



Integration of a new constraint in a carmaker: case of the recovery of the end of life vehicles

Pierre Tonnelier

► To cite this version:

Pierre Tonnelier. Integration of a new constraint in a carmaker: case of the recovery of the end of life vehicles. Humanities and Social Sciences. Arts et Métiers ParisTech, 2002. English. NNT : 2002ENAM0017 . pastel-00001942

HAL Id: pastel-00001942

<https://pastel.hal.science/pastel-00001942>

Submitted on 5 Oct 2006

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° d'ordre : 2002-17

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Centre de Paris

THESE

PRESENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

de

**L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
D'ARTS ET METIERS**

Spécialité : GENIE INDUSTRIEL

par

Pierre TONNELIER

**PROPOSITION D'UNE DEMARCHE D'INTEGRATION D'UNE NOUVELLE
CONTRAINTES EN CONCEPTION :
CAS DE LA VALORISATION DES VEHICULES EN FIN DE VIE CHEZ PSA
PEUGEOT CITROËN**

Soutenue le 16 octobre 2002, devant le Jury d'examen :

M. C. MIDLER, Professeur à l'école Polytechnique	Rapporteur
M. J.-M. HENRIOUD, Professeur à l'université de Franche-Comté	Rapporteur
M. G. LOZACH, Directeur Matériaux et Procédés, PSA PEUGEOT CITROËN ...	Examineur
M. R. DUCHAMP, Professeur à l'ENSAM de Paris	Directeur de thèse
M. D. MILLET, Ingénieur de Recherche à l'ENSAM de Paris	Co-directeur
M. M. LE COQ, Maître de conférences à l'ENSAM de Paris	Co-directeur
M. E. LECOINTRE, Ingénieur, ADEME	Invité

L'ENSAM est un Grand Etablissement composé de 8 centres :
AIX-EN-PROVENCE - ANGERS - BORDEAUX - CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE - CLUNY - LILLE - METZ - PARIS

Remerciements

Je souhaiterais tout d'abord exprimer toute ma gratitude à Mademoiselle Sophie RICHET, Responsable du service Recyclage de PSA Peugeot Citroën, pour l'intérêt qu'elle a su porter à ce sujet et pour ses encouragements et son soutien de tous les jours.

Je remercie Monsieur le Professeur Christophe MIDLER de l'école Polytechnique et Monsieur le Professeur Jean-Michel HENRIOUD de l'université de Franche-Comté pour avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs.

Je remercie également mon Directeur de thèse, Monsieur le Professeur Robert DUCHAMP, Directeur du laboratoire de Conception de Produits et Innovation, de m'avoir permis de mener ces travaux.

Je remercie sincèrement Monsieur Guy LOZACH, Directeur des Matériaux et Procédés de PSA Peugeot Citroën, de m'avoir accueilli dans son service pendant ces trois ans et d'avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Dominique MILLET, Ingénieur de recherche au laboratoire CPI et co-directeur de ma thèse, pour son soutien sans faille au cours de ces trois ans. Son enthousiasme, ses conseils avisés, ses encouragements et nos longues discussions m'ont permis de mener ces travaux à leur terme.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur Marc LE COQ, Responsable des études à l'ENSAM, pour ses conseils, sa rigueur et sa vision du sujet. Je lui dois en grande partie de m'être lancé dans l'aventure de la thèse, qu'il en soit remercié.

Je tiens également à remercier Monsieur Christophe PERRARD, Maître de conférence au Laboratoire d'Automatique de Besançon, pour notre coopération fructueuse au cours de ces années, pour son accueil et sa bonne humeur jamais démentis, pour son enthousiasme et nos échanges sur le sujet. Sans oublier bien sûr les étudiants avec qui nous avons été amenés à travailler (Sid, Olivier, Rodolphe et Samuel).

Un merci particulier à Christophe BREGAND et à Jean-François PONTHEUX de la Direction des systèmes d'information de PSA Peugeot Citroën pour l'intérêt qu'ils ont su porter à mes travaux et qui a été un moteur pour moi pendant les périodes difficiles.

Je voudrais bien sûr remercier l'ensemble des membres du service Recyclage, actuels et passés, pour l'ambiance générale qui vous redonne chaque jour l'envie d'aller travailler. Encore merci à Virginie, Céline, Philippe, Claude, Georges, Olivier et aux nombreux stagiaires qui sont venus grossir nos rangs. Et évidemment à Patrick et à Christophe sans qui cette thèse n'aurait jamais eu lieu. Merci également aux autres résidents de « La Veuve » et tout particulièrement à Emmanuelle, Julie, Vanina et Hervé.

Mes remerciements vont également au personnel du Laboratoire CPI, pour ces trois ans partagés avec eux. Merci notamment à Séverine, Bernard, Jean-François, José, Guillaume, Stéphanie, Nadine, Frédérique et Loïc. Mais également aux étudiants de l'ENSAM avec qui j'ai eu le plaisir de travailler, Yannick et Baudouin.

Enfin, un très grand merci à ma Marie, pour avoir été ma première correctrice et de m'avoir encouragé et supporté pendant ces trois ans. Et à mes amis, Sébastien, pour nos discussions interminables et toujours enrichissantes, et Cédric, Jérôme et Stéphane pour leur soutien et leur inébranlable confiance en ma réussite.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	9
1. OBJET DE LA RECHERCHE	13
1.1. L'environnement et l'automobile	13
1.1.1. Nécessité de la prise en compte de l'environnement	14
1.1.2. Les actions de l'industrie automobile par rapport à l'environnement	16
1.2. La valorisation des véhicules hors d'usage	20
1.2.1. La réglementation	20
1.2.1.1. Définition des différents modes de valorisation	20
1.2.1.2. L'Accord Cadre	21
1.2.1.3. La Directive Européenne relative aux véhicules hors d'usage	23
1.2.2. Description du schéma de traitement	25
1.2.3. Description des différents acteurs de la filière	27
1.2.3.1. Les démolisseurs	27
1.2.3.2. Les broyeurs	28
1.2.3.3. Les recycleurs	28
1.2.3.4. Les installations de valorisations énergétiques	30
1.3. Les actions réalisées chez PSA Peugeot Citroën	32
1.3.1. L'acquisition de connaissances	33
1.3.2. La prise en compte en conception	33
1.3.2.1. Les préconisations de conception	34
1.3.2.2. L'aptitude à la dépollution d'un véhicule	35
1.3.2.3. L'indice de valorisation du véhicule	35
1.3.3. Développement d'outils de Design for Recycling	36
1.3.3.1. La base de règles	37
1.3.3.2. L'outil d'évaluation quantitatif	38
1.3.4. Question posée par PSA	41
2. ANALYSE DU CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	43
2.1. Complexité de la valorisabilité	44
2.1.1. Diversité des modes du calcul de la valorisation	44
2.1.1.1. Les indicateurs de valorisation	44
2.1.1.2. L'évaluation économique de la valorisation	46
2.1.2. Evolution de la réglementation	50
2.1.3. Evolution des filières de valorisation	51
2.1.4. Evolution du produit automobile	53
2.1.5. Quelles évolutions possibles de la valorisabilité ?	54
2.1.6. Conclusion	55
2.2. Complexité du processus de conception	56
2.2.1. Structure organisationnelle	56

