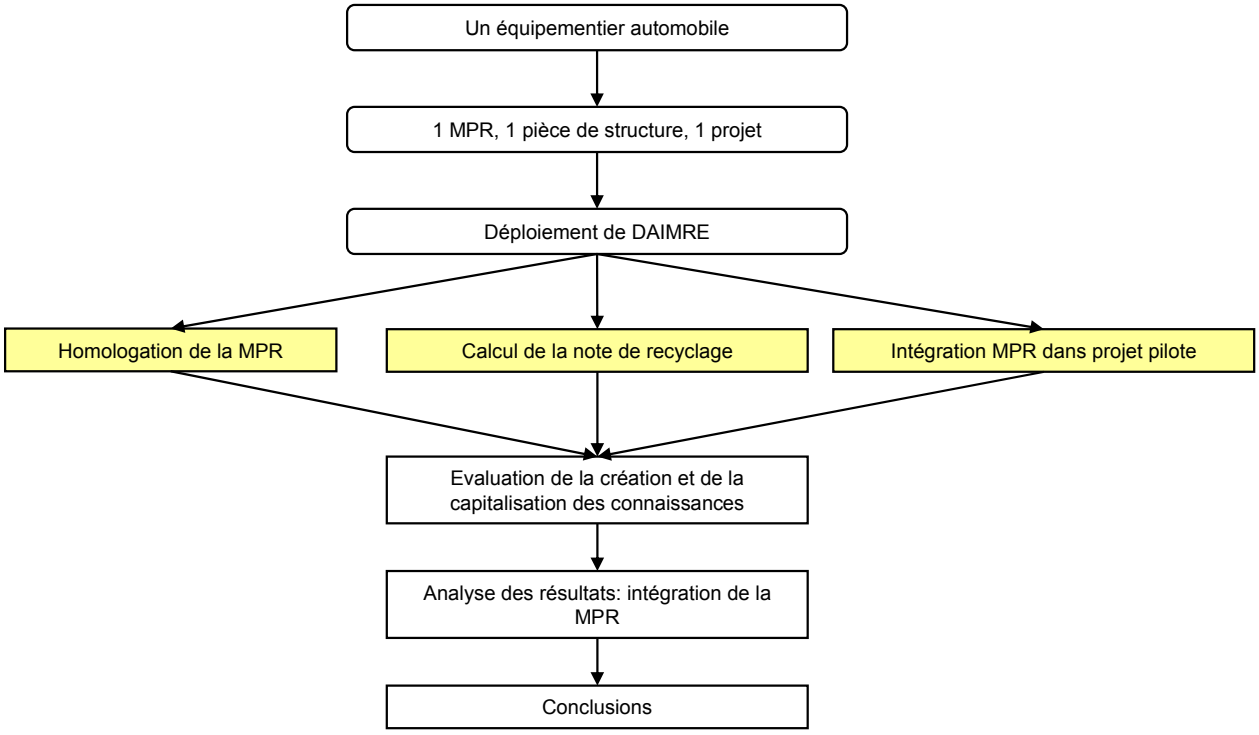


Figure 81: Déroulement de l'expérimentation pour la validation de DAIMRE comme démarche d'intégration de MPR chez un équipementier automobile

I-1-2. Le projet pilote

La première étape de l'expérimentation a consisté à sélectionner le projet pilote pour le déploiement de la démarche. Cette dernière a été appliquée sur un projet de conception de Face-Avant-Technique en PP-FV, projet effectué dans le cadre du développement de solutions globales pour l'éco-

conception et la valorisation de pièces de structure (cf. Chapitre 1). L'objectif de ce projet était de standardiser l'utilisation de PP-FVR dans les FAT puis de faire de cette expérience un point d'entrée vers la pérennisation de l'utilisation de cette matière dans les autres projets de conception de pièces de structure.
L'expérimentation de notre démarche a demandé dans un premier temps l'intervention de l'expert recyclage et éco-conception de l'entreprise (dénommé ci-après expert environnement) afin de sensibiliser et informer les protagonistes sur les changements apportés par DAIMRE. Ce projet pilote a impliqué tous les métiers concernés par le déroulement d'un projet de conception automobile : expert matière, concepteur, experts qualité, acheteurs, fournisseur de matières, client… (cf. Chapitre 2).

I-1-3. Le déroulement de la démarche

L'expérimentation de DAIMRE a été conduite en cinq étapes (cf. Figure 82)

- Etude technico-économique de faisabilité du recyclage du PP-FV : cette étape correspond au développement du PP-FVR en collaboration avec un recycleur, à la caractérisation des propriétés de la matière élaborée,
- Validation du cahier des charges pièce : c'est la caractérisation des propriétés des FAT en PP-FVR.
- Validation environnementale : mesure du potentiel technico-économique des filières de recyclage associées au PP-FVR (le calcul de la note de recyclage (cf. Chapitre 3)), l'évaluation de la démontabilité des FAT comme scénario fin de vie le plus probable pour accéder à la matière recyclée,
- Industrialisation des FAT en PP-FVR : C'est le lancement du projet pilote.
- Extension de l'expérience du projet pilote à d'autres projets pour une standardisation de l'utilisation de MPR : elle correspond à l'intégration des connaissances sur les MPR et les filières associées dans les outils de conception existants.

Nous avons accompagné les équipes de POAE tout au long du déroulement de la démarche par le biais de l'expert éco-conception et environnement de l'entreprise. Les caractéristiques des différentes étapes ont été transmises pour validation à cet expert qui a été en charge du déploiement de DAIMRE au sein des équipes projet et équipes de conception. Nous avons validé ensemble l'avancée de chacune des étapes, les résultats obtenu afin de démontrer la pertinence de DAIMRE pour l'intégration de MPR au sein des référentiels d'un équipementier.

Les trois premières étapes conduisent à l'homologation de la matière et à la création de la fiche PP-FVR-FAT-Fournisseur. Le PP-FVR développé en collaboration avec un recycleur, est obtenu selon le procédé décrit sur la Figure 83. Ce dernier est produit à partir de PP issu de pare-chocs fin de vie et de fibres de verre issues de la valorisation de pièces automobiles en TD. Le PP-FVR n'est pas obtenu directement à partir du recyclage de FAT ou autres pièces en PP-FV car :

- la filière de recyclage de cette matière est en émergence. Le PP-FVR n'est pas accessible sur le marché. La solution présentée ci-dessus permet de pallier à ce manque et d'ouvrir un débouché pour cette filière.
- cette association offre également une voie de valorisation aux TD au travers de la récupération des fibres qui les composent.

Par ailleurs, le PP-FVR produit ici est un compound composé de 80% de PP-FV vierge et de 20% de PP-FVR. Cette pratique est une première étape dans l'intégration de MPR au sein des différents métiers de POAE, l'objectif de l'entreprise étant d'augmenter le pourcentage de MPR au fur et à mesure que l'utilisation de MPR devient une pratique commune au sein des projets de pièces de structure et que les filières de recyclage se structurent.

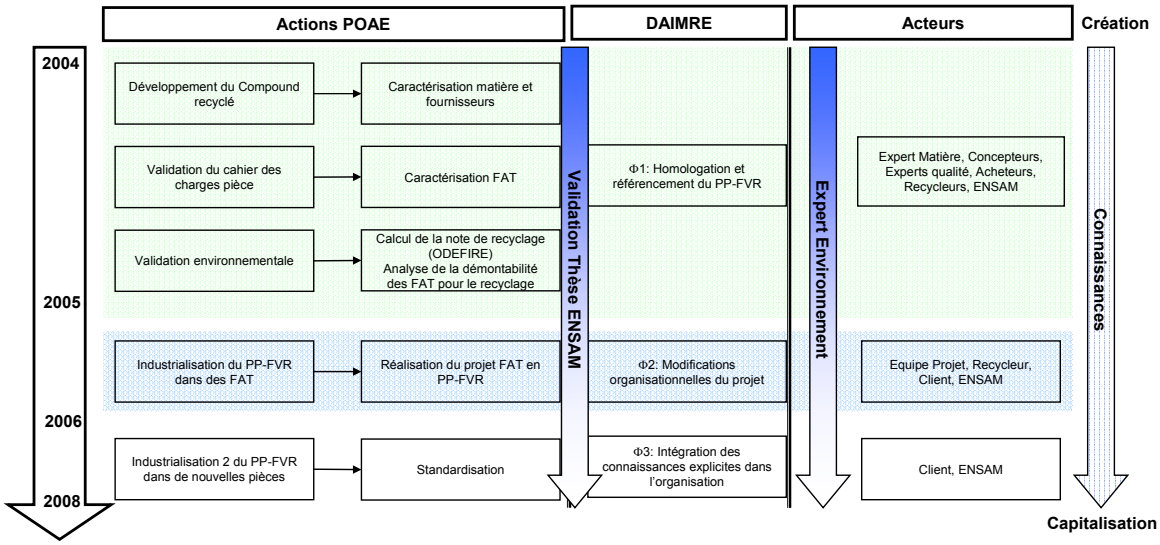


Figure 82: Déroulement de DAIMRE au sein de POAE

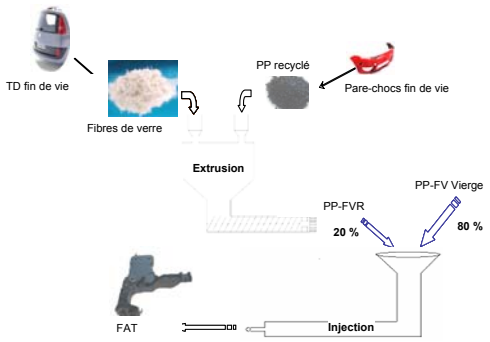


Figure 83: Production du PP-FVR

I-2. Résultats de l'intégration de PP-FVR dans les FAT

I-2-1. Φ1 : Homologation et référencement du PP-FVR

I.2.1.a. Création de la fiche PP-FVR

<u>Développement d'un compound recyclé</u>

Le recycleur sélectionné par POAE (expert environnement, expert qualité et acheteurs) dispose des moyens techniques suffisants (extrudeuses, filtres…) pour réaliser le PP-FVR. Des séries d'essais de compoundage ont été réalisées chez le recycleur afin de définir les paramètres machine (filtres, taille filière…) optimaux pour produire la matière (Lonete 2004). La matière obtenue a été caractérisée sur une vingtaine d'échantillons en fonction des propriétés suivantes, densité, taux de fibre, indice de fluidité à chaud, module de flexion et de traction, choc IZOD, températures de fusion et de

cristallisation (Lonete 2004), et comparées à celles de la matière vierge par les experts matière. Les principaux résultats sont présentés dans le Tableau 27 et l'Annexe 14.

		Propriétés		
		Taux de FV (%)	Module de flexion (MPa)	Module de traction (MPa)
Matières	PP-FV	31	4675	5840
	PP-FVR	☺	☺	☺

Tableau 27 : Propriétés mécaniques du PP-FVR en fonction du PP-FV vierge, ☺=équivalence entre les propriétés du compound et la matière vierge

Le prix de production du compound PP-FVR (est inférieur à celui de la matière vierge (réduction de 20% du prix). Ainsi l'utilisation de 20% matière recyclée pour réaliser le compound se révèle suffisante pour abaisser de façon substantielle le prix de la matière d'origine donc de réaliser un gain économique sur la production des FAT. La structure du prix d'achat pour POAE ne peut être présentée dans ces résultats pour des raisons de confidentialité auprès de l'entreprise.

D'autre part, l'utilisation de PP-FVR améliore l'indice de recyclabilité des FAT en matière vierge (gain d'un point), indice établi par RENAULT pour mesurer l'adéquation du produit avec des critères de valorisation en fin de vie indice utilisé par les équipementiers (cf. Annexe 14). Ce gain est obtenu par le simple fait d'utiliser de la matière recyclée.

En conclusion, le recyclage du PP-FV est techniquement et économiquement possible tant d'un point de vue matière que d'un point vue structure du recycleur. Le PP-FVR est à ce stade une référence de MPR dont l'utilisation est envisageable dans un projet.

Validation du cahier des charges pièce

Des FAT ont été moulées à l'aide du compound 80%PP-FV vierge-20%PP-FVR. Les propriétés des pièces obtenues ont été comparées à celles des FAT en PP-FV vierge afin de s'assurer que la nouvelle matière réponde aux exigences du cahier des charges des FAT . Les caractéristiques analysées ont porté sur le vissage des fixations, la rotation des inserts, l'arrachement de crochet de sécurité, les exigences après vente, chaleur avec projecteurs (Lonete 2004). Les test ont été réalisés sur 70 jeux de quart de FAT. Les résultats mettent en évidence que les FAT injectées en compound recyclé ont une tenue identique qu'à celles fabriquées avec 100% de matière vierge et sont donc conformes au cahier des charges.

Mise en place de la fiche matière

Les propriétés matière et pièce étant validées, nous avons créé la fiche matière du PP-FVR en collaboration avec l'expert environnement (cf. Figure 84).

Fiche PP-FVR	
Propriétés	Valeur
Densité	1,13
Taux de fibres	31
MFI	/
Module de traction (MPA)	5420
Application	FAT
.....	

Figure 84: Fiche matière du PP-FVR

I.2.1.b. Création de la fiche Fournisseur-PP-FVR

L'homologation définitive du recycleur requière une mesure quantitative de ses performances technico-économiques et de celles de la filière en amont. La filière n'étant pas mise en place, nous avons dû définir le potentiel des acteurs existants à répondre aux exigences de la production de PP-FVR.

Cette étape devait également permettre d'identifier rapidement tous les recycleurs figurant dans le panel de fournisseurs de l'entreprise et susceptibles de répondre à la demande en PP-FVR. Nous avons établi le potentiel de production de cette filière à l'aide de l'outil ODEFIRE (cf. chapitre 4 partie 2). La modélisation de la filière de recyclage des pare-chocs permettant de produire le PP-FVR est détaillée dans l'expérimentation d'ODEFIRE (chapitre 4 partie 2). Les résultats obtenus (cf. Chapitre 4 partie 2) indiquent qu'il existe dans le panel de fournisseurs (au moment où l'expérimentation a été effectuée) un seul recycleur solvable capable de produire le PP-FVR correspondant aux attentes de POAE et de ses clients. La fiche fournisseur PP-FVR a alors été créée (cf. Figure 57).

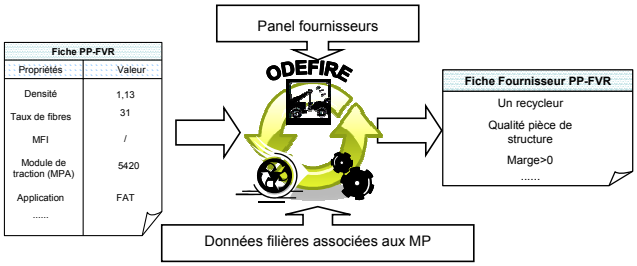


Figure 85: Création de la fiche Recycleur-PP-FVR

I.2.1.c. Validation environnementale : création de la fiche PP-FVR-FAT Recycleur

<u>Calcul de la note de recyclage (processus d'évaluation cf. Chapitre 3)</u>

La note de recyclage du PP-FVR est calculée afin de définir la possibilité d'intégrer cette matière dans un projet. Les valeurs attribuées aux différents critères définies dans un travail de groupe réunissant les experts matières, les concepteurs, les experts qualité et les acheteurs, et directement liées au recycleur sélectionné sont présentées dans le Tableau 23.

Les critères C1 et C3 ont la note la plus faible car le PP-FVR n'est pas encore sur le marché. Ainsi les données obtenues ci-dessus dans l'analyse des propriétés de la matière représentent un potentiel de production et non une production effective actuellement. Ce potentiel représenté par le critère C8, est

évalué à l'aide d'ODEFIRE (cf. Chapitre 4 partie 2) et la note maximale lui est attribuée car le recycleur peut répondre aux exigences du projet.

La note obtenue est de 3,8 (cf. Figure 86). Compte-tenu de sa position en fonction de la note idéale (cf. Chapitre 3) et celle de référence, le PP-FVR peut-être utilisée dans un projet de FAT avec une prise de risque calculée.

Référencement du PP-FVR

Le PP-FVR répondant aux cahiers des charges matière et pièce imposés par POAE, son référencement a été validé par l'expert environnement. Nous avons associé les résultats de la fiche matière, de la fiche fournisseur afin d'obtenir une fiche unique à destination des différents acteurs : la fiche PP-FVR-FAT-Recycleur (cf. Figure 87). Cette fiche a été réalisée pour être intégrée dans les bases de données matière de POAE, bases alimentant leurs outils de conception.

Indice critère	Nom critère	Valeur	Note
C1	Volume	0	1
C2	Nfournisseurs	1	2
C3	Prix	Non produit	1
C4	Qualité	Haute qualité=Qualité du projet automobile	3
C5	Solvabilité	Marge<0	1
C6	Certification	Toutes	3
C7	Localisation	Région	3
C8	Potentiel	Fort	3

Tableau 28: Critère de notation et poids associés- Valeur des critères et notes associées (cf. Chapitre 3).

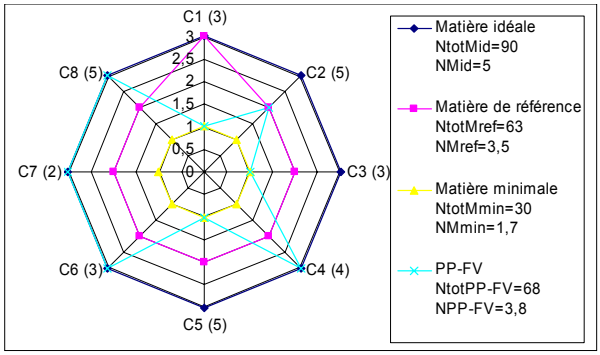


Figure 86:Note de recyclage pour le PP-FV

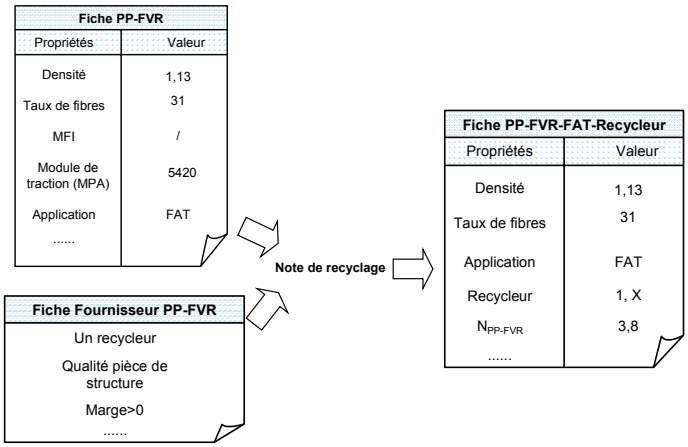


Figure 87: Référencement du PP-FVR : la fiche PP-FVR-FAT-Recycleur

I.2.1.d. Intégration du PP-FVR dans la démarche d'éco-conception

Le développement d'une solution d'éco-conception globale au sein des équipes de POAE induit d'étudier à la fois son devenir en fin de vie et l'aptitude de la pièce à répondre à ce devenir (démontabilité, recyclabilité…). Une question importante est d'identifier si la filière peut fonctionner en partie en boucle fermée en repérant le PP-FV des FAT en fin de vie. L'analyse de la démontabilité des pare-chocs à l'origine de la filière de recyclage des PP-FV avait démontré la faisabilité d'utiliser ces produits en fin de vie pour alimenter la filière PP-FVR (Toupe 2004) et est également à l'origine de l'analyse de la filière de recyclage du PP automobile développée dans la deuxième partie de ce chapitre.

L'analyse de la démontabilité des FAT répond à deux objectifs :

- améliorer la conception des FAT pour faciliter l'accès au PP-FVR en fin de vie,
- maîtriser les coûts de démontage afin de maintenir un prix intéressant du PP-FVR.

L'expérience conduite sur les pare chocs a permis d'identifier les leviers déterminants de la faisabilité technico économique d'un démontage automobile. Ces leviers sont identifiés au travers des critères retenus dans le tableau ci-après:

Critère	Evaluation	Résultats
Fixations	- Nombre et type	- Vis (diamètre et longueur donnés) - Rivklé…
Accessibilité	- Indirecte: FAT intégrée au module[116] avant de la voiture - Définir les points de fixation	- Module avant : enlever pare-choc, faisceaux…
Vieillissement	- Démontage FAT sur VHU	- Fixations
Degré démontage	- Définir les éléments fixés directement sur la FAT (phare, connectique…)	- Projecteur supérieur - Projecteur inférieur - Avertisseur - Serrure - Crochet de sécurité…

Tableau 29: Critères d'évaluation de la démontabilité des FAT (Maudet 2005)

Les fixations recensées sur différentes FAT lors d'essais de démontage de divers modèles de voitures (Boini 2006) (cf. Annexe 15), ont été classées en fonction de leur fréquence d'apparition et leur facilité à être démontées (temps et outil de démontage). Compte-tenu du nombre de modules fixés sur une FAT (bloc optique, câblages, déflecteurs, poutre, pare-choc), des zones de fixation ont été identifiées afin de définir les plus critiques à démonter (cf. Annexe 15). Cette analyse conduit également à la

définition du degré de démontage, c'est-à-dire quels modules peuvent rester sur la FAT et dont les matières peuvent être récupérées par broyage et tri. En effet, la conception des FAT actuelles implique que pour atteindre un niveau de compatibilité des matériaux qui rendent possible l'application du broyage tri sur les composants non démontés il faut 11 minutes de démontage. Cette durée rend l'opération non rentable économiquement. La conception des futures FAT doit donc être modifiée pour permettre d'atteindre le seuil de rentabilité requis sur ces traitements de fin de vie

Dans cette perspective nous avons proposé :

- une liste des fixations à privilégier lors de la conception des FAT.
- des recommandations sur la structure d'assemblages des composants qui permettent de réduire les temps de désassemblages requis pour obtenir un démontage rentable et rendre possible le recyclage direct de la pièce. Les recommandations formulées relèvent du guide de démontage et ont pris les formes suivantes :
    - Ne pas faire de surmoulage du PP-FV sur une structure métallique,
    - Limitation de l'utilisation de bagues anti-fluage….
- le calcul du temps de démontage a été informatisé afin de permettre aux concepteurs d'intégrer ce critère dans leur choix de conception (cf. Annexe 15).

Nous pouvons conclure que le démontage des FAT pour récupérer le PP-FVR est envisageable sur le plan technico économique sous réserve de l'application de nos recommandations. Cependant la production du PP-FVR à partir du PP issu de pare-chocs fin de vie et de fibres de verre issues de TD reste la voie la plus intéressante économiquement en attendant des changements de conception des FAT en faveur du démontage.
Pour ce projet, l'utilisation de PP-FVR a donc été associée à une analyse du scénario fin de vie de la pièce en accord avec cette utilisation. L'éco-conception des FAT a donc été améliorée.

I-2-2. Φ2 : Industrialisation du PP-FVR dans les FAT

I.2.2.a. Modifications organisationnelles du projet

Une fois le référencement du PP-FVR obtenu, le projet devant utiliser le PP-FVR recyclé a été soumis à un constructeur qui a accepté son usage. Le cahier des charges associé au produit (volume, prix, qualité, délai) a alors pu être transmis au recycleur sélectionné au travers de la fiche PP-FVR-FAT-Recycleur. Le succès de sa création permet son utilisation directe en phase de conception conceptuelle lors du choix matière au même titre que les autres matières contenues dans le panel matériaux de l'équipementier. De ce fait, la conception du moule des FAT a été directement dimensionnée en fonction des propriétés du PP-FVR. Les simulations numériques réalisées à ce stade de la conception sont en accord avec les résultats obtenus lors du référencement. Les résultats du projet ont été approuvés par le constructeur et le démarrage série a été validé.

[116] Module= Partie d'une voiture composée d'un ensemble de pièces fixées entre elles

I-2-3. Φ3 : Intégration des connaissances, un pas vers la standardisation de l'utilisation de MPR

I.2.3.a. Les connaissances créées lors des différentes phases

Au cours des phases successives de l'expérimentation, des connaissances ont été créées et ont circulées entre les différents acteurs pour permettre l'utilisation du PP-FVR dans un projet (cf. Annexe 16). Toutes les connaissances sur le PP-FVR et la filière de recyclage associée identifiées comme primordiales pour une intégration réussie ont été au moins transmises de façon orale ou écrite. Il est important de noter que la création de la fiche PP-FVR-FAT-Recycleur été formalisée.

I.2.3.b. Intégration des connaissances dans l'entreprise

L'intégration des connaissances sur les MPR au sein de l'entreprise est signifiée par leur utilisation dans les procédures ou bases de données officielles de l'entreprise (cf. Tableau 30).
Le processus d'intégration dans les bases de données matière de POAE a été initié mais non finalisé au cours des travaux de thèse, notamment par un manque de disponibilité des personnes en charge du développement des outils de conception de POAE. Cependant, comme les connaissances sur le PP-FVR ont été formalisées, son utilisation se poursuit dans de nouveaux projets avec la participation de l'expert environnement. Cette continuité dans l'utilisation de cette MPR révèle une certaine pérennisation de l'intégration de cette MPR. Elle est devenue un standard dans les référentiels de l'entreprise.

I-2-4. Analyse des résultats

L'expérimentation de DAIMRE au sein de POAE a démontré que cette démarche était adaptée à la mise en œuvre d'un processus d'intégration mais elle a également mis en évidence les limites de la démarche proposée. En effet seule une partie des étapes a donné lieu à une production pérenne. Ces étapes sont :

- La création d'une fiche PP-FVR-FAT-Recycleur commune à tous les métiers,
- La validation du projet pilote par le client signifiant une réussite de l'utilisation du PP-FVR dans ce projet,
- La création de connaissances inhérentes à la MPR et aux filières de recyclage associées. Cette création combinée à l'utilisation d'un compound et à l'intégration directe du recycleur dans le processus a permis de passer outre les freins à son utilisation auprès des différents métiers de l'entreprise.
- La poursuite de l'utilisation de la MPR dans de nouveaux projets.

En revanche les étapes de standardisation n'ont été que partiellement atteintes. En effet, le PP-FVR est devenu un standard dans les références matière car son utilisation est poursuivie dans de nouveaux projets au sein de POAE. Les barrières à son utilisation ont été détruites. Cependant, l'intégration des connaissances créées dans les outils de conception de l'entreprise n'a pu être finalisée dans les temps des travaux. Ceci n'a pas permis de démontrer la validité de la démarche pour l'intégration d'autres MPR.

Toutefois, les pratiques de conception de l'équipementier ont été modifiées et cette démarche a permis de sensibiliser les acteurs de l'entreprise à la possibilité d'utiliser des MPR dans les pièces de

structure. Cette possibilité est acquise par les utilisateurs de MPR qui sont désormais enclin à envisager leur intégration dans ce type de pièces.

Etape	Acteur	Moyens	Validation
Validation projet	Projet Pilote	Création des connaissances liées au MPR et aux filières Expérimentation de DAIMRE	☺
Communication-Formation	Expert Environnement	Session de formation sur les bénéfices de l'intégration de MPR et l'existence des connaissances créées	☺
Standardisation	Métier	Intégration de la fiche MPR dans la base de données Matière Intégration de la fiche fournisseur dans le panel fournisseur	😐 En cours
Capitalisation	Equipes projet	Intégration des connaissances sur les MPR aux outils de conception et d'éco-conception existants	😐 En cours
Déploiement pour toute MPR	Entreprise	Utilisation des nouvelles connaissances intégrées aux outils de l'entreprise Création de nouvelles connaissances selon DAIMRE	☹

Tableau 30: Bilan de l'intégration des connaissances liées aux MPR au sein de l'entreprise POAE

Les raisons que nous identifions pour expliquer ce non succès partiel sont :

- le manque de disponibilité des acteurs impliqués dans le déploiement des outils de conception
- une action indirecte par le biais de l'expert environnement, nous n'avons pu agir directement au sein des différents métiers de l'entreprise,
- un manque d'implication des différents niveaux stratégiques de l'entreprise dans le déploiement de l'utilisation de MPR,
- la nécessité d'une intervention extérieure dans les étapes d'homologation par le biais de l'utilisation d'ODEFIRE.

Les suggestions que nous émettons pour surmonter ces obstacles sont :

- l'implication de tous les niveaux stratégiques de l'entreprise,
- une mise à disposition de l'outil ODEFIRE auprès de l'expert environnement,
- une poursuite de l'intégration des connaissances sur les MPR et les filières dans les bases de données et les outils de conception. Cette intégration nécessite non seulement la participation de l'expert environnement mais de tous les acteurs impliqués dans l'utilisation de MPR.

I-3. Réponse à la problématique industrielle et de recherche

I-3-1. POAE

I.3.1.a. Développement de solutions globales de conception et fin de vie

POAE a exprimé le besoin de développer des solutions globales d'éco-conception et de valorisation pour les pièces de structure. DAIMRE conduit à combiner les règles d'éco-conception actuelles (ex : améliorer la démontabilité) avec l'utilisation de MPR et l'analyse du statut des filières de recyclage

associées, et ceci pour des pièces à hautes propriétés mécaniques comme les pièces de structure (cf. Figure 88). Nous pouvons conclure que DAIMRE a permis d'améliorer l'éco-conception des FAT et de répondre au besoin de POAE sur ces pièces. Cependant, pérenniser cette démarche pour le développement de ces solutions implique une intégration dans la démarche d'éco-conception globale de l'entreprise. Ceci nécessite l'implication des différents niveaux stratégiques de l'entreprise et non plus uniquement de l'expert environnement. DAIMRE s'avère donc prometteuse pour répondre aux besoins de POAE, mais la pérennisation de cette réponse doit cependant être validée.

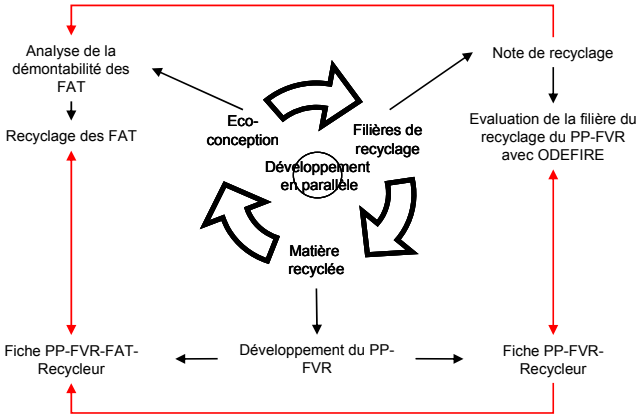


Figure 88: Solution d'éco-conception globale développée pour les FAT par l'intermédiaire de DAIMRE

I.3.1.b. Modification des pratiques de conception pour une utilisation pérenne de MPR

L'utilisation de MPR au sein des projets de conception de pièces de structure s'accompagne d'une prise de risque importante liée à un manque de connaissances de la matière et à des freins organisationnels. Les résultats de l'expérimentation démontrent que l'application de DAIMRE a conduit à:

- un apport de connaissances sur la MPR et les filières à tous les acteurs concernés au travers du référencement du PP-FVR. Le caractère instable des filières de recyclage a été pris en compte par le biais de la note de recyclage.
- la modification du processus de conception : l'utilisation d'une fiche matière dès les premières étapes du processus a été acceptée par les concepteurs et a conduit à une réelle adéquation entre matière et pièce,

Tous ces changements dans les pratiques de conception initiés par DAIMRE conduisent à minimiser les risques liés aux MPR et donc permettent à POAE de renforcer sont utilisation dans ses nouveaux projets.

Nous pouvons conclure que DAIMRE est une approche prometteuse pour faciliter l'utilisation de MPR dans des pièces de hautes propriétés mécaniques mais utiliser cette démarche pour faire de cette utilisation une pratique courante chez les équipementiers automobiles implique de résoudre un certain nombre de limites évoquées précédemment.

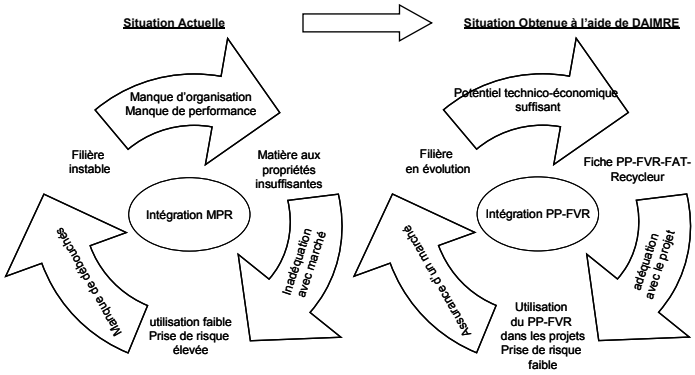


Figure 89: Evolution obtenue par DAIMRE pour l'utilisation du PP-FVR au sein de POAE

I-3-2. Réponse à la problématique 3

L'analyse de troisième point de la problématique a mis en évidence le besoin de création et de capitalisation de connaissances explicites au sein de l'entreprise. Nous avons émis l'hypothèse qu'une démarche comme DAIMRE est une condition sine-qua-none pour obtenir une CpFV complète. L'expérimentation de DAIMRE a permis de valider cette hypothèse à trois niveaux :

- la création de connaissances sur la MPR et les filières associées,
- la capitalisation de ces connaissances,
- la mise en place d'une CpFV complète.

I.3.2.a. La création et la capitalisation de connaissances

DAIMRE a permis la création de connaissances explicites par deux moyens :

- la création de la fiche MPR-Pièce-Recycleur,
- la note de recyclage avec l'intervention de l'outil ODEFIRE.

Ces connaissances ont été transmises dans les différents métiers et conservées. Cette transmission a abouti à l'intégration réussie de la MPR dans un projet de conception de pièces de structure et à la suppression des principaux freins à cette intégration.

Les principales étapes du processus de capitalisation ont pu être expérimentées et validées (cf. Tableau 31). Mais l'ultime étape d'actualisation n'a pu être réalisée et reste aujourd'hui invalidée. Seuls les prémices de cette étape ont été mises en place.

I.3.2.b. Une Conception pour la Fin de Vie complète

La fiche MPR-Pièce-Recycleur, résultat de la combinaison de la note de recyclage (représentative du potentiel de développement des filières) et des propriétés matière a été introduite aux stades initiaux du processus de conception au même titre que les règles d'éco-conception. L'intégration de la MPR a conduit à la prise en compte du critère filières dans la démarche d'éco-conception. D'autre part, DAIMRE a permis de mettre en adéquation le scénario fin de vie de la pièce au fait d'utiliser de la MPR dans sa conception et donc de tenir compte de développement réel et non théorique des filières. La méthode de conception pour l'intégration des filières établie par DAIMRE ne se limite pas à une méthode de conception pour un scénario de valorisation mais conduit à une méthode complète de CpFV. DAIMRE est donc une condition sine-qua-none pour finaliser une méthode de CpFV.

Etapes processus de capitalisation	Sous-Etapes	Quoi	Validation
Repérer	Identifier	Connaissances sur les MPR et les filières Identification des recycleurs	☺
Préserver	Acquérir	Communication sur les MPR et les filières Développement d'un compound	☺
	Structurer	Fiche MPR Note de recyclage	☺
	Combiner	Fiche MPR-Pièce-Recycleur	☺
Valoriser	Partager	Transmission fiches au sein des métiers	☺
	Distribuer	Transmission fiches entre les métiers et les équipes projet	☺
	Utiliser	Projet de conception pilote	☺
Actualiser	Préserver	Intégration des fiches dans les bases et outils existants	☹
	Eliminer	Mise à jour des bases	☹

Tableau 31: Validation des étapes du processus de capitalisation des connaissances

I-3-3. Conclusion

L'expérimentation de DAIMRE a démontré qu'une démarche de création et de capitalisation de connaissances explicites aux stades initiaux de la conception était bien une condition sine-qua-none pour la mise en place d'une démarche de CpFV complète (cohérence entre MPR et scénario fin de vie). Cette démarche est adaptée à l'intégration de MPR dans des pièces de structure en minimisant la prise de risque associée à cette utilisation.

L'originalité de notre démarche repose sur :

- l'implication du recycleur dans le référencement de la MPR,
- l'utilisation d'un compound dans les pièces de structure,
- la prise en compte du potentiel technico-économique des filières dans le référencement de la matière par le biais d'ODEFIRE,
- la quantification de la prise de risque par l'intermédiaire de la note de recyclage.

Les principales limites de notre démarche sont :

- la nécessité de faire intervenir l'expert environnement à tous les niveaux de déploiement de la démarche,
- l'utilisation d'ODEFIRE qui peut s'avérer fastidieux et demande une expertise spécifique sur les filières,
- la durée d'intégration de la démarche pour valider la pérennité de l'utilisation de MPR.

Notre expérimentation a été limitée par l'impossibilité de finaliser la formalisation des fiches de connaissances dans les bases de données et outils existants. Les perspectives de développement de la DAIMRE porte principalement sur la mise en place des moyens pour résoudre les limites au déploiement de DAIMRE, limites évoquées précédemment. DAIMRE nous a permis d'assurer un débouché pour une filière de recyclage, condition première pour initier le développement d'une filière. La deuxième étape consiste à évaluer les performances de cette filière pour définir les actions à mener pour passer d'un état d'émergence à stable. Cette étape est conduite à l'aide d'ODEFIRE.

II- *Aide au développement des filières à l'aide de l'outil ODEFIRE*

II-1. Modélisation de la filière de recyclage du PP issu de VFV

II-1-1. Objectifs de l'expérimentation

L'expérimentation d'ODEFIRE a pour objectif principal de démontrer qu'il est adapté pour créer des informations pertinentes sur les performances des filières en vue d'aider les parties prenantes associées au développement des dites filières. Les parties prenantes concernées par cette expérimentation sont celles de l'industrie automobile (cf. Chapitre 1). L'expérimentation est réalisée à partir de la modélisation de la filière de recyclage du PP issu de l'automobile (FiRePPAutoPC). Elle nous permettra de déterminer comment FiRePPAutoPC peut passer d'un état de système émergent à un état de système stabilisé.