2.2.1.1.	Les plates-formes	56
2.2.1.2.	L'équipe projet	58
2.2.2.	Supports méthodologiques	60
2.2.2.1.	L'Ingénierie Système Automobile	60
2.2.2.2.	Le Processus de Conception Produit Process	63
2.2.2.3.	Le Schéma Opérationnel de Développement	64
2.2.3.	Les systèmes d'information	65
2.2.3.1.	Gestion des processus de l'entreprise	66
2.2.3.2.	Conception des véhicules : le projet INGENUM	66
2.2.3.3.	Autres supports de la conception	69
2.2.4.	Conclusion	70
2.3.	Panorama des démarches d'intégration existantes	70
2.3.1.	Aspect technique de l'intégration	71
2.3.2.	Aspect managérial de l'intégration	73
2.3.2.1.	Les approches Top-Down	74
2.3.2.2.	Les approches Bottom-Up	74
2.3.2.3.	Les approches intermédiaires	75
2.3.3.	Intégration d'autres domaines : exemple des métiers « fonctionnels »	75
2.3.3.1.	Service « Acoustique et Vibrations »	76
2.3.3.2.	Service « Masse »	77
2.3.4.	Conclusion	77
2.4.	Problématique	78
3.	HYPOTHESES ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL	81
3.1.	Hypothèses	81
3.1.1.	Expérimentation d'outils d'investigation	82
3.1.2.	Développement d'une stratégie d'intégration consciente	83
3.2.	Protocole expérimental	83
4.	EXPERIMENTATIONS	87
4.1.	Développement des outils d'investigation	87
4.1.1.	Outil d'investigation n°1 : outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule	88
4.1.1.1.	Principe et objectifs	88
4.1.1.2.	L'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule	89
4.1.1.3.	Méthode de répartition d'objectifs aux projets	94
4.1.1.4.	Mise à disposition de l'outil	103
4.1.1.5.	Gains de connaissances	108
4.1.2.	Outil d'investigation n°2 : outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'une fonction	110
4.1.2.1.	Principe et objectifs	110
4.1.2.2.	Évaluation et comparaison de l'aptitude à la valorisation de fonctions	113
4.1.2.3.	Mise à disposition de l'outil	125
4.1.2.4.	Gains de connaissances	126
4.1.3.	Outil d'investigation n°3 : outil de simulation d'un atelier de démontage	128

4.1.3.1.	Principe et objectifs	128
4.1.3.2.	Développement de l'outil de simulation	130
4.1.3.3.	Mise à disposition de l'outil	134
4.1.3.4.	Gains de connaissances	135
4.1.4.	Outil d'investigation n°4 : outil qualitatif d'évaluation de l'aptitude à la valorisation	137
4.1.4.1.	Principe et objectifs	137
4.1.4.2.	Développement et expérimentation de l'outil	138
4.1.4.3.	Mise à disposition de l'outil	146
4.1.4.4.	Gains de connaissances	147
4.1.5.	Synthèse	149
4.2.	Développement d'une stratégie d'intégration consciente	151
4.2.1.	Détermination de quatre scénarios d'évolution externe	151
4.2.2.	Définition de la structure d'un scénario d'évolution interne générique	153
4.2.3.	Proposition de quatre scénarios d'évolution interne	154
4.2.3.1.	Scénario d'évolution interne I	158
4.2.3.2.	Scénario d'évolution interne II	165
4.2.3.3.	Scénario d'évolution interne III	174
4.2.3.4.	Scénario d'évolution interne IV	183
4.2.4.	Choix d'une stratégie d'intégration consciente	193
4.2.5.	Conclusion	195
5.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	197
5.1.	Conclusions de l'étude	197
5.2.	Proposition d'une démarche d'intégration d'une nouvelle contrainte en conception	199
	BIBLIOGRAPHIE	205
	TABLE DES ILLUSTRATIONS	215

Introduction générale

Les travaux que nous allons présenter dans ce document s'inscrivent dans le champ de recherche de l'Environnement et du Génie industriel, discipline définie comme étant à la croisée des sciences fondamentales, des sciences pour l'ingénieur et des sciences sociales et humaines. Ils portent plus particulièrement sur une démarche d'intégration de l'aptitude à la valorisation des véhicules en fin de vie dans le processus de conception de l'entreprise, basée sur le développement de scénarios d'évolution externe, de scénarios d'évolution interne et de la mise en œuvre d'outils d'investigation.

La préservation de l'environnement est devenue l'un des enjeux majeur du XXI^e siècle. La prise de conscience des limites de notre planète et des impacts de l'activité des hommes sur celle-ci depuis la fin du siècle dernier a mis en exergue la nécessité de protéger notre cadre de vie.

L'évolution de l'humanité, qui se traduit par l'amélioration de notre qualité de vie, est liée aux évolutions technologiques et industrielles. Mais ces progrès ne sont pas sans conséquences sur l'environnement, que ce soit en termes d'utilisation de ressources qui ne sont pas illimitées, ou en termes de rejets, qui par leur nature ou leur quantité ne peuvent plus être assimilés par les cycles naturels assurant l'équilibre de notre planète.

Le développement de l'industrie s'est particulièrement accéléré au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, cette évolution s'accroissant avec l'extension du mode de vie occidental au reste de notre planète. Progressivement, face à cette situation, l'industrie et la société civile ont pris conscience des risques de cette croissance effrénée pour l'environnement. Pour réduire ces risques, des mesures ont été mises en place, que ce soit de manière volontaire ou réglementaire, pour faire évoluer les pratiques de conception, de fabrication, d'utilisation des produits et de gestion des déchets.

L'industrie automobile ne fait pas exception à la règle. Depuis une quinzaine d'années, des réglementations tendent à diminuer les pollutions directes et indirectes des véhicules, qu'il s'agisse des rejets atmosphériques dus aux moteurs à combustion, des nuisances sonores ou des déchets issus des usines de production. Parmi ces nouvelles contraintes, l'une d'elles est liée à la gestion de la fin de vie des véhicules et à la limitation des déchets qu'ils génèrent.

PSA Peugeot Citroën travaille depuis une dizaine d'années sur la problématique de la valorisation des véhicules en fin de vie, à la suite de la signature d'un accord volontaire avec l'ensemble des acteurs de cette filière. Ces travaux ont permis de structurer un nouveau métier : le Recyclage. En 2000, une Directive européenne a été adoptée, fixant de nouveaux objectifs de valorisation, aussi bien en termes d'homologation pour les nouveaux véhicules, qu'en termes de taux de valorisation pour les véhicules hors d'usage, et impliquant les constructeurs dans le retraitement de ces derniers. Face à ces nouvelles échéances, PSA Peugeot Citroën a souhaité développer la prise en compte de la notion de valorisation des véhicules en fin de vie dès la conception des véhicules.

Nous allons présenter dans une première partie le contexte et l'objet de notre étude. Nous rappellerons la nécessité de la prise en compte de la notion d'environnement dans l'industrie et préciserons les actions qui ont déjà été menées dans ce domaine par le secteur automobile. Nous décrirons ensuite les différents éléments structurant le contexte de la valorisation des véhicules hors d'usage en présentant la réglementation en vigueur sur le sujet et les différents acteurs intervenant dans le traitement des véhicules en fin de vie. Nous présenterons enfin les actions qui ont été menées par PSA Peugeot Citroën jusqu'à présent pour appréhender ce sujet, ce qui nous amènera à la question à laquelle nos travaux doivent répondre.

Dans la deuxième partie, nous analyserons plus finement le contexte de notre intervention. Nous définirons la notion de valorisation, qui peut être considérée comme étant le passage d'un produit en fin de vie dans un process de valorisation. Puis, nous exposerons la complexité de cette notion. Nous verrons que cette complexité est essentiellement due au décalage dans le temps entre la conception du produit et le moment où il va être valorisé. Or, les différentes composantes de cette notion, que sont la réglementation, les filières de valorisation et le produit automobile, sont amenées à évoluer dans le temps. Ainsi, nous esquisserons les évolutions possibles de l'aptitude à la valorisation des véhicules et les risques, aussi bien réglementaires qu'économiques, qui y sont associés. Dans un deuxième temps, nous étudierons le lieu de l'intégration, c'est-à-dire le processus de conception de PSA Peugeot Citroën. Nous verrons que ce processus, très complexe, est composé de différentes dimensions : organisationnelle, fonctionnelle et informationnelle, qui sont extrêmement interdépendantes. Nous aborderons ensuite différentes approches d'intégration existantes, aussi bien en termes d'instrumentation que d'un point de vue managérial. Nous concluons en posant notre problématique, à savoir : quels sont les moyens à mettre en œuvre pour intégrer

une contrainte floue, telle que la notion de valorisation, dans un univers complexe et hyper-contraint, tel que celui de la conception automobile ?

Dans la troisième partie, nous poserons deux hypothèses afin de pouvoir répondre à cette question. L'analyse du contexte nous conduira à postuler qu'une intégration pérenne résulte : d'une modification exhaustive des aspects méthodologiques, organisationnels et informationnels du processus de conception ; d'un processus participatif de l'ensemble de l'équipe de conception au sens large ; d'une flexibilité des vecteurs d'intégration mis en œuvre liée à l'évolution et à l'incertitude des aspects à la fois réglementaires et techniques. Pour pouvoir développer une telle démarche, nous choisirons d'accroître notre connaissance de l'aptitude à la valorisation des véhicules et des impacts de son intégration par le développement et la mise en œuvre d'outils d'investigation. Ce nouveau savoir nous permettra d'établir des scénarios d'évolution externe et des scénarios d'évolution interne permettant de dresser une stratégie d'intégration consciente de la notion de valorisation dans le processus de conception. Nous présenterons ensuite le protocole expérimental mis en place pour mettre à l'épreuve ces hypothèses.

Dans la quatrième partie, consacrée aux expérimentations, nous nous attacherons à mettre en œuvre les différents éléments que nous avons définis dans les hypothèses. Dans un premier temps, nous élaborerons et exploiterons quatre outils d'investigation (OI) permettant d'améliorer nos connaissances sur l'aptitude à la valorisation d'un véhicule et sur la mise en place d'une démarche de prise en compte de ce paramètre dans le processus de conception. Les quatre OI sont : un outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule, un outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'une fonction, un outil de modélisation d'un atelier de désassemblage et un outil d'évaluation qualitatif de l'aptitude à la valorisation. A partir de ces outils et des connaissances que nous avons accumulées sur le sujet, nous élaborerons quatre scénarios d'évolution interne (SEI) (processus, acteurs, méthodes et outils, impacts sur les systèmes d'information) satisfaisant à différents scénarios d'évolution externe (SEE) liés aux aspects réglementaires et techniques. La confrontation de ces SEI et SEE nous permettra enfin d'identifier une stratégie d'intégration consciente (SIC) pour l'entreprise concernant la contrainte de valorisation des véhicules en fin de vie.

Dans la cinquième partie, nous récapitulerons les apports de notre recherche concernant spécifiquement la notion de valorisation des véhicules en fin de vie chez PSA Peugeot Citroën

et proposerons, pour conclure, une démarche générique d'intégration d'une nouvelle contrainte dans un processus de conception complexe.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un contrat avec l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) en partenariat avec le constructeur automobile PSA Peugeot Citroën (département Matériaux et Procédés, au sein du service Recyclage dirigé par mademoiselle Sophie RICHET) et comme laboratoire de recherche associé, le Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris (dirigé par monsieur Robert DUCHAMP). Ces travaux se positionnent dans l'un des axes de recherche du laboratoire CPI intitulé « modélisation et intégration d'un nouveau métier en conception ».

1. Objet de la recherche

Au cours des dernières décennies, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure de notre société. L'industrie en général et l'automobile en particulier, en tant qu'agent économique majeur de notre société, a dû faire face à cette nouvelle contrainte.

Dans ce premier chapitre, nous allons voir en quoi la protection de l'environnement est devenue une nécessité et quelles sont les actions mises en place par l'industrie automobile pour y répondre.

Nous nous focaliserons ensuite sur l'un des aspects environnementaux qui impacte aujourd'hui fortement les constructeurs automobiles, c'est-à-dire la valorisation des véhicules en fin de vie. Nous décrirons la réglementation qui s'y rattache et les différents acteurs intervenant dans le processus de valorisation des véhicules.

Enfin, nous verrons quelles ont été les actions menées par le groupe PSA Peugeot Citroën au cours des dix dernières années pour prendre en compte cette nouvelle contrainte et pour répondre aux contraintes réglementaires sur le sujet.

1.1. *L'environnement et l'automobile*

La protection de l'environnement est un problème global qui nécessite l'implication de l'ensemble des acteurs de la société, du simple citoyen aux plus grandes multinationales, en passant par les pouvoirs publics. L'industrie automobile, du fait de son influence sur notre société, aussi bien en termes d'image qu'en regard des impacts environnementaux qu'elle génère, se doit de contribuer à ce nouveau défi.

Dans ce chapitre, nous rappellerons ce que recouvre la notion d'environnement, ainsi que la nécessité de sa prise en compte par l'industrie. Puis, nous verrons les actions menées par l'industrie automobile, et plus particulièrement par PSA Peugeot Citroën, afin de rendre les différentes étapes de la vie d'un véhicule plus respectueuses de notre environnement.

1.1.1. Nécessité de la prise en compte de l'environnement

La préservation de l'environnement est une notion relativement récente, issue d'une prise de conscience des limites de la planète et des impacts des activités humaines sur celle-ci. Depuis le début de l'ère industrielle, les progrès technologiques ont permis d'augmenter considérablement le niveau de vie d'une population toujours croissante et de plus en plus encline à consommer. Cette situation devient aujourd'hui problématique au regard de la capacité limitée de la nature à absorber ces transformations [SCHUMACHER 78].

Face à cette évolution, de nouvelles disciplines et de nouveaux concepts sont apparus pour mieux comprendre l'influence de l'homme sur son milieu. Ainsi est née au début du siècle une nouvelle science : l'écologie [DELEAGE 92]. Plus récemment est apparu un concept très global : la notion d'environnement. Cette notion peut être déclinée sous bien des formes ; de la préservation de la biodiversité à la protection de la couche d'ozone, en passant par les changements climatiques ou la pollution de l'air, de l'eau et des sols. Ainsi certaines concepts, plus ou moins globaux, sont apparus pour prendre en compte et gérer ces différents aspects, tels que le développement durable, la gestion du patrimoine naturel, l'éco-développement, etc.

Parmi toutes les activités humaines, l'activité industrielle a une place prépondérante. Elle est en première ligne lorsque l'on parle de l'influence de l'homme sur son environnement. D'après la SETAC¹ [SETAC 93], les principaux impacts environnementaux engendrés par les ponctions (matières premières et énergies) et les rejets (émissions atmosphériques, effluents aqueux, déchets) des industries sont des consommations de ressources (biotiques et abiotiques), des pollutions (effet de serre, destruction de la couche d'ozone, acidification atmosphérique, composés organiques volatils et poussières, etc.) et des dégradations (occupation des sols).