Les résultats attendus sont:

- L'image à un instant t de FiRePPAutoPC,
- Le cahier des charges pour la mise en place d'une filière dite « idéale » en fonction des besoins des différentes parties prenantes.

Le déroulement de l'expérimentation est présenté sur l'Annexe 17.

II-1-2. Les étapes de l'expérimentation

La première étape consiste à définir les limites de notre modèle de FiRePPAutoPC. Le choix des classes d'acteurs les plus favorables au développement de cette filière est le résultat de TypPPAuto (cf. chapitre 3 Figure 71). A partir de cette sélection, le modèle de FirePPAutoPC a été réalisé selon le processus décrit sur la Figure 66 du Chapitre 3. Les caractéristiques de ce dernier sont détaillées dans la partie II-1-3.

L'expérimentation de ce modèle dénommé ci-après simulation comporte deux grandes phases :

- la validation des performances de la filière existante qui consiste à mesurer les performances de FiRePPAutoPC,
- l'amélioration des performances de cette filière qui correspond à la définition des actions à mener pour développer cette filière.

La première phase consiste principalement à comparer les valeurs obtenues par le modèle à celles obtenues auprès des acteurs de la filière. Ceci correspond à la calibration du modèle. Cette phase donne également une image de la filière à un instant t avec un constat chiffré de la situation actuelle. La principale performance mesurée est la marge financière réalisée par chaque acteur. Cet indicateur est représentatif de l'ensemble des modifications des paramètres du modèle et donc des autres indicateurs (cf. Chapitre 3). Cette phase aboutit à l'obtention du système de référence. La deuxième phase correspond à l'amélioration des niveaux de performances du système de référence en fonction de valeurs cibles définies à partir des attentes des parties prenantes. La valeur mesurée doit se rapprocher le plus possible de la valeur à atteindre. Si les valeurs du système de référence et celles attendues sont équivalentes, alors la filière a atteint ses objectifs. Dans le cas d'une divergence, un plan d'expériences est appliqué afin de déterminer les paramètres ayant le plus grand effet de maximisation sur les valeurs de la marge. L'analyse de la marge nous permet d'identifier dans un premier temps une série de paramètres susceptibles de faire varier sa valeur. Le plan permet avec un nombre limité de simulations de déterminer les paramètres ayant le plus d'effet sur la marge. Une fois

ces paramètres sélectionnés, les valeurs optimales pour chacun d'entre eux, sont retenues. Une nouvelle simulation est alors effectuée afin de déterminer la nouvelle valeur de la marge. Le système obtenu est appelé système amélioré par rapport au système de référence et ses caractéristiques correspondent aux valeurs « idéales » de la filière par rapport aux attentes des parties prenantes à un instant t. Ensuite la possibilité d'atteindre ces nouvelles valeurs est traduite en actions à mener par l'une ou l'autre des parties prenantes. Ainsi chaque variation de paramètre correspond à une action potentielle menée par un acteur avec un impact sur une des performances de la filière. Ces actions sont en lien direct avec les critères d'évolution maîtrisables et non maîtrisables définis dans le Chapitre 2.
La combinaison d'actions, établie suite aux résultats de l'expérimentation; correspond au scénario « idéal » d'évolution de la filière.

II-1-3. Le modèle de départ

Le modèle du système de référence est le modèle de FiRePPAutoPC axé sur un scénario démontage et illustré sur la Figure 90. Les modèles WITNESS$^{@}$ du démolisseur et du recycleur sont illustrés sur l'Annexe 18. Le calcul des coûts et les paramètres du modèle utilisés pour chacun des acteurs sont résumés dans les Annexe 12 et Annexe 13. Leur quantification a été obtenue par enquête et visites sur site des acteurs sélectionnés (cf. Annexe 18).

Nous avons modélisé une filière capable de produire du PP destiné à l'industrie automobile. Le PP provient principalement du démontage des pare-chocs chez les démolisseurs. Le choix du pare-choc est dû à plusieurs caractéristiques qui lui sont propres :

- c'est le composant plastique le plus massif d'un véhicule et son démontage est relativement aisé,
- certains démolisseurs le démontent déjà pour atteindre d'autres pièces dont il bloque l'accès, mais ne le destinaient pas au recyclage par méconnaissance de l'existence des acteurs en aval. La prise en compte de la réalité du terrain lors du choix des acteurs et la calibration du modèle nous a permis d'identifier ce flux de pare-chocs non utilisés par la majorité des démolisseurs.
- il donne accès à une qualité connue et élevée aux recycleurs facilitant la production de matière recyclée de qualité ouvrant des marchés de qualité

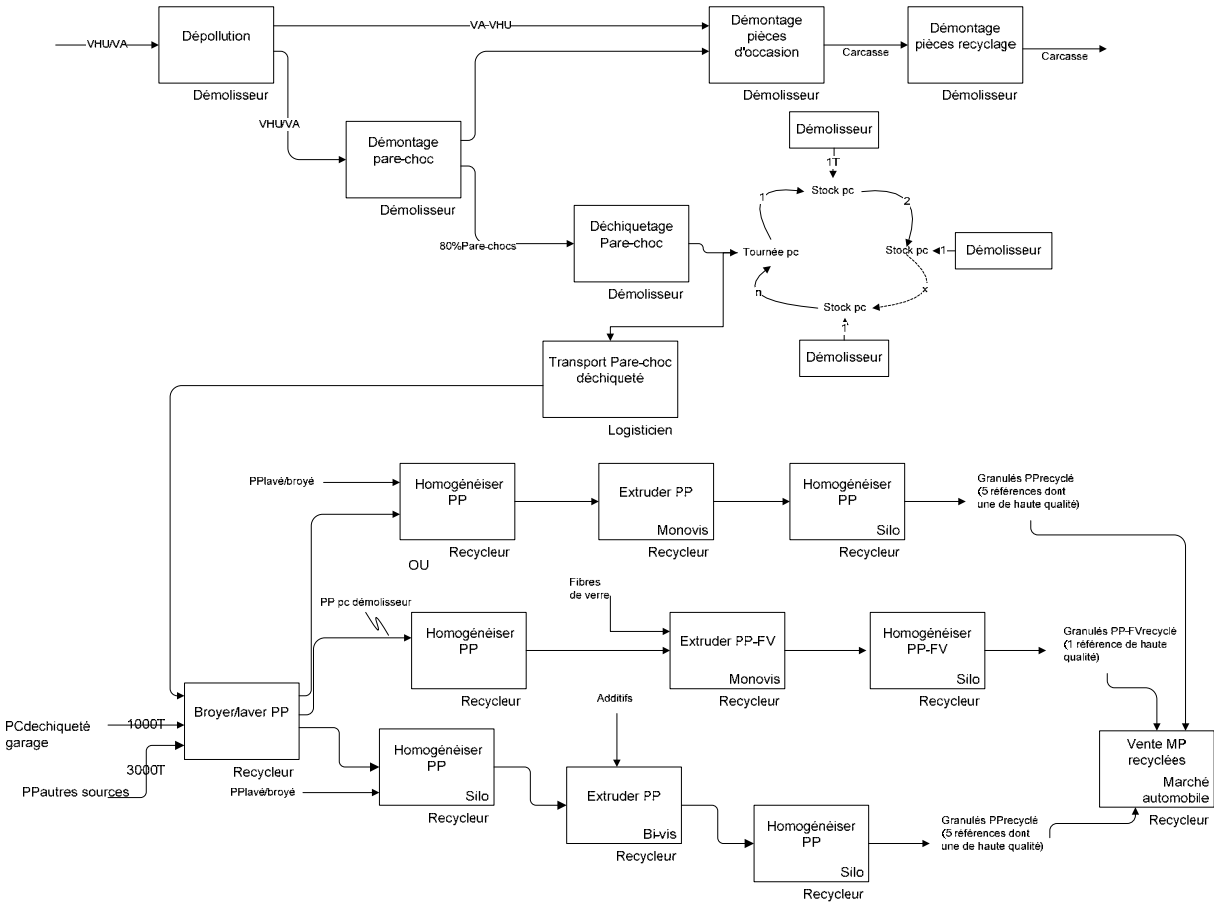


Figure 90: FiRePPAutoPC régionale

Les activités que nous avons prises en compte dans cette filière sont (cf. Figure 90) :

- Collecte des VHU et des VA.
- Activités du démolisseur :
    - o activités directement liées à la démolition : dépollution des véhicules, démontage et ventes des pièces d'occasion, démontage des pare chocs, vente des carcasses aux ferrailleurs,
    - o activités annexes liées indirectement aux activités de valorisation: réparation et vente de véhicules d'occasion et véhicules assurances.
- Le déchiquetage et la collecte des pare-chocs auprès des démolisseurs : le déchiquetage est effectué par les démolisseurs participant à la collecte des pare-chocs.
- Activités des recycleurs : broyage et lavage des composants en PP, homogénéisation de la matière, extrusion/granulation avec formulation de la résine.
- Vente de la matière recyclée aux équipementiers plasturgistes.

Le modèle créé est dimensionné pour satisfaire aux besoins de retraitement des flux de PP usagés d'une région Française (cf. Figure 91, Tableau 32). L'ensemble des flux est donc dimensionné à cette échelle. Le démolisseur moyen choisi traite avant toute optimisation 1400 VFV par an représentant un volume collectable de pare-chocs d'environ 11 tonnes par an (environ 80% des pare-chocs sont démontés). Ce flux représentera pour le recycleur un flux de matière de haute qualité.

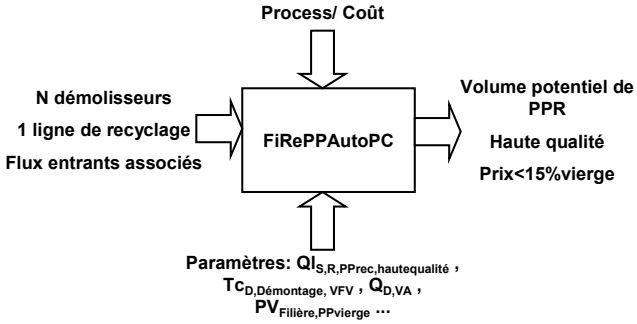


Figure 91: Cahier des charges de la filière modélisée

Nombre de VFV	Echelle	Volume pc collectables (0,02T)
1800000	National	36000
1200000	National collecté	24000
480000	Démolisseurs certifiés (2006)	9600
70000	Région	1400

Tableau 32: Dimensionnement des flux de pare-chocs collectables

Nous avons choisi d'indexer le cours du PPR sur le cours de la matière vierge et donc sur le cours du pétrole (pratique pas encore bien intégrée au niveau des recycleurs).
Au sein du processus de recyclage de la matière, le flux de matière issu des pare-chocs n'est pas mélangé avec les autres flux de PP provenant du recyclage d'autres secteurs car il est utilisé spécifiquement pour la réalisation de certaines références hautes qualités de matières recyclées et destinées à l'industrie automobile comme par exemple le PP-FV.

Nous avons lissé les dysfonctionnements techniques liés à une non exploitation optimale des outils de production utilisés par ces entreprises (surcoûts de maintenance, pertes de productivité, goulets d'étranglement…). Nous les avons identifiés à l'aide de simulations sous WITNESS[@]. Chacun des acteurs, moyennant les investissements nécessaires, présente les capacités pour faire face à ces dysfonctionnements. S'en affranchir permet d'identifier les autres raisons de non-développement plus difficiles à cerner et essentielles à solutionner pour permettre le déploiement des filières.

II-1-4. Validation des performances de FiRePPAutoPC

II.1.4.a. Mesure des indicateurs de performance

Les mesures des marges de la filière et de ses acteurs ont été effectuées sur une année avec des données de 2006. La calibration du modèle- soit la comparaison des valeurs mesurées avec les valeurs transmises par les acteurs- nous a permis de définir le temps de simulation à partir duquel le système s'équilibrait, temps minimum à partir duquel les données obtenues par la simulation sont prises en compte. Les valeurs des principaux indicateurs de performance du système de référence sont données dans le Tableau 33.

II.1.4.b. Bilan du système de référence

Le démolisseur

La marge de l'activité démolition est fortement négative pour un fort pourcentage de VA traité. L'évolution de ces dernières années a vu une diminution de la vente des pièces d'occasion liée à l'augmentation de la complexité pour le particulier de réparer son véhicule et liée également à la diminution des accidents (ADEME 2003c). Le chiffre d'affaires lié à cette activité représentant une grande part de son bénéfice, la marge ne fait que diminuer. L'activité de démolition n'est donc pas

rentable à elle seule. Il apparaît que le démolisseur a besoin de nouveaux débouchés pour augmenter sa marge et tendre vers une économie positive. Plusieurs voies sont possibles pour acquérir ces débouchés :

- le démontage de nouvelles pièces, par exemple en MP,
- l'augmentation du prix de vente des carcasses : ce prix n'est pas indexé pour le moment sur la qualité des carcasses. Mais si le démolisseur démonte plus de pièces, la qualité de la carcasse augmentera et on pourrait imaginer que le prix augmente de la même façon. Cette augmentation a un impact direct sur l'activité des broyeurs, elle est donc à envisager en collaboration avec ce métier.
- L'industrialisation des lignes de démontage : le démontage est manuel, ce qui implique un poste coût de démontage très élevé. Une industrialisation permettrait de réduire ces coûts mais rentre en opposition direct avec le maintien de l'activité de tous les démolisseurs existants (donc du côté sociétal de l'activité) ou bien alors un regroupement de plusieurs démolisseurs devra être envisagé.

Nom	Valeurs initiales
$M_{D,Démolition,VFV}$ (€/VFV)	<<0
$M_{D,Démolisseur,VFV}$ (€/VFV)	>>0
$M_{R,Recyclage,PP,}$(€/Tonne)	<<<0
$M_{R,Recyclage,MP}$ (€/Tonne)	<<0
$TauxRecyclage_{pp}$	0
$Re_{R,Recyclage,PP}$	0.9T/h
$Re_{D,Démolition,\ VFV}$	0.8VFV/h
$QI_{S,R,PP,\ Autoj}$	70% de faible qualité
$PV_{S,R,PPj}$	x

Tableau 33: Performances de FiRePPAutoPC de référence. La signification des tendances est explicitée dans l'Annexe 20.

Le recycleur

La marge du recycleur liée à l'activité du recyclage du PP est négative. Les volumes de matière en entrée sont trop faibles pour rentabiliser ses lignes. Ces dernières ont donc des temps d'occupation faibles. Ceci induit des coûts de production élevés. D'autre part, le recycleur traite un fort pourcentage de références de basse qualité donc à bas prix de vente. Leur prix de vente est en accord avec les exigences du marché automobile mais compte-tenu des coûts de production élevés le chiffre d'affaires lié à l'activité de recyclage du PP reste faible. A partir de ces informations, certaines solutions peuvent être envisagées pour améliorer la marge du recycleur :

- l'augmentation des volumes en entrée : ceci conduirait à une amélioration des performances techniques de la ligne de traitement. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles sources comme par exemple de nouvelles pièces démontées par les démolisseurs ou bien des flux hors automobiles mais maîtrisés comme les DEEE.
- l'augmentation du volume des références à plus forte valeur ajoutée : le prix de vente serait plus élevé que celui des références actuelles tout en n'induisant pas une augmentation équivalente des coûts de production, à condition que la qualité des entrants soit maîtrisée. Les gains obtenus par le recycleur seraient alors plus importants.

Ces résultats confirment que la FiRePPAutoPC de référence est une filière émergente qui a besoin qu'un ensemble d'actions soit mis en œuvre pour pouvoir atteindre une stabilité.

II-2. Amélioration des performances de la filière pour répondre aux attentes des parties prenantes

L'analyse de la FiRePPAutoPC de référence a montré qu'elle avait une économie négative tant au niveau de chaque acteur qu'au niveau global. Une première analyse des résultats a mis en évidence des pistes d'actions pour améliorer ses performances technico-économiques. ODEFIRE va nous permettre de valider ou non la pertinence de mener de telles actions pour développer cette filière mais également d'en identifier de nouvelles avec les acteurs responsables du bon déroulement de ces actions.

II-2-1. Les attentes des parties prenantes

L'amélioration des performances d'une filière se réalise par rapport à une valeur cible à atteindre. Dans notre expérimentation les valeurs que doit atteindre FiRePPAutoPC correspondent aux attentes des différentes parties impliquées dans la supply chain automobile et dans FiRePPAutoPC.

Ces valeurs sont détaillées dans le Tableau 34. Toutes ces valeurs sont reliées directement à des indicateurs qui eux-mêmes sont reliés directement à des paramètres du modèle. Cette traduction permet d'analyser les résultats du modèle en fonction des valeurs attendues par les parties.

II-2-2. Choix des paramètres d'analyse

Tout d'abord, il est nécessaire d'avoir une connaissance technique, économique et organisationnelle précise du système à étudier pour identifier les paramètres susceptibles d'impacter le système au niveau global et au niveau de chaque acteur. Dans notre cas, celle-ci s'acquière auprès des acteurs de la filière par le biais d'entretiens, à partir d'un bilan des travaux scientifiques dans le domaine (différents modèles proposés pour l'étude de scénarios fin de vie (cf. Chapitre 2) et des relations mathématiques du modèle.

Les paramètres à faire varier ont été classés en deux catégories :

- Les paramètres en lien avec les critères d'évolution non maitrisables par les parties : ceux qui vont évoluer dans le temps compte tenu de l'évolution du contexte
- Les paramètres en lien avec les critères maîtrisables : ceux sur lesquels les parties peuvent agir directement.

Les paramètres choisis ainsi que leurs effets potentiels sont résumés dans l'Annexe 17.

II.2.2.a. Paramètres du démolisseur

Ce sont des facteurs conduisant à une variation des caractéristiques d'entrée de la filière et en sortie du démolisseur. Ils correspondent notamment aux facteurs-clés d'évolution définit par l'ADEME (ADEME 2003c).

$Tc_{D,Démontage,\ VFV}$

$Tc_{D,Démontage,\ VFV}$ correspond au temps de démontage des VA pour une quantité donnée de pièces d'occasion démontées. Ce temps va tendre à augmenter avec les nouveaux véhicules. Ainsi ces derniers sont de plus en plus complexes, notamment en raison des nouveaux modules électroniques. Ceci induit une augmentation du temps de démontage de pièces standard pour la vente de pièces d'occasion. Par conséquent le coût de traitement des véhicules va également augmenter et la marge du démolisseur diminuer.

Partie Prenante	Attentes	Performance	Indicateur	Valeur
Société Civile Gouvernement	1- Viabilité et pérennité de la filière 2- Informations sur les performances 3- Respect de la réglementation	Sociétale Economique Technique Organisationnelle Environnementale	$M_{Filière}$	Equilibre, >0
			$V_{S,PP}$	Réponse à un marché donné
			QI_{PP}	Nouveaux débouchés
			$PV_{filière,PP}$	Réponse à un marché donné
			$TauxRecyclage_{VFV}$	85%
Les constructeurs	1- Viabilité de la filière 2- Les scénarios à développer 3- Informations sur les résultats 3- Respect de la réglementation 4- Augmentation utilisation matière recyclée	Technique Economique	$M_{filière}$	Equilibre, >0
			V_S	>30000T
			$TauxRecyclage_{VFV}$	85%
			$QI_{S,PP}$	Débouchés haute qualité
			$PV_{Filière,PP}$	<matière vierge
Equipementier	1- Recycleurs comme fournisseurs 2- Utilisation en conception de matière recyclée haute performance 3- Anticiper la demande des constructeurs	Economique Technique Organisationnelle	$M_{R,Recyclage,MP}$	Equilibre, >0
			$V_{S,R,PP}$	>10000T
			$TauxRecyclage_{Pièces}$	Maximal
			$QI_{S,PP}$	Réponse aux cdc de pièces de structure
			$PV_{S,R,PP}$	15% < prix matière vierge
Acteurs filières	1- Stabilité 2- Augmentation des flux 3- Nouveaux débouchés	Economique Technique Organisationnelle	$M_{D,Démolition,VFV}$ $M_{D,Démolisseur,VFV}$ $M_{R,Recyclage,MP}$ $M_{R,Recyclage,PP}$	Equilibre, >0
			$CR_{R,Recyclage,PP}$	Minimaliser
			$V_{S,Recycleur,PP}$	Répondre au cdc de l'acteur en aval,
			$QI_{S,R,PP}$	Nouvelle référence de qualité
			$PV_{S,R,PP}$	Répondre au marché

Tableau 34: Attentes des parties prenantes et performances associées

$\underline{Po_{U,VFV}}$

$Po_{U,VFV}$ représente le poids moyen des VFV. Même si aujourd'hui de nombreuses actions sont menées dans l'industrie automobile (Cabal et al. 2005) pour diminuer le poids des véhicules, le poids des nouveaux véhicules tend à augmenter en raison de nombreux composants électroniques. Donc au fil des années, le poids moyen des VFV arrivant chez le démolisseur a augmenté. En 2000, le poids moyen des VFV était de 0,8T, en 2005, de 1T et d'ici quelques années de 1,2T voire de 1,4T (ADEME 2003c). Cette évolution conduit à une augmentation du poids moyen des carcasses donc à une augmentation du chiffre d'affaires des ventes liées au recyclage.

$Q_{D,VA}$

$Q_{D,VA}$ représente la proportion de VA en entrée du démolisseur. Ce paramètre est dit composite c'est-à-dire qu'il représente la variation de plusieurs paramètres simultanément. Ainsi la variation du pourcentage de VA induit automatiquement une variation de la proportion de VHU en entrée. Une diminution du nombre de VA conduit à une diminution du temps global de démontage donc à une augmentation du nombre possible de VFV traités pour une même configuration d'acteur. D'autre part, comme le nombre d'accidents tend à diminuer, le nombre de VA disponibles est plus faible. Ensuite, cette diminution conduit à une baisse des ventes de pièces d'occasion. Ainsi les VA sont la principale source de ces pièces. En contrepartie, le prix moyen d'achat va diminuer. Ainsi les VA ont un prix d'achat élevé compte tenu de leur valeur. Ce facteur composite présente à la fois un effet positif et négatif. Ainsi le coût de traitement sera plus faible mais le chiffre d'affaires le plus important de la démolition soit la vente de pièces d'occasion va diminuer.

$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$

$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$ illustre une perte dans le chiffre d'affaires lié à la pièce d'occasion. Ainsi la diminution des accidents entraîne une diminution du besoin des particuliers de recourir à la pièce d'occasion. D'autre part la complexification des véhicules (contrôles électroniques, accessibilité des pièces) diminue les possibilités des particuliers de les réparer eux-mêmes à l'aide de pièces d'occasion. De plus une ouverture des marchés à la copie libre des pièces neuves concurrence le marché de la pièce d'occasion. Compte tenu du bilan des entretiens effectués auprès de démolisseurs, ce marché tend vers la baisse.

$PV_{S,D,carcasse,B}$

$PV_{S,D,carcasse,B}$ correspond au prix de vente moyen des carcasses par le démolisseur au broyeur. Nous posons l'hypothèse que ce prix augmentera dans les années à venir dû à une augmentation de la qualité de la carcasse (démontage de pièces plastiques) ou à un impact direct de l'augmentation du prix de vente des ferrailles. Pour le moment, nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour quantifier ces relations. Cette augmentation du prix conduit à une augmentation du chiffre d'affaire lié au recyclage et pourrait peut-être pallier en partie l'effet négatif de la baisse des ventes de pièces d'occasion.

II.2.2.b. Paramètres du recycleur

$V_{E,R,PP}$

$V_{E,R,PP}$ représente le volume de PP disponible en entrée du recycleur hors flux en provenance du démontage des pièces plastiques. Ainsi le volume de plastiques fin de vie disponible actuellement est faible par rapport au volume collectable. Ce volume devrait augmenter dans les années à venir par l'augmentation de la collecte et l'augmentation de l'efficacité des techniques de tri. Cette augmentation conduit à une augmentation du temps d'occupation des lignes et donc à une diminution du coût de revient du recyclage.

$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$

$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$ correspond à la répartition des références de PP recyclé que propose le recycleur pour l'automobile. C'est un paramètre composite puisque la variation de la quantité d'une référence entraîne la variation des autres. Actuellement, la référence produite en plus grande quantité est celle d'une référence destinée à des applications basse qualité. Par déclinaison de contraintes, le recycleur va augmenter la part de ces références de plus haute qualité vendue à un prix plus élevé. Le chiffre d'affaire lié aux ventes de références de PP augmentera.

$\underline{PV_{Filière,PPvierge}}$

$PV_{Filière,PPvierge}$ est le prix du PP vierge. Ses variations (indexées sur celles du prix du baril de pétrole) ont une conséquence directe sur le prix demandé par l'automobile et donc par conséquent sur le prix de la matière recyclée fournie par le recycleur. Ce facteur sera pris en compte au travers du prix imposé par le marché automobile pour la MPR. Ainsi la matière recyclée doit être de 15% inférieur au prix de la matière vierge pour un même niveau de propriétés pour être facilement acceptée par les acheteurs. Le choisir comme paramètre permettra de quantifier son effet mais surtout de voir quel niveau est acceptable par le recycleur compte tenu de la situation actuelle.

II.2.2.c. Paramètres de la filière

Ils représentent les interactions entre le démolisseur et le recycleur.

$\underline{Po_{s,D,pare\text{-}choc,R}\ et\ PO_{E,R,pare\text{-}choc,D}}$

Ils correspondent au poids moyen des pare-chocs démontés par véhicule et fournis au recycleur par le démolisseur. Ils comprennent le pare-choc avant, les passages de roue et le pare-choc arrière. Le chiffre d'affaires lié au recyclage sera augmenté par la vente de ces pare-chocs Mais la récupération de ces pièces précédemment laissées dans la carcasse conduit à une diminution du poids des carcasses vendues, entraînant une diminution du chiffre d'affaire lié aux ventes de carcasse.

D'autre part, cet accès aux pare-chocs permettra de disposer d'un volume de matière de bonne qualité plus important pour le recycleur. Elle conduira donc à une augmentation du volume global des entrants du recycleur, du temps d'occupation de ses lignes et à une diminution du coût de traitement. D'autre part, la connaissance de la qualité de ces pièces induira une meilleure maîtrise du procédé soit une diminution du coût de formulation.

$\underline{PV_{s,D,pare\text{-}choc,R,}}\ \underline{PA_{E,R,pare\text{-}choc,D}}$

Ces deux paramètres représentent le prix de vente (par le démolisseur) et le prix d'achat (par le recycleur) des pare-chocs déchiquetés in situ chez le démolisseur. Ils doivent être au moins équivalents au prix de la carcasse pour éviter une diminution du chiffre d'affaires actuel du démolisseur. Ce prix doit tendre vers une augmentation pour améliorer les revenus autres que la pièce d'occasion pour le démolisseur. Ceci induit par conséquent une augmentation du prix de la matière déchiquetée soit une augmentation du prix moyen des entrants du recycleur donc un coût de revient plus élevé et une diminution de la marge. Ce paramètre est représentatif d'un paramètre aux effets contradictoires sur deux acteurs. Il faut donc trouver une valeur de compromis pour ne défavoriser aucun d'entre eux.

$\underline{N_{démolisseurs}}$

$N_{démolisseurs}$ représente le nombre de démolisseurs démontant les pare-chocs pour le recyclage. Un démolisseur seul ne dispose pas d'un approvisionnement suffisant pour un recycleur. De plus, le nombre de démolisseurs va augmenter naturellement puisque nombreux sont ceux qui démontent déjà les pare-chocs. Ainsi il faut un nombre suffisant de démolisseurs pour limiter les coûts de transport liés à la récupération des pare-chocs. Mais $N_{démolisseurs}$ ne peut pas être trop important car considérer que tous les démolisseurs soient fournisseurs d'une seule entité est peu envisageable ne serait ce que pour les coûts logistiques. Enfin l'augmentation de ce nombre conduit à une augmentation conséquente d'un gisement à faible coût et de qualité maîtrisée pour le recycleur, soit un effet positif sur l'économie de la filière.

II-2-3. Les plans d'expérience

Compte-tenu :

- du nombre de paramètres à prendre en compte pour établir une configuration idéale pour les performances de FiRePPAutoPC,
- du nombre de valeurs possibles pour chacun de ces paramètres,

nous avons déployé un plan d'expérience permettant d'atteindre un résultat robuste (Tahon 2003, Alexis 1995). Les plans permettent d'étudier simultanément l'effet combiné de divers paramètres. L'objectif principal de ce plan est de maximiser la marge des différents acteurs de FiRePPAutoPC. Le choix des paramètres (cf. II-2-2) et de leurs différentes valeurs (appelées ci-après niveaux) sont primordiaux pour non seulement s'affranchir d'un oubli mais également pour tester les plus grandes variations de niveaux conduisant à des caractéristiques très différenciées. Les différences obtenues sur un indicateur comme la marge pour plusieurs niveaux d'un même paramètre représente l'effet du paramètre sur cet indicateur.

II.2.3.a. Les niveaux des paramètres d'analyse de FiRePPAutoPC

Pour chaque paramètre décrit précédemment, des niveaux sont définis (cf. Tableau 35). Leur nombre diffère d'un paramètre à l'autre. Leurs valeurs ont été choisies à partir du bilan d'études sur la filière, de discussions auprès des acteurs sur les possibilités d'évolution de celle-ci mais également à partir d'analyse de l'évolution de l'indicateur de performance en fonction d'un nombre x de niveaux afin de définir à partir de quel moment le changement n'est plus significatif.

II.2.3.b. Création de la table d'expériences

A partir des différents paramètres et niveaux choisis, nous avons construit une table d'expériences de type L32 à l'aide du logiciel de plan d'expériences OPTIMUM (Alexis 1995) (cf. Annexe 21). La table obtenue est une table fractionnaire c'est-à-dire qu'elle donne le nombre minimal de simulations à réaliser pour identifier les effets. Les valeurs obtenues pour les caractéristiques à optimiser sont intégrées à la table. Les indicateurs à maximiser sont $M_{D,Démolition,VFV}$, $M_{R,Recyclage,PP}$.

II-2-4. Analyse des effets des différents paramètres

Le calcul des effets et leur représentation sont réalisés à l'aide d'OPTIMUM. Chaque ligne du plan équivalente à une configuration de niveaux de paramètres est simulée à l'aide d'ODEFIRE. Les effets sur les marges sont présentés sur la Figure 92. Les paramètres ayant le plus d'effet sont :

- $Q_{D,VA}$ pour le démolisseur : une valeur croissante de ce paramètre présente un effet négatif. L'objectif est donc de minimiser son effet.
- $PV_{Filière,PPvierge}$ pour le recycleur : son augmentation a un effet positif. L'objectif est donc de maximiser son effet.

II-2-5. Configuration d'amélioration des performances de FiRePPAutoPC

II.2.5.a. Amélioration de la marge des acteurs de FiRePPAutoPC

A partir des résultats des effets, OPTIMUM nous a permis d'obtenir la configuration de niveaux de paramètres la plus favorable pour chacune des marges et les valeurs de marge associées (cf. Tableau 36). Pour identifier les paramètres ayant la plus forte contribution, les marges des acteurs ont été mesurées séparément dans le cadre de deux plans d'expériences distincts.

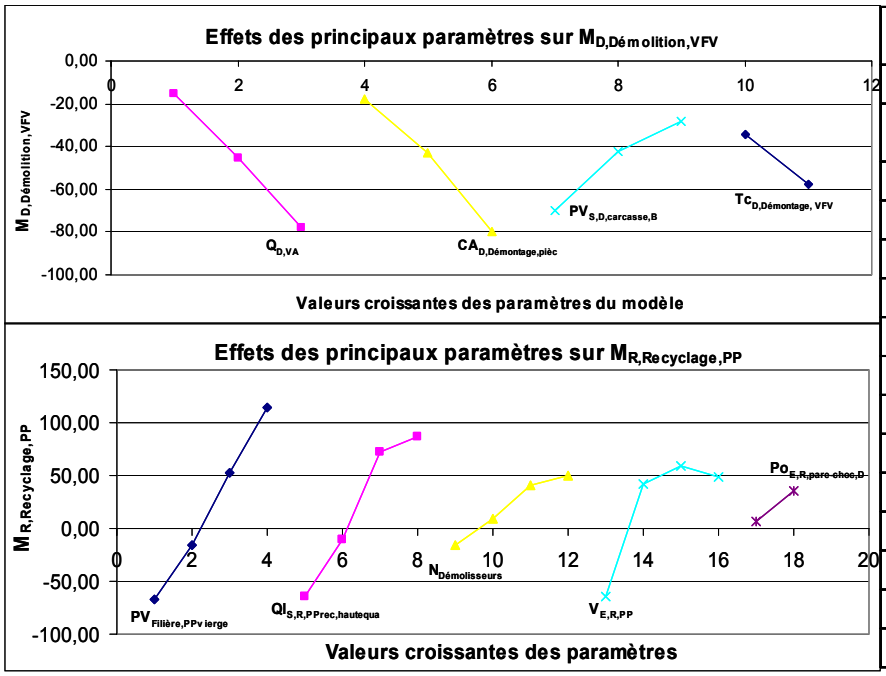
Le démolisseur

Les paramètres présentant la contribution la plus forte sont dans l'ordre décroissant (cf. Tableau 36):

- $Q_{D,VA}$: à partir d'une certaine quantité de VA traités, le coût de démontage associé à cette activité empêche la réalisation de dégager une marge positive à la vente. Ceci s'entend dans le dimensionnement spécifique retenu pour le démolisseur de notre modélisation.
- $CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$: un maintien des activités de vente de pièces d'occasion est nécessaire pour permettre le dégagement d'une marge si aucun changement structurel n'est appliqué à l'activité du démolisseur.
- $PV_{S,D,carcasse,B}$: une augmentation du prix de vente de la carcasse est indexée à la qualité de la ferraille est une voie d'amélioration essentielle pour l'évolution de la démolition dans les années à venir.
- $Tc_{D,Démontage,\ VFV}$: le démontage étant manuel, son temps doit être minimisé afin de réduire le coût de traitement des VFV.

Paramètres	$N_{niveaux}$	Origine	Valeur niveaux
$Q_{D,VA}$	3	Le niveau le plus faible correspond à la moyenne française.	80 60 40
$Po_{U,VFV}$	2	1T correspond au poids moyen actuel, 1,2 représente leur poids moyen dans quelques années.	1 1,2
$Tc_{D,Démontage,\ VFV}$	2	Données obtenues auprès des démolisseurs. Le temps maximal de démontage des VA peut aller jusqu'à 8h.	Uniform (1,6) Uniform (1,8)
$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$	3	Selon l'entretien auprès des démolisseurs, cette diminution peut aller jusqu'à 25%. Cette information est confirmée par l'étude ADEME qui dans son modèle considère une diminution de 10% sur quelques années.	0 10 25
$Po_{s,D,pare\text{-}choc,R}$, $Po_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	2	Selon des retours d'expérience de la filière et de l'industrie automobile, le poids récupérable serait de 0,02T par véhicule.	0,01 0,02
$PV_{s,D,pare\text{-}choc,R}$, $PA_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	4	Le niveau maximal correspond à un prix de vente de pare-chocs broyés équivalent au prix actuel des autres sources de PPbroyé.	60 100 160 200
$PV_{S,D,carcasse,B}$	3	Le niveau minimal est la situation actuelle. Le niveau maximal choisi s'approche du prix de vente des ferrailles.	60 80 100
$N_{démolisseurs}$	4	Nous choisissons comme niveau maximal 100 (nombre en région) au dessus se pose le problème d'un seul client pour tous ces fournisseurs.	1 20 40 100
$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$	4	Le niveau maximal choisit correspond à la quantité de références de haute qualité vers laquelle veut tendre le recycleur. Elle correspond à une demande du marché automobile mais également à une volonté de se positionner sur des marchés de faible volume avec un prix de vente élevé.	5 15 30 40
$PV_{Filière,PPvierge}$	4	Ces 4 niveaux permettront d'identifier quel compromis devront faire l'industrie automobile et le recycleur pour favoriser le développement de la filière.	5 10 15 20
$V_{E,R,PP}$	4	Elle se traduit par une multiplication du nombre de bennes arrivant chaque semaine chez le recycleur jusqu'à atteindre un volume légèrement supérieur au volume maximal que peut traiter la structure.	T1 T2 T4 T8

Tableau 35: Les différents niveaux des paramètres pour la construction des plans d'expérience



Paramètres du modèle	Effet
Démolisseur	
$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$	☹
$Q_{D,VA}$	☹
$Tc_{D,Démontage,}$ VFV	☹
$Po_{U,VFV}$	☺
$PV_{S,D,carcasse,B}$	☺
$PV_{s,D,pare-choc,R}$	☺
$Po_{s,D,pare-choc,R}$	☺
Recycleur	
$PV_{Filière,PPvierge}$	☺
$V_{E,R,PP}$	☺
$N_{démolisseurs}$	☺
$PA_{E,R,pare-choc,D}$	☹
$Po_{E,R,pare-choc,D}$	☺
$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$	☺

Figure 92: Effets des paramètres sur $M_{D,Démolition,VFV}$ et $M_{R,Recyclage,PP}$

Le recycleur

Les paramètres présentant la contribution la plus forte sont dans l'ordre décroissant (cf. Tableau 36):

- $PV_{Filière,PPvierge}$: une augmentation du prix attendu par le marché et par conséquent l'élévation du prix de la matière vierge ont une conséquence directe et forte sur le prix auquel le recycleur peut vendre ses matières.
- $QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$: pour tendre vers une économie positive, le recycleur, selon la structure que nous avons choisie, doit réaliser une part importante de matière de qualité, qualité qui va dépendre de la nature de ses entrants et la possibilité d'intégrer un marché.
- $V_{E,R,PP}$: La contribution de ce paramètre démontre que le recycleur doit augmenter la quantité des sources de matière en entrée pour réduire ses coûts de production.
- $N_{démolisseurs}$: pour obtenir une quantité suffisante de sources de qualité type pare-chocs le recycleur doit s'adresser à un regroupement conséquent de démolisseurs qui correspond dans notre expérimentation au dimensionnement régional.