Comme le rappelle Janin [JANIN 00], l'engagement des entreprises dans une progression vers la prise en compte de l'environnement a été motivé par un renforcement des pressions réglementaires. Les contraintes se faisant de plus en plus fortes, les entreprises ont dû réfléchir aux moyens d'intégrer l'environnement dans leur fonctionnement. Cette intégration a été progressive, depuis le simple respect des lois dans les années 70, les traitements curatifs

¹ SETAC : Society of Environmental Toxicology and Chemistry.

des pollutions dans les années 80, jusqu'aux technologies propres dans les années 90 [KHALIFA 98].

Ainsi dans les années 70, prendre en compte l'environnement se résumait à une mise en conformité avec les législations. Au cours de la décennie suivante, les industriels ont tenté de réduire les pollutions en introduisant des techniques de dépollution en bout de chaîne : les traitements curatifs, dits « end of pipe », des déchets, des pollutions de l'eau, de l'air, du sol. Ces traitements, largement utilisés aujourd'hui, se sont néanmoins révélés insatisfaisants en termes de performances écologiques ; ils peuvent en effet engendrer des déplacements de pollution (un traitement d'eau peut, par exemple, conduire à la formation de boues qui devront être traitées à leur tour) et coûtent de plus en plus cher compte tenu de la sévérification progressive des contraintes réglementaires.

Une approche amont, plus stratégique, s'est donc peu à peu développée vers la fin des années 80. Il s'agit d'une stratégie préventive, visant la minimisation des déchets, la production propre et la prévention des pollutions. Certains évoquent le terme d'approche « middle of pipe » [CHARTER et al. 99]. L'objectif d'une telle approche est de prévoir et d'anticiper les éventuels futurs problèmes environnementaux. Cette démarche nécessite un changement du paradigme productif qui correspond au passage d'une simple adaptation technique du système productif (filtres, stations d'épurations, etc.) à sa remise en cause [BONAÏTI 94]. C'est l'évolution d'une stratégie simplement réactive, fondée sur une approche palliative, vers une stratégie proactive, s'appuyant sur une approche intégrative, et ce pour en tirer un nouvel avantage concurrentiel.

Au cours des années 90, l'approche anticipatrice de certaines entreprises s'est encore approfondie et la notion de prévention des pollutions a peu à peu dépassé le périmètre même de l'entreprise : d'une approche focalisée sur l'activité de production et les processus de fabrication des produits, les entreprises se sont tournées vers une approche plus globale, orientée produit, où il s'agit de considérer les impacts environnementaux d'un produit manufacturé non plus seulement en phase de fabrication, mais sur l'ensemble de son cycle de vie. C'est une approche dite « du berceau à la tombe » [BRALLA 96], qui prend en compte les désutilités environnementales d'un produit depuis l'extraction des matières premières le constituant jusqu'à son traitement en fin de vie. Cette préoccupation environnementale se met en place dès la conception du produit.

L'objectif d'une telle stratégie est de réduire, voire de supprimer, les impacts à la source. Car, comme le souligne De Winter, plus de 80 % des nuisances d'un produit tout au long de son cycle de vie sont déterminées en phase de conception [DE WINTER et al. 94]. Il est donc fondamental d'agir dès la phase de conception des produits et le plus en amont possible dans le processus de conception, qui constitue ainsi un lieu et un vecteur pertinent d'intégration de la dimension environnementale dans l'entreprise, comme l'ont précédemment montré certains travaux sur le sujet [MILLET 95].

1.1.2. Les actions de l'industrie automobile par rapport à l'environnement

Nous venons de voir l'évolution des réactions de l'industrie face à la problématique environnementale au cours des trente dernières années. Parmi toutes les actions envisageables, nous allons voir quels ont été les choix des constructeurs automobiles.

On peut définir pour l'automobile, comme pour tout produit de grande consommation, son cycle de vie (de l'extraction des matières premières à la fin de vie) et les impacts sur l'environnement générés par le produit (voir Figure 1).

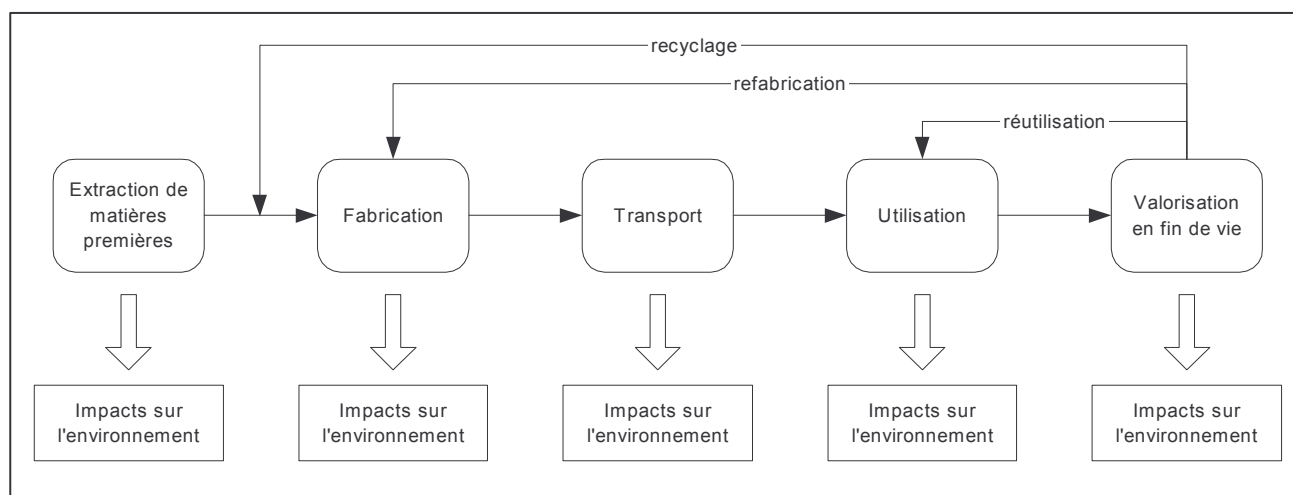


Figure 1 : Cycle de vie d'un produit et ses modes de valorisation

Pour illustrer les actions menées par l'industrie automobile dans le domaine de l'environnement, nous allons prendre l'exemple de PSA Peugeot Citroën, qui est représentatif de la plupart des constructeurs mondiaux [PSA 99].

Nous allons décrire ces actions en suivant chronologiquement les différentes étapes du cycle de vie du véhicule, en passant de sa production à son utilisation et à sa fin de vie.

Les premiers impacts de l'automobile sur l'environnement sont dus à la production du véhicule.

Même si l'automobile n'est généralement pas considérée comme une industrie particulièrement agressive vis-à-vis de l'environnement, la question des nuisances industrielles est une préoccupation importante, et ce à deux niveaux : celui, quotidien, de la qualité de vie à proximité des usines, et celui, plus général, des risques réels ou perçus d'accidents écologiques. Le groupe PSA Peugeot Citroën met en œuvre sur ses sites industriels une politique globale, qui vise à garantir dans tous les cas le respect de l'environnement, aussi bien en termes de protection du milieu que de qualité de vie du voisinage. Les éléments directeurs de cette politique sont étroitement liés aux principaux impacts potentiels des différentes activités de l'industrie automobile sur l'environnement : il s'agit de la réduction de la consommation d'eau et du traitement de celle-ci, de la préservation des sols, de la réduction des émissions atmosphériques, en particulier des composés organiques volatils (COV) grâce à la mise en place d'ateliers de peintures hydrodiluable, et de l'augmentation de la part valorisée des déchets industriels. Sur le plan du respect du voisinage, le respect du paysage et la réduction des émissions sonores sont au centre des préoccupations et des actions engagées.

PSA Peugeot Citroën a fait le choix de rechercher une mesure officielle et internationalement reconnue des efforts entrepris, en s'engageant depuis plusieurs années dans un programme de certification ISO 14000. Aujourd'hui, l'ensemble des usines terminales et d'assemblage est certifié, il en sera de même fin 2002 pour les usines de mécanique et de bruts.

Le deuxième impact de l'automobile sur l'environnement, et le plus visible, est lié à la phase d'utilisation du véhicule.

Pour lutter contre les nuisances dues à l'utilisation du véhicule, liées principalement aux émissions résultantes de la combustion du carburant, PSA Peugeot Citroën travaille sur différentes solutions :

- l'évolution du moteur thermique, aussi bien essence que Diesel, et en particulier les technologies du filtre à particules et de la catalyse DeNOx ;
- l'allègement et l'aérodynamique ;
- le développement de nouveaux types de motorisation.

Ces actions sont complétées par une implication importante dans des domaines connexes : le groupe participe activement à l'amélioration des carburants, ainsi qu'au développement d'énergies alternatives pour l'automobile, telles que :

- le gaz de pétrole liquéfié carburant (GPL-C) ;
- le gaz naturel véhicule (GNV) ;
- le véhicule électrique ;
- le véhicule hybride ;
- la pile à combustible ;
- les biocarburants.

Ces solutions, qui peuvent se compléter, répondent chacune à une demande spécifique. Le développement des énergies alternatives constitue, pour l'avenir, un facteur clef de la réduction des émissions de polluants.

Enfin, parmi toutes les étapes du cycle de vie, nous nous intéresserons plus particulièrement à la dernière, c'est-à-dire la fin de vie du véhicule.

Dès la mise hors d'usage du véhicule (environ 12 ans après sa mise en circulation), l'automobile devient un déchet encombrant. Or, même si les automobiles en fin de vie, comparées à d'autres produits industriels, ne représentent pas un risque majeur, il n'en demeure pas moins nécessaire de les traiter de manière appropriée pour éviter qu'elles ne contribuent au développement de la masse de déchets produits par nos sociétés. En effet, chaque année en France, 1,8 million de véhicules arrivent en fin de vie, et génèrent 450 000 tonnes de déchets [ADEME 00].

Les actions de PSA Peugeot Citroën vis-à-vis de la question des déchets et du recyclage se situent au niveau de la conception, de l'usage et de l'entretien courant, et de la gestion de la fin de vie des véhicules.

Au stade de la conception, PSA Peugeot Citroën intègre, d'une part, l'utilisation d'une quantité croissante de matériaux recyclés partout où cela est possible, et, d'autre part, comme nous le verrons par la suite, prend en compte à la source la recyclabilité des nouveaux véhicules.

Les réseaux commerciaux, ainsi que les professionnels de la démolition et du recyclage, sont les principaux partenaires des autres actions menées PSA Peugeot Citroën : d'une part en organisant la collecte et le tri des déchets issus de l'activité d'entretien et de réparation, tels que les pneumatiques, les batteries, l'huile de vidange, les pare-brise, etc., et d'autre part en

assurant la prise en charge des véhicules en fin de vie. De plus, un programme de récupération et de remise en état des pièces réutilisables (programme SECOIA [PSA 01]) permet, tout en contribuant à la valorisation des véhicules en fin de vie, de proposer aux propriétaires de véhicules usagés un approvisionnement en pièces de rechange.

Comme nous l'avons précisé au début de ce chapitre, des actions similaires se rapportant aux différentes étapes du cycle de vie du véhicule ont été entreprises par la plupart des constructeurs automobiles. Les travaux de cinq constructeurs sur le sujet sont synthétisés dans le Tableau 1 [JACQUESON 02].

	FORD	PSA	RENAULT	VOLVO	VW
Actions développées par tous les constructeurs	• Développement de carburants alternatifs (gaz naturel, diesel bio...). • Recherches de motorisations alternatives (véhicules hybrides électrique / essence, piles à combustible, etc.). • Restriction d'utilisation de certaines substances dangereuses. • Certification ISO 14 001 des sites de production et de distribution. • Utilisation de matière recyclée pour des pièces de série. • Recueil de préconisations pour le recyclage. • Réflexions sur la dématérialisation des produits².				
Actions spécifiques et/ou originales	• Mécénat pour la conservation de l'environnement (Fondation FORD). • Sensibilisation des utilisateurs de véhicules (<i>eco-driving practices</i>). • Prise de participation dans les réseaux de démolisseurs aux Etats-Unis. • Proposition d'un nouveau mode de consommation : forfait de renouvellement du véhicule tous les deux ans.	• Reconstitution d'un écosystème forestier (pour réaliser un puits de CO₂). • Usine interne de rénovation de pièces mécaniques pour échange standard. • Développement d'un filtre à particules pour les moteurs Diesel.	• Développement d'outils spécifiques pour le démontage destructif des VHU. • Optimisation de la consommation d'eau sur les sites de production, utilisation des eaux de pluie.	• Publication de déclarations environnementales de produits. • Plan de formation de l'ensemble du personnel aux enjeux de l'environnement. • Exigences environnementales globales destinées à leurs chaînes de fournisseurs.	• Réalisation d'ACV sur les véhicules complets. • Commercialisation d'un véhicule à très faible consommation (Lupo 3L / 100 km). • Centrale thermique sur site de production fonctionnant avec des résidus de broyage. • Développement de caisses de véhicules 100 % en aluminium.

Tableau 1 : Actions environnementales communes et spécifiques des constructeurs automobiles

Parmi toutes ces actions, nous nous intéresserons plus spécifiquement à celles qui concernent la fin de vie des véhicules et aux actions entreprises par PSA Peugeot Citroën sur le sujet au niveau de la conception.

² Recherche de la faisabilité de nouveaux modes de déplacement (flotte de véhicules en libre service), proposition concrète de Ford d'un forfait « véhicule neuf tous les deux ans », projet SMART (1^{re} version) proposant un concept de mobilité à « véhicule variable » (facilités commerciales intégrées à l'achat du véhicule pour l'avion, le train et la location de véhicules familiaux).

1.2. La valorisation des véhicules hors d'usage

Pour présenter le contexte lié à la valorisation des véhicules en fin de vie, nous allons tout d'abord détailler l'aspect réglementaire, avec, dans un premier temps, l'Accord Cadre français sur le retraitement des véhicules hors d'usage, signé en 1993 par l'ensemble de la filière automobile, et, dans un deuxième temps, la récente Directive Européenne 2000/53/CE sur les véhicules hors d'usage. Nous décrirons ensuite le contexte industriel lié aux véhicules hors d'usage (VHU), c'est-à-dire le schéma de traitement des véhicules, et les différents acteurs intervenant dans ce traitement.

1.2.1. La réglementation

Pour présenter la réglementation, nous allons tout d'abord définir les termes clefs de la valorisation. Nous verrons ensuite les objectifs que se sont fixés les différents acteurs de la filière automobile lors de la signature de l'Accord Cadre. Enfin, nous décrirons les différentes obligations définies par le Parlement Européen dans le cadre de la Directive Européenne relative aux véhicules hors d'usage [JOCE 00].

1.2.1.1. Définition des différents modes de valorisation

Pour bien appréhender le contenu de la réglementation, il convient de définir le contenu de certains termes, et plus spécialement du mot valorisation. Il recouvre en effet plusieurs process : le réemploi, le recyclage et la valorisation énergétique. Ces termes sont définis de manière réglementaire par la Directive Européenne relative aux véhicules hors d'usage.