Les valeurs de marge obtenues par la simulation du modèle pour une configuration de paramètres donnée correspondent aux valeurs calculées par le plan d'expériences. Ceci confirme que notre plan est valide pour étudier les effets des paramètres et qu'il n'y a pas d'interaction entre les niveaux de paramètres choisis.

II.2.5.b. Analyse des interactions

L'amélioration de la marge globale correspond à une maximisation simultanée des marges des acteurs pour une configuration de paramètres donnée. Les résultats sont présentés dans le Tableau 36. Les résultats des indicateurs associés sont résumés dans le Tableau 37.

A partir des résultats obtenus, deux constats ont été effectués :

- Certaines valeurs de paramètres ont dû être modifiées entre les niveaux donnés par le plan et les niveaux utilisés pour la simulation. En effet, certains niveaux du plan (plan qui ne fait que maximiser les niveaux sans prendre en compte de facteurs extérieurs) ne sont pas cohérents

avec une évolution envisageable pour la filière (ex : $CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$, on cherche à compenser cette perte et non à la maintenir).

- Les valeurs obtenues pour les marges des acteurs modélisées simultanément sont différentes de celles obtenues pour les acteurs modélisés à l'aide de deux plans distincts. Ceci met en évidence que certains paramètres impactent à la fois le démolisseur et le recycleur. Les évolutions économique et structurelle de ces acteurs sont interdépendantes et les considérer séparément reviendrait à aller à l'encontre du développement de l'un d'entre eux. Une analyse et amélioration efficientes de la filière ne peuvent donc être envisagées sans prendre en compte l'ensemble des acteurs impliqués.

Paramètres	**Valeurs des paramètres utilisées pour le plan**	**Contribution (%)**	**Valeurs des paramètres utilisées pour le plan**	**Contribution (%)**	**Valeurs des paramètres obtenues par le plan**	**Valeurs des paramètres modifiées**
$Q_{D,VA}$	40	26,8	60	1,8	**49,7**	**40**
$Po_{U,VFV}$	1,2	/	/	/	1,2	1,2
$Tc_{D,Démontage,\ VFV}$	uniform(1,6)	8,8	/	/	**uniform(1,6)**	**Uniform(1,4)**
$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$	0	26,4	/	/	**10**	**0**
$Po_{s,D,pare\text{-}choc,R}$, $Po_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	0,02	/	0.02	1,4	0,02	0,02
$PV_{s,D,pare\text{-}choc,R}$, $PA_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	200	V	60	/	160	160
$PV_{S,D,carcasse,B}$	100	11,8	/	/	**89,7**	**120**
$N_{démolisseurs}$	/	/	100	4,9	100	100
$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$	/	/	40	30,1	40	40
$PV_{Filière,PPvierge}$	/	/	20	36,8	**15**	**20**
$V_{E,R,PP}$	/	/	T4	19,6	**T2**	**T4**
Valeurs des Marges obtenues par le plan	$M_{D,Démolition,VFV}$ = 42€/VFV (6,5 à 76,7)		$M_{R,Recyclage,PP}$=230€/T (175 à 286)		$M_{D,Démolition,VFV}$ = 4,9€/VFV (-40 à 31) $M_{R,Recyclage,PP}$ = 176€/T (120 à 232)	
Valeurs des Marges obtenues par simulation	$M_{D,Démolition,VFV}$ = 40€/VFV		$M_{R,Recyclage,PP}$=200€/T			$M_{D,Démolition,VFV}$ = 27€/VFV $M_{R,Recyclage,PP}$ =120€/T

Tableau 36: Configuration de paramètres la plus favorable pour maximiser les marges: comparaison des résultats donnés par le plan et par la simulation

Analyse des résultats de la filière

Le démolisseur :

La vente des pare-chocs pour le démolisseur moyennant un certain niveau de prix est une activité à économie équilibrée voire positive participant de façon favorable au développement de cet acteur. L'atteinte d'une économie positive par cet acteur demande des changements organisationnels relativement importants, notamment dans le déploiement de son activité et la nature des produits traités (cf. Tableau 37).

Le recycleur

L'approvisionnement en PP issu des démolisseurs autorise la production de références de qualité, avec des coûts de formulation maîtrisés compte-tenu du fait que la qualité en entrée est connue. La vente de ces références à des marchés de qualité paraît primordiale pour développer une activité à économie positive notamment dans le cas de recycleurs à capacités de production peu élevées (10000-15000T).

Nom	Valeurs initiales	Valeurs maximisées
$M_{D,Démolition,VFV}$ (€/VFV)	<<0	>0
$M_{D,Démolisseur,VFV}$ (€/VFV)	>>0	>>0
$M_{R,Recyclage,PP,}$(€/T)	<<<0	>>0
$M_{R,Recyclage,MP}$ (€/T)	<<0	>>0
$TauxRecyclage_{pp}$	0	+1,6%
$Re_{R,Recyclage,PP}$	0.9T/h	1,5T/h
$Re_{D,Démolition, VFV}$	0.8VFV/h	1,5 VFV/h
$QI_{S,R,PP, Autoj}$	70% de faible qualité	40% de haute qualité
$PV_{S,R,PPj}$	x	+50%

Tableau 37: Performances de FiRePPAutoPC avant et après amélioration

Les résultats obtenus tant pour les paramètres que pour les indicateurs de performance montrent que FiRePPAutoPC peut atteindre une économie positive et nous permettent de mettre en place le cahier des charges pour parvenir à cet équilibre, soit le dimensionnement de la filière au niveau régional.

Le cahier des charges obtenu grâce à l'expérimentation donne les conditions suivantes:

- Utilisation de 1400T de pare-chocs collectables par les démolisseurs,
- De nouveaux flux de PP en provenance d'autres sources qui conduisent à un volume de PP traité par le recycleur de 7000T par an,
- Création de nouvelles références de haute qualité à hauteur de 40% du volume en sortie du recycleur. 1400T de ce PP sont de très haute qualité directement issus du PP des pare-chocs. Ces 1400T correspondent au PP-FVR attendu par POAE.
- Une augmentation du cours de la matière vierge de 20% par rapport à son cours de 2006 (à euros constant). L'élévation naturelle du coût du pétrole incite à penser que cette limite ne devrait pas être un obstacle encore très longtemps. Par ailleurs ce critère est à considérer avec précaution. Tout d'abord cette augmentation entraîne également une augmentation du prix du déchet annulant dans certains cas le gain en sortie de filière. Il représente un critère d'évolution essentiel dans un premier temps mais non suffisant.

L'atteinte de ce cahier des charges, soit des niveaux de paramètres préconisés par les plans d'expériences, nécessite un certain nombre d'actions par les parties, ensemble d'actions qui représente les scénarios d'évolution.

II-2-6. Scénarios d'évolution

Obtenir ces résultats pour la filière actuelle et modifier les valeurs des paramètres dans la direction attendue induisent la mise en place d'actions (cf. Tableau 38) par l'acteur adéquat et au bon moment. Ces actions portent principalement sur :

- La réorganisation de la filière : augmenter la coopération entre acteurs pour identifier de nouveaux flux, contractualiser leurs relations pour pérenniser ces flux, envisager une industrialisation et/ou un regroupement des démolisseurs,
- L'investissement de toutes les parties prenantes : une modification des activités (adjoindre des compétences de reformulation à celles déjà présentes chez les recycleurs),
- Le positionnement des matières recyclées sur des marchés à plus hautes valeurs ajoutées en favorisant l'ouverture du marché automobile aux recycleurs pour permettre leur développement et ainsi les faire entrer dans le panel fournisseurs (travailler l'intégration des matières recyclées dans les procédures de projets de conception cf. chapitre 4 partie 1).

Les préconisations proposées représentent une base de discussion et de réflexion entre les parties prenantes.

Partie prenante	Actions	Conséquences
Cahier des charges du recycleur		
Industrie automobile Société civile	Augmentation du prix du marché lié à prix matière vierge	↗$PV_{Filière,PPvierge}$
Industrie automobile Recycleur	Production de références à plus forte valeur ajoutée=nouveaux débouchés	↗$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$
Industrie automobile Recycleur Démolisseur	Traitement de nouveaux gisements (nouvelles pièces, nouvelle matière)	↗$Po_{E,R,pare-choc,D\ pc}$ ↗$N_{démolisseurs}$
Recycleur Acteurs de la valorisation	Augmentation du nombre de sources	↗$N_{démolisseurs}$ ↗$V_{E,R,PP}$
Recycleur, Démolisseur Société civile	Matière à un prix d'achat faible	↘$PV_{Filière,PP}$
Cahier des charges du démolisseur		
Démolisseur Industrie automobile	Nouvelle activité de recyclage (pc) ou industrialisation pour compenser perte $CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$	↘$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$
Démolisseur Société civile	Diminuer la part de VA traités et démonter moins de pièces d'occasion=baisse du temps de démontage	↘$Tc_{D,Démontage,}$ VFV ↘$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$
Démolisseur Acteurs de la valorisation	Augmentation du poids de la carcasse et de son prix	↗$PV_{S,D,carcasse,B}$ ↗$Po_{D,carcasse}$

Tableau 38: Préconisations pour la mise en place de la filière de démontage des pare-chocs

II-2-7. Analyse des résultats

Cette expérimentation nous a permis :

- d'améliorer les performances d'une filière de recyclage,
- de dimensionner une filière au niveau régional,
- de répondre aux attentes des parties prenantes présentées sur le Tableau 39.

Amélioration des performances

Après validation des performances actuelles de FiRePPAutoPC, l'expérimentation d'ODEFIRE a permis la maximisation de l'indicateur de performance principal, la Marge, pour les différents acteurs de la filière. Il est important de noter que cette amélioration doit s'effectuer pour tous les acteurs en même temps pour ne pas favoriser l'un d'entre eux au détriment des autres et par conséquent mettre un frein au développement de la filière vers une économie positive. La possibilité d'atteindre l'équilibre pour la filière a été démontrée. Les modélisations ont fait ressortir l'importance des critères non maîtrisables sur le développement de la filière, comme par exemple le prix de vente de la matière vierge indexé sur l'évolution du cours du pétrole. C'est un paramètre clé dans l'évolution de l'utilisation de la matière recyclée mais non suffisant. Une indexation du prix de la matière recyclée au même titre que la matière vierge au niveau des recycleurs est également une condition sine qua non dans le développement pérenne de ces systèmes.

Dimensionnement d'une filière régionale

Le cahier des charges à destination des différents acteurs pour le dimensionnement de la filière au niveau régional a pu être obtenu. Ces résultats ont pu être validés par la mise en place d'une filière analogue à celle modélisée. Cette filière a été mise en place en région Rhône-Alpes avec la participation d'INDRA (gestionnaire-distributeur de VFV représentatif d'un ensemble de démolisseurs), Plastic Recycling (Recycleur), POAE (cf. Annexe 22). Les résultats d'ODEFIRE ont donc représenté une aide pour le développement de cette FiRePPAutoPC.

Réponse aux attentes des parties prenantes

Notre expérimentation a également répondu à l'un de ces objectifs principaux: soit améliorer les performances de FiRePPAutoPC pour répondre aux attentes des parties prenantes. En fonction des résultats obtenus pour les différents indicateurs et leur interprétation, les attentes des parties prenantes ont été dans l'ensemble satisfaites (cf. Tableau 39).

Une des conditions pour atteindre le cahier des charges de la nouvelle filière et les attentes des acteurs de la filière est la coopération entre eux (soit par contrat client-fournisseur, collaboration avec les donneurs d'ordre). Cette conclusion a pu être validée à trois niveaux par des évènements simultanés ou postérieurs à ces travaux:

- la mise en place d'une filière FirePPAutoPC en Rhône-Alpes,
- la joint-venture entre Renault et SITA en 2008[117] pour prendre en commun le contrôle d'INDRA. L'objectif de cette initiative est d'améliorer le traitement et le recyclage des VFV en France, d'assurer la réussite économique et environnementale de cette filière, contribuer à l'atteinte des objectifs de valorisation de 95 % de la masse de chaque véhicule en 2015…

[117] Actu-envionnement.com « Renault et Sita s'associent dans la déconstruction des véhicules en fin de vie » - 25/02/2008

- création d'un nouveau marché de haute qualité pour le recycleur (PP-FVR) avec la collaboration de POAE (cf. Chapitre 4).

II-3. Réponse aux problématiques

L'outil ODEFIRE a été créé pour répondre à deux besoins identifiés comme essentiels pour faciliter le développement des filières de recyclage de MP :

- Créer des connaissances sur les critères d'évolution en les quantifiant par la mesure des performances,
- Donner une représentation de la filière prenant en compte tous les critères de définition de cette filière.

Partie Prenante	Attente	Valeur
Société Civile gouvernement	Viabilité et pérennité de la filière	++
	Informations sur les performances	++
	Respect de la réglementation	Apport +
Les constructeurs	Viabilité de la filière : pas d'intervention financière	++
	Les scénarios à développer	-+
	Informations sur résultats pour prise de décision en conception	++
	Respect de la réglementation	Apport +
	Augmentation utilisation matière recyclée	++
Equipementier	Recycleurs comme fournisseur	++
	Utilisation en conception de matière recyclée haute performance	+
	Valorisation pour leurs pièces	+
	Anticiper la demande des constructeurs	++
	Potentiel des recycleurs actuels et potentiels	++
Acteurs filières	Stabilité	++
	Augmentation des flux	++
	Nouveaux débouchés	++
	Quelle organisation	-+

Tableau 39 : Réponse de FirePPAutoPC par rapport aux attentes des parties prenantes

II-3-1. Validation de l'hypothèse 1

H1 *: La création des connaissances essentielles au choix des actions à mettre en place pour faire évoluer les filières vers une configuration stable s'obtient par la mesure de leurs performances techniques, économiques, organisationnelles et environnementales*

Le passage d'une situation d'émergence à une situation plus stable nécessite un ensemble de changements à différents niveaux de la filière, changements auxquels ODEFIRE apporte une réponse au travers du cahier des charges d'actions ou scénario d'évolution que l'expérimentation nous a permis de valider.

Cette expérimentation a conduit à la quantification d'un ensemble d'indicateurs de performance, directement liés aux attentes des parties prenantes et représentatifs d'un niveau de performance donné (cf. Tableau 39, Tableau 39). Par ce biais, différents critères d'évolution ont pu être quantifiés grâce à ODEFIRE (cf. Tableau 40).

Cette quantification a donc apporté les connaissances nécessaires sur la filière pour identifier les changements tant techniques, qu'économiques et organisationnels à mener par les différentes parties prenantes pour s'approcher au mieux des conditions « idéales » d'évolution de la filière. Ces conditions sont représentées par le dimensionnement de la filière. Ces résultats ont également confirmé que la définition d'un marché de haute qualité est un critère primordial pour que la filière ait une chance de sortir de son état émergent.

Nous pouvons en déduire qu'ODEFIRE, outil centré sur la mesure des performances d'une filière, fournit les connaissances suffisantes pour définir le cahier des charges des actions à mener au niveau de chaque partie pour aider les filières de recyclage à évoluer vers plus de stabilité.

Type de critères	Définition	Paramètres d'ODEFIRE	Quantification
Non maîtrisables	Evolution du cours de la matière vierge	Prix de la matière vierge indexé sur le cours du pétrole	☺ (cf. II-2-2)
	Export des déchets	Non pris en compte	☹
Maîtrisables	Marché pour les MPR	Marché automobile au travers de POAE	☺ (cf. II.2.5.b)
	Amélioration de la qualité des Matières	Création d'une référence pour les pièces de structure	☺ (cf. II.2.5.b)
	Coopération des acteurs	Paramètre les plus influents sur la marge Actions associées à ces modifications	☺ (cf. II-2-6)
	Conditions « idéales » de développement	Dimensionnement technico-économique d'une filière régionale	☺ (cf. II-2-7)

Tableau 40: Exemples de critères d'évolution quantifiés par ODEFIRE

II-3-2. Validation de l'hypothèse 2

H2 : *Une représentation dynamique et systémique des filières intégrant un ensemble précis de caractéristiques internes et externes à la filière est essentielle pour un outil d'analyse efficient de ces systèmes indispensable pour susciter l'énonciation de voies d'amélioration.*

ODEFIRE a conduit à une analyse efficiente des filières notamment car les résultats obtenus concordent non seulement avec la réalité mais avec les attentes des parties prenantes. Cette analyse efficiente est obtenue par le biais de :

- L'amélioration des performances d'une filière existante soit d'une prise en compte des acteurs déjà en place.
- La prise en compte de tous les acteurs soit directement pour les acteurs de la filière soit indirectement au travers du dimensionnement du système en fonction des attentes de toutes les parties prenantes: les différents résultats de marge financière ont montré l'obligation de prendre en compte l'interaction entre les acteurs pour obtenir une économie positive sur l'ensemble du système.
- L'utilisation d'un outil dynamique conduit à identifier les paramètres responsables de l'évolution de l'indicateur marge (M=f(x paramètres)) ainsi que les interactions entre les acteurs.

- La considération de toutes les parties prenantes apporte une aide à la décision adaptée à chaque partie prenante par le biais d'une proposition d'un cahier des charges d'action, propositions directement utilisables par celles-ci.
- L'intégration des différents niveaux de performance : les conclusions d'ODEFIRE n'apportent pas uniquement des réponses au niveau technico-économique mais également des propositions d'évolution structurelle.

Cette expérimentation démontre que la prise en compte des critères primaires et secondaires de définition d'une filière est primordiale pour obtenir des résultats en accord avec les attentes et besoins des différentes parties prenantes, critères qu'ODEFIRE intègre (cf. Tableau 39).

Critères	ODEFIRE	Résultat
Domaines d'analyse	Analyse des filières :intersection des domaines de GrSCM, ELVCM, RL, RPCM, RePCM…	Modélisation de la filière FiRePPAutoPC
Objectif de l'outil	Aide à la décision, Optimisation de systèmes existants	Amélioration des performances de FiRePPAutoPC Proposition d'actions à destination des parties prenantes
Type d'outil/ de modélisation	Dynamique	Interaction entre les acteurs
Type de filière	Filières de recyclage	Filière de recyclage du PP issu de pare-chocs
Type de produit	VHU, MP	PP
Parties prises en compte	Toutes les parties prenantes Marché automobile	Modélisation de tous les acteurs de la filières Prise en compte des parties au travers de la prise en compte de leurs attentes
Type d'optimisation	Maximisation des performances	Différents niveaux de performance pris en compte
Paramètres pris en compte	Techniques, économiques, organisationnels	Toutes les caractéristiques des acteurs
Résultats obtenus	Acteurs existants, quantitatif, résultats potentiels …	Entretien auprès des acteurs Validation des résultats d'ODEFIRE avec les performances actuelles
Géographie	France, Réglementation européenne	Dimensionnement d'une filière à l'échelle régionale

Tableau 41 : Critères de classification de l'outil ODEFIRE

ODEFIRE permet donc de répondre aux lacunes identifiées des outils présentés dans la littérature (Chapitre 2 partie 2). Nous pouvons conclure que cet outil est une réponse adaptée aux besoins d'analyse actuels des filières et qu'une représentation dynamique et systémique des filières intégrant un ensemble de critères prédéfinis est essentielle pour obtenir une analyse efficiente de ces systèmes.

En conclusion, l'expérimentation d'ODEFIRE atteste que cet outil est une réponse adaptée aux problématiques 1 et 2.

II-4. Analyse de l'outil ODEFIRE

II-4-1. Conclusions sur l'outil

ODEFIRE permet :

- l'évaluation des performances techniques et économiques de différents acteurs de la filière,
- la prise en compte de l'ensemble des acteurs jusqu'au marché,
- la mesure des impacts des décisions d'un acteur sur le développement des autres acteurs,
- la définition des actions à mener et par qui pour faire évoluer une filière,
- le dimensionnement d'une filière la plus stable.

Ensuite, une des clés de réussite pour les filières de recyclage est la coopération entre les acteurs. Ainsi leur développement ne peut-être pérenne sans :

- L'établissement de relations contractuelles type supply chain entre les acteurs
- La connaissance des capacités de la filière globale avec principalement la connaissance des besoins et attentes des acteurs en amont et aval
- L'implication de toutes les parties prenantes dans le développement et le montage des filières.

L'utilisation d'ODEFIRE, la réalisation des actions pour développer les filières tout en respectant les attentes de chacun doit être coopérative et surtout participative d'où l'importance d'une expertise des parties prenantes renforçant la légitimité d'ODEFIRE.
C'est également un outil qui apporte une réponse aux besoins des différentes parties prenantes en leur fournissant :

- le suivi des performances d'une filière donnée : information à destination de la société civile,
- le cahier des charges des acteurs pour la mise en place et l'équilibre de la filière à destination de la société civile, la Supply Chain automobile, les acteurs de la filière,
- la contribution de la filière au taux de recyclage à destination de la société civile et de la Supply Chain automobile,
- les propriétés de la matière recyclée obtenues par la filière à destination des équipementiers et des acteurs de la filière,
- la possibilité de capitaliser les connaissances sur les performances des filières à destination de la Supply Chain automobile.

Son originalité est de proposer une base de discussion entre toutes les parties et à destination de chaque partie afin d'aider la prise de décisions adaptées au développement des filières actuelles.
La principale limite d'ODEFIRE est l'utilisation de données issues des acteurs de la filière, données nécessitant une mise à jour régulière pour conserver la pertinence de l'outil en prenant en compte les évolutions de la filière. L'accès à ces informations implique une participation directe des acteurs de la filière dans son développement. Les difficultés liées à la recherche d'informations portent sur :

- La sensibilité des données et leur inaccessibilité. Les acteurs nous ont demandé de conserver ces informations pour une utilisation propre à ODEFIRE, ce qui explique notamment qu'aucune des valeurs de paramètres ne soit transmise dans ce mémoire.
- La difficulté d'accéder à ces informations au sein de l'entreprise : intervention de différents interlocuteurs.

II-4-2. Discussion

La robustesse des résultats de l'outil relève des points suivants : la nature des résultats obtenus et la qualité des informations utilisées pour obtenir ces résultats.

La qualité des informations

Selon Leroy (Leroy et al. 2008), la qualité des informations n'est pas caractérisée uniquement par sa nature mais également par son utilisation. En d'autres termes, si la source et la forme de l'information sont suffisantes pour répondre aux objectifs visés alors la qualité de l'information est dite adaptée et suffisante. Nous n'évaluerons pas quantitativement mais qualitativement la qualité des informations selon l'ensemble des critères (corrélation technologique[118], corrélation spatiale[119], corrélation temporelle[120], complétude[121], fiabilité[122]) définissant cette qualité car nous cherchons uniquement à montrer qu'elle est suffisante pour atteindre l'objectif visé par ODEFIRE. Les informations utilisées sont corrélées au niveau :

- technologique : les données technologiques sont directement issues des acteurs utilisant ces technologies,
- spatiale : les données ont été transmises par des acteurs d'une même région correspondant à un dimensionnement régional,
- temporelle : les données doivent être mises à jour régulièrement pour que les résultats concordent avec la situation actuelle des filières,
- fiabilité : les données ont été mesurées auprès des acteurs et confirmées par la simulation,
- complétude : l'échantillon est représentatif d'un dimensionnement régional et des classes sélectionnées par la typologie. Le nombre de sources pourrait être plus important.

La qualité de l'information utilisée est donc suffisante pour mesurer des tendances sur les performances technico-économiques de la filière afin de définir les actions à mener pour un dimensionnement régional.

Robustesse des résultats

Tout d'abord, compte-tenu que la qualité des informations répond aux résultats attendus et que les valeurs obtenues par la simulation du modèle correspondent aux valeurs mesurées chez les acteurs, le modèle réalisé apparaît robuste.

Une question peut se poser sur la sensibilité du modèle par rapport à la variation des paramètres (par exemple : quelles sont les conséquences d'une variation du volume de matière ?). Ainsi le nombre de sources étant limité pour une information, une divergence dans la valeur de cette information peut-elle entraîner une forte variation dans le résultat, ce qui conduirait à des valeurs d'indicateurs et donc des conclusions erronées. Les relations entre les paramètres étant linéaires et non chaotiques (c'est-à-dire qu'une variation d'un paramètre conduit à une variation proportionnelle de l'indicateur) et les résultats attendus des tendances ou des fourchettes de valeurs, les conclusions obtenues resteront valides par rapport à l'objectif de maximiser la marge. Des valeurs limites (c'est-à-dire minimales des

[118] *Définitions données par Y.Leroy- Qualité du jeu de données, Management de l'incertitude, Stratégie de collecte- Séminaire de recherche- ENSAM Chambéry- 2006* : Corrélation entre la technologie étudiée (matériaux, procédés) et celle à laquelle se rapporte l'information

[119] Corrélation entre la zone géographique étudiée et celle à laquelle se rapporte l'information

[120] Corrélation entre la date de l'étude et celle à laquelle se rapporte l'information

[121] Représentativité de l'échantillon: distribution, période de collecte…

[122] Mode d'acquisition de l'information (mesure, estimation, calcul, vérifié ou non)

paramètres par rapport à la situation des acteurs et la maximisation de la marge) ont été définies pour chaque paramètre du modèle. En ce sens, les résultats obtenus sont robustes.

II-4-3. Perspectives

Pour améliorer les résultats d'ODEFIRE, la robustesse des résultats peut être quantifiée et non simplement évaluée de façon qualitative. Elle peut être quantifiée en :

- augmentant le nombre de sources d'informations,
- évaluant le niveau d'incertitudes sur les données,
- en mesurant le rapport signal/bruit (minimisation de l'écart-type par rapport à la moyenne) sur chaque valeur à l'aide de la méthode de Tagushi (Alexis 1995). L'objectif de cette mesure est de rendre les résultats insensibles aux perturbations extérieures.

ODEFIRE s'est révélé être un outil d'aide à la décision (outil appuyé par un développement scientifique) efficace pour le développement des filières. Son utilisation peut être étendue à d'autres filières que ce soit en termes de matériaux, de produits ou bien d'échelle (passage du régional au national) mais également à la création de nouvelles filières. Ces points ont été validés au travers d'un projet ADEME faisant suite à ces travaux de thèse (cf. Annexe 23). L'objectif de ce projet était de consolider l'outil en étendant son application à l'ensemble des filières de recyclage issues du traitement des VFV.

Les perspectives pour ODEFIRE sont de faire de cet outil un outil de référence pour le suivi des filières de recyclage à destination des acteurs de la closed-loop supply chain :

- un outil d'aide à la capitalisation des informations pour la supply chain automobile,
- un outil de suivi des filières avec une extension aux autres filières pour les décideurs et la société civile,
- un outil d'aide au développement de l'utilisation des MPR pour les équipementiers (utilisation bien engagée au sein des équipes de conception de POAE)
- un outil d'aide au développement des filières pour les acteurs de valorisation pour amélioration notamment leur coopération.

Conclusion

Cette thèse apporte une réponse satisfaisante à la problématique de recherche sur l'intégration des filières de recyclage des MP dans la Supply Chain Automobile. Pour atteindre ce résultat, nous proposons une démarche d'acquisition des connaissances DAIMRE à destination des équipementiers automobiles et un outil d'aide au développement des filières ODEFIRE à destination de toutes les parties concernées par ces filières. Notre dessein au travers de ces travaux est de :

- participer au développement des filières de recyclage robustes,
- diffuser largement les connaissances sur ces systèmes pour une aide à la décision à destination des parties prenantes et faire de ces travaux une référence dans la recherche sur les filières de fin de vie émergentes,
- réussir à pérenniser l'utilisation de MPR dans l'industrie automobile.

La prise en compte du devenir des MP dans notre société est primordiale pour des raisons tant environnementales que sociétales. Ce constat concerne aussi bien la société civile que les industries utilisatrices de MP. Ainsi la prise de conscience environnementale actuelle sur l'impact des produits au travers de l'éco-conception et sur la gestion des produits en fin de vie (campagnes sur le tri, économie de ressources…) oblige les entreprises à trouver des solutions pour le traitement de leurs produits et réduire la quantité de déchets non traités. La Supply Chain automobile est plus particulièrement concernée tant par l'obligation de prendre en compte la fin de vie des MP pour répondre à des obligations réglementaires qu'en tant que précurseur dans le prise en compte des critères environnementaux dans la conception de produit.

Dans ce cadre, de nombreux efforts doivent être effectués vis-à-vis de la prise en charge des impacts environnementaux des MP, matières à la fois consommatrices d'une ressource non renouvelable et génératrices de déchets insuffisamment traités aujourd'hui. Les filières de recyclage sont apparues comme une solution permettant de répondre à ces deux problématiques.
La construction d'une filière dépend du produit en entrée, du marché attendu, des attentes des acteurs… Ces caractéristiques qui lui sont propres, doivent être définies et prises en compte dans l'analyse de ces systèmes pour développer une filière adaptée au matériau choisi mais surtout aux attentes des différentes parties prenantes impliquées dans le système. L'analyse de leur processus d'émergence révèle qu'un critère crucial comme la définition d'un marché n'est pas défini lors de la conception de ces systèmes. D'autre part les marchés investis par les MP sont des marchés à faibles valeurs économiques défavorisant l'équilibre économique de l'ensemble de la filière. D'autre part, les outils développés à ce jour par l'industrie automobile ne prennent pas en compte le devenir des matières post-recyclage. Enfin, les producteurs et équipementiers ne se perçoivent pas comme des utilisateurs de cette matière. Pour des motivations tant économiques qu'environnementales, cette intégration s'avère cependant nécessaire pour instaurer une régularité et une qualité des approvisionnements en matières recyclées propres aux exigences du secteur automobile. D'un point de vue autre que le seul intérêt des donneurs d'ordres automobiles, nos travaux nous ont permis de mesurer que cette intégration est également un élément clé pour le développement des filières de recyclage. En effet, une intégration réussie permettra aux acteurs des filières de passer des modes organisationnels artisanaux et chaotiques à des fonctionnements standardisés plus propice à fournir de la robustesse aux filières. L'intégration de ces filières dans un système complexe comme la Supply

Chain automobile implique donc la prise en compte d'un marché en accord avec les pratiques de conception de l'industrie automobile dans une démarche d'analyse des filières pour un passage de l'émergence à la stabilité pour ces systèmes.

Nos travaux s'intègrent complètement, au travers du génie industriel, dans le développement de démarches de conception pour la fin de vie au sein des entreprises. Ces travaux apportent une réponse à des attentes réelles de l'industrie automobile en terme d'aide à l'intégration de l'utilisation de MPR dans des pièces à hautes performances mécaniques et à leur besoin en termes de connaissances sur les performances des filières pour parfaire leurs pratiques sur la gestion des produits en fin de vie pour une adéquation produit/système de fin de vie.

En ce qui concerne le contexte de recherche, nos travaux répondent à des constats effectués dans la littérature sur :

- la perpétuelle émergence de ces systèmes et le manque d'aide à la définition d'actions à destination des parties prenantes,
- la non-intégration de connaissances explicites sur les filières de recyclage et les matières recyclées dans les pratiques de conception.

❖ *Nos travaux se sont articulés sous deux axes distincts :*

Le premier axe de travail concerne l'aide à la décision à destination des parties prenantes afin de définir les actions à mener pour développer des filières de recyclage stables et répondre ainsi aux enjeux environnementaux et sociétaux associés à ces matières. L'un des objectifs de cette thèse était de fournir un outil d'aide à la détermination des conditions (volume, coût et qualité des matières et facteurs d'influence sur ces paramètres) devant permettre la réelle émergence de ces filières et d'en déduire les moyens qui doivent être déployés par les différentes parties prenantes- pouvoirs publics, donneurs d'ordres automobiles, équipementiers, acteurs des filières- pour faciliter la régulation des ces systèmes. En d'autres termes comment intégrer les filières dans les supply chain existantes.
Nous avons développé un modèle quantitatif, ODEFIRE, du comportement de ces systèmes reposant sur des critères représentatifs du cycle d'évolution d'une industrie et sur des équations représentatives des interactions entre toutes les parties prenantes. Il permet de prendre en compte des données telles que l'élévation du coût des matières vierges (induite par celui du pétrole), les capacités de traitement des différents métiers des filières, les choix de qualités de matières recyclées produites. Son originalité repose sur le dimensionnement d'une filière en fonction des attentes de toutes les parties prenantes conduisant à l'obtention d'une structure de compromis. Les résultats du modèle ont permis de mettre en évidence les éléments à modifier au niveau de chaque acteur pour évoluer vers la stabilité (augmenter la coopération pour augmenter les volumes disponibles, intervention financière extérieure). Une des actions clés pour le développement est l'intégration de matière recyclée en conception automobile assurant des débouchés stables de hautes valeurs à la filière.

Le deuxième axe de travail porte donc sur l'intégration de MPR pour la fabrication de pièces automobiles à hauts niveaux de caractéristiques mécaniques. L'objectif de ce travail était de proposer une démarche basée sur l'acquisition de connaissances explicites à la fois sur le matériau en lui-même et sur les performances des filières, DAIMRE. Ce thème de recherche fait partie intégrante des travaux sur le développement des pratiques de conception pour le recyclage (CpR). L'analyse de la problématique a mis en exergue la nécessité de pérenniser l'utilisation de MPR dans des pièces à

hautes performances mécaniques et de briser les barrières techniques, industrielles et humaines à leur utilisation, barrières entraînant une prise de risque importante, frein majeur à leur utilisation. L'originalité de notre démarche repose sur l'intégration de MPR comme tout autre matière dès la première phase du processus de conception et surtout sur l'apport de connaissances explicites sur les filières de recyclage par le biais d'un calcul de leurs performances à un instant t à l'aide d'ODEFIRE. Cet apport de connaissances formalisé sous la forme d'une note de recyclage apporte un niveau de sécurité suffisant pour favoriser l'utilisation de MPR.

Nous avons donc travaillé tant sur le développement d'un nouveau matériau avec POAE que sur l'évolution des pratiques et outils d'éco-conception permettant de faciliter son usage par les concepteurs de l'équipementier au travers de DAIMRE. Des règles de conception spécifiques ont été données aux équipes de conception pour permettre de concevoir des moules d'injection, et par conséquent des pièces, en fonction des comportements spécifiques de ces nouveaux matériaux les MPR. Cette expérimentation au sein des équipes de conception de POAE a également conduit à tester ODEFIRE comme une aide au déploiement de cette utilisation par la connaissance des performances des filières.

❖ *Notre démarche globale*

Notre contribution au niveau industriel a été de permettre à un équipementier d'intégrer l'utilisation de MPR dans la conception de pièces de structure et de lui apporter les connaissances nécessaires pour faire de cette pratique une pratique commune. Cet apport a nécessité des changements tant humains qu'organisationnels et a conduit à la proposition d'une CpFV globale.
Notre contribution au niveau recherche porte sur l'analyse de l'émergence d'un système au fonctionnement chaotique et d'adapter les théories existantes à cette problématique environnementale. Ces deux contributions sont intrinsèquement liées car tout développement de filières nécessite l'assurance d'un marché donné pour émerger selon le processus habituel d'évolution d'une industrie, assurance obtenue au travers de l'intégration des MPR dans les pratiques de conception automobile. De même l'efficience de la démarche d'intégration de MPR repose sur la quantification des performances des filières.

Nous proposons donc une démarche d'intégration globale des filières de recyclage des MP dans la Supply Chain Automobile reposant sur un processus de capitalisation de connaissances explicites créées par un outil quantifiant les capacités des filières de recyclage à partir des attentes des parties prenantes ayant une influence sur leur déploiement (cf. Figure 93).

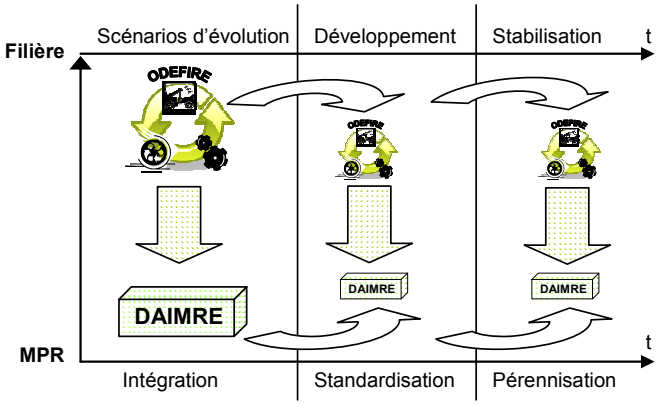


Figure 93: Approche globale d'intégration des filières de recyclage dans la Supply Chain

❖ *Perspectives*

Les expérimentations réalisées dans ces travaux ont permis de valider DAIMRE et ODEFIRE par :

- un protocole de simulations basé sur des plans d'expériences afin de démontrer l'efficacité d'ODEFIRE à proposer un ensemble d'actions permettant de répondre aux attentes des parties prenantes,
- un suivi de la réalisation des phases de DAIMRE au sein d'un projet de conception automobile permettant de confirmer l'adéquation entre le déroulement de la démarche et les composantes humaines, techniques et organisationnelles d'intégration d'une matière au sein de l'entreprise.

Les résultats obtenus sont probants par rapport à la problématique de recherche définie dans ces travaux.

Ces travaux de recherche ne sont pas un aboutissement, même si nous avons démontré la nécessité et la possibilité de déployer une CpFV complète. L'intégration de la composante filière dans les pratiques de conception doit poursuivre son déroulement c'est-à-dire achever le processus de capitalisation des connaissances (notamment informatisation, et intégration dans les outils existants). Dans le temps imparti à ces travaux, la pérennisation de la démarche DAIMRE n'a pu être validée, l'intégration des MPR doit donc être poursuivie pour différentes matières mais également en fonction de l'évolution des filières et du positionnement des fournisseurs. Nous pensons que ces travaux ne se cantonnent pas aux équipementiers mais que cette expérience est reproductible à d'autres produits complexes comme les produits électriques et électroniques. Fort de cette expérience, l'industrie automobile peut transmettre cette approche aux autres industries. Ces travaux ne s'achèvent pas avec la proposition d'un outil permettant de définir les actions pour le développement de filières stabilisées mais se veulent être une référence dans la recherche de solutions viables pour le déploiement de filières de recyclage.

D'autre part, nous pensons que la création de connaissances par l'outil ODEFIRE peut conduire à la capitalisation des connaissances sur les filières en créant une base de données directement alimentée par ODEFIRE (cette proposition a fait l'objet d'un dépôt de projet auprès de l'ADEME). Pour être efficientes, les connaissances sur le sujet doivent être mises en commun entre les différentes parties pour éviter un trop grand nombre de sources et pour empêcher la confusion lors des décisions à prendre pour le développement de ces systèmes. Un tel outil pourrait se présenter comme un outil de référence sur cette problématique et représenter un observatoire du développement des filières dans le temps. Cet aspect répond à une volonté des pouvoirs publics mais également des donneurs d'ordres. La société civile par le biais d'une telle structure pourrait mieux appréhender les décisions des pouvoirs publics et adapter plus facilement leur comportement pour participer au déploiement du recyclage. Cette création suppose la participation de toutes les parties prenantes notamment en ce qui concerne la mise à jour des données à la base de l'outil pour que les conclusions apportées par celui-ci restent pertinentes par rapport aux évolutions et donc pour disposer de préconisations de développement idoines. Nous pensons également que cet observatoire doit être gérer par un organisme indépendant des filières pour que les décisions ne soient pas orientées pour favoriser les attentes de l'une ou l'autre des parties prenantes. Ceci conforte l'idée d'un besoin de changements dans l'organisation des relations entre les parties, soit privilégier les partenariats et les actions collectives.

Cependant le principal frein reste aujourd'hui le manque d'implications de la société civile même si ces derniers temps des actions (comme le Grenelle de l'environnement) démontrent une volonté de faire évoluer la situation. La thématique environnementale concernant la gestion des produits en fin de vie ne doit plus être une réponse à une contrainte réglementaire mais le résultat d'actions volontaires et collectives.

BIBLIOGRAPHIE

(ADEME 2009**)** ADEME. Bilan du recyclage 1998-2007. 2009. 91p.

(ADEME, 2008a) ADEME. Campagne de démontage et de broyage de 304 VHU et étude des flux de matériaux issus du traitement. 2008. 30p.

(ADEME, 2008b) ADEME. Enquête sur la filière de recyclage des plastiques en 2005. 2008b.

(ADEME, 2006) ADEME. Bilan du recyclage 1996-2005. 2006.

(ADEME, 2004) ADEME. Activité de la filière de recyclage des déchets plastiques. 2004.

(ADEME, 2003a) ADEME. L'éco-conception en actions- 1ère édition. . ADEME Editions, Décembre 2003.

(ADEME, 2003b) ADEME. Enquête sur l'état de l'art et les perspectives des techniques de tri automatiques des déchets. 2003. 132p.

(ADEME, 2003c) ADEME. Etude économique sur la filière de traitement des Véhicules Hors d'Usage. 2003.

(ADEME, 2003d) ADEME. Panorama européen des éco-organismes ou structures assumant la responsabilité des producteurs pour la gestion des produits en fin de vie. 2003. 150p.

(ADEME, 2002) ADEME. Recyclage chimique des matières plastiques, 2002.

(ADEME, 2007) ADEME et MEDAD. Dossier de presse: Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Un an après le démarrage de la filière pour les équipements ménagers: quel bilan? 13 Novembre 2007.

(AFNOR, 2003) AFNOR. Norme XP ISO/TR 14062. Management Environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. 2003.

(AFNOR, 1998) AFNOR. Norme FD X 30-310. Management Environnemental. Prise en compte de l'environnement dans la conception des produits – principes généraux et application. 1998.

(AFNOR, 1996) AFNOR. Norme XP R10-402: Véhicules Routiers- Conception des véhicules en vue de l'optimisation de la valorisation en fin de vie, Juillet 1996.

(AGGERI, 1995) AGGERI, F. Environnement et pilotage de l'innovation: un modèle dynamique du développement durable. Le cas du recyclage automobile. Thèse de Doctorat, ENS Mines Paris, 1998.

(ALEXIS, 1995) ALEXIS, J. Pratique industrielle de la méthode Taguchi- Les plans d'expériences. AFNOR, 1995. 184p.

(AL-MUDIMIGH et al., 2004) AL-MUDIMIGH, A. S., ZAIRI, M. et AHMED, A. M. M. Extending the concept of Supply Chain: the effective management of value chains. International Journal of Production Economics, 2004, vol. 87, pp. 309-320.

(ALVAREZ-GIL et al., 2007) ALVAREZ-GIL, M. J., BERRONE, P., HUSILLOS, F.J. et LADO, N. Reverse Logistics, stakeholders' influence, organizational slack, and managers' posture. Journal of Business Research, Mai 2007, 2007, vol. 60, no. 5, pp. 463-473.

(AMARAL et al., 2002) AMARAL, J. et FERRAO, P. The industrial ecology of the automobile: a Portuguese perspective. International Journal of Ecology and Environmental Sciences, 2002, vol. 28, pp. 27-34.

(AMARAL et al., 2006) AMARAL, J., FERRAO, P. et ROSAS, C. Is Recycling technology innovation a major driver for technology shift in the automobile industry under an EU context? International Journal of Technology, Policy and Management, 2006, vol. 6, no. 4, pp. 385-398.

(APME, 2004) APME. An analysis of plastics consumption and recovery in Europe in 2002-2003. 2004. 20p.

(BARTHES, 1997) BARTHES, J. P. A. Capitalisation des connaissances et intelligence artificielle. Journées Franco-Finlandaises de Tempere, Finlande, 9-10 Juin 1997.

(BAUQUIS, 2006) BAUQUIS, P. R. Quel avenir pour les hydrocarbures à l'approche des pics pétrolier et gazier? IFP Paris, 2006.

(BEAUREPAIRE, 2003) BEAUREPAIRE, E. Recyclage des produits en fin de vie: gestion, techniques, responsabilités. AFNOR, 2003. 173p.

(BELLER et al., 2000) BELLER, C. et REMOND-TIEDREZ, I. Du cours des matières premières au prix de vente des biens intermédiaires. INSEE Première, Septembre 2000, no. n°736, pp. 35-40.

(BELLMANN et al., 1999) BELLMANN, K. et KHARE, A. European response to issues in recycling car plastics. Technovation, 1999, vol. 19, pp. 721-734.

(BERRAH, 2005) BERRAH, L., BALLOT, E., PARIS, J.L. et THIERRY, C. Modélisation et évaluation de la performance des chaînes logistiques. Hermes Lavoisier ed., 2005. 886p.

(BOINI, 2006) BOINI, C. Etude de la démontabilité et de la recyclabilité des Face Avant Techniques de véhicules : retour sur conception. PFE ENSAM Chambéry, 2006. 73p.

(BOKS, 2002) BOKS, C. The relative importance of uncertainty factors in product end-of-life scenarios- A quantification of future developments in design, economy, technology and policy. Thèse de Doctorat, Engineering Design Department, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2002. 323p.

(BOONS, 2002) BOONS, F. Greening products: a framework for product chain management. Journal of Cleaner Production, 2002, vol. 10, pp. 495-505.

(BUSTANI, 1998) BUSTANI, A., MACKAY, P.W., COBAS-FLORES, E., YESTER, S., SULLIVAN, J. Et WILLIAMS, R.L. An approach to modelling the vehicle end-of-life process. SAE Technical Paper Series- International Congress and Exposition, Detroit, USA, 1998.

(CABAL et al., 2005) CABAL, C. et GATIGNOL, C. La définition et les implications du concept de voiture propre. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2005. 383p.

(CAPIEZ et al., 1998) CAPIEZ, A. et HERNANDEZ, E. M. Vers un modèle d'émergence de la petite entreprise. Revue Internationale PME, 1998, vol. 11, no. 4, pp. 11-43.

(CCE, 2008) CCE. Proposition de directive du parlement européen et du conseil relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. 23 janvier 2008.

(CCE, 2007a) CCE. Communication de la commission au conseil et au parlement européen- Rapport de la situation sur les biocarburants- Rapport sur les progrès accomplis en matière d'utilisation de biocarburants et d'autres carburants renouvelables dans les états membres de l'union européenne. 10 janvier 2007.

(CCE, 2007b) CCE. Communication de la commission au conseil et au parlement européen relative à la communication interprétative sur la notion de déchet et de sous produit. 21 février 2007.

(CCE, 2007c) CCE. Rapport de la commission au conseil et au parlement européen concernant les objectifs visés à l'article 7, paragraphe 2, point b) de la directive 200/53/CE relative aux Véhicules Hors d'Usage. 16 janvier 2007.

(CCE, 2005a) CCE. Communication de la commission au conseil, au parlement européen, au comité économique et social européen et au comité des régions- Mise en œuvre de l'utilisation durable des ressources: une stratégie thématique pour la prévention et le recyclage des déchets. 21 décembre 2005.

(CCE, 2005b) CCE. Communication de la commission du 21 Décembre 2005 intitulée: "Stratégie thématique sur l'utilisation durable des ressources naturelles". 21 décembre 2005.

(CCE, 2001) CCE. Livre vert sur la politique intégrée de produits. 2001.

(CHICK et al. 2004) CHICK, A. et MICKLETHWAITE, P. Specifying recycled: understanding UK architects' and designers' practices and experience. Design Studies, 5, 2004, vol. 25, no. 3, pp. 251-273.

(CHICK et al., 2002) CHICK, A. et MICKLETHWAITE, P. Obstacles to specifying recycled products and materials: a literature review. The designing for sustainability research group- Faculty of Art, Design and Music, kingston University, 2002. 43p.

(CHOI et a., 2001) CHOI, T. Y., DOOLEY, K. J. et RUNGTUSANATHAM, M. Conceptual note: supply networks and complex adaptive systems: control versus emergence. Journal of Operations Management, 2001, vol. 19, pp. 351-366.

(Consultic marketing and industrieberatung GmbH, 2005) Consultic marketing and industrieberatung GmbH. Plastic waste in European key countries: report of results. PlasticsEurope: Association of Plastics manufacturers, 2005. 139p.

(COPPENS, 1999) COPPENS, C. Méthode de conception en vue d'optimiser la valorisation des Véhicules Hors d'Usage. Thèse de Doctorat, ENSAM Paris, 1999.

(DE BRITO et al., 2004) DE BRITO, M. P., et DEKKER, R. Reverse Logistics: quantitative models for closed-loop supply chains. DEKKER, R., et al eds., Springer-Verlag ed., 2004. A Framework for Reverse Logistics, pp. 3-28.

(DE BRITO et al., 2003), DE BRITO, M. P., DEKKER, R. et FLAPPER, S. D. P. Reverse Logistics- a review of case studies. Erasmus Research Institute of Management, 2002-2003. 29p.

(DE BRITO et al., 2002), DE BRITO, M. P., DEKKER, R. et FLAPPER, S. D. P. Reverse Logistics- a review of case studies. Erasmus Research Institute of Management, 2001-2002. 32p.

(DE MEDINA, 2006) DE MEDINA, H. V. Eco-design for materials selection in automobile industry. 13th CIRP Life Cycle Seminar, Bruxelles, 31 Mai- 2 Juin 2006.

(DE MEDINA et al., 2001) DE MEDINA, H. V. et SEDILLEAU, P. L'industrie automobile se réorganise pour le recyclage. Neuvième rencontre internationale du GERPISA- Les reconfigurations de l'industrie automobile : alliance, cessions, fusion-acquisition, partenariats, scissions ..., 7-9 Juin 2001, 2001.

(DEL VECCHIO et al., 2004) DEL VECCHIO, J. M.; FROELICH, D. et MARIS, E. La valorisation des VHU par un démontage avancé et optimisé. Paris, Colloque ADEME- Filières et recyclage, 2004.

(DILLON, 2001) DILLON, P. S. Stakeholder dialogues on recycling engineering thermoplastics: a collaborative effort to build a recycling infrastructure for plastics from electronics. Conference proceedings of the 2001 International Symposium on Electronics and the Environnement, Denver, Colorado, 7-9 Mai 2001, 2001.

(DUPEUX, 2000) DUPEUX, M. Pratique des matériaux industriels. Dunod, 2000. Chapitre 9 : Méthodologie de choix de matériaux.

(DURAND, 2000) DURAND, R. Le management stratégique des compétences. QUÉLIN, B. and ARREGLE, J. L. eds., Ellipses, 2000. Analyse par les Ressources de la performance des entreprises françaises, pp. 83-127.

(DURAND et al., 1997) DURAND, R. et QUÉLIN, B. Comment envisager l'évolution économique sans concevoir une firme évolutionniste ? Contributions de la théorie des ressources à une théorie évolutionniste de la firme. VIème conférence internationale de management stratégique, Montréal, AIMS: Association Internationale du Management stratégique, 1997.

(DURAND, 1987) DURAND, B. Du kérogène au pétrole et au charbon : les voies et les mécanismes des transformations des matières organiques sédimentaires au cours de l'enfouissement. Mem. Soc. Geol., 1987, pp. 77-95.

(DUVAL, 2007a) DUVAL, C. Plastiques et automobile- D'aujourd'hui à demain. Techniques de l'ingénieur, AM 3591, 2007. 12p.

(DUVAL, 2007b) DUVAL, C. Plastiques et automobile- D'hier à Aujourd'hui. Techniques de l'ingénieur, AM 3590, 2007.

(DUVAL, 2004) DUVAL, C. Matières plastiques et environnement: recyclage, valorisation, biodégradabilité, éco-conception. 2004. 310p.

(Energetics Incorporated, 2001) Energetics Incorporated. A roadmap for recycling End-of-Life Vehicles of the future, Workshop report, 25 Mai 2001. 32p.

(EUROPEAN COMMISION, 2006) EUROPEAN COMMISSION (Joint Research Center) Well-to-wheels analysis of the future automotive fuels and powertrains in the European context, Mai 2006, 2006. 157p.

(FEDEREC, 2008) FEDEREC. Observatoire de la récupération, du recyclage et de la valorisation- Résumé de l'évolution du premier trimestre 2008. 2008.

(FENNETEAU, 1997) FENNETEAU, H. Encyclopédie de gestion, 2ème édition. SIMON, Y. and JOFFRE, P. eds., Editions Economica, Paris, 1997. Cycle de vie du produit, pp. 888-914.

(FERNANDEZ, 2003) FERNANDEZ, I. The concept of Reverse Logistics. A review of litterature. 15th Annual NOFOMA'03 Conference, Oulu, Finlande, 2003.

(FERRAO et al., 2006a), FERRAO, P. et AMARAL, J. Assessing the economics of auto recycling activities in relation to European Union directive on End of Life Vehicles. Technological forecasting and social change, 2006, vol. 73, no. 3, pp. 277-289.

(FERRAO et al., 2006b) FERRAO, P. et AMARAL, J. Design for recycling in the automobile industry: new approaches and new tools. Journal of Engineering Design, 2006, vol. 17, no. 5, pp. 447-462.

(FIELD, 2001) FIELD, F. R. Recycling strategies in automotive industries. Massachusetts Institute of Technology, Materials Systems Laboratory, 2001.

(FLEISCHER et al., 2003) FLEISCHER, G. et LANDER, S. A macro-economic approach to efficient planning of ELV recycling. IDENTIPLAST, Bruxelles, Avril 2003.

(FLEISCHMAN et al., 1997) FLEISCHMANN, M., BLOEMHOF-RUWAARD, J.M., DEKKER, R., VAN der LAAN, E., VAN NUNEN, J.A.E.E. et VAN WASSENHOVE, L.N. Quantitative models for Reverse Logistics: a review. European Journal of Operational Research, 1997, vol. 103, pp. 1-17.

(FLEISCHMANN et al, 2000) FLEISCHMANN, M., KRIKKE, H.R., DEKKER, R. et FLAPPER, S.D.P. A characterisation of logistics networks for product recovery. Omega, 2000, vol. 28, pp. 653-666.

(FRANCOIS, 2004) FRANÇOIS, O. Techniques de valorisation des VHU par le tri post-broyage. Colloque ADEME Filires et recyclage, Paris, 2004.

(FRANCOIS, 2003) FRANÇOIS, O. Mass-balance in post-shredding technology: results of a trial based on the shredding of 201 ELVs-A joint work of Galloo, PSA and Renault. International Automobile Recycling Congress, Geneve, Suisse, 2003.

(FREYSSENET et al., 2000) FREYSSENET, M., MAIR, A., SHIMIZU, K. et VOLPATO, G. Quel modèle productif? Trajectoires et modèles industriels des constructeurs automobiles mondiaux. LA DÉCOUVERTE, Paris, 2000. 568p.

(GARCIA, 2000) GARCIA, R. Product chain management to facilitate design for recycling of post consumer plastics: case studies of polyurethane and acrylic use in vehicles. Lund University: International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), 2000. 108p.

(GARCIA, 2003) GARCIA, R. et PECK, P. Inter-organizational environmental management: the case of chemical recycling of End-of-Life Vehicle polymers. Lund University: International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), 2003.

(GARDONI et al, 2005) GARDONI, M., FRANCK, C. et VERNADAT, F. Knowledge capitalisation based on textual and graphical semi-structured and non-structured information: case study in an industrial research centre at EADS. Computers in Industry, 2005, vol. 56, pp. 55-69.

(GAUCHERON, 2000) GAUCHERON, T. Intégration du recyclage en conception. Le Modèle produit: Un outil descriptif et cognitif dans le processus de prise en compte du recyclage. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), 2000. 244p.

(GLACHANT, 2005) GLACHANT, M. Le concept de responsabilité élargie du producteur et la réduction à la source des déchets de consommation. Responsabilité et Environnement, 2005, vol. La prévention des déchets, no. n°39, pp. 8.

(GOLDMANN, 2003) GOLDMANN, G. Plastics recovery from ASR: The VW-SiCon process. Bruxelles, IDENTIPLAST, Avril 2003.

(GRUNDSTEIN, 1998) GRUNDSTEIN, M. La capitalisation des connaissances de l'entreprise, système de production de connaissances. L'entreprise apprenante et les sciences de la complexité, 1998.

(GUNTHER et al. 2008) GÜNTHER, S. et CASULLI, J. Eco-conception: panorama des activités de la filière automobile et contribution de l'équipementier Rieter. Conférence PDMA, 11 juin 2008.

(HALAL et al., 1998) HALAL, W. E., KULL, M. D. et LEFFMANN, A. The George Washington University forecast of emerging technologies: a continuous assessment of the technology revolution. Technological Forecasting and Social Change, 1998, vol. 59, pp. 89-110.

(HALL et al., 2003) HALL, J. et KERR, R. Innovation dynamics and environmental technologies: the emergence of fuel cell technology. Journal of Cleaner Production, Juin 2003, 2003, vol. 11, no. 4, pp. 459-471.

(HAOUES, 2006) HAOUES, N. Contribution à l'intégration des contraintes de désassemblage et de recyclage dès les premières phases de conception de produits. Thèse de doctorat, Institut ENSAM de Chambéry, 2006. 225p.

(HUNDAL, 2000) HUNDAL, M. Design for recycling and remanufacturing. International Design Conference- Design 2000, Dubrovnik, Croatie, 23-26 Mai 2000.

(IDSE-CNR, 2000) IDSE-CNR. The impact of EU regulation on innovation of European industry: regulation and innovation in the area of End-of-Life Vehicles. The European Commission JRC-IPTS (Institute for Prospective Technological Studies), 2000.

(ISHII, 2000) ISHII, K. et STEVELS, A. Environmental Value Chain analysis: A tool for product definition in eco-design. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2000.

(ISO, 2002) ISO. ISO 22628: Véhicules Routiers- Recyclabilité et valorisabilité- Méthode de calcul. 2002.

(ISO, 2000) ISO. ISO 11469: Identification générique et marquage des produits en matière plastique. norme révisée en 2000, 1993.

(JACQUESON, 2002) JACQUESON, L. L'intégration de l'environnement en entreprise: proposition d'un outil de pilotage du processus de création de connaissances environnementales. Thèse de Doctorat, ENSAM Paris, 2002. 173p.

(JENSEIT, 2003) JENSEIT, W., STAHL, H., WOLLNY, V. et WITTLINGER, R. Recovery options for plastics parts from End-of-Life Vehicles: an eco-efficiency assessment. Öko-Institut report for APME, 2003.

(JOCE, 1999) JOCE. Directive du conseil n° 1999/13/CE du 11 Mars 1999 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations. n° L85 Du 29 Mars 1999.

(JOCE, 1996) JOCE. Directive n° 96/61/CE du conseil du 24 Septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution- IPPC. 1996.

(JOCE, 1982) JOCE. Directive du conseil n° 82/501/CEE du 24 Juin 1982 concernant les risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles. 1982.

(JOCE, 1970) JOCE. Directive 70/220/CEE du conseil, du 20 Mars 1970, concernant le rapprochement des législations des États Membres relatives aux mesures à prendre contre la pollution de l'air par les émissions des véhicules à moteur. 1970.

(JORF, 2003) JORF. Décret n° 2003-727 du 1er Août 2003 relatif à la construction des Véhicules et à l'élimination des Véhicules Hors d'Usage , n°179 du 5 août 2003, 2003.

(JOUE, 2008) JOUE. Directive 2008/98/CE du parlement européen et du conseil du 19 Novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, 20 Novembre 2008, 2008. ISBN L312/3.

(JOUE, 2007) JOUE. Règlement (CE) n°715/2007 du parlement européen et du conseil du 20 Juin 2007 relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 Et Euro 6) et aux informations sur la réparation et l'entretien des véhicules. 2007.

(JOUE, 2006) JOUE. Directive n°2006/12/CE du parlement européen et du conseil du 5 Avril 2006 relative aux déchets. 2006.

(JOUE, 2005) JOUE. Directive 2005/64/CE du parlement européen et du conseil du 26 Octobre 2005 concernant la réception par type des véhicules à moteur au regard des possibilités de leur réutilisation, de leur recyclage et de leur valorisation, et modifiant la directive 70/156/CEE du conseil. 2005.

(JOUE, 2004) JOUE. Directive 2004/12/CE du parlement européen et du conseil du 11 Février 2004 modifiant la directive 94/62/CE relative aux emballages et aux déchets d'emballages. 2004.

(JOUE, 2003a) JOUE. Directive 2002/96/CE du parlement européen et du conseil du 27 Janvier 2003 relative aux Déchets d'Equipements Électriques et Electroniques (DEEE). 2003.

(JOUE, 2003b) JOUE. Directive 2003/17/CE du parlement européen et du conseil du 3 Mars 2003 modifiant la directive 98/70/CE concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel. 22 mars 2003.

(JOUE, 2003c) JOUE. Directive 2003/30/CE du parlement européen et du conseil du 8 Mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports. 17 mai 2003.

(JOUE, 2000) JOUE. Directive 2000/53/CE du parlement européen et du conseil du 18 Septembre 2000 relative aux Véhicules Hors d'Usage. L 269 du 21 octobre 2000.

(JULLIEN, 1995) JULLIEN, B. De la diffusion à la dilution d'une technologie: le cas des matériaux composites: pour une approche continuiste des processus de changement technico-économique. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1, 1995. 421p.

(JUSKA et al., 2006) JUSKA, C., GEARHART, J. et GRIFFITH, C. Automotive plastics report card: the policies and practices of eight leading automakers. The Ecology Center- Michigan, Novembre 2006. 28p.

(KEMP et al., 2000) KEMP, R., SMITH, k. et BECHER, G. The Impact Of EU Regulation on innovation of European industry: How should we study the relationship between environmental regulation and

innovation? The European Commission JRC-IPTS (Institute for Prospective Technological Studies), 2000.

(KIM, 2002) KIM, N. Exploring determinant factors for effective End-of-Life Vehicle policy: experiences from End-of-Life Vehicle systems. The International Institute for Industrial Environmental Economics (IIIEE), Lund, Suède, 2002. 140p.

(KRIKKE et al., 2003) KRIKKE, H. R., LE BLANC, I. et VAN DE VELDE, S. Creating value from returns: the Impact of Product Life Cycle Management on circular Supply Chains and Reverse. Tilburg University, CentER Applied Research, Pays-Bas, Janvier 2003. 31p.

(KRIKKE et al., 2001) KRIKKE, H., BLOEMHOF-RUWAARD, J. et VAN WASSENHOVE, L. N. Design of closed loop Supply Chains: a production and return network for refrigerators. Rapport, Erasmus Universiteit Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management, 2001. 33p.

(LAHERRÈRE, 2007) LAHERRÈRE, J. Quand le "Peak Oil"?, « Vivre demain sans pétrole », Châlons en Champagne, 20 Novembre 2007.

(LARRUE, 2002) LARRUE, P. La coordination des activités d'innovation dans les consortiums de recherche sur les technologies émergentes: le cas du Partnership for a New Generation of Vehicle (PNVG). Dixième rencontre internationale du Gerpisa : la coordination des compétences et des connaissances dans l'industrie automobile, Paris, France, 6-8 Juin 2002.

(LARRUE, 2000) LARRUE, P. La coordination des activités de recherche et d'innovation dans les phases d'émergence: le cas des batteries pour véhicules électriques hybrides. Thèse de Doctorat, Université Montesquieu- Bordeaux IV, 2000. 466p.

(LASSARTESSES, 2004) LASSARTESSES, R. Quelle politique d'intégration de matières recyclées dans les véhicules neufs? Processus et résultats de Renault. Colloque ADEME Filières et recyclage, Paris, 20-21 Octobre 2004.

(LAURAS, 2004) LAURAS, M. Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques: application à la coopération maison mère-filiales internationales dans un groupe pharmaceutique et cosmétique. Thèse de Doctorat, INPT, 07 Juillet 2004. 197p.

(LE BLANC et al., 2004) LE BLANC, H. M., FLEUREN, H. A. et KRIKKE, H. R. Redesign of a recycling system for LPG-tanks. OR Spectrum- Quantitative Approaches in Management. Springer ed., 2004, vol. 26, pp. 283-304.

(LE DORTZ, 1995) LE DORTZ, L. La dynamique des industries dans les approches évolutionnistes: irréversibilités et émergence des industries. MATISSE: Modélisations Appliquées Trajectoires Institutionnelles Stratégies Socio-Economiques et CRIFE: Centre de Recherche sur l'Industrie, les Finances, l'Espace et les Services, Université de Paris I-Panthéon Sorbonne, 1995. 21p.

(LE POCHAT, 2005) LE POCHAT, S. Intégration de l'éco-conception dans les PME: proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits. Thèse de Doctorat, Institut ENSAM de Chambéry, 2005. 279p.

(LEBORGNE, 1998) LEBORGNE, R. De l'utilité à l'utilisation des Analyses de Cycle de Vie chez un constructeur automobile. Thèse de doctorat. ENSAM Paris, 1998.

(LEROY et al., 2008) LEROY, Y. et FROELICH, D. Proposal joint implementation of qualitative and quantitative approaches to integrate uncertainties in Life Cycle Assessment of complex systems. IDMME- Virtual Concept, Pékin, Chine, 8-10 Octobre 2008.

(LIVIAN, 2001) LIVIAN, Y. F. Organisation: théories et pratiques. DUNOD, 2ème édition, 2001. 322p.

(LONETE, 2004) LONETE, L. Développement d'un matériau 100% recyclé: le PP-FV30- Utilisation dans des pièces automobiles. Rapport interne POAE, 2004. 45p.

(LOPEZONTIVEROS, 2004) LOPEZONTIVEROS, M. A. Intégration des contraintes de remanufacturabilité en conception de produits. Thèse de Doctorat, Laboratoire 3S-INPG Grenoble, 2004.

(LUNG, 2000) LUNG, Y. Programme de recherche du réseau international GERPISA (Groupe d'Etudes et de Recherches Permanent sur l'Industrie et les Salariés de l'Automobile) 2000-2003. La coordination des compétences et connaissances: nouveau défi majeur pour les systèmes automobiles régionaux. 2000. 19p.

(MANICORE, 2005) MANICORE, J. M. Qu'est-ce qu'une réserve de pétrole? En avons-nous pour longtemps? www.manicore.com 2005.

(MANICORE, 2003) MANICORE, J. M. Comment se forment pétrole, gaz et charbon? www.manicore.com 2003.

(MARSILI, 1999) MARSILI, O. Technological regimes: theory and evidence. Dynacom project-TSER-European Union, 1999. 33p.

(MATHIEUX, 2002) MATHIEUX, F. Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit- Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception. Thèse de Doctorat, ENSAM Chambéry, 18 Décembre 2002. 286p.

(MATHIEUX et al., 2008) MATHIEUX, F., FROELICH, D. et MOSZKOWICZ, P. ReSICLED: A new recovery-conscious design method for complex products based on a multicriteria assessment of the recoverability. Journal of Cleaner Production, 2008, vol. 16, pp. 277-298.

(MAUDET, 2005) MAUDET, C. Recyclabilité des pièces automobiles en PP-FV: mise en place d'une filière de traitement adaptée, 2005. 27p.

(MAUDET et al., 2007) MAUDET, C., BERTOLUCI, G. et FROELICH, D. Proposal for a tool for integrating plastic recycling industries into the automotive supply chain. International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing, 2007, vol. Design for reuse, recycle and remanufacture.

(MAUDET et al., 2006) MAUDET, C., BERTOLUCI, G. et FROELICH, D. A method for recycled plastic material integration in automotive industry. 13th CIRP Life Cycle Seminar, Bruxelles, 31 Mai- 2 Juin 2006.

(MAUDET et al., 2005) MAUDET, C. et VIOT, F. Critères d'émergence d'une filière de recyclés et quantification de ses performances technico-économiques. Session de travail avec les différents acteurs des filières à POAE 14 décembre, 2005.

(MAC LAREN et al., 1999) MC LAREN, J., WRIGHT, L., PARKINSON, S. et JACKSON, T. A dynamic life-cycle energy model of mobile phone take-back and recycling. Journal of Industrial Ecology, 1999, vol. 3, no. 1, pp. 77-91.

(MELLOR, et al., 2002) MELLOR, W., WRIGHT, E., CLIFT, R., AZAPAGIC, A. et STEVENS, G. A mathematical model and decision-support framework for material recovery, recycling and cascade use. Chemical Engineering Science, 2002, vol. 57, pp. 4697-4713.

(MENTZER et al. 2001) MENTZER, J. T., DEWITT, W., KEEBLER, J.S., MIN, S., NIX, N.W., SMITH, C.D. et ZACHARIA, Z.G. Defining the Supply Chain Management. Journal of Business Logistics, 2001, vol. 22, no. 2.

(MIDLER, 2004) MIDLER, C. L'Auto qui n'existait pas: management des projets et transformation de l'entreprise. Dunod ed., 2004.

(MILLET et al., 2001) MILLET, D., BISTAGNINO, L., CAMOUS, R. et AOUSSAT, A. Etat des lieux des outils méthodologiques environnementaux : proposition d'une nouvelle classification basée sur les niveaux de transformation de l'entreprise, 4ème Congrès International de Génie Industriel, Marseille, 2001.

(MILLET, 2008) MILLET, P. A. Une étude de l'intégration organisationnelle et informationnelle: application aux systèmes d'informations de type ERP. Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 2008. 307p.

(MINEL, 2003) MINEL, S. Démarche de conception collaborative et proposition d'outils de transfert de données métier: application à un produit mécanique "le siège automobile". Thèse de Doctorat, ENSAM PARIS, 2003. 169p.

(MINTZBERG, 1998) MINTZBERG, H. Le Management: voyage au centre des organisations. Editions d'organisation, 1998. 570p.

(MUNOZ et al., 2006) MUNOZ, I., RIERADEVALL, J., DOMENECH, X. et GAZULLA, C. Using LCA to assess eco-design in the automotive sector. International Journal of LCA, 2006, vol. 11, no. 5, pp. 323-334.

(NAGURNEY et al., 2005) NAGURNEY, A. et TOYASAKI, F. Reverse Supply Chain Management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling. Transportation Research Part E, 2005, vol. 41, pp. 1-28.

(NONAKA et al., 1997) NONAKA, I. et TAKEUSHI, H. La connaissance créatrice- La dynamique de l'entreprise apprenante. De Boeck Université, Bruxelles, 1997.

(PATEL et al., 2000) PATEL, M., VON THIENEN, N., JOCHEM, E. et WORREL, E. Recycling of plastics in Germany. Resources, Conservation and Recycling, 2000, vol. 29, pp. 65-90.

(PECK, 2003) PECK, P. Interest in material cycle closure: exploring evolution of industry's responses to high-grade recycling from an industrial ecology perspective-Volume I. The International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, 2003. 360p.

(PlasticsEurope, 2008) PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers. The compelling facts about plastics- An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe, 2008. 24p.

(PlasticsEurope, 2008) PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers. The compelling facts about plastics- An analysis of plastics production, demand and recovery for 2005 in Europe, 2007. 22p.

(POCHAMPALLY et al., 2004a) POCHAMPALLY, K. K. et GUPTA, S. M. A Business-mapping approach to multi-criteria group selection of collection centers and recovery facilities, IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004. pp.249-254

(POCHAMPALLY et al., 2004b) POCHAMPALLY, K. K. et GUPTA, S. M. A Linear physical programming approach for designing a reverse Supply Chain. 2004. 8p.

(POINCELET, 2002) POINCELET, P. Enjeux de la filière VHU et conditions d'équilibre. Colloque ADEME- Filières et recyclage, Paris, 2002.

(PORTER, 1985) PORTER, M. E. Competitive advantage: creating and sustaining superior performance. The Free Press, New York, 1985. 557p.

(RENARD, 2001) RENARD, H. Améliorer la recyclabilité des équipements automobiles multimatériaux. Ingénieurs de l'automobile, Novembre-Décembre, 2001.

(ROBOTIS et al., 2005) ROBOTIS, A., BHATTACHARYA, S. et VAN WASSENHOVE, L. N. The effect of remanufacturing on procurement decisions for resellers in secondary markets. European Journal of Operational Research, 6/16, 2005, vol. 163, no. 3, pp. 688-705.

(ROSE et al., 2001) ROSE, C. M., ISHII, K. et STEVELS, A. ELDA and EVCA: tools for building product end-of-life strategy. The Journal of Sustainable Product Design, 2001, vol. 1, pp. 181-195.

(ROSE et al., 2000) ROSE, C. M. et STEVELS, A. Applying Environmental Value Chain analysis to product take-back systems. 7th CIRP Life Cycle Engineering Conference, Tokyo, Japon, Novembre 2000.

(ROSSI et al., 2005) ROSSI, M., et al. Moving towards sustainable plastics: A report card on the six leading automakers. The Ecology Center- Michigan, Février 2005. 56p.

(SCHULTMANN et al., 2006) SCHULTMANN, F., ZUMKELLER, M. et RENTZ, O. Modeling reverse logistic tasks within closed-loop Supply Chains: an example from the automotive industry. European Journal of Operational Research, 2006, vol. 171, no. 3, pp. 1033-1050.

(SCRELEC, 2004) SCRELEC. Etude pour une filière de recyclage des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques sur le territoire national, 2004. 42p.

(SESSI, 2008) SESSI. Panorama de l'industrie en France- Transformation des matières plastiques. Ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi. 17 juin 2008.

(SEURING, 2004) SEURING, S. Industrial Ecology, Life Cycles, Supply Chains: differences and interrelations. Business Strategy and the Environment, 2004, vol. 13, pp. 306-319.

(SILVA, 2006) SILVA, C. Raffinage et pétrochimie. Panorama 2006, IFP, 9p.

(SRIVASTAVA, 2008) SRIVASTAVA, S. K. Network design for Reverse Logistics. OMEGA: The International Journal of Management Science. Elsevier, 24 Mai 2007, 2008, vol. 36, pp. 535-548.

(SRIVASTAVA, 2007) SRIVASTAVA, S. K. Green Supply Chain Management: a state-of-the-art literature review. International Journal of Mangement Reviews, 2007, vol. 9, no. 1, pp. 53-80.

(TAHON, 2003) TAHON, C. Evaluation des performances des systèmes de production. Traité IC2 Productique. Hermes Lavoisier ed., 2003. 302p.

(TELLE, 2003) TELLE, O. Gestion des chaînes logistiques dans le domaine aéronautique: aide à la coopération au sein d'une relation donneur d'ordres/ fournisseur. Thèse de doctorat, SupAero, 17 janvier 2003. 223p.

(The association of german plastics manufacturers et al., 2004) The association of german plastics manufacturers et VKE working group statistics and market research. Plastics business data and charts. PlasticsEurope: Association of plastics manufacturers, 16 Avril 2004.

(TONNELIER, 2002) TONNELIER, P. Proposition d'une démarche d'intégration d'une nouvelle dimension en conception : application à la valorisation des véhicules usagés chez un constructeur automobile, Thèse de doctorat, ENSAM Paris, 2002.

(TOUPE, 2004) TOUPE, P. Y. Intégration du démantèlement des fonctions automobiles à la conception. Rapport de Mastere. Institut ENSAM Chambéry -POAE, 2004. 73p.

(TOYOTA, 2002) Toyota. Recyclage des Véhicules en Europe. http://www.toyota.eu/, Novembre 2002. 20p.

(TRICOT, 2004) TRICOT, O. La politique d'intégration des matières recyclées dans les véhicules toyota neufs. Colloque ADEME- Filières et recyclage, Paris, 20-21 Octobre, 2004.

(UEDA et al., 2003) UEDA, K., NISHINO, N. et ODA, S. H. Integration of economics into engineering with an application to the recycling market. Annals of the CIRP, 2003, vol. 52, pp. 33-36.

(UNEP, 2002) UNEP. The automotive industry as a partner for sustainable development. UNEP's Mobility Forum, 2002. 26p.

(VAN SCHAIK, 2004) VAN SCHAIK, A. Theory of recycling systems- Applied to car recycling. Thèse de Doctorat, TU Delft, 2004. 273p.