○ Réemploi

Le réemploi (ou réutilisation) consiste à utiliser des composants issus des VHU pour assurer la même fonction que celle pour laquelle ils ont été conçus, après rénovation ou non. La rénovation concerne les principales pièces mécaniques du véhicule (moteur, alternateur, démarreur, étrier de frein, etc.).

○ Recyclage

Le recyclage (ou valorisation matière) consiste à réintroduire les matériaux usagés dans un processus de production pour satisfaire à leur fonction originelle ou à d'autres fonctions, en excluant les processus générant de l'énergie. Nous pouvons distinguer dans cette catégorie le

recyclage mécanique (traitement des matériaux issus de VHU par des moyens physiques en de nouveaux produits) et le recyclage chimique (traitement des polymères issus de VHU par des moyens chimiques, jusqu'à obtenir les monomères de base).

- Valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à utiliser les produits et les matériaux dérivés des VHU en tant que combustibles afin de générer de l'énergie à travers une incinération directe, avec ou sans autres combustibles, mais avec récupération de la chaleur.

Ces termes vont se retrouver dans les différentes réglementations et accords que nous allons développer.

1.2.1.2. L'Accord Cadre

En France, dès 1975, une loi organise l'élimination des déchets et la récupération des matériaux [JORF 92].

La modification du 13 juillet 1992 de cette loi impose les points suivants :

- la suppression à l'horizon 2002 des décharges traditionnelles ;
- la priorité au traitement et à la valorisation des déchets ;
- l'interdiction de mélanger, lors du stockage, les déchets industriels spéciaux et banals ;
- la mise en décharge des seuls déchets ultimes.

Comme beaucoup de secteurs industriels, le secteur automobile a été impacté par cette décision³. Cette loi et le contexte de l'époque⁴ ont amené les constructeurs automobiles français, les professionnels du recyclage et de la récupération, les producteurs de matériaux et les équipementiers à officialiser, le 10 mars 1993, sous l'égide des pouvoirs publics (ministères de l'Industrie et de l'Environnement), un Accord Cadre sur le traitement des véhicules hors d'usage (VHU).

³ Le traitement des véhicules hors d'usage génère chaque année en Europe 3 millions de tonnes de déchets.

⁴ Dès 1990, l'Allemagne a initié une réflexion sur la question des déchets automobiles en annonçant un projet d'Ordonnance comportant des objectifs de recyclage et en mettant la pression sur les constructeurs en les déclarant responsables de la reprise des véhicules hors d'usage à coût nul pour le dernier propriétaire [AGGERI 95].

Cet Accord Cadre précise les objectifs de réduction de mises en décharge suivants :

- en 2002, 15 % du poids du véhicule avec un plafond de 200 kg ;
- à terme, 5 % du poids du véhicule.

De plus, les constructeurs s'engagent :

- A fournir aux professionnels du retraitement les informations techniques (composition des pièces, gammes de désassemblage) nécessaires pour mener le retraitement de véhicules dans les meilleures conditions (techniques, économiques, environnementales).
- A s'assurer qu'en 2002 les nouveaux modèles ne génèrent pas un poids de déchets ultimes supérieur à 10 % en poids du véhicule.

A cela s'ajoutent les engagements communs aux constructeurs et aux équipementiers :

- Intensifier les efforts de R&D pour utiliser des matériaux à taux de valorisation croissant et de plus en plus de matériaux recyclés.
- Intégrer les contraintes techniques et économiques du retraitement dans la conception des nouveaux modèles.
- Apporter une contribution technique aux professionnels du retraitement pour développer des méthodes de retraitement et des modes de valorisation plus compétitifs.
- Généraliser le marquage des pièces plastiques.

Cet accord ne fixe pas les moyens pour atteindre ces objectifs, laissant libre cours à une économie de marché, permettant ainsi d'exploiter au mieux les technologies existantes, d'en développer de nouvelles tout en optimisant les coûts.

Il s'appuie sur les principes suivants :

- la responsabilité partagée des acteurs de la filière ;
- les lois du marché ;
- le libre choix des méthodes de valorisation (réutilisation, recyclage, valorisation énergétique).

La signature de l'Accord Cadre a motivé les différents acteurs de la filière et particulièrement les constructeurs automobiles chez qui sont apparues des entités entièrement dédiées au problème du véhicule en fin de vie, aussi bien chez Renault S.A., avec la direction du projet recyclage, que chez PSA Peugeot Citroën, avec le service recyclage [AGGERI 95].

1.2.1.3. La Directive Européenne relative aux véhicules hors d'usage

Au niveau européen, le sujet des véhicules hors d'usage (VHU) est apparu dès 1997. Une Directive Européenne a été définitivement adoptée en septembre 2000 [OJEC 00], chaque Etat membre ayant 18 mois pour la transcrire en droit national.

De façon générale, la Directive prévoit d'harmoniser les différentes mesures nationales pour la collecte et le traitement des VHU dans le respect de l'environnement, de valoriser les déchets en favorisant la récupération et le recyclage, et d'appliquer des mesures préventives dès la conception des nouveaux véhicules, en réduisant notamment l'emploi de « substances dangereuses ». La Directive fixe des taux de valorisation à atteindre et stipule la reprise gratuite du véhicule en fin de vie pour son dernier détenteur, lorsque le VHU est transféré vers une installation de traitement autorisée.

Cette directive fixe des exigences, dont certaines concernent plus particulièrement les constructeurs :

La réglementation des substances :

- Des mesures interdisent ou limitent l'utilisation du plomb, du mercure, du cadmium et du chrome hexavalent pour les véhicules mis sur le marché après le 1^{er} juillet 2003.

Les taux de valorisation en fin de vie des VHU :

- A partir du 1^{er} janvier 2006, pour tous les véhicules hors d'usage, le taux de réutilisation et de valorisation est porté à un minimum de 85 % en poids et le taux de réutilisation et de recyclage est porté à 80 % en poids.
- A partir du 1^{er} janvier 2015, pour tous les véhicules hors d'usage, le taux de réutilisation et de valorisation est porté à un minimum de 95 % en poids et le taux de réutilisation et de recyclage est porté à 85 % en poids.

L'homologation des nouveaux véhicules :

- A partir du 1^{er} juillet 2005, un véhicule, pour être homologué, devra garantir un taux d'aptitude à la réutilisation et / ou à la valorisation de 95 %, dont 85 % d'aptitude à la réutilisation et / ou au recyclage.
- Les constructeurs devront publier les taux de réutilisation, de recyclage et de valorisation atteints par leurs véhicules et composants au cours de l'année écoulée.

La reprise gratuite en fin de vie :

- La collecte et la valorisation des VHU incombent aux opérateurs économiques selon le principe du « pollueur - payeur ». Cela engage la responsabilité du constructeur, qui devra supporter tout ou une partie significative des coûts de traitement.
- La remise du véhicule à une installation de traitement autorisée devra s'effectuer sans aucun frais pour le dernier détenteur si le véhicule présente une valeur marchande négative. Les éventuels coûts de mise en œuvre de ce système seront à la charge des producteurs, en totalité ou pour une « part significative ». Cette disposition est applicable à partir du 1^{er} juillet 2002 pour les véhicules mis sur le marché à cette date, et à partir du 1^{er} juillet 2007 pour les véhicules mis sur le marché antérieurement au 1^{er} juillet 2002.

L'ensemble des dates d'entrée en vigueur des différents items de la directive est récapitulé dans le Tableau 2.

		Date officielle	Parution de la transcription	01/07/2002	01/07/2003	01/01/2005	01/01/2006	01/01/2007	01/01/2015
		Date pratique	01/04/2002			Fin 2005			
Responsabilité constructeur	HOMOLOGATION des véhicules (tout type ou nouveau type)			Publication fin 2002 de la procédure d'homologation		Calcul ISO : 95% de valorisation/réemploi dont 85% recyclage / réemploi			
	SUBSTANCES réglementées		Localisation parmi la liste « 2400 substances »		Interdiction / limitation du Pb, Hg, Cd, Cr6 pour tous les véhicules vendus				
Responsabilité partagée	REPRISE GRATUITE du VHU à son dernier détenteur			Pour les nouveaux véhicules				Pour tous les véhicules du parc	
	Objectifs de VALORISATION pour les VHU						85% de valorisation/réemploi dont 80% recyclage / réemploi	95% de valorisation/réemploi dont 85% recyclage / réemploi	

Tableau 2 : Principaux objectifs de la Directive Européenne sur les VHU

Pour entrer en application, la Directive Européenne doit être transcrite en droit national dans un délai de 18 mois. Cette transcription est encore en cours en France, mais devrait paraître

avant la fin 2002. Le décret d'application de la transcription peut comporter quelques variantes par rapport à la Directive d'origine, afin de prendre en compte les spécificités de chaque pays. Ce n'est donc que le jour de sa parution que les conditions d'application seront définitivement fixées. De même, le calcul en vue de l'homologation des véhicules, qui devra être effectif à partir de 2005, sera réglementé par une Directive spécifique qui est aujourd'hui en cours de rédaction. L'ensemble des paramètres liés à la Directive sera donc connu fin 2002.

La réglementation implique la mise en place de filières de traitement mettant en action des acteurs agréés. Les filières de traitement, ou filières de valorisation, est le terme générique employé pour décrire l'ensemble des acteurs qui participent au traitement et à l'élimination des véhicules en fin de vie.

1.2.2. Description du schéma de traitement

Pour comprendre ce qu'implique cette Directive, nous allons donc, dans un premier temps, décrire le schéma de traitement type d'un VHU, puis nous décrirons chaque acteur intervenant dans ces filières.

Le schéma de traitement des véhicules en fin de vie que nous allons présenter s'appuie sur les acteurs existants et sur un certain nombre d'opérations complémentaires au traitement actuel des VHU imposées par la Directive Européenne.

Le schéma de traitement tel que le prévoit la Directive se compose de quatre étapes :

- 1) Après collecte, le VHU passe par une étape obligatoire de dépollution. Cette phase consiste à extraire tous les éléments dangereux ou polluants pour l'environnement et pour les filières de traitement. Il s'agit essentiellement de la vidange des fluides, de l'extraction de la batterie, de la neutralisation des éléments pyrotechniques et de l'extraction de composants dangereux.
- 2) La deuxième étape est le désassemblage. Durant cette étape, la plupart des éléments ayant une valeur marchande significative sont démontés. Il s'agit principalement de pièces mécaniques pouvant être rénovées ou réutilisées, et donc revendues en pièces d'occasion. D'autres pièces peuvent être démontées en vue de leur recyclage, c'est le

cas des grandes pièces plastiques (comme le pare-chocs ou la planche de bord), des mousses de sièges ou encore des vitrages.

- 3) La troisième étape est le broyage de la carcasse et le tri des métaux. Les métaux sont ensuite recyclés par les aciéristes (métaux ferreux) et par les affineurs (métaux non ferreux).
- 4) Enfin, la dernière étape est le traitement des résidus non métalliques issus de l'étape de broyage et de tri. Ils peuvent alors être recyclés ou servir de combustible de substitution pour une valorisation énergétique.

Les différentes étapes du schéma de traitement sont présentées sur la Figure 2

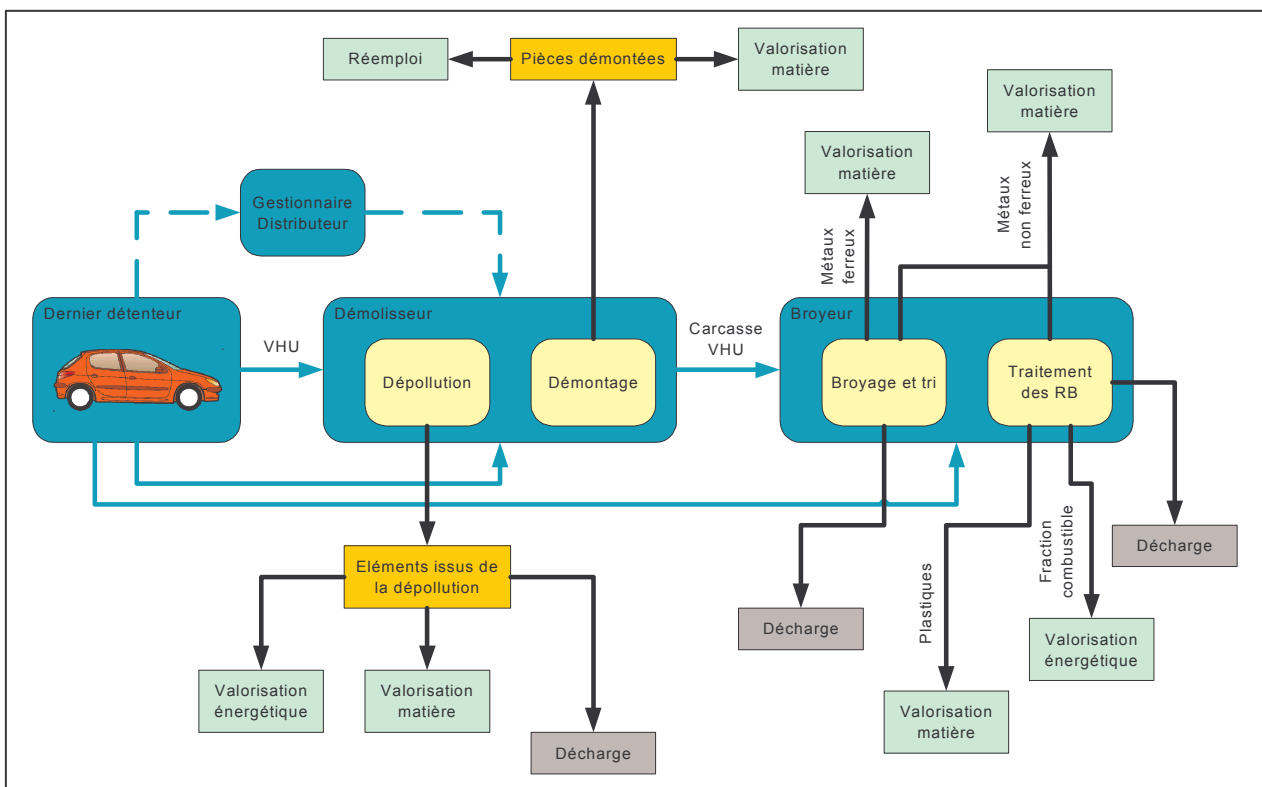


Figure 2 : Schéma de traitement d'un véhicule hors d'usage

Ce schéma correspond au contexte français. Néanmoins, il est représentatif de la filière présente dans les autres pays européens, même si on peut noter une certaine disparité d'un pays à l'autre quant au nombre des infrastructures existantes.

1.2.3. Description des différents acteurs de la filière

Nous allons maintenant détailler les activités des différents acteurs impliqués dans ce schéma de traitement.