(VAN SCHAIK et al., 2004) VAN SCHAIK, A. et REUTER, M. A. The time-varying factors influencing the recycling rate of products. Resources Conservation and Recycling, 2004, vol. 40, pp. 301-328.

(VERA et al., 2004) VERA, M. A.; et VIOT, F. Vision des recycleurs par les constructeurs automobiles en 2004. Document interne POAE, 21 Décembre 2004.

(VILLALBA et al., 2004) VILLALBA, G., SEGARRA, M., CHIMENOS, J.M. et ESPIELL, F. Using the recyclability index of materials as a tool for design for disassembly. Ecological Economics, 2004, vol. 50, pp. 195-200.

(VIOT, 2004) VIOT, F. Bilan des brevets concernant le démontage de 1990 à 2004. POAE, Rapport interne, 2004.

(VIOT, 2001) VIOT, F. CFOM: rapport documentaire sur le recyclage des composants automobiles. Document interne POAE, 2001. 143p.

(WALKER et al., 2008) WALKER, H., DI SISTO, L. et MCBAIN, D. Drivers and barriers to Environmental Supply Chain Management practices: lessons from the public and private sectors. Journal of Purchasing and Supply Management, 3, 2008, vol. 14, no. 1, pp. 69-85..

(WINSLOW, 2002) WINSLOW, G. CARE Car II: demonstration of the viability of recycled plastics in Chrysler cars. Proceedings of Global Plastics Environmental Conference, 2002.

(WOLF et al., 2000) WOLF, B., HORA, M., WEISSMANTEL, H. et JAGER, J. Modelling of disposal processes and a recycling and disposal mix for the development of sustainable products. Electronics Goes Green, Berlin, Allemagne 2000.

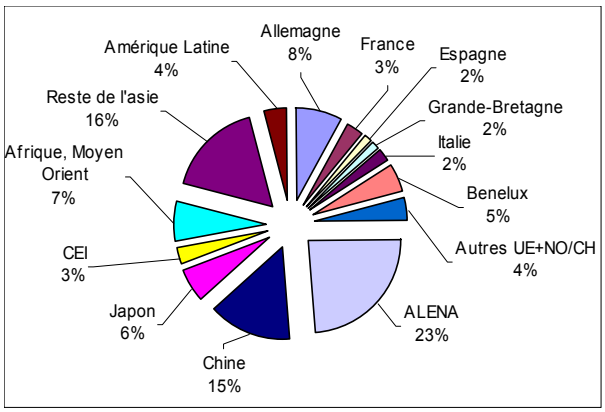
(ZOBOLI, 1998) ZOBOLI, R. Implications of environmental regulation on industrial innovation: the case of End-of-Life Vehicles. The European Commission IPTS (Institute for Prospective Technological Studies), 1998.

ANNEXES

Annexe 1

Données techniques et économiques sur les MP

Répartition de la production mondiale de MP en 2006 (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008)

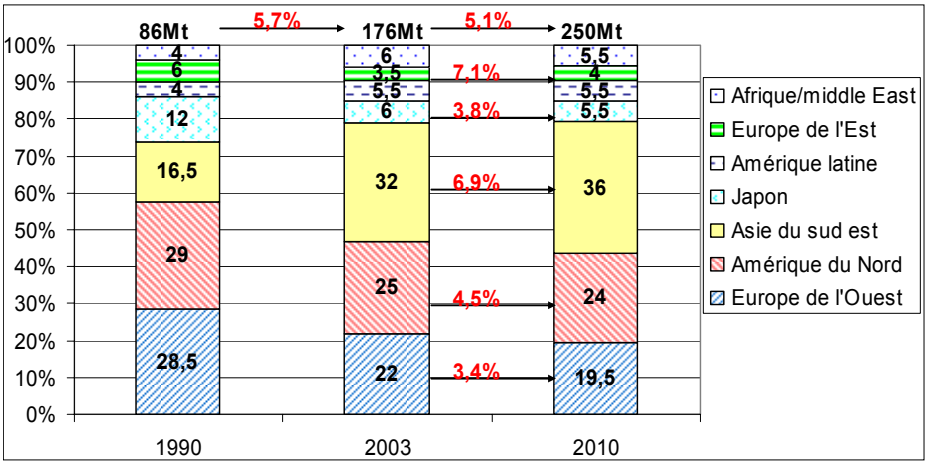


Classification non exhaustive des propriétés des MP adaptée de (Duval 2004, Dupeux 2000).

V= propriétés de volume, S=de surface, P=propres au matériau, I=interactives entre 2 matériaux ou un matériau et l'environnement

	Types de propriétés	Caractéristiques
Propriétés objectives intrinsèques au matériau	Mécaniques statiques: constantes d'élasticité, dureté	V,P
	Mécaniques dynamiques: viscosité, tenue au fluage, ténacité	V, P ou I
	Structurales: amorphe, cristallin, homogénéité	V, P
	Physiques: masse volumique, propriétés électriques, optiques	V, P
	Chimiques: réactivité, toxicité, tenue à la corrosion	S, I
	Tenue au vieillissement, stabilité physique	V, I
	Tribologiques: friction, usure	S, I
Propriétés attribuées dépendant du contexte ou propriétés contextuelles	Disponibilité: ressources, réserve, fournisseurs	V, P
	Coût: matière première, mise en œuvre	V, P ou I
	Degré de familiarité: connaissance du matériau, expérience locale à court et long terme, savoir-faire acquis	S, V, P ou I
	Aptitude à la mise en œuvre: ductilité, coulabilité	V, P
	Aptitude à l'assemblage: soudabilité…	S, I
	Désignation: chimique, normalisée, commerciale	V, P
	Impact sur l'environnement, contenu énergétique, recyclabilité	S et V, P ou I
	Esthétique: aspect, toucher, forme	S, P

Répartition et évolution annuelle de la consommation de MP dans le monde adaptée de (The association of german plastics manufacturers et al. 2004). X%=croissance moyenne par an



Exemples d'applications de quelques MP

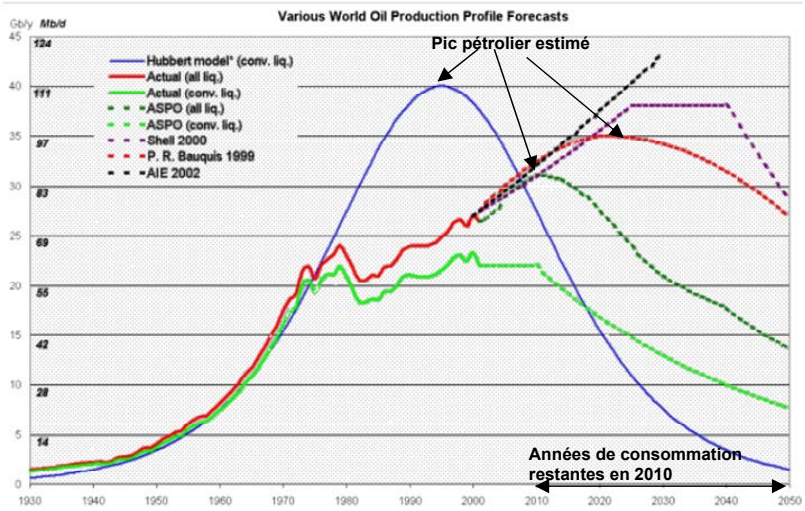
MP	Applications
PE	Bouteilles, flacons, bouchons, jouets, réservoirs à carburants, emballages, films agricoles…
PP	Pare-chocs, pots de yaourts, meubles de jardin, emballages médicaux, barquettes…
PS	Appareils électriques, tasses, assiettes, gobelets à café…
PVC	Châssis de fenêtres, profilés pour construction, isolation de câbles, revêtements de sols…
PET	Bouteilles, emballages, vêtements…
PUR	Mousses pour coussin, sièges automobiles…

Annexe 2

Quelques données sur les ressources pétrolières

Le pic pétrolier

Le modèle de référence utilisé pour l'évaluation de ce pic est le modèle de Hubbert (Laherrère 2007) développé dans les années 1950 pour l'analyse des ressources pétrolières américaines. Il repose sur le fait que la courbe de production suit avec un décalage constant la courbe des découvertes.



Modèles prévisionnels de l'évolution de la production mondiale (Bauquis 2006) données dérivées de ASPO Uppsala 2002 et Shell, conv=conventionnel.

L'ASPO (Association pour l'étude du pic pétrolier) déclare que le pic surviendra en 2010 (Bauquis 2006). Le pétrolier Shell, quant à lui, affirme qu'avant la décroissance la production connaîtra une période de stagnation à partir de 2025 (Bauquis 2006). Le différentiel porte notamment sur l'évaluation des capacités d'innovations technologiques pour l'extraction du pétrole. La courbe présentée par l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) est une courbe d'évolution de la consommation de pétrole compte-tenu de la croissance de la demande énergétique.

Les solutions de remplacement de la ressource pétrolière pour tenter de réduire à long terme son indisponibilité en tant qu'énergie

Les principales applications des produits pétroliers sont les carburants. De nombreuses recherches ont été effectuées dans le domaine des transports que ce soit en Europe, en Amérique ou Asie, pour développer des solutions de remplacement progressif ou définitif. Chacune de ces solutions est adaptée à un milieu géographique donné mais également à un contexte économique et environnemental. Nous présenterons ici uniquement les principaux éléments d'analyse permettant de cerner l'intérêt et les limites des solutions envisagées (Cabal et al. 2005, EUROPEAN COMMISSION (Joint Research Center) et al. 2006).

Solution	Avantages	Inconvénients/limites	Statut	Economie
Carburant et énergie				
Biocarburants	-Origine du carbone non fossile mais issu de l'atmosphère. -Economie partielle de carburant	-Rentabilité faible. -Rendement de production : espace agricole français non suffisant pour alimenter la flotte française - Equilibre avec la culture alimentaire -Rendement énergétique inférieur	1% des carburants en 2005 (CCE 2007a)	Ethanol= 5% (JOUE 2003b) EMVH=30%
Hybride (Electrique-thermique)	-Economie de pétrole -Poids du moteur	-Origine de la source électrique (fossile) -Coût élevé (mise en œuvre complexe des batteries)	-Industriel -Diffusion limitée même si le marché a doublé ces dernières années.	Pouvant atteindre 25%
Electrique	-Absence de pollution et d'émissions -Silence de fonctionnement -Rendement énergétique -Indépendance vis-à-vis du pétrole.	-Coût de mise en œuvre des batteries -Origine de la source électrique -Performances insuffisantes -Mono-marché	-Embryonnaire au niveau industriel -Travaux de recherche avancés	100% si énergie non issue de ressources fossiles
Hydrogène	-Rendement élevé -Economie de pétrole -Pas d'émissions (rejet d'eau) -Indépendance des pays vis-à-vis des hydrocarbures (si source énergie renouvelable)	-Coût -Production d'hydrogène issue d'énergie fossile (96% de gaz, charbon, pétrole) -Difficulté pour la production de masse, le stockage, le transport et la sécurité	Embryonnaire	100% possible
Energie renouvelable	-Economie de ressources fossiles	-Problèmes de mise en œuvre -Coût économique et énergétique.	Selon l'AIE 6% des futurs combustibles.	100%
GNV, GPL	-Economie de pétrole	-Coût de mise en œuvre -Faible diffusion du nombre de lieux de ravitaillement -Faible déploiement du réseau commercial -Efficacité énergétique plus faible -Problème du transport et de la distribution du gaz (étendue des pipelines) -Ressource non renouvelable	Industriel mais faible marché	Partielle

Les moteurs hybrides (Cabal et al. 2005): L'hybridation consiste à combiner plusieurs sources d'énergies pour réaliser la propulsion. Dans la pratique, il existe les combinaisons électrique-thermique mais également électrique-hydrogène. Ces dernières années, les véhicules hybrides ont

connu un fort engouement notamment avec les constructeurs japonais (Toyota, Honda) qui considèrent le moteur hybride comme une technologie incontournable et ont fait l'objet d'une forte communication de la part des constructeurs européens aux derniers salons de l'automobile. En France, le gouvernement s'est engagé à aider au développement d'une voiture ne consommant que 3,5l au 100, résultat possible avec un moteur hybride.

Les moteurs électriques : le moteur est directement et uniquement alimenté par une batterie dont la composition et la structure conditionnent les performances du moteur. Compte-tenu de l'autonomie des batteries et de leur temps de recharge, ces véhicules sont destinés, pour le moment, aux seuls déplacements urbains (ex : domicile-travail). Par ailleurs, selon la politique énergétique et les ressources disponibles d'un pays donné, la production d'électricité nécessaire à la recharge présente, dans certains cas, une efficience environnementale moindre que celle du pétrole. Les véhicules électriques représentent 3% de la flotte EDF (1ère flotte électrique professionnelle du monde).

Les moteurs GNV (Gaz naturel), GPL (Gaz pétrolier liquide) : Ces moteurs sont développés depuis de nombreuses années, notamment en Europe. Leur déploiement s'est principalement limité à des niches géographiques et des flottes spécifiques (ex : bus dans certaines villes européennes).

Les moteurs à pile à combustible : La pile transforme l'énergie chimique d'un combustible (hydrogène) en énergie électrique. Cette technologie est depuis très longtemps convoitée par les chercheurs (Hall et al. 2003) et les constructeurs voyant dans la pile à combustible une alternative « idéale » au pétrole mettant au rang de transition les autres technologies.

Les biocarburants: Ce sont des carburants liquides ou gazeux issus de matières organiques végétales ou animales. Il existe deux filières principales : l'éthanol fabriqué à partir de la fermentation de sucres ou d'amidon (très développé au Brésil). L'éthanol est utilisé en association avec l'essence. La filière des esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) issus du colza et du tournesol (en Europe) sont, quant à eux, incorporés dans les diesels. L'Europe cherche à promouvoir l'utilisation de ces biocarburants, ainsi la directive 2003/30/CE (JOUE 2003c) fixe des objectifs d'incorporation pour les transports routiers : 2 % en 2005, 5,75 % en 2010 (75% de la production d'oléagineux) et le sommet européen de Mars 2007 engage les Etats membres à atteindre l'objectif de 10% pour 2020. La part des biocarburants en Europe est de l'ordre de 1% en 2005, ce qui reste éloigné des objectifs de 2010. Compte-tenu des critiques autour de ces objectifs et des défis[123] des biocarburants, la commission européenne a présenté une révision de la directive 2003/30/CE en janvier 2008 (CCE 2008) dans le cadre d'une directive plus vaste sur les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables[124] (CCE 2008): Elles ne poseront, en théorie, pas de problème de disponibilité. Ce remplacement suppose une volonté des gouvernements de modifier leur politique

[123] Selon certaines études, la production d'éthanol demanderait plus d'énergie qu'il n'en contient lui-même, tandis que d'autres affirment le contraire. L'utilisation des sols pour la production de ces carburants entre en conflit avec l'utilisation des terres pour la production d'aliments. Une alternative au problème de rendement et de surface, est de produire les biocarburants à partir de la biomasse. Celle-ci est définie dans la réglementation européenne comme « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux ».Se pose également un problème de durabilité des ces carburants. Ainsi dans certaines régions du monde ces cultures sont favorisées au détriment de la biodiversité et leur production nécessite une grande quantité de ressources qui se raréfient (ex : eau). C'est pourquoi la commission européenne a introduit des critères de durabilité dans la rectification de la directive 2003/30/CE.

[124] La loi n °2005-781 du 13 juillet 2005 définit les énergies renouvelables comme suit : les énergies hydraulique, solaire, éolienne, géothermique, houlomotrice, marémotrice et celles issues de la biomasse , gaz de décharge, gaz des stations d'épuration des eaux usées et du biogaz.

énergétique. Certaines de ces énergies sont adaptées à des solutions locales et pourront difficilement être mises en place sur une grande échelle. Par exemple, en France (énergie basée principalement sur le nucléaire) pour une diversification des solutions énergétiques, l'état s'est fixé pour objectif que, pour 2010, 10% des besoins soient couverts par des énergies renouvelables

.

Annexe 3

Les différentes définitions autour du terme déchet

La notion de déchets fait actuellement débat entre les différentes parties concernées notamment sur la répartition de la charge des coûts associés à ces déchets, la responsabilité de leur transfert et les caractéristiques attribuant à des objets le statut de déchet. Diverses réglementations européennes et françaises ont établi un cadre de définition de cette notion (12 directives européennes depuis 1970). La directive de 1975[125] {JOUE, 1975 #294} relative aux déchets, modifiée en 2006 (JOUE 2006), pose la définition suivante : « toute substance ou tout objet qui relève des catégories (…) dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ». La directive de 2006 (JOUE 2006) quant à elle clarifie et précise cette notion en insistant sur la nécessité de donner une définition commune afin de promouvoir des solutions de traitement des déchets en accord avec l'environnement et la santé. Le déchet est alors considéré à la fois comme une source de pollution à réduire mais également comme une ressource potentielle à exploiter (CCE 2005a). Le tableau ci-dessous donne quelques définitions proposées en fonction de la réglementation et des organismes concernés.

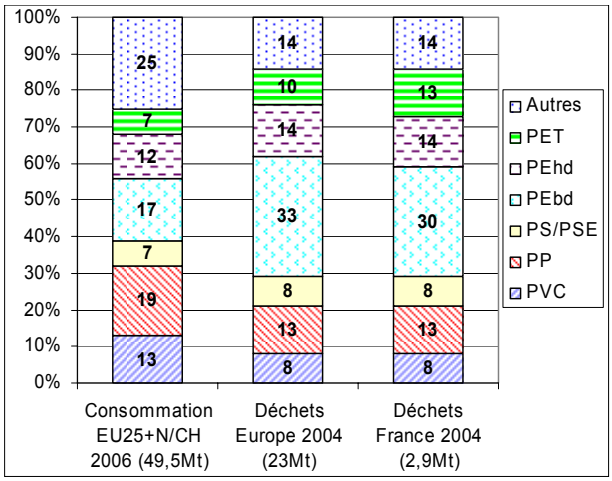
	Définitions
Droit français (Article L541-1 du code de l'environnement)	« Est un déchet au sens du présent chapitre tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon »
Le droit européen (et le common law)	« qualifie le déchet avec comme critère **la notion de volonté d'abandon**. Le critère économique seul n'est pas pertinent pour en faire un produit, il doit être associé à la forte probabilité d'une réutilisation »
Directives 75/442/CEE et 2006/12/CE Communication COM(2005) 667	Déchet : « toute substance ou tout objet (…) dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » Déchet ultime : « est ultime un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. »
l'UNICE[126]	« seul le **critère de la fin de l'opération de recyclage** détermine la fin du déchet, sans considération de l'existence d'un marché ou de la valeur économique »
ACFCI[127]	« est déchet tout résidu d'un processus de production de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire et qui ne fait pas l'objet d'une utilisation économique. »
Communication COM(2006) 845	Cette communication donne des éléments d'orientation, issus d'exemples de jurisprudence de la cour de justice de la Communauté Européenne, pour déterminer si une matière constitue ou non un déchet. Un résidu de production ne constitue pas un déchet si et seulement si la réutilisation de la matière est certaine, sans transformation préalable, dans la continuité du processus de production et prévue pour un sous-produit licite. Une matière peut être identifiée comme déchet si aucun autre usage que l'élimination ne peut être envisagé, si l'usage prévu a un impact environnemental élevé nécessitant des mesures de protection spécifiques, si le procédé de traitement est un procédé courant pour le traitement de déchets, si l'entreprise perçoit la matière comme un déchet ou si l'entreprise cherche à limiter la quantité de matière produite.

[125] Face à l'augmentation croissante de la quantité de déchets produits chaque année, ce premier texte de loi daté de 1975 et modifié en 1992 a établi des axes directeurs pour la gestion et l'élimination des déchets. Ces axes sont les suivants : la suppression des décharges traditionnelles à l'horizon 2002, priorité à la valorisation des déchets, interdiction de mélanger lors du stockage les déchets industriels spéciaux et banals, mise en décharge des seuls déchets ultimes.

[126] Confédération européenne des employeurs

Les déchets de MP

Part des différentes résines MP dans les déchets fin de vie par rapport à leur consommation (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008, Consultic marketing and industrieberatung GmbH 2005).



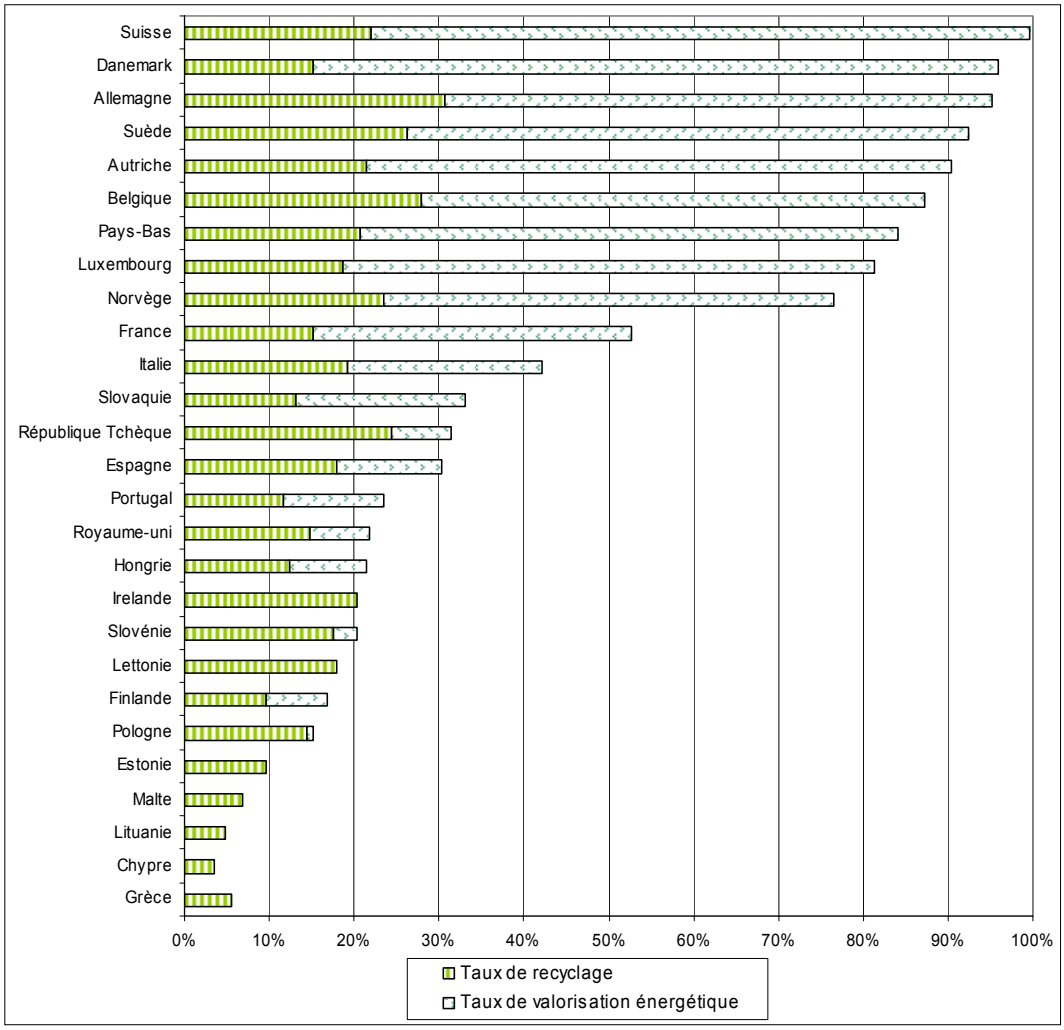
Les résultats sont répartis en trois groupes :

- les pays affichant un taux de valorisation global supérieur à 60% : Suisse, Danemark, Allemagne, Suède… Ces résultats dénotent la mise en place d'un système de gestion des déchets et de l'énergie efficient incluant à la fois les deux modes de traitement. Ils mettent également en évidence la possibilité de développer la valorisation énergétique sans qu'il y ait une contradiction avec l'obtention d'un taux de recyclage mécanique élevé.
- Les pays affichant un taux de valorisation global entre 20 et 60% : France, Italie, Espagne, Portugal, Royaume-Uni….

Les pays affichant un taux de valorisation global inférieur à 20% : Lettonie, Pologne, Estonie… Ce sont principalement des nouveaux membres où la gestion des déchets MP n'est pas forcément l'enjeu sociétal prioritaire.

[127] Assemblée des Chambres françaises de Commerce et d'Industrie

Taux de recyclage matière et de valorisation de déchets MP post-consommation par pays de l'EU_{25}+N/CH en 2006 (PlasticsEurope- Association of plastics manufacturers 2008)



Descriptif des acteurs de la valorisation des MP (ADEME 2008b, Fleischmann et al. 1997)

Nom de l'acteur	Rôle
Dernier détenteur	Il possède le Produit en fin de vie (PFV)[128] à valoriser. Il est en charge de faciliter la collecte de celui-ci en le rendant disponible au collecteur.
Collecteur / Récupérateur	Son rôle est primordial. Il a en charge la collecte du PFV à valoriser, le tri et le conditionnement dans les lieux de traitement.
Désassembleur/ Démolisseur	Il démonte les composants du produit susceptibles d'être rénovés et réutilisés, mais également pour le recyclage de la matière. Il réalise également la dépollution du produit.
Rénovateur	Il réalise les activités de rénovation de composants usagés pour la réutilisation.
Négociant	Il s'occupe uniquement des activités de négoce restreintes aux matières triées ou broyées
Broyeur	Il regroupe les broyeurs de PFV, de pièces en MP. Il broie les PFV complets ou non et trient dans certains cas les résidus obtenus pour le recyclage de la matière. Le reste des résidus est destinés au CET, incinérateur ou valorisation énergétique.
Recycleur	Il est en charge du recyclage de la matière issue du PFV, du démontage de pièces ou du tri des résidus de broyage
Valorisateur énergétique	Il est en charge d'incinérer les PFV avec une récupération de l'énergie (déchets ménagers)
Marché	Il achète de la matière recyclée après recyclage ou de l'énergie

[128] PFV correspond au produit en fin de vie. Dans cette analyse il recouvre aussi bien le produit, ses composants et les matières qui le composent.

Annexe 4

Les différents types de filières

Les produits associés aux filières (Krikke et al. 2003)

Produit pour un retour commercial

Produit retourné du marché pour des raisons comme une insatisfaction du client, du surstockage. Ce retour intervient au cours de la vente du produit.

Produit en fin d'utilisation

Produit retourné après une période d'utilisation par un client et dont les caractéristiques ne répondent plus aux critères d'utilisation d'origine. Ils nécessitent une étape de rénovation avant d'être commercialisé sur un nouveau marché. Dans cette catégorie, se distinguent les biens qui peuvent être transformés en de nouveaux produits de ceux qui sont réparables et vendus à des marchés alternatifs.

Produit réparable

Produit défectueux issu des activités de rénovation et des produits sous garantie.

Produit de transport réutilisable (containers, palettes)

Produit de transport et de stockage dont les retours sont associés aux activités de distribution.

Produit reremplissable

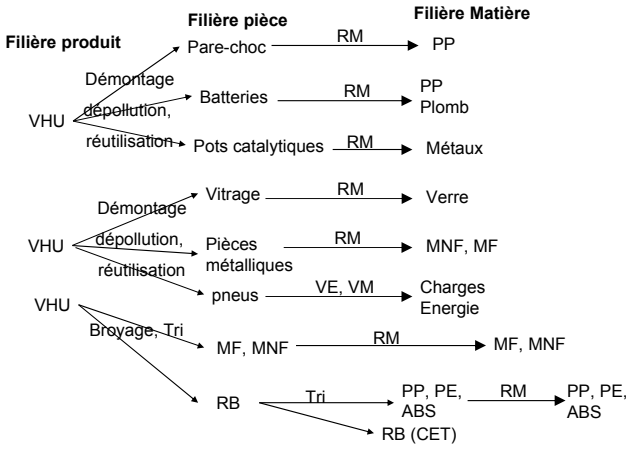
Produit contenant le produit utilisé (bouteille, toner…) dont le retour se fait par échange. Il concerne la phase d'utilisation.

PFV

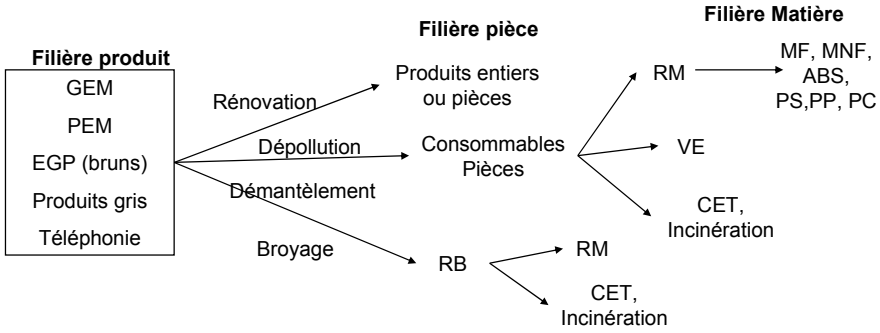
Produit qui ne peut plus être utilisés. Leur traitement est souvent lié soit à des obligations contractuelles de reprise, soit à des obligations réglementaires de les valoriser (VHU, DEEE).

Les différentes filières en fonction de la nature du produit

Bilan des filières issues de VHU à partir des scénarios démontage et broyage



Bilan des filières pour les DEEE Exemple de filières pièces/ consommables: Batteries, Tubes fluorescents, Composés mercuriels, Tubes cathodiques, Batteries au plomb, accumulateurs, Toner…



Quelques données sur les différents modes d'organisation

La gestion directe par le producteur correspond à une prise en charge par le producteur de toutes les étapes de traitement de son produit de la collecte à la valorisation. La mise en place est individuelle, chaque firme gérant ses propres déchets. Le financement de la filière est effectué au travers du paiement d'une taxe au moment de l'achat du produit ou bien d'un fonds réalisé par les producteurs pour son financement. Le paiement est réalisé sur la base du coût spécifique pour le produit. Il n'y a pas de transfert de responsabilités et seuls les producteurs sont impliqués. Cette forme d'organisation (cf. Figure 30) est souvent retrouvée pour le remanufacturing où les producteurs gèrent leur propre retour. C'est également le cas pour certains DEEE mais essentiellement professionnels : XEROX et ses photocopieurs, IBM et ses serveurs, HP et ses ordinateurs. Dans le cadre de l'industrie automobile, BMW gère sa propre filière de valorisation de ses véhicules.

Le mode de gestion le plus développé t out produit confondu[129] est la gestion par un éco-organisme ou une gestion collective des producteurs. Les éco-organismes développés sont de structures variées et se différencient sur les points suivants : la structure juridique, le partage des responsabilités, les acteurs intervenant dans les décisions, le mode de relation avec l'état, les contributions financières, la concurrence et les obligations d'information au grand public. Cette diversité rend difficile un schéma organisationnel type d'un éco-organisme. L'ADEME (ADEME 2003d) propose les caractéristiques moyennes d'un éco-organisme en Europe qui sont:

- une réponse ou une anticipation à une réglementation,
- une association ou une société privée à but non lucratif,
- une direction par des représentants des producteurs et importateurs des produits concernés,
- une autorisation ministérielle unique,
- il effectue une déclaration annuelle de ses résultats,
- il finance les activités correspondant à ses responsabilités opérationnelles,
- il détermine et collecte le montant des contributions payées par ses adhérents,
- il est l'unique éco-organisme en charge de ses produits dans son pays,
- il communique de manière volontaire vers le grand public.

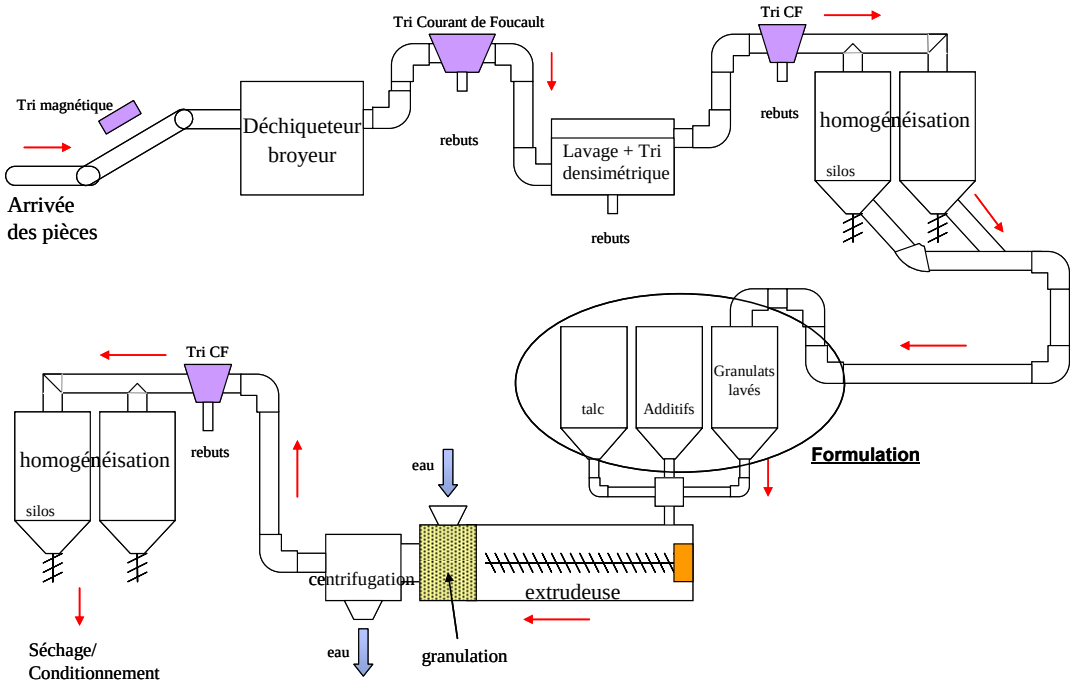
[129] En 2003 100 éco-organismes avaient été recensés dans l'UE plus la Suisse avec une répartition variable en fonction du pays et du produit. Le Royaume-Uni en présente le plus grand nombre. En Europe, 12 produits en fin de vie sont concernés et les emballages font appel à 30 éco-organismes, secteur où l'utilisation d'un tel système est la plus développée ADEME. *Panorama européen des éco-organismes ou stuctures assumant la responsabilité des producteurs pour la gestion des produits en fin de vie*, p. 150.

Les avantages de ce mode sont la répartition des coûts, un financement aisé des opérations de traitement non rentables, un transfert de responsabilités pour le producteur, une possibilité de faire intervenir les autres acteurs de la filière. Une gestion collective permet également le partage des connaissances et compétences.

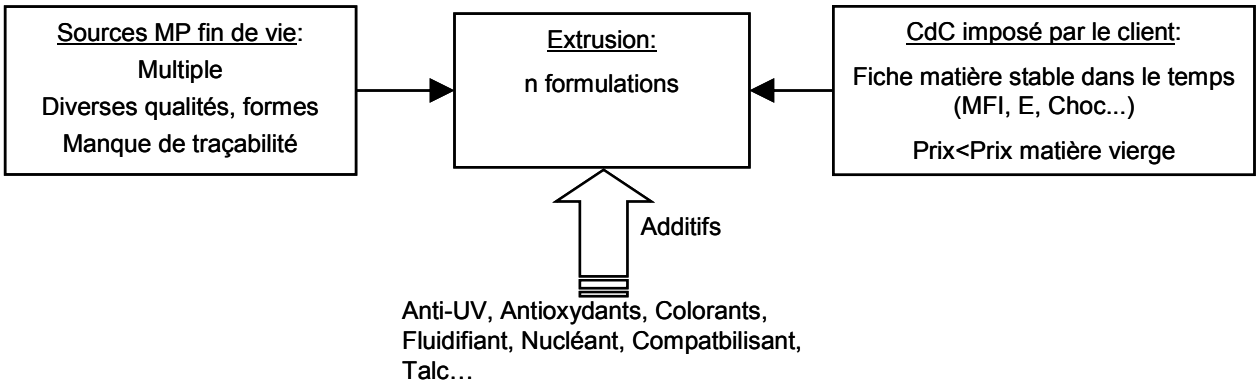
Annexe 5

Description de l'activité de recyclage

Etapes du recyclage des MP chez le recycleur adapté de (Boini 2006)



Formulation des MP



Annexe 6

Caractéristiques des domaines de recherche à l'origine des domaines d'analyse sur les filières

Le Supply Chain Management (SCM)

Le terme de gestion de chaînes logistiques ou Supply Chain Management (SCM) s'est développé il ya une dizaine années et se retrouve sur des thématiques comme la production, la distribution, le marketing ou le transport. (Telle 2003) et (Lauras 2004) ont réalisé une revue des définitions du terme chaîne logistique les plus couramment utilisées dans la littérature. De cette analyse ressort une cohérence de la finalité de la chaîne logistique : conduire les produits et services d'une entreprise jusqu'au client final à l'aide d'une ensemble de moyens opérationnels et humains.

La chaîne logistique implique différents niveaux d'acteurs :

- niveau direct : une entreprise, son fournisseur et le client intervenant dans les flux amont et aval impliqués dans la fabrication d'un produit
- niveau élargi : ajout des fournisseurs du fournisseur et des clients du client de la chaîne précédente
- niveau global : tous les acteurs impliqués dans les flux amont et aval impliqués dans la fabrication du produit soit toutes les chaînes logistiques du dernier fournisseur au dernier client.

Mentzer et al. (Mentzer et al. 2001) proposent la définition suivante « *le Supply Chain Management peut-être défini comme la coordination systémique, stratégique des fonctions opérationnelles classiques et de leurs tactiques respectives à l'intérieur d'une même entreprise et entre partenaires au sein de la chaîne logistique, dans le but d'améliorer la performance à long terme de chaque entreprise membre et de l'ensemble de la chaîne* ».

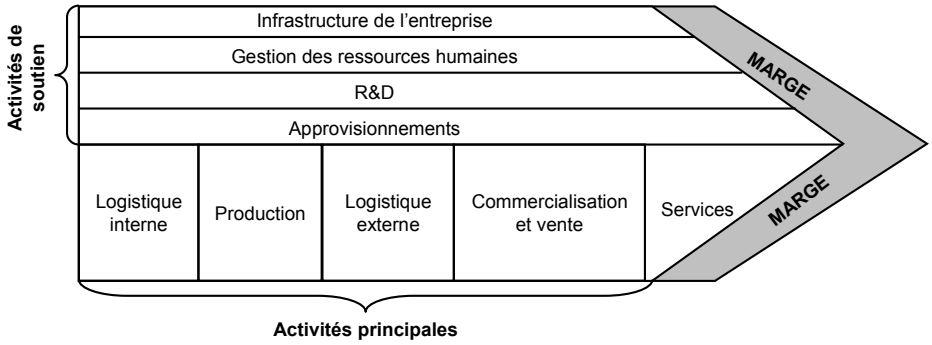
Le Product Chain Management (PCM)

L'approche orientée produit prend en compte toutes les activités impliquées dans le traitement du produit tout au long de son cycle de vie. La PCM est un réseau d'acteurs directement responsables de l'une des étapes du cycle de vie du produit. Ces étapes sont : l'extraction des matières premières, conception, production de produits intermédiaires, production du produit fini, distribution, utilisation, élimination (Boons 2002). Alors que le SCM donne une vision des activités, flux et performances de la chaîne logistique, le PCM donne une vision des acteurs, de leurs interactions et des flux matières, économique, d'informations autour du produit. Du PCM dérive la démarche Product Life Cycle Management (PLM) consistant à capitaliser toutes les informations concernant un produit industriel.

Le Value Chain Management (VCM)

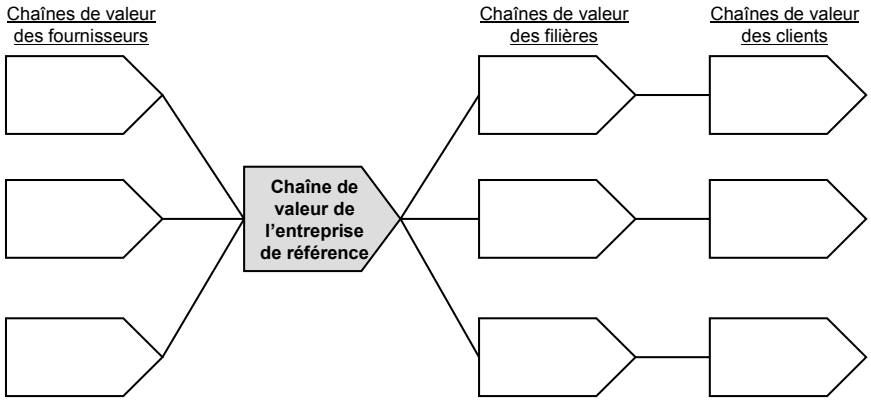
Le concept de SCM est également étendu au concept de Value Chain Management (VCM) (Al-Mudimigh et al. 2004). Ceci est dû à une prise en compte insuffisante des réels besoins et attentes du consommateur final. Le concept de valeur présente diverses définitions dans la littérature. Cependant des éléments communs ressortent: elle est liée à l'utilisation d'un produit d'un service, elle est perçue par l'utilisateur et non de façon objective par le fournisseur, elle implique une relation entre ce que le client reçoit (qualité, bénéfices) et ce qu'il a donné pour acquérir le produit ou service (Al-Mudimigh et al. 2004). En d'autre termes, ce concept est généralement défini par rapport au consommateur final et repose sur la définition de Porter (Porter 1985) « *En termes concurrentiels, la valeur est la somme*

que les clients sont prêts à payer pour obtenir le produit qu'entreprise leur fournit. La valeur est mesurée par la marge représentant le prix du produit fourni par l'entreprise et la quantité vendue. » (Porter 1985) a développé la notion de chaîne de Valeur comme un outil stratégique pour analyser et diagnostiquer une création de valeur au sein d'une entreprise pour en faire un avantage concurrentiel mais surtout pour découvrir les moyens de la développer et de la conserver. La chaîne de valeur décompose l'entreprise en activités économiquement stratégiques pour comprendre leur impact sur la valeur et la différenciation pour rester compétitif.



Chaîne de la valeur selon Porter (Porter 1985)

La notion de chaîne de valeur ne se limite pas à une entreprise. Ainsi de nombreuses entreprises gèrent simultanément plusieurs chaînes de valeur intervenant dans la production du produit et avec des objectifs différents. La notion de système de valeur est alors introduite allant de la production des matières premières à la vente du produit final. Le VCM devient le VSM (Value System Management).



Le Système de Valeur

Annexe 7

Classification des outils d'analyse des filières de la littérature (tableau complet)

Critères / Références	Domaines d'analyse					Objectif de l'outil			Type d'outil				
	RL	GrPCM	GrSCM	ELVCM	IE	Aide à la décision	Conception de nouveaux systèmes	Optimisation de l'existant	Modèle Logistique	Modèle dynamique	Modèle Mathématique	ACV	MFA
(Robotis et al. 2005)	X					X		X			X		
(Nagurney et al. 2005)	X		X			X	X				X		
(Pochampally et al. 2004a) (Pochampally et al. 2004b)	X		X			X	X		X		X		
(Ueda et al. 2003)		X						X			X		
(Rose et al. 2000)				X		X		X					
(Schultmann et al. 2006)	X		X				X		X		X		
(Ferrao et al. 2006a)		X						X		X			
(Amaral et al. 2006)		X				X		X		X			
(Amaral et al. 2002)					X			X			X		
(Van Schaik 2004)		X			X	X		X		X			X
(le Blanc et al. 2004)	X	X				X		X	X				
(Mellor et al. 2002)		X			X	X	X					X	X
(ADEME 2003c)		X				X		X			X		
(le Blanc et al. 2004)	X					X	X	X	X				
	X					X	X		X				
(Krikke et al. 2001)	X					X	X	X	X				
	X					X	X	X	X			X	
	X					X	X		X			X	
(De Brito et al. 2003)	X	X				X	X	X	X		X		
	X	X				X	X	X	X		X		
	X	X				X	X	X	X		X		
	X	X				X	X	X	X		X		

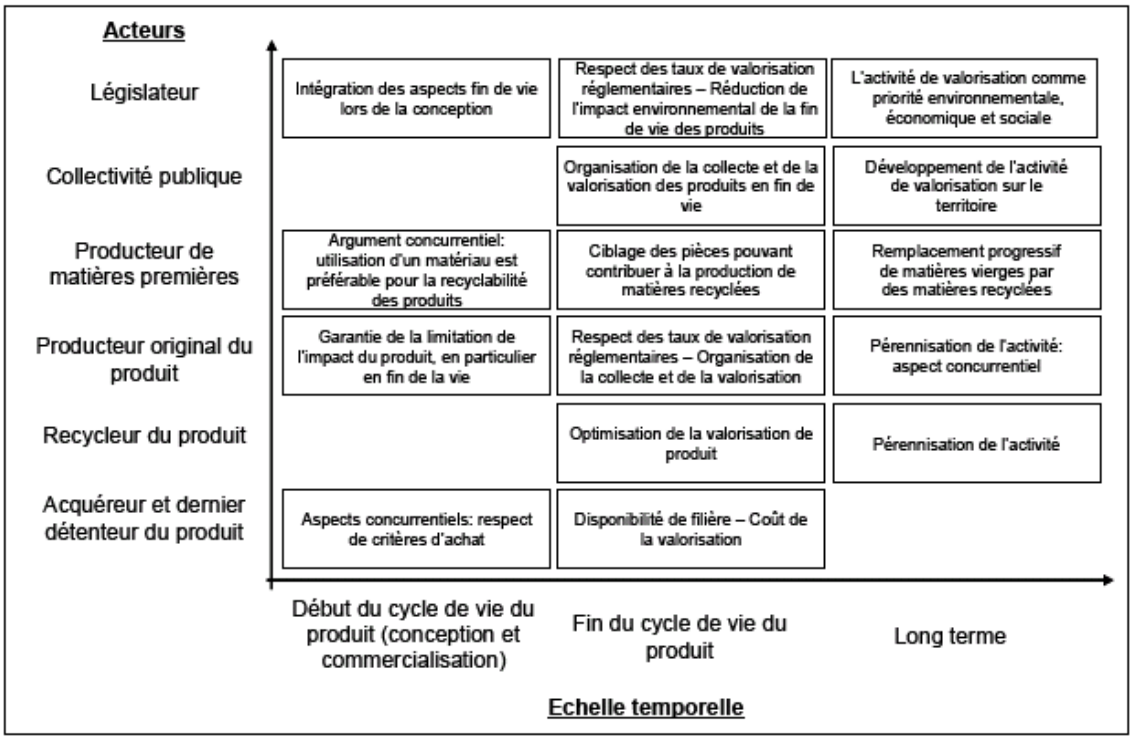
Critères / Références	Type d'optimisation				Type de filières				Type de produit		
	Economique	Environnementale	Organisation	Conception	Démontage Réutilisation	Broyage	Recyclage	Valorisation	VHU	DEEE	MP
(Robotis et al. 2005)	X				X					X	
(Nagurney et al. 2005)	X		X				X			X	
(Pochampally et al. 2004a) (Pochampally et al. 2004b)	X		X		X		X				
(Ueda et al. 2003)	X						X				
(Rose et al. 2000)	X		X				X			X	
(Schultmann et al. 2006)			X				X		X		X
(Ferrao et al. 2006a)	X				X	X			X		
(Amaral et al. 2006)	X	X			X	X			X		
(Amaral et al. 2002)					X	X			X		
(Van Schaik 2004)		X			X	X	X	X	X		
(le Blanc et al. 2004)	X		X		X				X		X
(Mellor et al. 2002)	X	X					X	X		X	X
(ADEME 2003c)	X		X		X	X			X		
(le Blanc et al. 2004)	X						X			X	
	X				X					X	
(Krikke et al. 2001)	X		X		X		X			X	
	X	X	X		X		X				
		X		X	X		X				
(De Brito et al. 2003)	X		X		X		X		X		X
	X		X		X		X			X	X
	X		X		X		X			X	X
	X		X		X		X				X

Critères / Références	Parties						Paramètres					
	Acteurs de la valorisation	Recycleurs	Producteurs	Société civile	Toutes	Attentes	Flux produits	Procédés	Economiques	Organisationnels	Quantitatif	Qualitatif
(Robotis et al. 2005)	X		X			X	X		X		X	
(Nagurney et al. 2005)	X	X	X				X		X		X	
(Pochampally et al. 2004a) (Pochampally et al. 2004b)					X	X			X	X		X
(Ueda et al. 2003)	X			X			X					X
(Rose et al. 2000)					X	X	X		X	X		X
(Schultmann et al. 2006)	X						X			X	X	
(Ferrao et al. 2006a)	X						X		X		X	
(Amaral et al. 2006)	X						X		X		X	
(Amaral et al. 2002)	X						X				X	
(Van Schaik 2004)	X			X			X	X				
(le Blanc et al. 2004)	X		X						X	X	X	
(Mellor et al. 2002)							X	X	X		X	
(ADEME 2003c)	X						X		X		X	
(le Blanc et al. 2004)	X	X					X		X	X	X	
	X						X		X	X	X	
(Krikke et al. 2001)	X		X				X		X	X	X	
(De Brito et al. 2003)	X	X	X				X		X	X	X	
	X	X		X			X		X	X	X	
	X	X	X				X		X	X	X	
	X	X	X				X		X	X	X	

Annexe 8

Définition de la notion de recyclabilité

Les perceptions de la recyclabilité du produit en fonction de l'acteur et de l'horizon temporel selon (Mathieux 2002)



Annexe 9

Les quatre modes de conversion des connaissances d'après (Le Pochat 2005) **adapté de** (Nonaka et al. 1997) **et Lopez130.**

Mode de conversion des connaissances	Types de connaissance en jeu et sens de conversion	Description du mode	Moyens mis en œuvre	Phénomène déclencheur
Socialisation	*tacites → tacites*	Du **savoir tacite individuel** au **savoir tacite collectif**. Dans cette notion il y a à la fois l'idée d'un **transfert de compétence** d'un individu à un autre ou à un groupe, mais également une modification de cette compétence dans le transfert grâce à l'interaction. **L'apprentissage, l'intégration** au sens courant de ce terme, correspond très concrètement à ce concept de **socialisation**.	- Partage sur le lieu de travail, apprentissage**.** - Interaction forte par proximité géographique.	Construction d'un champ d'interactions (pouvant prendre la forme, au tout début, d'un projet pilote).
Extériorisation	*tacites → explicites*	Du **savoir tacite collectif** au **savoir explicite.** Des pratiques considérées comme efficientes sont explicitées dans un **discours formalisé** (forcément dans une certaine limite). Les **savoirs** sont rendus **conscients** en les explicitant. Cette étape se traduit par l'élaboration de **modèles cognitifs communs**, favorables à la **coordination**.	- Métaphores, concepts, hypothèses, modèles, analogies. - Discours formalisé.	Dialogue porteur de sens et réflexion collective.
Combinaison	*explicites → explicites*	Des **savoirs explicites** aux données existantes dans l'organisation (et à l'extérieur) en vue de la **création de connaissances nouvelles**. Agrégation en une **vision systémique** de connaissances explicites éparpillées.	Par le biais d'un langage commun et de mécanismes de communication variés, les connaissances explicites de certains individus sont rapprochées, combinées pour produire par induction, déduction des connaissances nouvelles : - Langage commun. - Notes d'information, cours,…	Mise en réseau : - de la nouvelle connaissance créée ; - des connaissances détenues dans d'autres parties de l'organisation.

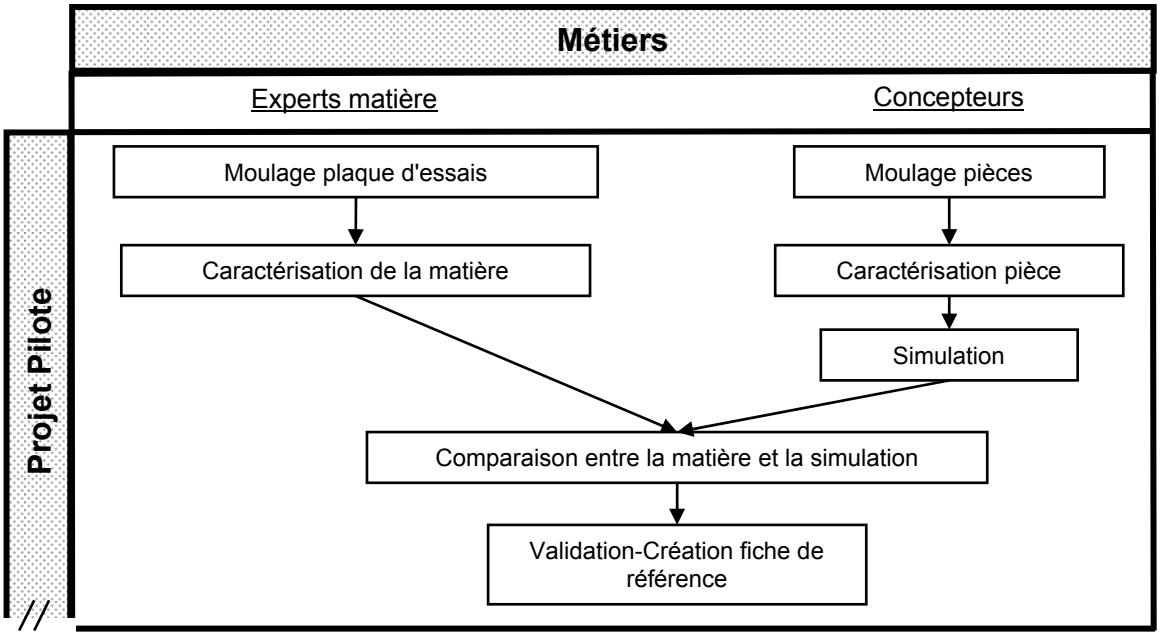
[130] Lopez, R., Gardoni, M., Tollenaere, M. (2002). « Retour d'expérience sur la création de connaissances et la compétence collective – Approche appliquée au cas de l'entreprise PECHINEY à St Jean de Maurienne », 1er Colloque GCCGI, Vers l'articulation entre compétences et connaissances, Nantes.

Intériorisation	*explicites → tacites*	Du **savoir explicite** au **savoir tacite** à un **niveau plus élevé** (l'organisation apprenante). **Intériorisation** par l'individu. Par **répétition** on enracine la connaissance explicite dans des séquences pouvant atteindre le **réflexe automatique** en adaptant le schéma aux conditions spécifiques d'exécutions. Cette intériorisation s'accompagne de gains d'efficience pour l'acteur. C'est une **interprétation individualisée** de compétences communes, **préalablement codifiées**. Cette étape inclut deux dimensions : une dimension de **transmission** qui suppose la codification et une dimension **d'application** qui nécessite une réinterprétation par la création de compétences utiles.	- Répétition d'expériences, mise en application dans des projets. Automatisation des pratiques. - Codification, procédures, indicateurs d'activité.	Apprentissage « en Faisant »

Annexe 10

Processus de création de la fiche matière Φ1b

C'est une fiche capitalisant les propriétés mécaniques d'une matière ainsi que son adéquation avec le cahier des charges associé à la pièce choisie pour son utilisation. Les experts matière caractérisent la nouvelle matière sur la base de test de propriétés mécaniques comme le module de traction, l'indice de fluidité à chaud (MFI), module d'élasticité en flexion, résistance au choc…



Les concepteurs, en parallèle de cette évaluation, caractérisent les propriétés du compound sur pièce afin d'évaluer l'adéquation entre propriétés matière et le cahier des charges spécifique à la pièce choisie. Le comportement de la matière lors de sa mise en forme est également évalué par simulation dans le but notamment de prévoir le comportement de la matière lors de l'injection des pièces (retrait de matière, augmentation des épaisseurs pièce…). Les caractéristiques obtenues par simulation sont comparées à celles obtenues directement sur la pièce. Celles-ci concernent tant le comportement mécanique de la matière lors de la mise en forme que son comportement lors des sollicitations de la pièce demandée par le cahier des charges (température de fusion, dégradation, calcul de structure, loi de comportement du matériau, rigidité de la pièce, la déformation, coefficient d'expansion thermique, foirage des fixations).

.

Annexe 11

Processus de création de la typologie TypPPauto

Choix des caractéristiques différenciatrices (Maudet 2005)

Tout d'abord, pour les démolisseurs, la différenciation s'opère sur leur capabilité légale. La caractéristique la plus discriminante est le respect de la réglementation ICPE (Installations classées pour la protection de l'environnement). La moitié des démolisseurs ne sont pas certifiés ICPE. Ceci est dû notamment à une activité restée longtemps marginale, artisanale, non professionnalisée. Mais cette profession subit aujourd'hui de nombreuses mutations pour continuer à exister (augmentation du nombre d'ICPE, certification obligatoire pour traiter les VHU). La deuxième caractéristique est la certification Qualicert[131] (certification de services).Elle permet selon l'ADEME : « - **d'établir des relations de confiance entre les démolisseurs et les autres intervenants de la filière (assureurs, concessionnaires, constructeurs, broyeurs, recycleurs matière et pouvoirs publics) pour tout ce qui concerne la dépollution et la traçabilité des V.H.U., - de guider les clients dans leur choix et de leur fournir des garanties sur la qualité du service proposé par les démolisseurs, - de valoriser l'image du démolisseur d'automobiles auprès de l'ensemble des opérateurs économiques**. » Cette certification est également exigée par certain gestionnaire-distributeur pour faire partie de leur réseau. D'autres points, notamment sur les activités, peuvent venir améliorer cette distinction comme le fait que les démolisseurs soient prédisposés à démonter ou non des pièces en MP. Mais ces groupes sont difficiles à quantifier donc non utilisés pour la création de la typologie.

Pour les broyeurs et les recycleurs les distinctions s'opèrent sur les caractéristiques des flux et les capacités de traitement.

La première distinction entre les broyeurs de MP s'opère sur les caractéristiques des flux traités par l'opérateur, notamment la nature de la résine soit s'ils traitent ou non du PP. A fortiori ceux qui ne traitent pas de PP sont les moins appropriés dans un premier temps au développement de la filière choisie mais pourrait l'être pour le développement d'autres systèmes à base d'autres résines. Ensuite seuls sont retenus dans la dernière classe les entités traitant du PP issus de produits fin de vie type VFV. Cette dernière différenciation concerne également la diversité des sources traitées par l'opérateur. Ainsi une grande diversité de sources peut avoir un impact sur la qualité du flux en sortie et donc sur le prix. Donc la dernière classe comporte également la moins grande variété de sources.

Enfin, pour les recycleurs, la première classe créée regroupe les acteurs qui ne recyclent pas de PP. Ensuite, la distinction est faite sur l'origine des flux traités et donc sur le traitement ou non de PP issu de déchets automobiles. La dernière différenciation est associée à la capacité de traitement des acteurs. Cette caractéristique est essentielle pour les recycleurs et va conditionner notamment le profil de qualité de leurs flux sortants. Ainsi, ceux traitant des grands volumes et cherchant à atteindre des économies d'échelle s'oriente vers de la basse qualité (besoin comblé) et la production de matière de haute qualité ne peut se faire que sur de petites quantités, des marchés de niche.

[131] Elle est un signe de qualité délivré par un organisme tiers indépendant permettant aux clients d'identifier et de différencier les entreprises proposant des services conformes à un référentiel validé par les professionnels, les utilisateurs et les pouvoirs publics.

Annexe 12

Méthodologie de calcul pour les différents coûts économiques et leurs définitions

I- Méthodologie de calcul

Pour calculer la marge potentielle réalisée par les différents acteurs de la filière de recyclage, il nous faut tout d'abord définir les coûts à évaluer ainsi que leur mode d'obtention.
Pour une entreprise produisant des biens et des services, les coûts suivants peuvent être définis :

- Le coût d'utilisation du bien de production
- Le coût de production ou coût de revient partiel
- Le coût de revient complet.

Ils sont évalués pour une unité d'œuvre donnée : un produit, une activité, une heure.

Ces coûts sont définis par :

- des charges directes : élément directement utilisé par l'outil de production. ex : matières premières
- des charges indirectes : élément se rapportant à l'ensemble de la production et non directement au produit considéré ex : frais généraux
- des charges variables : élément dépendant de la quantité de produite ex : main d'œuvre, matière première
- des charges fixes : élément utilisé quelque soit la quantité produite ex : loyer, frais d'administration.

Les différents centres de coût d'une entreprise peuvent utilisés les mêmes moyens de production pour produire divers biens. Les coûts sont alors ventilés entre les différents centres.

I-1. Le coût d'utilisation (CU)

Il dépend uniquement des charges directes liées à l'utilisation de l'outil de production soit :

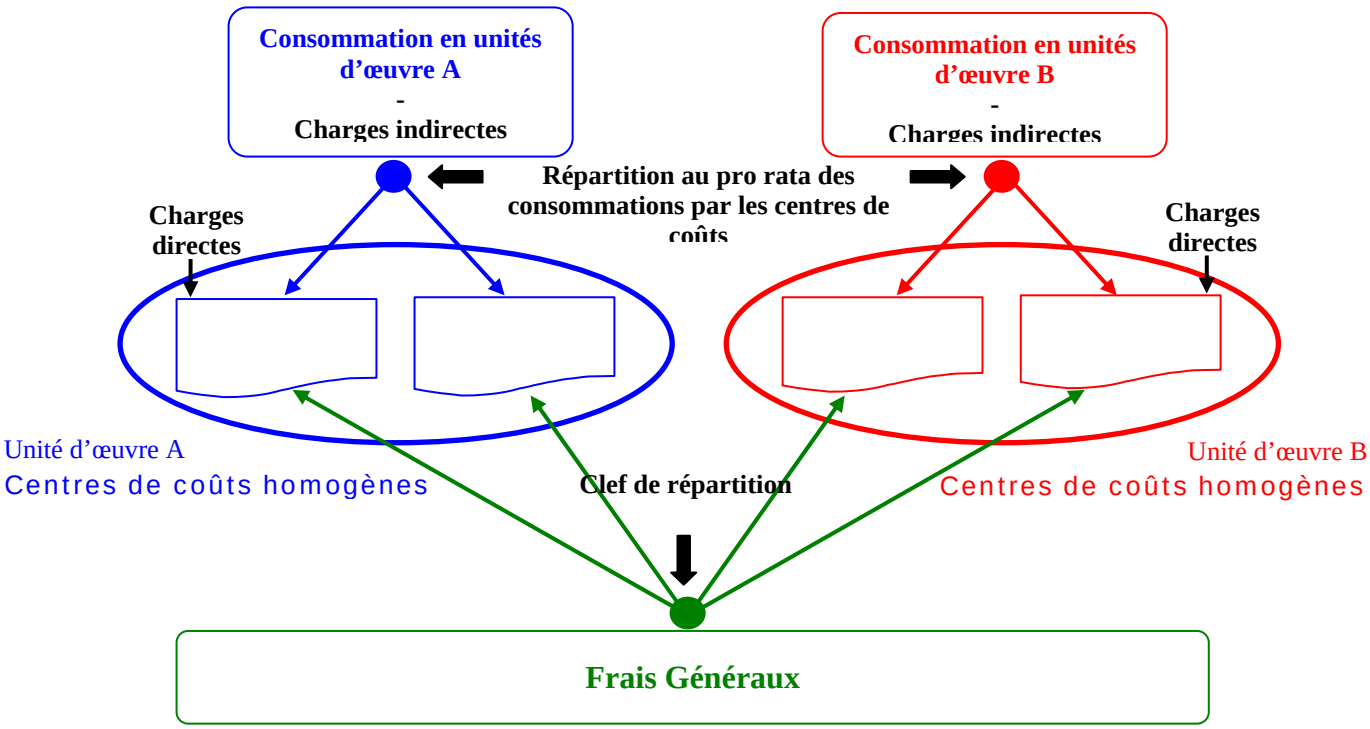
- main d'œuvre, surface occupée par l'outil, les consommables utilisés (eau, énergie), les frais de maintenance, durée de l'amortissement

On a : $Cu =$ R (Frais de fonctionnement de l'outil) +A (amortissement de l'outil)
Avec :

- $R = \frac{Fr}{H} + \frac{IS}{H} + 0{,}6ew + 1{,}6CS$ (cf. techniques de l'ingénieur)
  - Fr=frais de réparation et d'entretien annuels
  - H=Nombre d'heures d'utilisation par an
  - S=surface occupée par la machine
  - I=frais de local par m² et par an
  - W=puissance de la machine en kW/h et 0,6 le % d'utilisation
  - e=coût du kw/h
  - CS=charge salariale (1,6CS comprend les charges sociales)
- $A = \frac{P}{HN} + \frac{PI}{2H}$
  - P=prix de la machine
  - N=durée en année de l'amortissement
  - I=taux d'intérêt

Dans ce calcul l'unité d'œuvre est l'heure mais le même calcul pourrait être aussi bien effectué pour un produit donné.

$Cu_{/\,produit} = Cu_{/\,h} * T_{/\,produit}$ avec T le temps pour traiter un produit



Répartition des charges entre les différents centres de coûts

I-2. Le Coût de production (CP)

Le CP ou coût de revient partiel prend en compte le CU et tous les achats nécessaires à la production du bien considéré.

Soit $CP_{/\,produit} = Cu_{/\,produit} + \frac{\sum achats}{n}$ avec n=la quantité produite avec tous ces achats.

Cu et CP sont variables en fonction du la quantité de produit traitée.

I-3. Le coût de revient du produit (CR)

Le CR complet prend en compte les frais généraux de l'entreprise. Ils sont affectés au produit au prorata de l'importance du produit dans la production totale de l'entreprise. La clé de répartition de ces frais peut être le pourcentage du chiffre d'affaires que représente l'activité ou bien le pourcentage que représente le volume de ce produit par rapport au volume global. Sont ajoutés également les frais de distribution des produits, les coûts liés aux déchets…

Les frais généraux représentent les frais administratifs, les frais liés aux locaux…

$$CR_{/\,produit} = CP_{/\,produit} + \%CA(ouvolume) * FG + Fraisdistribution...$$

I-4. Marge

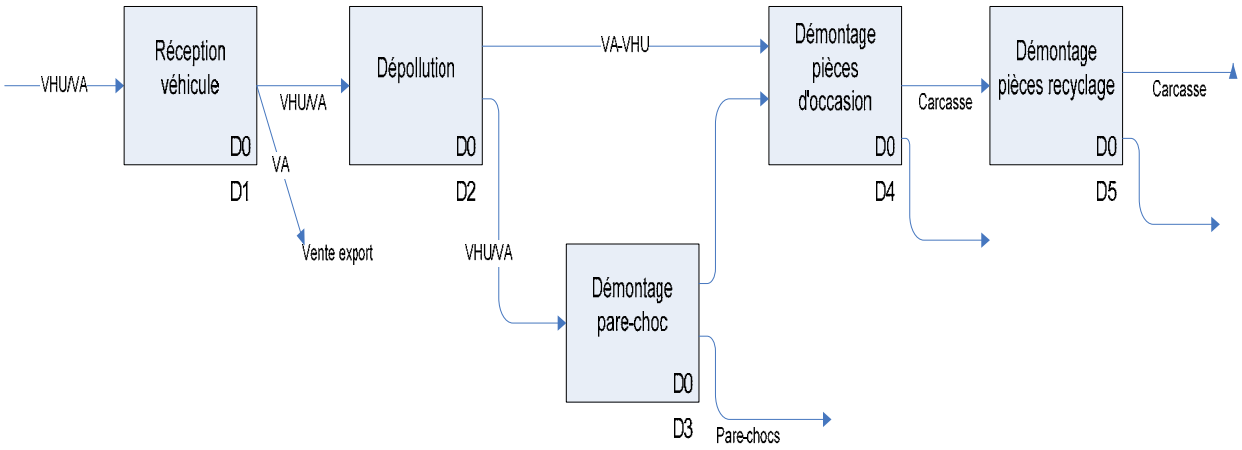
Le calcul de la marge réalisée sur un produit est la différence entre le prix de vente de produit ou le chiffre d'affaires de l'activité et son coût de revient soit

$$M_{/\,produit} = PV_{produit} - CR_{/\,produit}$$

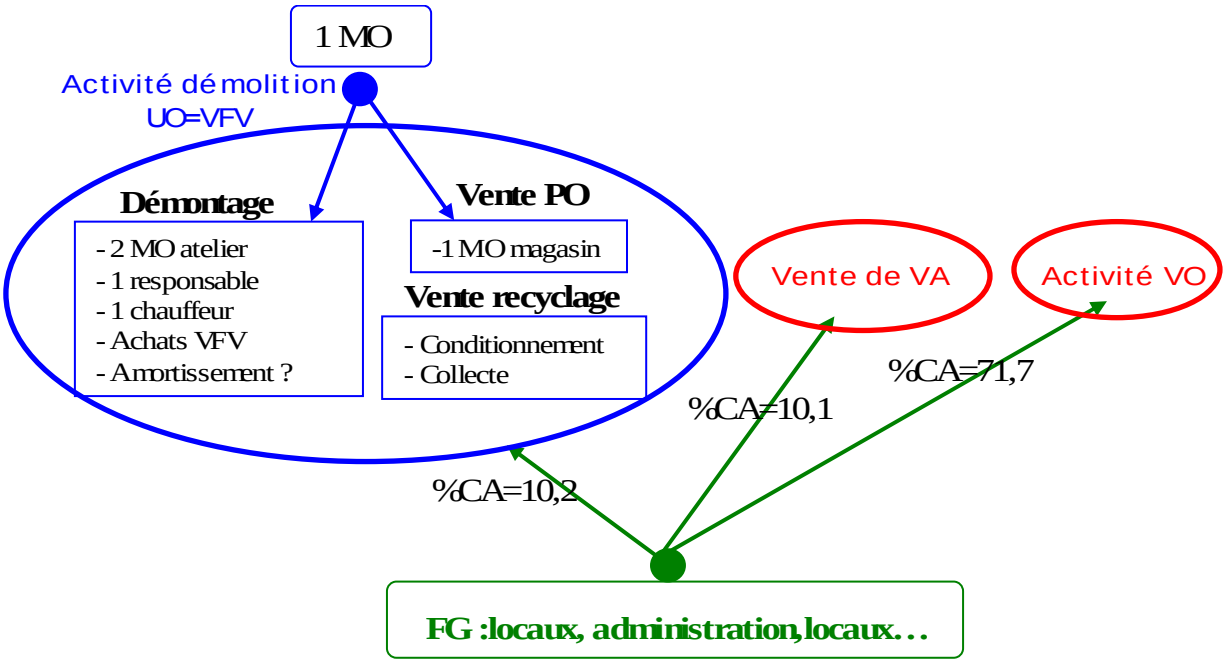
II- Illustration des calculs de coûts

II-1. Pour le démolisseur

Etapes à prendre en compte :



Clé de répartition de charges



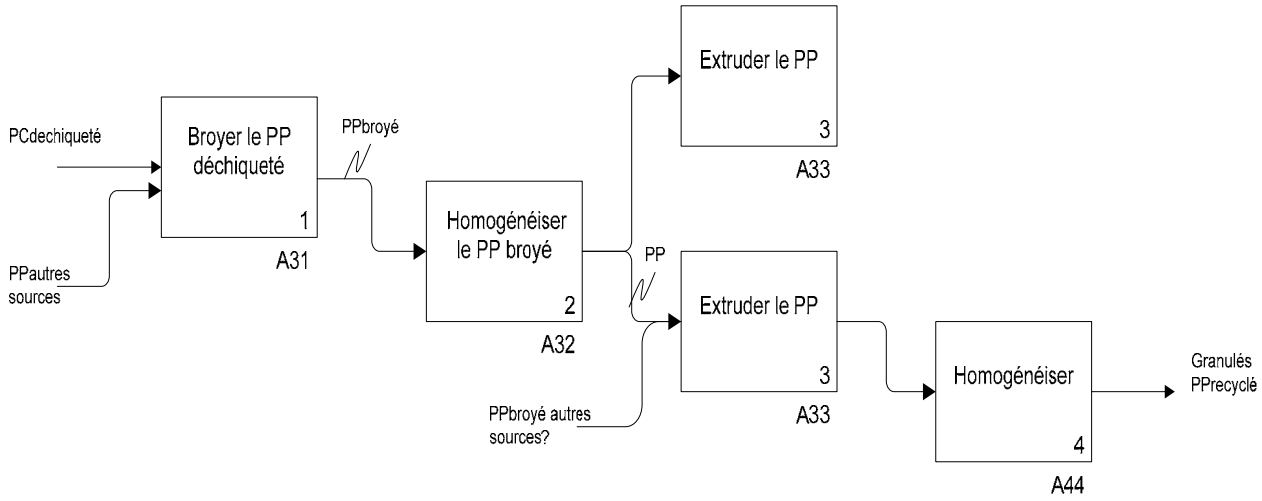
Quelques exemples de calcul de coûts

$$CU_{D,Démolition,VFV} = \frac{\sum_{i=1}^{nVA}(Tu_{D,Démontage,VA}) * CS_{D,D\&montage,VA} + \sum_{j=1}^{nVHU}(Tu_{D,Démontage,VHU}) * CS_{D,Démontage,VHU}}{Q_{tot,D,VFV}}$$

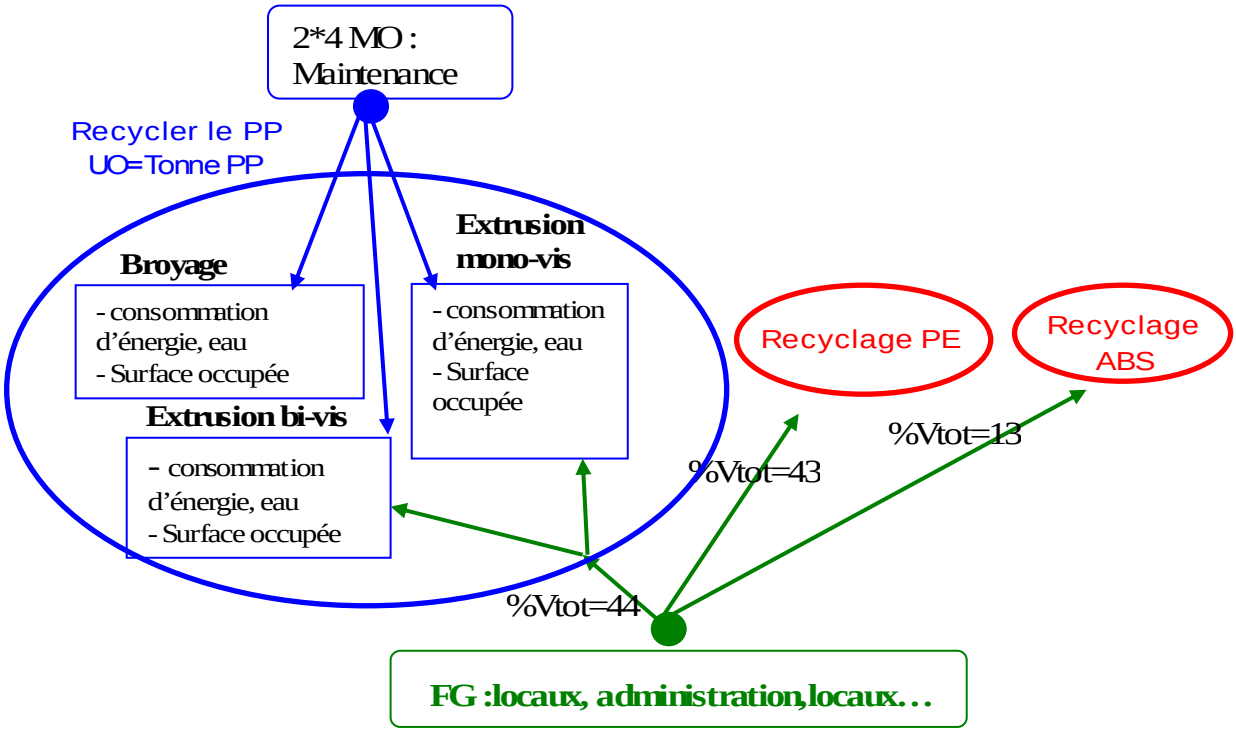
$$CP_{D,Démolition,VFV} = CU_{D,Démolition,VFV} + \frac{\sum_{i=1}^{\%ntot}(PA_{E,D,VA}) + \sum_{j=1}^{\%ntot}(PA_{E,D,VHU})}{Q_{tot,D,VFV}}$$

II-2. Pour le recycleur

Etapes à prendre en compte



Clé de répartition de charges



Exemples de calcul de coûts

$$Cu_{R,recyclage,PP} = Cu_{R,broyage,PP} + Cu_{R,lavage,PP} + Cu_{R,\text{hom}ogénéisation,PP} + Cu_{R,Extrusion,PP}$$

$$CP_{R,\text{Re}cyclage,PP} = Cu_{R,\text{Re}cyclage,PP} + \frac{\sum_{j=1}^{nlots} PA_{E,R,PP,D} * V_{E,R,PP,D} + \sum_{j=1}^{nlots} \left(\sum_{k=1}^{nadditifs} PA_{E,R,additifs} * V_{E,R,additifs} \right)_j}{V_{R,PP}}$$

Annexe 13

Exemples des paramètres de modélisation du démolisseur

Les formalismes utilisés ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour l'explication théorique, ceci dans un souci de simplification lors du développement du modèle

Variables	Représentation
Cfluides	Coût de traitement total des fluides
Cfuides_VFV	Coût de traitement des fluides par VFV
Courscarcasse	Prix de vente moyen des carcasses ou indexation sur évolution au cours de l'année
Coutsa_VFV	Coût traitement administratif par VFV
Cudemoltot	Coût de démontage ou d'utilisation total
Cu_VA_VHU	Coût de démontage ou d'utilisation par VA ou VHU
CPpc_pc	Coût de production du traitement des pare-chocs par pc
Cpneus_vfv	Coût de traitement des pneus par VFV
CP_VFV	Coût de production par VFV
CPtotpc	Coût de production total des pare-chocs
CR_VFV	Coût de revient de la démolition par VFV
Crebuts	Coût d'élimination des déchets
Crebuts_VFV	Coût d'élimination des déchets par VFV
CRpc_vfv	Coût de revient du démontage des pc par vfv
CRtotpc	Coût de revient total du démontage des pc
Cu_vfv	Coût d'utilisation main d'oeuvre pour le démontage des pc par pc
Cu_vfv	Coût d'utilisation main d'oeuvre pour le démontage des VFV par VFV
Cubenne_vfv	Coût de location de la benne pour le stockage des pc par vfv
Fcollecte	Coût de collecte des produits
FG	Frais généraux globaux de l'acteur
Fmagasin	Frais liés à la gestion des pièces d'occasion en magasin
Fresponsable	Frais liés au responsable d'atelier
Locationbenne	prix de location de la benne pour les pc
M_Tpc	Marge réalisée par tonne de pc
Margedémolition	Marge réalisée par l'activité démolition
ncarcasse	nombre de carcasses traitées
npce	nombre de pare-chocs démontés
npcs	nombre de pare-chocs vendus par le démolisseur
nva	nombre total de VA traités
nvfv	nombre total de VFV traités
nvhu	nombre total de VHU traités
nvhuconcessions	nombre total de VHUc traités
partCA	% du CA global consacré à la démolition
PAtotpc	coût d'achat total des pc au prorata du poids du vfv
PA_vfv	Prix d'achat moyen d'un VFV
Pbatteriestot	poids total des batteries démontées
Poidscarcasse	poids total des carcasses
Poidstot	poids total des VFV
Poidstotal_Parechoc	Poids total des pc démontés
PV_piècesrecyclage_VFV	Prix de vente lié aux pièces démontées pour le recyclage en fonction du type de VFV
PV_recyclage	Total des ventes liées au recyclage
PV_Tpc	Prix de vente de la tonne de pare-choc

PV_VA	Total des ventes liées à la vente directe de VA
PV_VO	Total des ventes liées à la vente des véhicules d'occasion
PVbatteries_VFV	Vente liée aux batteries par VFV
PVcarcasse_VFV	Prix de vente carcasse par VFV
PVdémolition_VFV	Ventes liées à l'ensemble de la démolition par VFV
PVpc_VFV	Ventes liées aux pc par VFV
PVpo_VFV	Ventes liées aux pièces d'occasion par VFV
Pvtot_piècesrecyclage	Total des ventes liées aux pièces pour le recyclage
PVtotpc	Total des ventes liées au pc
PVtotPO	Total des ventes liées aux pièces d'occasion
Sommeachat	Total des achats liés aux VFV
Taux_recyclage_moyen	Taux de recyclage moyen en sortie du démolisseur
Taux_recyclage_tot	Taux de recyclage total
Tpc	Temps de cycle du démontage des pc
Tdtot	Temps de démontage global du VFV
X	nombre de salariés employés
CS	coût salarial
TempsW	Temps de travail

Annexe 14

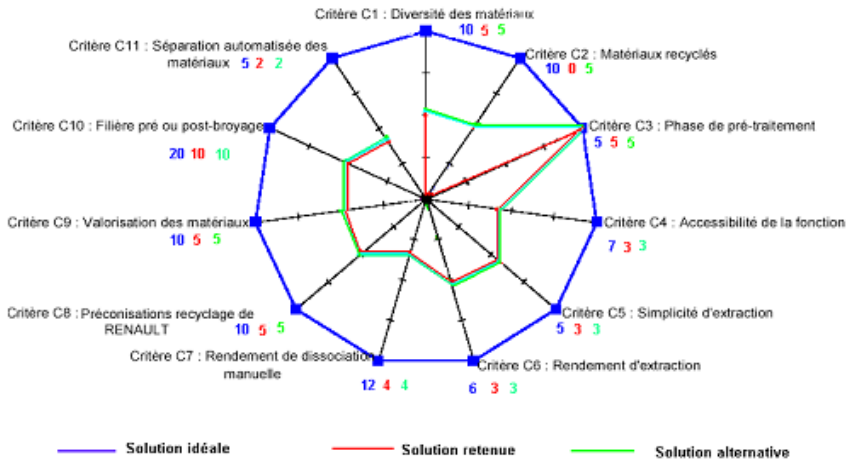
Caractérisation du PP-FVR

Propriétés du compound PP-FVR

Propriétés	PP-FV vierge	PP-FVR
Densité	1,13	☺
Taux de fibres	31	☺
MFI	Mesure impossible	
Module de flexion (MPa)	4675	☺
Module de traction (MPa)	5840	☺
Choc IZOD à T ambiante (kJ/m²)	24	☺
Température de fusion	165	☺
Température de cristallisation	123	☺

Propriétés de la FAT en PP-FVR

Indice de recyclage : la solution alternative représente la FAT en PP-FVR



Annexe 15

Analyse de la démontabilité des FAT (Boini 2006)

Recensement des fixations présentes sur les FAT étudiées

Nom	Exemple	Démontabilité	Fréquence
Vis tête hexagonale (vis H)		+++	+++
Vis Torx (forme de la tête variable)		+++	+++
Vis tête cruciforme		+++	+
Insert Rivkle (serbloc Bollhoff)		x	+++
Ecrou réglable (Optiques)		++	+
bagues anti fluage		x	+++

Nom	Exemple	Démontabilité	Fréquence
écrou fût		+++	++
Clip		++	+
Rivet		+	+
Agrafes		++	+
Plasti-rivet		++	++
Bouterolles (fixation FAT/Renfort métallique)		+	-

Légende :

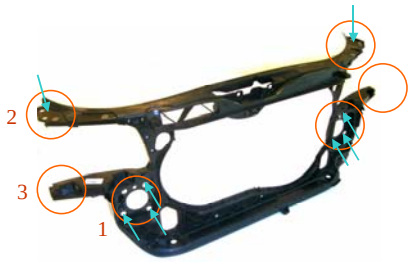
Démontabilité

+++	Très facilement démontable
++	Facilement démontable
+	Démontage peu pratique
x	Démontage difficile

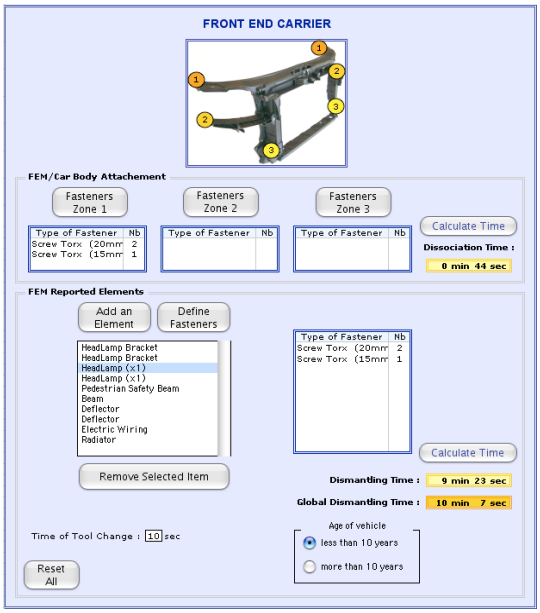
Fréquence

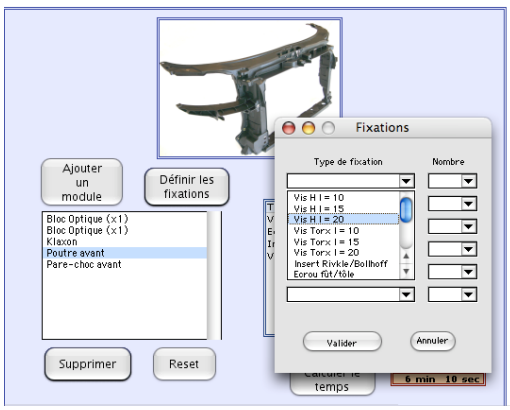
+++	Très fréquent
++	Assez fréquent
+	Peu fréquent
	Rare

Zones de fixation



Logiciel d'analyse de la démontrabilité des FAT intégré aux outils de conception POAE





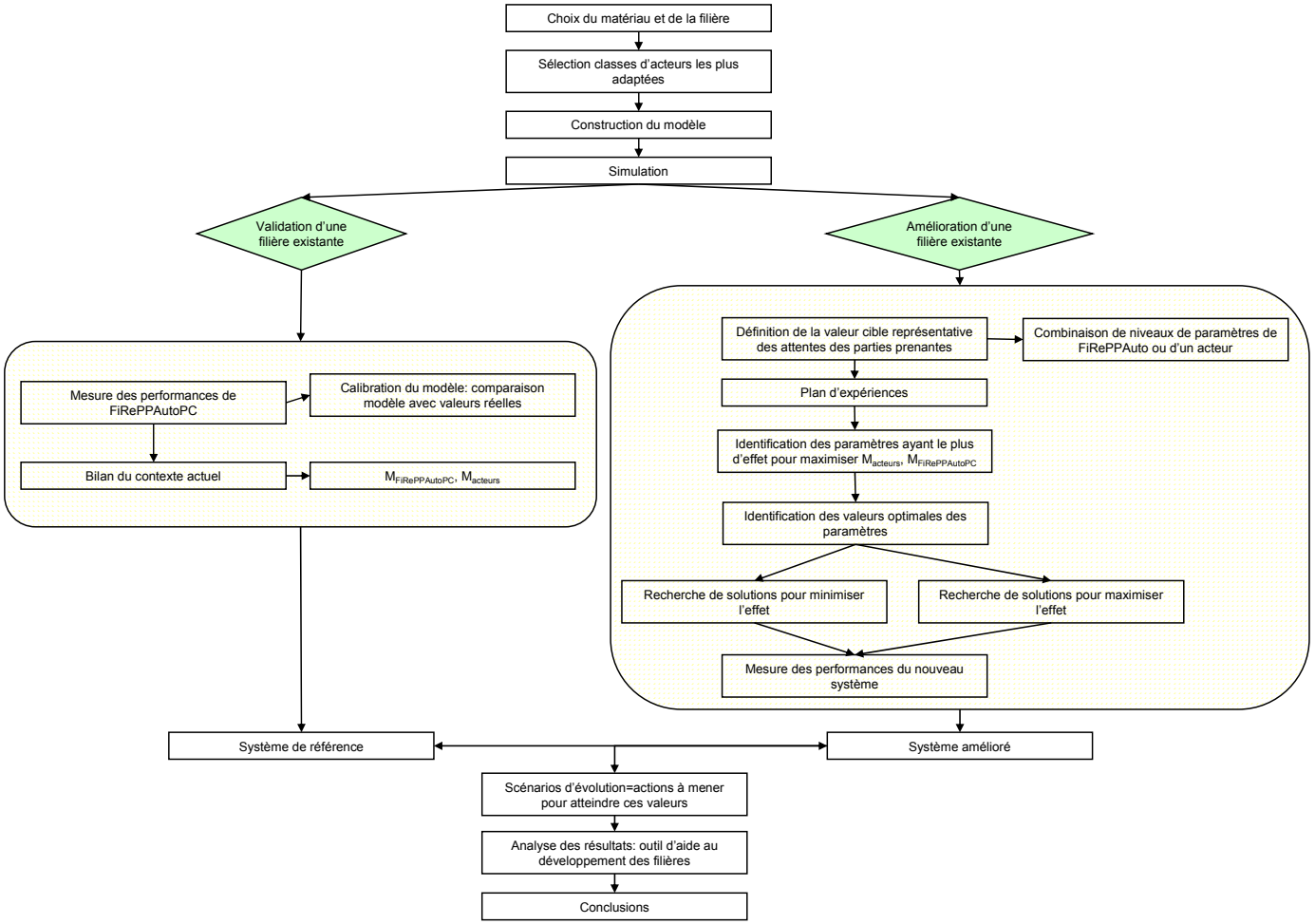
Annexe 16

Bilan des connaissances créées au sein des métiers de POAE lors de l'expérimentation de DAIMRE

Type de connaissances	Moyen	Acteur Amont	Acteur Aval	Validation
		1		
Caractéristiques du recycleur	Transmission orale	Recycleur	Expert Qualité Fournisseur Expert Environnement	☺
Critères de choix recycleur	Transmission orale	Expert Qualité Fournisseur	Acheteur Matière	☺
Critères d'achat PP-FVR	Transmission orale	Acheteur Matière	Expert Qualité Fournisseur	☺
Données Fournisseur	Transmission orale	Acheteur Matière	Expert Matière	☺
CdC FAT	Transmission orale Fiche	Concepteur	Expert Matière	😐
Caractéristiques PP-FVR	Transmission orale Fiche	Expert Matière	Concepteur	☺
	Fiche	Recycleur	Expert Matière	😐
	Fiche PP-FVR	Expert Matière Concepteur	Recycleur	☺
Propriétés combinées du PP-FVR, FAT, Recycleur	Fiche PP-FVR-FAT-Recycleur	Concepteur Expert Matière Acheteur Matière Expert Qualité Fournisseur	Equipe projet	☺
		2		
Propriétés combinées du PP-FVR, FAT, Recycleur	Transmission orale	Métiers	Responsable projet qualité	☺
	Fiche PP-FVR-FAT-Recycleur	Métiers	Responsable projet qualité	☹
	Transmission orale	Concepteurs	Responsable projet conception	☺
	Fiche PP-FVR-FAT-Recycleur	Concepteurs	Responsable projet conception	☹
Caractéristiques du projet (volume, prix, qualité…)	Transmission orale	Responsable projet Qualité	Recycleur	☺
	Fiche	Responsable projet Qualité	Recycleur	😐
Caractéristiques du PP-FVR	Transmission orale	Responsable projet Qualité	Constructeur	☺
Contraintes environnementales dans le cahier des charges	Transmission orale	Responsable projet conception	Métiers Matière	☺

Annexe 17

Déroulement de l'expérimentation d'ODEFIRE pour l'analyse de FiRePPAutoPC



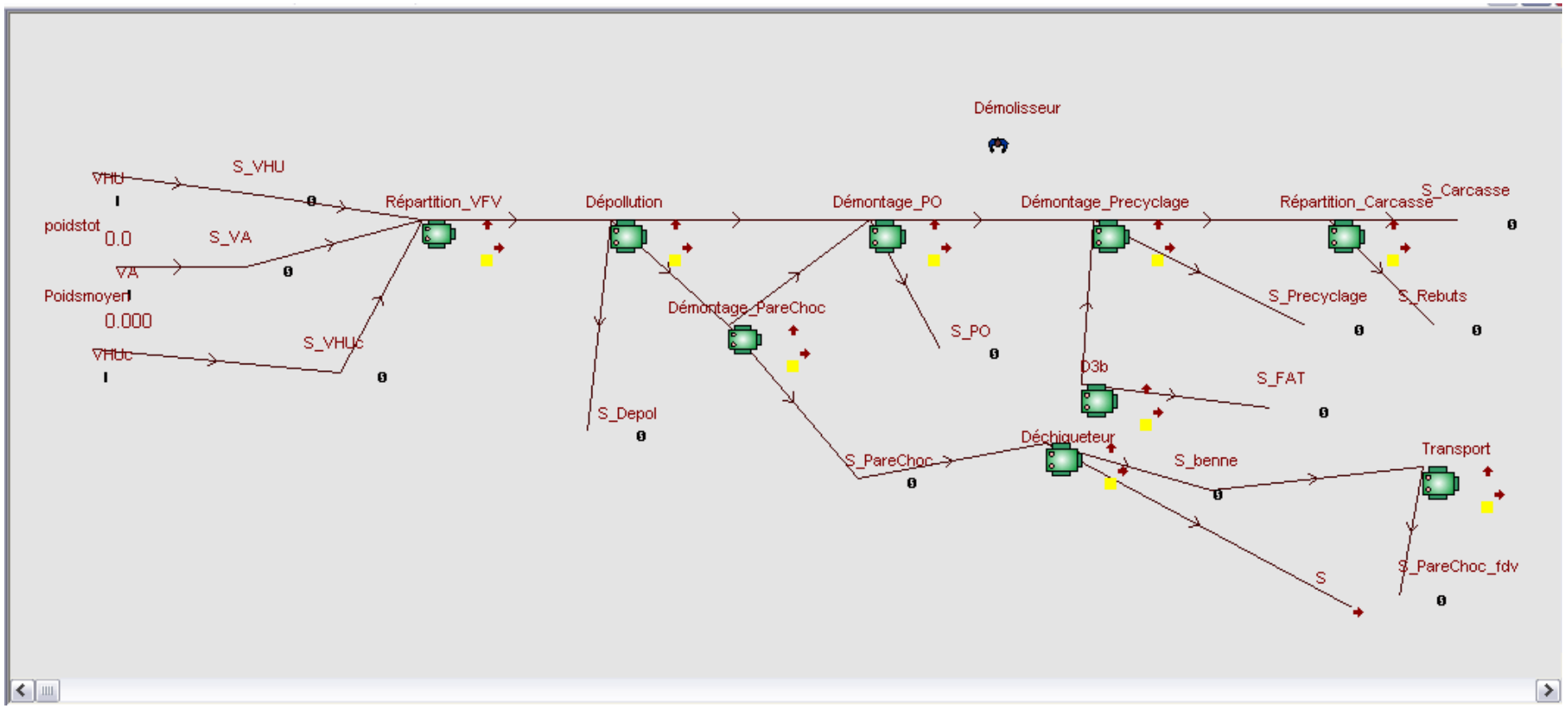
Liste des paramètres pour une optimisation

Paramètres d'évolution non maîtrisables	Définition	Variation	Sources
$Q_{D,VA}$	Evolution de la part de VA	Diminution liée à la diminution du nombre d'accidents	Entretien Démolisseur Recycleur (ADEME 2003) Modèles filière (cf. Chapitre 2)
$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$	Vente liée aux pièces d'occasion	Diminution liée notamment à l'augmentation de la complexité des véhicules rendant difficile le démontage	
$PV_{Filière,PPvierge}$	Prix de vente de la matière vierge (le prix attendu par le marché automobile est directement indexé sur cette valeur)	Augmentation du prix de la matière vierge	
Paramètres d'évolution maîtrisables	**Définition**	**Variation**	
$Po_{U,VFV}$	poids moyen d'un VFV	Augmentation du poids moyen des véhicules	
$Po_{s,D,pare\text{-}choc,R}$	Poids des pare-chocs démontés	Augmentation du poids des pare-chocs et association des pare-chocs arrière	
$N_{démolisseurs}$	Nombre de démolisseur démontant les pare-chocs	Augmentation du nombre de démolisseurs fournisseurs de MP	
$PV_{s,D,pare\text{-}choc,R}$	Prix de vente des pare-chocs	Augmentation du prix de vente des pare-chocs	
$Tc_{D,Démontage,VFV}$	Temps de démontage des VFV	Augmentation du temps de démontage liée à la complexité des nouveaux véhicules	
$PV_{S,D,carcasse,B}$	Prix de vente des carcasses	Augmentation du prix de vente des carcasses	
$V_{E,R,PP}$	Volume de PP disponible en entrée du recycleur	Augmentation du volume de MP capté par le recycleur	
$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$	Paramètre composite % de chaque ref de PP vendu par le recycleur	Augmentation de la part de références de qualité	
$PO_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	Poids des pare-chocs	Augmentation du poids des pare-chocs et association des pare-chocs arrière	
$PA_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	Prix d'achat des pare-chocs	Augmentation du prix d'achat des pare-chocs	

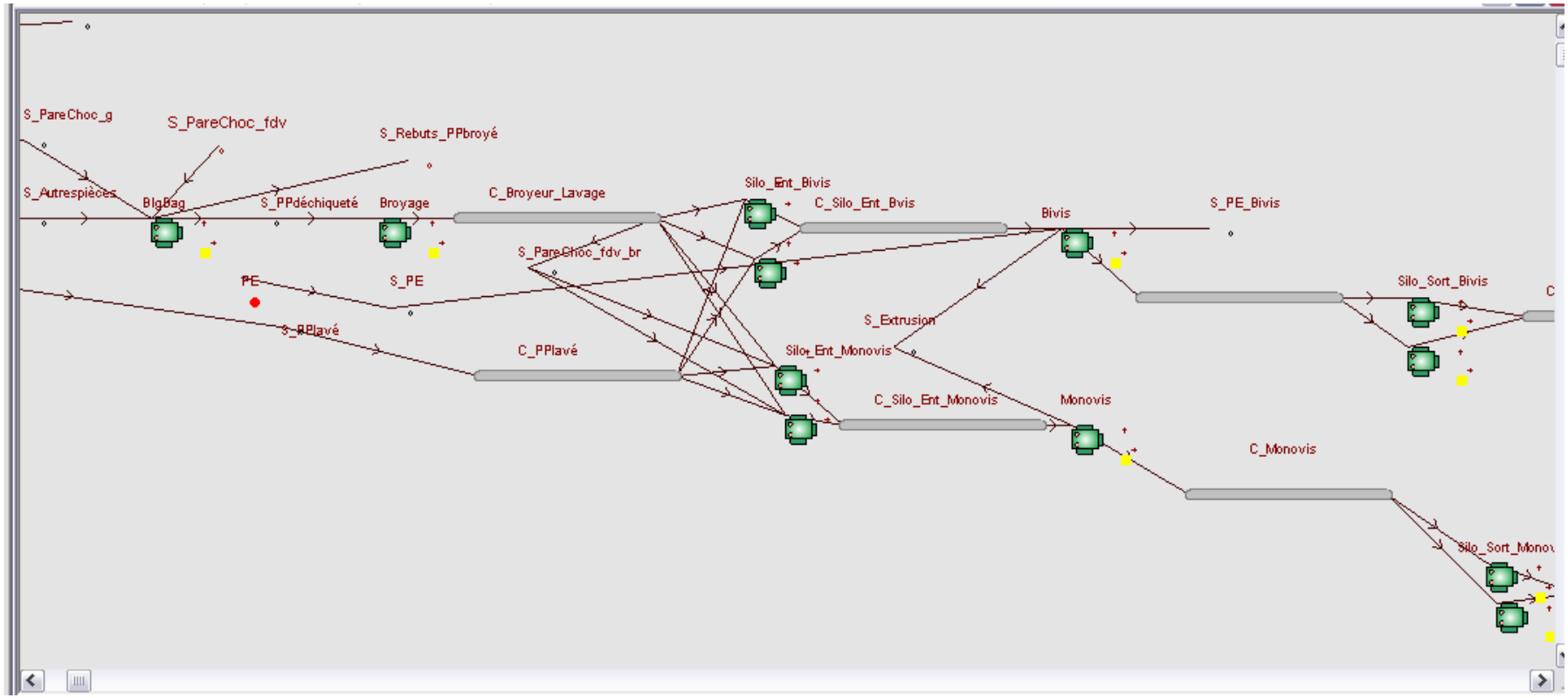
Annexe 18

Modèles WITNESS@ du démolisseur et du recycleur de la filière FiRePPAutoPC

Modèle WITNESS@ du démolisseur de la filière de recyclage du PP issu de VFV



Modèle WITNESS@ du recycleur de la filière de recyclage du PP issu de VFV



Annexe 19

Guides d'entretiens

Ces guides ont été utilisés pour préparer les visites chez les différents acteurs de la filière.

Pour le démolisseur

Informations générales sur l'entreprise

1- Structure

- Quelle est la date de création de votre entreprise?
- Possède-t-elle des filiales, si oui quelles entreprises ?
- Est-ce une filiale ? si oui de quelle entreprise ?
- Quelle est sa taille ?
    - Quel a été le nombre de VHU traité en 2004?
    - Quel est le nombre de personnes employées et leurs fonctions ?
- Quelles sont ses activités principales: démontage, dépollution… ? et les activités annexes ?
- Quelle est votre fonctionnement au niveau du temps de travail (2*8,3*8…) ?
- Quel est le niveau de formation du personnel? Quelle est la répartition du personnel en fonction de la formation ? Quelle est la proportion du personnel de reclassement social ?
- Votre activité fait-elle l'objet d'un savoir-faire breveté ?
- Quels sont vos principaux fournisseurs ?
    - Acteurs de l'industrie automobile : quels réseaux de collecte et proportion?
    - Gestionnaire-distributeur : lesquels et proportion?
    - Autres : lesquels et proportion ?
- Quels sont vos principaux clients pour les activités liées à la valorisation?
    - Particuliers : part de la vente des pièces de réutilisation ?
    - Broyeurs : quelles entreprises et proportion selon le type de produits?
    - Collecteurs : quelles entreprises et proportion ?
    - Autres : proportion ?
- Avez-vous des contrats de collaboration avec les acteurs de la filière de valorisation (broyeurs, collecteurs …) ?
    - Avez-vous des contrats sur les approvisionnements ? Etes- vous assuré d'avoir un nombre minimum de VHU chaque mois ?

- Etes-vous liés par contrat avec vos clients ? Etes-vous tenus de leur fournir une quantité donnée sur une période donnée ?

- Quel est le nombre d'installations en France, en Europe et dans le monde et leurs activités ?

- Votre entreprise est-elle une installation classée ?

- Est-elle certifiée Qualicert, ISO 9001, ISO 14001 ou est-elle en cours de certification ?

2- Données économiques

- Quel est le chiffre d'affaires de votre entreprise en 2004 et quelle est la part liée aux activités de valorisation ?

- Est- ce que votre entreprise dégage des bénéfices par les activités de valorisation et quelle est la part de chacune d'entre elles?

- Quelle est votre position sur le marché des démolisseurs?
  - Position de monopole ?
  - Quels sont vos principaux concurrents ?

- Comment définiriez-vous votre point d'équilibre financier ?
  - En fonction du nombre de VHU traité, de pièces démontées ?
  - En fonction du coût de la matière vierge ?
  - Autres paramètres ?

Produits/ Matières traités

1- Flux entrants

- Quel a été le nombre de VHU traité en 2004 ?

- Quelles sont la provenance et la nature (accidenté, fin de vie) des VHU traités et la part de chacune d'entre elles par rapport au nombre global d'entrants?
  - Assurances ?
  - Particulier ?
  - Gestionnaire-distributeur ?
  - Garage ?
  - Autres ?

- Les approvisionnements sont-ils réguliers? Si non, quels sont les facteurs responsables de cette irrégularité ?
  - Avez-vous de contrats avec vos fournisseurs ?

- Possédez-vous des critères de choix, des exigences particulières pour les fournisseurs?

- Refusez-vous de traiter certains VHU, si oui pourquoi ?

- Quel est le prix d'achat des VHU?
    - En fonction de quels paramètres varie-t-il (origine, qualité,)? Quelle est cette variation (relation)?

Tableau de synthèse

Entrants	Origine	Nombre en 2004	Fournisseur	Prix d'achat (€/T)	Qualité
					conditions d'acceptation

2- Flux sortants

- Quelles pièces ont été démontées pour la réutilisation, le recyclage, la dépollution en 2004?
    - Quel est le nombre respectif de chacune d'entre elles ? Pouvez-vous l'augmenter ?

- Démontez-vous les pare-chocs ? Si oui pour quelle raison les démontez-vous : pour le recyclage ou par nécessité dans le but de démonter une autre pièce pour la réutilisation ? Quel a été le taux de pare-chocs démontés en 2004 par rapport au nombre potentiel en entrée?

- Réalisez-vous un suivi des pièces démontées pour valorisation (fiche technique de suivi)?

- Quels sont vos principaux clients ?
    - Quels sont ceux pour les pare-chocs et quelle est la part de chacun d'entre eux?
    - Possédez-vous des partenariats à long terme avec vos clients?

- Quelles sont les exigences des clients, quels sont les critères de choix?

- Quel est le prix de vente des pièces pour la valorisation?
    - Quel est celui des pare-chocs ?

- Comment le prix est-il fixé ?
    - De quels paramètres dépend le prix ? (nombre de pièces, client…)
    - Quelles sont les variations ?

Tableau de synthèse

Sortants	Nature	Nombre en 2004	Coût de traitement (€/T)	Prix de vente (€/T)	Qualité	client

Procédés de valorisation

1- Caractéristiques

- Quelle est votre capacité de traitement actuelle et maximale?
    - Quelles sont-elles pour les pare-chocs?

- Quelle est votre capacité de stockage ?
    - Sous quelle forme est réalisé le stockage en entrée et en sortie ?
    - Quel est le temps moyen de stockage ?

- Quelles sont les principales étapes de traitement des VHU ?
    - Quelles sont les conditions de traitement à chaque étape : caractéristiques des entrants, sortants, déchets, coût, ressources nécessaires, temps d'occupation… ?

- Quel est le temps moyen pour traiter un VHU avant vente de la carcasse à un broyeur ?

- Quel est le temps de démontage d'un pare-choc ? En fonction de quels paramètres varie ce temps ?

- Quel est le coût de démontage d'un pare-choc en prenant en compte toutes les étapes ?
    - De quels paramètres dépend-t-il ?
    - Quelle est son évolution en fonction du nombre démonté ?
    - Quel est son impact sur le prix de vente ?

- Avez-vous bénéficiez ou bénéficiez-vous de subventions pour l'installation de votre activité ?

2- Perspectives d'évolution

- Quel est le nombre de VHU prévu pour 2005 et 2006 ?

- Quels sont vos projets d'évolution pour votre activité ?
    - Démontage de nouvelles pièces pour le recyclage ?
    - Augmentation de la capacité de traitement ?
    - Certification…

- Devez-vous démontez dans certains cas les Face-Avant-Techniques pour récupérer d'autres pièces ? Si oui, comment sont-elles valorisées ? Si une filière de recyclage pour ces pièces se développait, seriez-vous intéressé pour les démonter ? Quelles sont pour vous les conditions techniques nécessaires à leur démontage ?

- Quelles sont vos attentes vis-à-vis de vos clients, fournisseurs?

- Quelle est votre position par rapport à la filière VHU ?

- Que pensez-vous de la filière VHU actuelle et de ses possibilités d'évolution?

- Y a-t-il un ou plusieurs points que nous n'avons pas évoqués ici et qui vous semble important par son (leur) influence(s) sur la stabilité au niveau du coût, volume, qualité des flux issus de la filière ?

Pour le recycleur

Informations générales sur l'entreprise

1- Structure

- Quelle est la date de création de votre entreprise?

- Possède-t-elle des filiales, si oui quelles entreprises ?

- Est-ce une filiale ? si oui de quelle entreprise ?

- Quelle est sa taille ?
  - Quel a été le tonnage traité en 2004? et quelle est la capacité de traitement maximale?
  - Quel est le nombre de personnes employées et leurs fonctions ?

- Quelles sont ses activités principales: recyclage, broyage, tri… ? et les activités annexes ?

- Quelle est votre fonctionnement au niveau du temps de travail (2*8,3*8…) ?

- Quel est le niveau de formation du personnel (par exemple, compétences spécifiques sur les matières plastiques)? Quelle est la répartition du personnel en fonction de la formation ? Quelle est la proportion du personnel de reclassement social ?

- Votre activité fait-elle l'objet d'un savoir-faire breveté ?

- Quels sont vos principaux fournisseurs ?
  - Acteurs de la filière VHU : quelles entreprises et leur proportion ?
  - Autres secteurs : lesquels et proportion ?

- Quels sont vos principaux clients ?
  - L'industrie automobile (%) : quelles entreprises ?
  - L'industrie électrique et électronique (%) : quelles entreprises ?
  - Autres : quels secteurs et proportion ?

- Avez-vous des contrats de collaboration avec les acteurs de la filière de valorisation comme par exemple celle des VHU ou du PP ?
  - Avez-vous des contrats sur les approvisionnements ? Etes- vous assuré d'avoir un volume minimum chaque mois ?

- Etes-vous liés par contrat avec vos clients ? Etes-vous tenus de leur fournir un volume donné sur une période donnée comme par exemple avec l'industrie automobile ?

- Quel est le nombre d'installations en France, en Europe et dans le monde et leurs activités ?

- Votre entreprise est-elle une installation classée ?

- Est-elle certifiée Iso 9001, 14001 ou est-elle en cours de certification ?

2- Données économiques

- Quel est le chiffre d'affaires de votre entreprise en 2004 et quelle est la part liée aux activités de valorisation ?

- Est- ce que votre entreprise dégage des bénéfices par les activités de valorisation ?

- Quelle est votre position sur le marché du recyclage, broyage… ?
  - Position de monopole ?
  - Quels sont vos principaux concurrents ?

- Comment définiriez-vous votre point d'équilibre financier ?
  - En fonction du volume traité ?
  - En fonction du coût de la matière vierge ?
  - Autres paramètres ?

Produits/ Matières traités

1- Flux entrants

- Quels produits ou quelles matières ont été récupérés en 2004 ?
  - Quel est le tonnage entrant de chacun d'entre eux ou leur proportion par rapport au tonnage global?
  - Quel est le tonnage de PP? Pouvez-vous l'augmenter ? Quelles seraient les conséquences sur sa qualité ?

- Quelles sont la provenance et la nature des produits/matières traités ?
  - Quel secteur industriel ? automobile, équipements électriques et électroniques….
  - Quelle nature ? Rebuts de production, produits fin de vie ou pièces fin de vie
  - Quelle est leur proportion ?
  - Quelle est la provenance du PP ?

- Récupérez-vous actuellement du PP-FV ? Si oui en quelle quantité et de quelle provenance ?

- Les approvisionnements sont-ils réguliers? Si non, quels sont les facteurs responsables de cette irrégularité ?
    - Avez-vous de contrats avec vos fournisseurs ?

- Quels sont vos principaux fournisseurs de PP ? Possédez-vous des critères de choix?

- Avez-vous des exigences particulières sur les entrants, notamment sur leur qualité ?
    - Quelles sont-elles dans le cas du PP ?

- Quel est le taux d'insatisfaction des entrants? Quelle proportion de lots refusez-vous ? Exercez-vous des actions correctives en cas de non-conformité des lots ? Effectuez-vous un suivi de la qualité des lots ?

- Quel est le prix d'achat des matières/produits que vous traitez ?
    - En fonction de quels paramètres varie-t-il (origine, qualité, cours des matières)? Quelle est cette variation (relation)?
    - Quels sont-ils dans le cas du PP ?

Tableau de synthèse

Entrants	**Origine**	**Tonnage en 2004**	**Fournisseur**	**Prix d'achat (€/T)**	**Qualité**
Produit Matière	Secteur industriel Fin de vie/rebuts de production				conditions d'acceptation

2- Flux sortants

- Quelles matières ont été produites en 2004 ?
    - Quel est le tonnage respectif de chacune d'entre elles, notamment celui du PP ou leur proportion par rapport au tonnage global ?
    - Sous quelle forme se présentent les matières obtenues (broyats, granulés) ?

- Quel est le taux de rebuts par rapport au tonnage entrant ?
    - Quelle est sa valeur pour le PP ?

- Quels sont les différents lots commercialisés et leurs propriétés respectives? (broyeur) ?

- Pour chaque référence ou lot commercialisé, réalisez-vous une fiche technique et un PV de contrôle (adéquation avec auto) ?

- Pour une même référence commerciale, combien existe-il de formulation ? (question spécifique recycleur)

- Combien de références commerciales proposez vous pour le PP et quelles sont leurs propriétés, leur qualité, notamment par rapport à la matière vierge?

- Quels sont vos principaux clients ?
    - Quels sont les débouchés pour le PP et quelle est la part de chacun d'entre eux?
    - Possédez-vous des partenariats à long terme avec vos clients?

- Quelles sont les exigences des clients (au niveau qualité, structure de l'entreprise), quels sont les critères de choix?

- Quel est le prix de vente des matières recyclées ?
    - Quel est celui du PP ?

- Comment le prix est-il fixé ?
    - De quels paramètres dépend le prix ? (volume traité, qualité, cours de la matière vierge, client…)
    - Quelles sont les variations ?

Tableau de synthèse

Sortants	**Nature**	**Tonnage en 2004**	**Coût de traitement (€/T)**	**Prix de vente (€/T)**	**Qualité**	**client**
Matière	Forme					

Procédés de valorisation

1- Caractéristiques

- Quelle est votre capacité de production installée et maximale?
    - Quelles sont-elles pour le traitement du PP ?

- Quelle est votre capacité de stockage ?
    - Sous quelle forme est réalisé le stockage en entrée et en sortie ?
    - Quel est le temps moyen de stockage ?

- Combien de lignes de traitement possédez-vous ?
    - Quel est le nombre dédié au traitement du PP ?
    - Quel est le rendement de ces lignes ?
    - Quel est le temps d'occupation moyen ?

- Quelles sont les principales étapes de traitement du PP ?
    - Quelles sont les conditions de traitement à chaque étape : caractéristiques des entrants (mélange différentes sources), sortants, déchets, coût, ressources nécessaires, caractéristiques des machines…

- Quel est le coût de traitement du PP ?
    - De quels paramètres dépend-t-il ?
    - Quelle est son évolution en fonction du tonnage traité ?
    - Quel est son impact sur le prix des lots commercialisés ?

- Quelle est l'année d'investissement des différentes lignes ?

- Avez-vous bénéficiez ou bénéficiez-vous de subventions pour l'installation des différentes lignes de traitement?

2- Perspectives d'évolution

- Quel est le tonnage prévu pour 2005 et 2006 ? Quel est celui pour le PP?

- Quels sont vos projets d'évolution pour votre activité ?
    - Investissement dans une nouvelle ligne de traitement ?
    - Recyclage d'une nouvelle matière ?
    - Augmentation des capacités de traitement ?
    - Certification…

- En supposant que le gisement de PP-FV disponible est suffisant, seriez-vous intéressez par le traitement de PP-FV issu de rebuts de production ou de produits fin de vie ? Quelles sont pour vous les conditions techniques nécessaires à sa valorisation ?

- Quelles sont vos attentes vis-à-vis de vos clients, fournisseurs?
- Quelle est votre position par rapport à la filière VHU ?
    - Que pensez-vous de la filière VHU actuelle et de ses possibilités d'évolution?
- Quels sont ou quels seraient pour vous les avantages et inconvénients de travailler en collaboration avec l'industrie automobile ?
    - Innovation sur nouvelles matières ?
    - Information sur qualité des pièces, voies de traitement ?
    - Comment répondre à leur demande ?
- Y a-t-il un ou plusieurs points que nous n'avons pas évoqués ici et qui vous semble important par son (leur) influence(s) sur la stabilité au niveau du coût, volume, qualité des flux issus de la filière ?

Les questionnaires de recherche d'informations

Les questionnaires se présentent sous forme de tableaux de données à remplir, modèle de base pour capitaliser les données sous Excel. Ils concernent les flux entrants et sortants, les procédés et les flux économiques. Dans le cadre du démolisseur, l'activité étant manuelle, il n'y a pas de tableau procédés. La présentation de ces tableaux donne un aperçu du grand nombre de paramètres prix en compte et de la complexité des modèles créés. Les valeurs obtenues ne sont pas présentées à la demande des différents partenaires.
Les différentes caractéristiques sont renseignées pour un exercice donnée (ex :2006)

I- Questionnaire pour le démolisseur

I-1. Les flux physiques

Nature de l'entrant	Caractéristiques	Valeur
VFV déclinés en VA, VHU, VHU gestionnaire	Prix d'achat par véhicule (€)	
	Prix d'achat moyen (€/VFV)	
	Poids par véhicule (T)	
	Poids moyen (T)	
	Age	
	Composition (% matériaux)	
	Stock (nombre de VFV moyen en stock)	
	Nature des arrivées (par camion de x VFV, fréquence)	
	Nombre moyen de VFV (/an, % des entrants)	
	Coût de transport (€)	
	Coût de transport moyen (€/VFV)	
	Temps de démontage par véhicule (h)	
	Temps moyen de démontage (h/VFV)	
Carcasse	Poids carcasse (T)	
	Poids moyen carcasse (T/carcasse)	
	Prix de vente de la carcasse (€/T, détail par mois si variation)	
	Prix de vente moyen de la carcasse (€/T)	
Pièces d'occasion	Poids total des pièces démontées pour les pièces d'occasion par véhicule (T)	
	Nature des pièces démontées pour les pièces d'occasion, poids et prix de vente respectifs par véhicule	
	Poids moyen des pièces démontées pour les pièces d'occasion (T/VFV)	
	Prix de vente des pièces d'occasion par véhicule (€)	
	Prix de vente total des pièces d'occasion (€)	
	Prix de vente moyen des pièces d'occasion (€/VFV)	
	Coût de transport	
	Temps de démontage (h)	
	Temps moyen de démontage (h/VFV)	
Batteries	Poids batteries par véhicule (T)	
	Poids moyen des batteries (T/VFV)	

	Prix de vente des batteries par véhicule (€/T)	
	Prix de vente moyen des batteries (€/T/VFV)	
	Coût de transport (€/T ou €/T/km)	
	Temps de démontage par véhicule (h)	
	Temps moyen de démontage (h/VFV)	
Fluides et autres éléments de dépollution	Poids fluides par véhicule (T ou L)	
	Poids fluides moyen (T/VFV ou L/VFV)	
	Prix de vente des fluides par véhicule (€/T)	
	Prix moyen des fluides (€/T/VFV)	
	Coût de transport par vente (€/T ou €/T/km)	
	Temps de démontage par véhicule (h)	
	Temps moyen de démontage (h/VFV)	
Pièces pour le recyclage	Poids total des pièces démontées pour le recyclage par véhicule	
	Nature pièces démontées pour le recyclage, poids et prix de vente respectifs par véhicule	
	Poids moyen des pièces démontées pour le recyclage (T/VFV)	
	Prix de vente total des pièces pour le recyclage par véhicule	
	Prix de vente total des pièces pour le recyclage (€)	
	Prix de vente moyen des pièces pour le recyclage (€/VFV)	
	Coût de transport par vente (€/T ou €/T/km)	
	Temps de démontage par véhicule (h)	
	Temps moyen de démontage (h/VFV)	
Pare-choc	Poids pare-choc par véhicule (T)	
	Poids moyen des pare-chocs (T/VFV)	
	Prix de vente pare-choc par véhicule (€)	
	Prix de vente moyen pare-choc (€/VFV)	
	Coût de transport par vente (€/T ou €/T/km)	
	Temps de démontage par véhicule (h)	
	Temps moyen de démontage (h/VFV)	
Rebuts des activités de démolition	Nature des rebuts	
	Poids par véhicule (T)	
	Poids moyen (T/VFV)	
	Prix d'élimination par véhicule (€/T)	
	Prix moyen d'élimination par véhicule (€/T/VFV)	
	Coût de transport par vente (€/T ou €/T/km)	

I-2. La chaîne économique

Chiffres d'affaires pour les différentes activités	
Désignation	Valeur
Vente de pièces d'occasion (€)	
Vente pièces pour le recyclage (€)	
Vente carcasse (€)	
Vente véhicules d'occasion (€)	

Vente véhicules assurances (€)	
Charge salariale	
Nombre d'employés total	
Nombre d'heures de travail (h)	
Nombre d'ouvriers	
Nombre de cadres	
Nombres autres catégories	
Coût salarial ouvriers (€/h)	
Coût salarial cadres (€/h)	
Coût salarial autres (€/h)	
Nombre d'employés dédiés à la démolition et à la dépollution, par catégorie	
Nombre d'employés dédiés à la vente, par catégorie	
Nombre d'heures de travail consacrées à la démolition (h)	
Nombre d'heures de travail consacrées à la dépollution (h)	
Nombre d'heures de travail consacrées à la vente (h)	
Frais généraux	
Frais généraux globaux (€)	
Location des bâtiments (€)	
Surface des bâtiments (m²)	
Eau (€)	
Electricité (€)	
Autres consommations (€)	
Autres (assurance, téléphone, entretien...) (€)	
Part des frais généraux associée au traitement des VHU et VA pour le démontage (%)	
Amortissements	
Investissements totaux (€)	
Investissements liés à VHU et VA (€)	
Investissements machines €)	
Amortissements totaux (€)	
Durée d'amortissement	
Autres coûts	
Coût traitement administratif par VFV (€/VFV)	
Coût location benne de stockage pièce (dimension) (€)	
Coût déchiquetage pare-choc (€/T	
Coût déchiqueteur (€)	

II- Questionnaire pour le recycleur

II-1. Les flux physiques

Flux entrants		
Nature de l'entrant	**Caractéristiques**	**Valeur**
Pour chaque type d'entrants (PPdéchiqueté, PPbroyé, PEbroyé...)	Prix d'achat (€/T)	
	Prix d'achat moyen (€/T)	
	Tonnage par lot (T)	
	Tonnage moyen (T)	
	Composition (qualité, % charge)	

	Stock (Tonnage moyen en stock, temps moyen)	
	Nature des arrivées (par camion de x T, fréquence)	
	Forme des lots (big bag, benne)	
	Tonnage moyen de l'entrant (/an, % des entrants)	
	Coût de transport (€/T ou €/T/km)	
	Coût de transport moyen (€/T)	
	Source (type: pare-choc, DEEE.. et %)	
	Prix d'achat selon source (€/T)	

Flux sortants		
Nature du sortant	**Caractéristiques**	**Valeur**
Pour chaque référence de PP recyclé en fonction des sources utilisées pour sa production	Tonnage par référence produite (T)	
	Composition par référence (%issu de déchiqueté et issus de broyé/lavé)	
	Formulation par référence (% total additifs, %PP)	
	Qualité par référence (propriétés, %charge)	
	Prix de vente par référence (€/T)	
	Prix de vente total références (€)	
	Prix de vente moyen (€/T)	
	Destination de chaque référence	
	Prix de vente par destination (€/T)	
	Stock (Tonnage moyen en stock, temps moyen)	
	Coût de transport (€/T ou €/T/km)	
Rebuts	Tonnage des rebuts issus de référence PP (T)	
	Nature des rebuts	
	Prix de vente/d'élimination des rebuts (€/T)	
	Prix de vente total des rebuts (€)	
	Stock (Tonnage moyen en stock, temps moyen)	
	Coût de transport (€/T ou €/T/km)	
	Destination	

II-2. La chaîne de production

Quel est le nombre de lignes de broyage et de tri et leur répartition en fonction des flux entrants (ligne dédiée à chaque matière)?

Nature des entrants	**Process**	**Caractéristiques**	**Valeur**
Pour chaque type d'entrants différents (le nombre peut diverger en fonction	Caractéristiques à décliner pour les étapes suivantes : Broyage	Rendement machine (T/h)	
		Rendement matière (temps pour traiter 1 Tonne T/h)	
		Tonnage traité (T)	
		Maintenance (h et fréquence)	

de la nature du flux)	Lavage Séchage Extrusion Homogénéisation avant et après extrusion	Type de maintenance	
		Taux de panne (h, fréquence)	
		Type de panne	
		Efficacité (taux de rebuts %)	
		Puissance machine (kw/h)	
		Energie, puissance consommée pour une tonne traitée (kw)	
		Prix machine (€), durée amortissement	
		Nombres de salariés associés à cette étape	
		Nombre d'heures d'utilisation (h,% d'arrêt)	
		Frais de réparation et maintenance (€)	
		Surface occupée par machine (m²)	
		Coût du procédé (€/T)	
		% PPlavé/broyé,% PPdéchiqueté	
		% additifs selon référence	
		Coût d'extrusion par référence (€/T)	
		Nombre de silos d'homogénéisation avant et après extrusion	
		Coût d'homogénéisation par référence (€/T)	
		Temps dédié au suivi qualité par référence (h)	

II-3. La chaîne économique

Chiffres d'affaires pour les différentes activités	
Désignation	Valeur
Vente des références PP (€)	
Vente des références PE (€)	
Vente Autres (€)	
Vente services (€)	
Charge salariale	
Nombre d'employés total	
Nombre d'heures de travail (h)	
Nombre d'ouvriers	
Nombre de cadres	
Nombres autres catégories	
Coût salarial ouvriers (€/h)	
Coût salarial cadres (€/h)	
Coût salarial autres (€/h)	
Nombre d'employés dédiés aux lignes de broyage	
Nombre d'employés dédiés aux lignes d'extrusion	
Nombre d'employés dédiés au suivi qualité (laboratoire)	
Nombre d'employés dédiés au recyclage du PP (broyage, extrusion, qualité)	

Nombre d'employés dédiés au recyclage du PE (broyage, extrusion, qualité)	
Nombre d'employés dédiés aux autres fonctions de l'entreprise	
Nombre d'heures de travail consacrées au broyage (h)	
Nombre d'heures de travail consacrées à l'extrusion (h)	
Nombre d'heures de travail consacrées au suivi qualité (h)	
Nombre d'heures de travail consacrées au recyclage du PP (h)	
Nombre d'heures de travail consacrées au recyclage du PE (h)	
Frais généraux	
Frais généraux globaux (€)	
Location des bâtiments (€)	
Surface des bâtiments (m²)	
Surface des zones de stockage (m²)	
Eau (€)	
Electricité (€)	
Autres consommations (€)	
Autres (assurance, téléphone, entretien...) (€)	
Part des frais généraux associée au recyclage du PP (%)	
Part des frais généraux associée au recyclage du PE (%)	
Amortissements	
Investissements totaux (€)	
Investissements liés au recyclage du PP (€)	
Investissements liés au recyclage du PE (€)	
Investissements zone de stockage	
Investissements machines €)	
Amortissements totaux (€)	
Dotations aux amortissements (€)	
Durée d'amortissement	

Annexe 20

Signification des tendances associées aux performances

Tendances	Valeur (€/unité de production)
<<<0	<- 100
<<0	-100 à -50
<0	-50 à 0
0	0
>0	0 à 50
>>0	50 à 100
>>>0	>100

Annexe 21

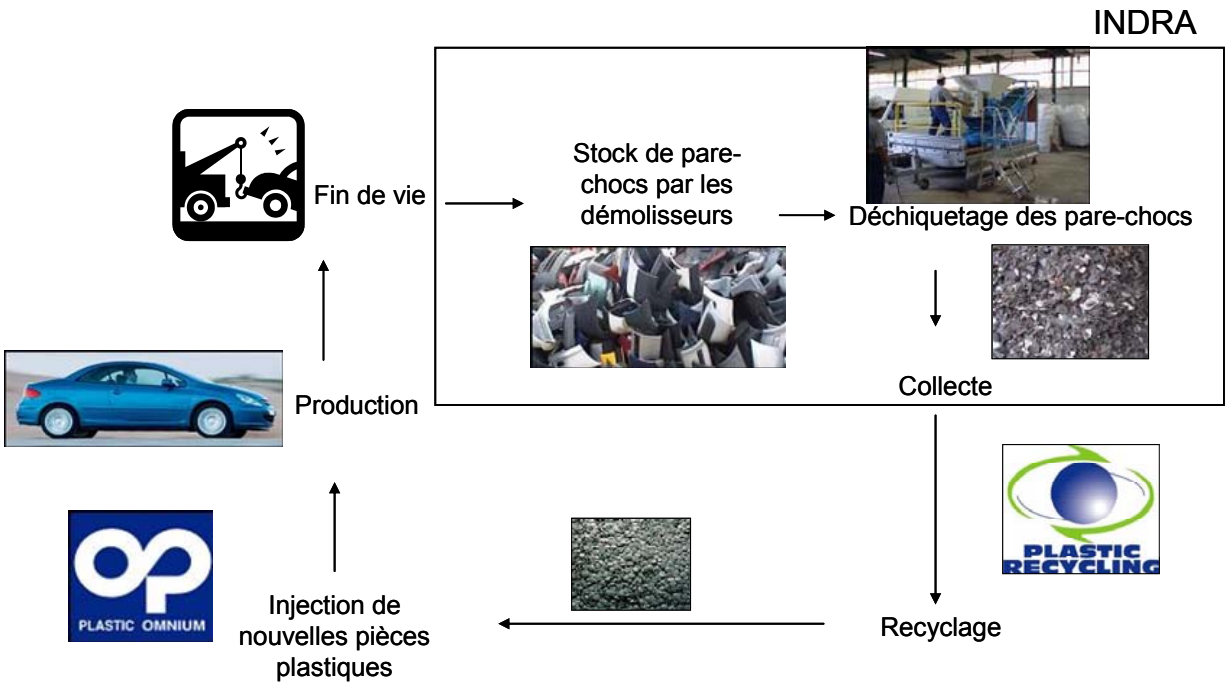
La table d'expériences utilisée pour l'amélioration des performances de FiRePPAutoPC

$Po_{U,VFV}$	$Tc_{D,Démontage,VFV}$	$Po_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	$Q_{D,VA}$	$CA_{D,Démontage,pièces\ d'occasion}$	$PV_{S,D,carcasse,B}$	$V_{E,R,PP}$	$Ql_{S,R,PPrec,hautequalité}$	$PV_{Filière,PPvierge}$	$PA_{E,R,pare\text{-}choc,D}$	$N_{démolisseurs}$	$M_{D,Démolition,VFV}$ (€/VFV)	$M_{R,Recyclage,PP,}$(€/T)
											[N°1]	[N°1]
1	uniform(1,6)	0,01	40	0	40	T1	5	5	40	1	-8,6	-313,1
1	uniform(1,6)	0,01	60	10	80	T8	40	10	100	20	-31,8	76,2
1	uniform(1,6)	0,01	60	10	80	T2	15	15	160	40	-31,4	51,8
1	uniform(1,6)	0,01	80	25	100	T4	30	20	200	100	-90	195,9
1	uniform(1,6)	0,01	40	0	80	T4	30	10	160	40	16,2	56,3
1	uniform(1,6)	0,01	60	10	40	T2	15	5	200	100	-54,8	-46
1	uniform(1,6)	0,01	60	10	100	T8	40	20	40	1	-20,6	182
1	uniform(1,6)	0,01	80	25	80	T1	5	15	100	20	-102,6	-154,6
1	uniform(1,8)	0,02	40	10	80	T2	30	20	40	20	-23	163,4
1	uniform(1,8)	0,02	60	0	100	T4	15	15	100	1	-19,6	55,5
1	uniform(1,8)	0,02	60	25	40	T1	40	10	160	100	-115,4	21
1	uniform(1,8)	0,02	80	10	80	T8	5	5	200	40	-90	-96,5
1	uniform(1,8)	0,02	40	10	100	T8	5	15	160	100	-9,6	-12,5
1	uniform(1,8)	0,02	60	0	80	T1	40	20	200	40	-28	124,8
1	uniform(1,8)	0,02	60	25	80	T4	15	5	40	20	-94,1	-41,6
1	uniform(1,8)	0,02	80	10	40	T2	30	10	100	1	**-114**	19,1
1,2	uniform(1,6)	0,02	40	25	40	T8	15	20	100	40	-58,1	170,3
1,2	uniform(1,6)	0,02	60	10	80	T1	30	15	40	100	-23,3	127,2
1,2	uniform(1,6)	0,02	60	10	80	T4	5	10	200	1	-23,3	-57
1,2	uniform(1,6)	0,02	80	0	100	T2	40	5	160	20	-8,5	5,3
1,2	uniform(1,6)	0,02	40	25	80	T2	40	15	200	1	-27,9	99,9
1,2	uniform(1,6)	0,02	60	10	40	T4	5	20	160	20	-50	79,2
1,2	uniform(1,6)	0,02	60	10	100	T1	30	5	100	40	-10,7	-71,9
1,2	uniform(1,6)	0,02	80	0	80	T8	15	10	40	100	-24,3	-21,6
1,2	uniform(1,8)	0,01	40	10	80	T4	40	5	100	100	-12,8	46,2

1,2	uniform(1,8)	0,01	60	25	100	T2	5	10	40	40	-68,2	-54,2
1,2	uniform(1,8)	0,01	60	0	40	T8	30	15	200	20	-49,8	105
1,2	uniform(1,8)	0,01	80	10	80	T1	15	20	160	1	-82,1	-93
1,2	uniform(1,8)	0,01	40	10	100	T1	15	10	200	20	2,4	-161
1,2	uniform(1,8)	0,01	60	25	80	T8	30	5	160	1	-81,6	-15
1,2	uniform(1,8)	0,01	60	0	80'	T2	5	20	100	100	-22	93,3
1,2	uniform(1,8)	0,01	80	10'	40	T4	40	15	40	40	-111	144

Annexe 22

Dimensionnement d'une FiRePPAutoPC dans la région Rhône-Alpes



Annexe 23

Extension de l'utilisation d'ODEFIRE : principaux résultats du projet ADEME

Extension du modèle : scénario tri du PP issus des résidus de broyage

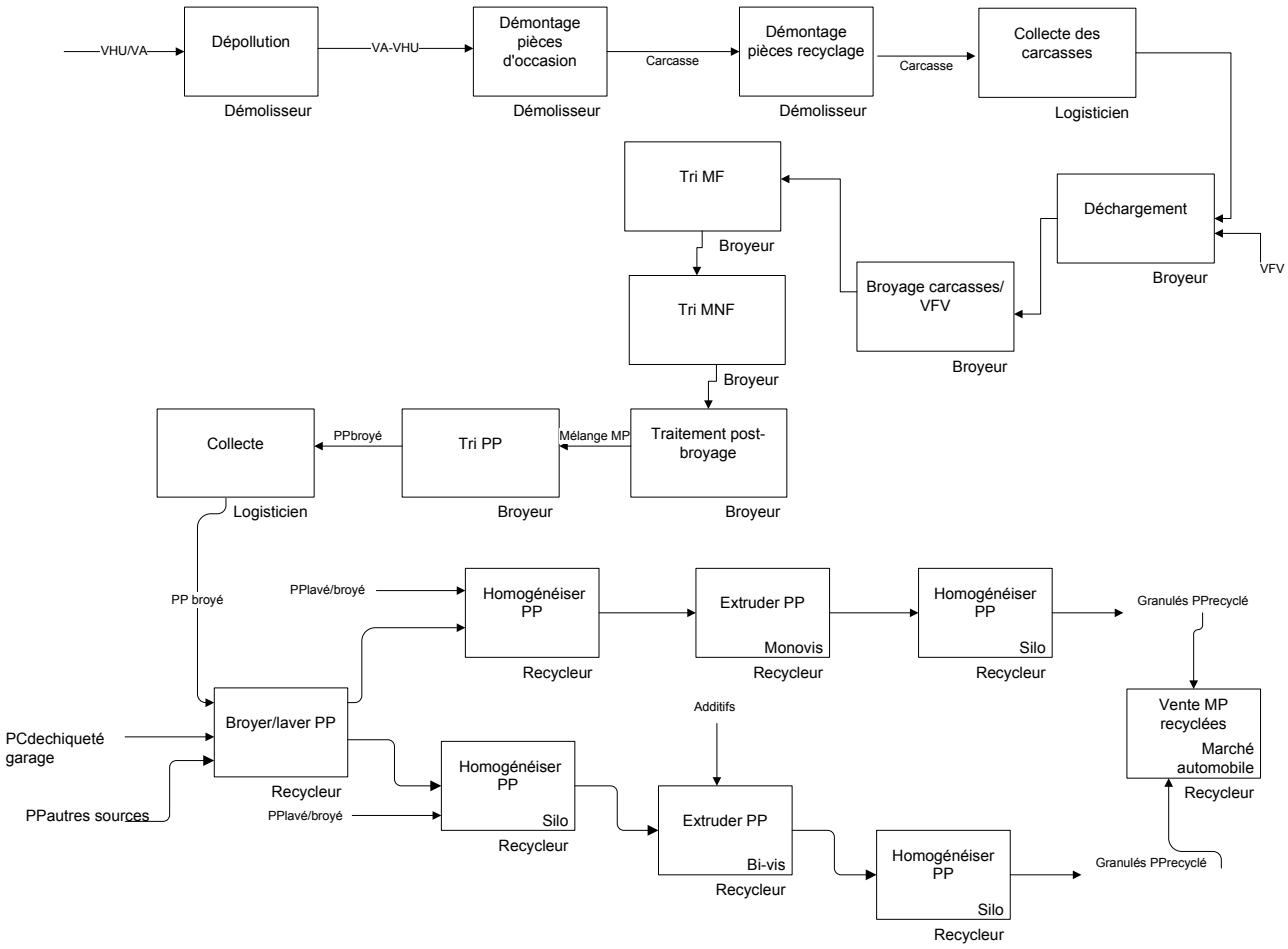
La filière modélisée est la filière de recyclage du PP issu de résidus de broyage automobile (RBA). Le tri des RB est la deuxième grande voie de récupération du PP pour le recyclage. Pour le moment, une seule unité industrielle a été déployée en France (Galloo Plastiques) représentant un volume de l'ordre de 15000T.

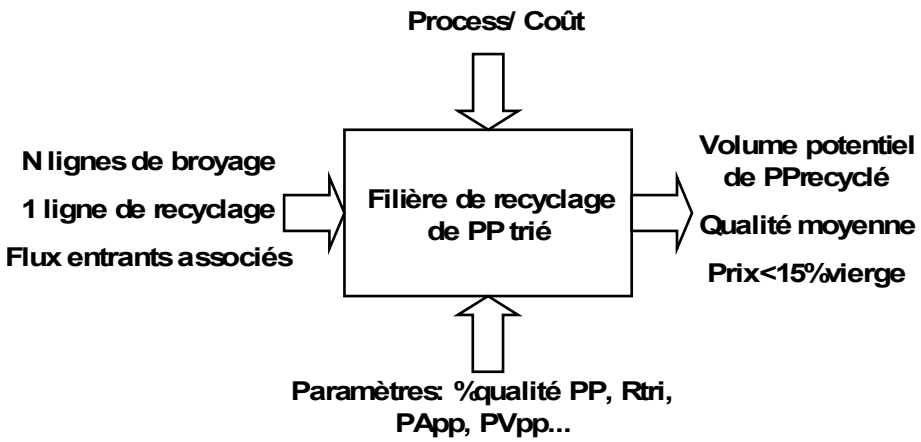
Nombre de VFV	Echelle	Volume PP collectables
1800000	national	100000
1200000	National collecté	72000
	Broyeurs	36000
	Région	7000T

De même que pour la filière de recyclage du PP par démontage, la filière est considérée dans un premier temps à l'échelle d'une région soit dans notre cadre à l'échelle d'une centrale de broyage traitant 115000T de RB. Elle comprend à la fois un ensemble de démolisseurs, représenté dans le modèle précédent, pourvoyeur de carcasses, un ensemble de lignes de broyage et un recycleur, de structure analogue au modèle précédent.

Les activités modélisées sont :

- Collecte des VFV
- Activités du démolisseur :
    - activités directement liées à la démolition : dépollution des véhicules, démontage et ventes des pièces d'occasion, démontage des pare chocs, vente des carcasses aux ferrailleurs;
    - activités annexes liées indirectement aux activités de valorisation: réparation et vente de véhicules d'occasion et véhicules assurances.
- Collecte des carcasses
- Activités du broyeur : déchargement, broyage des carcasses et produits, tri aéraulique, tri magnétique, tri des MNF, traitement post-broyage ou tri du PP (lavage/séchage, tri densimétrique, broyage…)
- Collecte et vente du PP broyé/lavé aux recycleurs
- Activités des recycleurs : broyage et lavage, homogénéisation de la matière, extrusion/granulation avec formulation de la résine.
- Vente de la matière recyclée aux équipementiers plasturgistes.





En ce qui concerne, l'étape de tri du PP, les caractéristiques d'un tri densimétrique ont été utilisées, étape existant à l'échelle industrielle.

Cette étape joue un rôle important sur le devenir du PP chez le recycleur. Ainsi en fonction de la qualité en sortie du tri, le PP ne sera pas orienté vers les mêmes formulations et donc orienté vers des marchés de valeur plus ou moins élevée.

Résultats

Pour le démolisseur :

Le tri des RB n'a pas d'impact direct sur l'activité du démolisseur. Les résultats obtenus après maximisation sont liés en grande partie à des paramètres inhérents à l'activité démolition.

Pour le broyeur

Développer une activité de tri de MP demande au départ de lourds investissements matériels pour le broyeur, notamment pour obtenir une technique de tri efficace tant en termes de rendement qu'en termes de qualité de matière. Mais l'assurance d'un débouché vers les recycleurs permet d'assurer un revenu issu de ces MP. Cette activité n'a pas d'influence directe sur la marge du broyeur compte-tenu du fait que son activité est principalement orientée vers les MF et MNF. Cette activité est importante tant pour fournir au recycleur des volumes conséquents et lui permettre de développer son activité que pour l'atteinte des objectifs de la directive. A terme, compte-tenu de l'évolution du prix de la matière vierge et des réserves, cette ressource deviendra économiquement très intéressante pour le broyeur. D'autre part cette activité conduit à diminuer la quantité de RB mise en décharge.

Pour le recycleur

Le volume de PP récupéré par le biais du tri fait partie des éléments primordiaux pour le développement des recycleurs. Le volume captif est un paramètre clé pour atteindre une marge positive. Un des moyens d'atteindre ces quantités est de développer le tri du PP issu des RB, dont l'effet positif est démontré par la modélisation de ce scénario. Compte-tenu de l'efficacité des techniques de tri actuelles, les volumes produits ont une qualité qui ne permet pas pour le moment d'atteindre des niveaux équivalents à ceux des pièces démontées et donc d'utiliser cette matière pour des références type pièces de structure. C'est pourquoi le taux de référence de qualité faible est élevé. La quantité de matière vendue doit être élevée pour conduire a un effet positif sur le coût de revient.

Les interactions

Ces interactions entre acteur sont représentées par :

- Le prix de vente des carcasses, lien entre le broyeur et le démolisseur
- Le prix et le volume de PP issu du tri

Nom	Valeurs initiales	Valeurs maximisées
$M_{D,Démolition,VFV}$ (€/VFV)	<<0	0
$M_{D,Démolisseur,VFV}$ (€/VFV)	>0	>>0
$M_{B,TRIpp,}$ (€/T)		0
$M_{B,Broyage}$ (€/T)	>0	>>0
$M_{R,Recyclage,PP}$ (€/T)	<<0	>0
$M_{R,Recyclage,MP}$ (€/T)	<<0	>0
$TauxRecyclage_{pp}$	0	+1,5%
$Re_{R,Recyclage,PP}$	0.9T/h	1,5T/h
$QI_{S,R,PP,\ Autoj}$	70% de faible qualité	50% de faible qualité
$PV_{S,R,PPj}$	X	+20%

Performances du scénario tri du PP issu de VFV avant et après optimisation

Paramètres du modèle	Variation	Effet	Valeurs initiales	Valeurs maximisées
Broyeur				
$QI_{E,B,VFV}$	Augmentation de la proportion de VFV en entrée du broyeur	☺	10%	20%
$Po_{B,carcasse}$	Diminution liée à l'augmentation des pièces démontées par le démolisseur	☹	0,9	0,8
$Re_{B,triPP}$	Augmentation de l'efficacité des techniques de tri	☺	0,8	0,9
$PV_{E,B,carcasse}$	Augmentation du prix de vente des carcasses	☹	60	120
$PV_{S,B,PP,R}$	Augmentation du prix de vente du PP trié	☺		PV=600
Recycleur				
$PV_{Filière,PPvierge}$	Augmentation du prix de la matière vierge	☺	0	20%
$N_{lignes\ de\ broyage}$	Nombre de lignes de broyage fournissant le recycleur	☺	0	1
$PA_{E,R,PP,B}$	Augmentation du prix d'achat du PP trié	☹		PA=600
$V_{E,R,PPtriéD}$	Augmentation du volume de PP trié	☺	0	+100%
$QI_{S,R,PPrec,hautequalité}$	Augmentation de la part de références de qualité moyenne	☺	0	+20%

Valeurs des paramètres permettant de maximiser les performances de la filière de recyclage du PP issu du tri des RBA

Partie prenante	Actions	Conséquences
Cdc Broyeur		
Broyeur Industrie Automobile	Nouvelle activité de recyclage	↗$N_{lignesdebroyage}$ ↗$CA_{B,Recyclage}$ ↗$PV_{FS,B,R}$
Broyeur Société Civile	Amélioration des techniques de tri pour une diminution de la mise en décharge	↗$Re_{B,triPP}$ ↗$CA_{B,Recyclage}$ ↗$V_{S,B,PP,R}$
Broyeur Acteurs de la filière	Augmentation du prix de vente des carcasses	↘ $CA_{B,Recyclage}$ ↗$PV_{E,B,carcasse}$
Cdc Recycleur		
Industrie automobile Société Civile	Augmentation du prix du marché lié à l'augmentation du prix de la matière vierge	↗$PV_{Filière,PPvierge}$ ↗$PV_{S,R,PPrec}$
Industrie Automobile Recycleur Broyeur	Traitement de nouvelles matières	↗$QI_{S,R,PPrec,qualitémoyenne}$ ↗$V_{E,R,Pptri,B}$ ↗$CA_{R,Recyclage,PP}$
Recycleur Acteurs de la filière	Augmentation du nombre de sources	↗$V_{E,R,PPtri,B}$ ↗$CA_{R,Recyclage,PP}$ ↗$N_{lignesdebroyage}$
Recycleur, Broyeur, Société civile	Matière à un prix d'achat faible	↘$PV_{Filière,PP}$

Préconisations pour le développement des différents acteurs du scénario

Les résultats de la modélisation font apparaître la possibilité de développer le tri du PP issu des RBA à une échelle régionale tout en accédant à des conditions technico-économiques satisfaisantes pour chacun des acteurs. Deux conditions primordiales sont à prendre en compte pour atteindre ce dimensionnement :

- l'approvisionnement en PP du recycleur
- l'augmentation du prix de la matière vierge
- l'efficacité des techniques de tri donnant accès à un volume et une qualité donnés.

Obtenir ces résultats est envisageable moyennant un certain nombre d'actions de la part des parties prenantes :

- La réorganisation de la filière : augmenter la coopération entre acteurs pour déployer le tri du PP issu de RB et faire évoluer le prix de vente des carcasses.
- Le développement de technologies de tri pour accéder à de nouveaux volumes et une qualité plus élevée et pour diminuer les quantités de RB mis en décharge.

PROPOSITION D'OUTILS ET DEMARCHES POUR L'INTEGRATION DES FILIERES DE RECYCLAGE DES MATIERES PLASTIQUES DANS LA SUPPLY CHAIN AUTOMOBILE

RESUME La prise en compte de la gestion des produits en fin de vie est devenue incontournable dans la conception de produits complexes. Ainsi, pour atteindre les objectifs de la réglementation sur l'élimination des véhicules hors d'usage et compte-tenu de l'augmentation croissante de la part de matières plastiques dans les véhicules, la Supply Chain automobile doit désormais justifier de scénarios de valorisation fiables pour leurs produits et par conséquent pour ces matières. L'industrie des matières plastiques, matière techniquement incontournable dans la société de consommation actuelle, est soumise à des pressions sociétales, environnementales et réglementaires fortes remettant en cause leur devenir dans la société. Pour répondre aux pressions environnementales, une des voies de recherche proposée est le développement de filières de recyclage permettant d'économiser des ressources en faisant du déchet une matière première. Ces filières sont des systèmes émergents dont les critères d'évolution doivent être définis. L'industrie automobile a développé de nombreux outils de conception pour le recyclage. Mais ces outils ne prennent pas en compte le devenir des matières plastiques suite au recyclage soit les caractéristiques propres aux filières, les producteurs et équipementiers ne se voyant pas comme utilisateurs de celles-ci. La problématique de l'intégration des filières de recyclage dans la Supply Chain automobile trouve son origine dans le manque de connaissances sur les filières des parties impliquées dans leur développement. Nous proposons donc, dans ce travail de recherche un outil de modélisation des filières- ODEFIRE- constituant par l'intermédiaire des mesures des performances des filières, une aide à la décision à destination des parties prenantes, dont la Supply Chain automobile, pour mettre en place les actions nécessaires pour stabiliser les filières. Nous proposons également une démarche d'acquisition des connaissances sur les filières- DAIMRE- à destination des équipementiers et s'appuyant sur ODEFIRE, permettant de favoriser l'utilisation de matières plastiques recyclées dans des pièces à haute valeur ajoutée et par ce biais de pérenniser l'intégration des filières dans la Supply Chain Automobile.

Mots –clés : *filières de recyclage, capitalisation de connaissances, Supply Chain automobile, conception pour le recyclage, aide à la décision, mesure des performances, matières plastiques*

TOOLS AND METHODS PROPOSAL FOR PLASTICS RECYCLING NETWORKS INTEGRATION IN THE AUTOMOTIVE SUPPLY CHAIN

ABSTRACT : Product end-of-life management must be considered in product design. To reach the European End-of-Life Vehicle (ELV) directive objectives and in view of the growing plastics' use in vehicles, the automotive Supply Chain must now set up reliable recovery scenarios for its products and therefore for these materials. The plastics industry, material technically unavoidable in our society, is subject to societal pressures, environmental regulations. An answer to these pressures is the development of recycling industries to save resources by making the waste a raw material. These networks are emerging systems whose development criteria must be defined. The automotive industry implemented many tools of design for recycling. But these tools do not take into account recycled plastics, that is to say the recycling networks characteristics, producers and suppliers don't see them as potential recycled material users. The limits of recycling networks' integration in the automotive Supply Chain find their origin in lack of knowledge on recycling industries characteristics by stakeholders involved in their development. We thus propose in this research a recycling networks' modelling tool- ODEFIRE- corresponding through network capabilities measures to a decision aid for stakeholders, including the Supply Chain Automotive. This aid concerns the implementation of the right actions to develop recycling industries. We also propose an approach for creating knowledge on recycling networks-DAIMRE-for automotive suppliers. This method authorizes, through the use of ODEFIRE, to promote the use of recycled plastics in high value parts. The aim is to sustain recycling industries integration in the automotive Supply Chain.

Keywords : *Recycling networks, knowledge management, automotive Supply Chain, design for recycling, decision aid tool, capabilities measures, plastics*