Les différents acteurs intervenant dans le traitement d'un VHU sont les démolisseurs, qui extraient les éléments ayant une forte valeur ajoutée, et les broyeurs, qui récupèrent la fraction métallique du véhicule, mais également les recycleurs, qui récupèrent les pièces et les matériaux pour en faire de nouvelles matières premières, et enfin les installations permettant de valoriser énergétiquement les résidus combustibles issus de l'ensemble de la filière de traitement.

1.2.3.1. Les démolisseurs

Les démolisseurs sont essentiellement de petites structures travaillant de manière artisanale. Il en existe environ 3 000 répartis sur l'ensemble du territoire français. Actuellement, ils récupèrent la majeure partie des VHUs. Ceux-ci sont issus des concessions, des assurances, des particuliers ou des fourrières et des domaines. L'activité principale du démolisseur est la revente de véhicules et de pièces d'occasion. En tant que premier maillon de la chaîne de traitement, il doit assurer l'opération obligatoire de dépollution du véhicule. Il peut également faire du démontage en vue du recyclage de certaines pièces.

Les démolisseurs sont fortement impactés par l'arrivée de la Directive Européenne. En effet, ils devront être certifiés pour pouvoir récupérer les épaves accidentées et les véhicules en fin de vie. Cette démarche va tendre à assainir une profession parfois considérée comme trop « artisanale ». S'il paraît clair que les démolisseurs qui ne pourront pas s'adapter devront disparaître, il semble néanmoins difficile de spéculer sur l'avenir de cette profession. Les démolisseurs vont-ils devenir des grosses structures afin de bénéficier d'effets de volumes, ou vont-ils rester un service de proximité, comme c'est le cas à l'heure actuelle ? Le nombre de démolisseurs certifiés sera prépondérant pour répondre à cette question, car il dimensionnera le maillage de la collecte.

Dans tous les cas, les démolisseurs resteront un maillon essentiel du traitement des véhicules.

1.2.3.2. Les broyeurs

Si le démolisseur est dans la plupart des cas le point d'entrée de la filière de traitement des VHU, le broyeur en est la clef de voûte. Contrairement aux démolisseurs, les broyeurs sont des unités industrielles ; il en existe une cinquantaine en France. Le métier du broyeur est la revente de métaux de récupération. Les broyeurs traitent les métaux issus de la ferraille de démolition des bâtiments, des gros produits électroménagers et des véhicules en fin de vie. Dans le cas des VHU et dans le contexte actuel, ils achètent les carcasses aux démolisseurs.

Tous ces produits sont déchiquetés et triés afin de récupérer la fraction métallique. Les métaux sont alors revendus aux aciéristes ou aux affineurs, ce qui rend les broyeurs très dépendants du cours des matériaux. Une fois cette fraction extraite, il reste les résidus de broyage (RB). Ces résidus sont composés d'un mélange de plastiques, caoutchouc, tissus, mousses, verre, etc. Actuellement les RB sont mis en décharge. Certaines installations trient les RB pour en extraire une fraction riche en matériaux organiques afin de la valoriser en tant que combustible. Cette dernière fraction peut alors être incinérée dans des fours cimentiers ou dans des installations de co-incinération des ordures ménagères. D'une manière plus marginale, certaines installations trient les RB pour faire du recyclage matière, comme nous le verrons dans le paragraphe 2.1.3.

Comme nous l'avons souligné, les broyeurs sont très dépendants du cours des métaux et, de ce fait, ils doivent mieux maîtriser leurs coûts d'approvisionnement. Pour ce faire, les broyeurs pourraient à l'avenir devenir la porte d'entrée de la filière, ce qui les obligerait à effectuer la dépollution des véhicules (opération qui n'est pas rentable). Ils seront alors soumis à la certification par la Directive s'ils veulent récupérer directement les véhicules.

1.2.3.3. Les recycleurs

Si les broyeurs et les démolisseurs sont les acteurs principaux de la filière de valorisation des VHU, les recycleurs en sont un maillon indispensable. Ils sont en effet les garants de la viabilité et de la pérennité de l'ensemble de la filière de valorisation. Ils transforment les déchets et les matériaux triés par les démolisseurs en matières premières exploitables par l'industrie.

En suivant le schéma de traitement du VHU, on distingue différents types de recycleurs :

- Pour l'étape de dépollution

- ✓ Recyclage des fluides

Il existe différentes filières de recyclage des fluides. La filière des huiles est soumise à la TGAP⁵ ; elle est donc entièrement financée, ce qui permet une reprise à coût zéro chez les démolisseurs. Ainsi, certaines huiles sont régénérées, de même que certains liquides de frein. Les autres fluides sont, pour la plupart, traités par évapo-incinération.

- ✓ Recyclage des batteries

Il existe une filière spécifique traitant les batteries. Le plomb qu'elles contiennent est recyclé par les affineurs, et le polypropylène constituant leur bac est également recyclé. Cette filière est viable du point de vue économique.

- ✓ Recyclage des pneus

Les pneus sont également recyclés. Cette filière est actuellement soumise à une réglementation spécifique en France.

- Pour l'étape de démontage

- ✓ Démontage des vitrages

Le verre est couramment recyclé, le calcin⁶ faisant partie intégrante du process de fabrication du verre. Néanmoins, les verriers ont des cahiers des charges relativement contraignants. Dans le cas de l'automobile, le traitement des vitres latérales ne pose pas de problème. En revanche, le verre feuilleté des pare-brise doit subir un traitement spécial pour extraire le film de PVB⁷ pris « en sandwich » entre les feuilles de verre. De même, pour être recyclé, le verre des lunettes arrières doit être dépollué de ses réseaux chauffants. Ces opérations ont un coût qui rend le recyclage de ces pièces très peu rentable. De plus, la filière est saturée par du verre provenant d'autres secteurs industriels, comme le verre d'emballage (bouteilles).

- ✓ Démontage des pièces plastiques

La plupart des plastiques sont techniquement recyclables. Il s'agit essentiellement, pour l'automobile, des polyoléfines (polypropylènes et polyéthylènes), du PVC, des

⁵ Taxe Générale sur les Activités Polluantes.

⁶ Débris de verre.

⁷ Polyvinylbutyral.

polyamides, de l'ABS, des SMC / BMC et de la mousse de polyuréthane. Il existe différentes solutions pour recycler les matières plastiques. Par exemple, la structure chimique des thermoplastiques, qui représentent 75 % des plastiques présents dans l'automobile, permet de les refondre facilement. Nous pouvons également citer le cas des mousses de siège : un procédé consiste en une micronisation des mousses ; la poudre obtenue peut ensuite être recyclée par voie mécanique pour des applications de type protection anti-gravillonnage ou mousse semi-rigide, ou par voie chimique (glycolyse) pour des applications de type insonorisant ou mousse de remplissage.

Si les procédés existent au niveau industriel ou au stade de technique de laboratoire, la viabilité des filières est problématique car les cahiers des charges d'approvisionnement sont très contraignants et les débouchés des matériaux recyclés peu matures. Les filières du recyclage des plastiques restent donc très fragiles.

- Pour l'étape du broyage et du tri

- ✓ Recyclage des métaux

Pour la plupart de ces métaux de récupération (l'acier, l'aluminium, le cuivre, le magnésium, le plomb, etc.), il existe un cours officiel d'achat. Celui-ci fluctue avec l'offre et la demande. Ces variations de prix ont une influence importante sur l'activité des broyeurs, car les métaux constituent leur seule source de revenus. Ces fluctuations peuvent avoir des conséquences importantes sur l'équilibre économique global de la filière.

En conclusion, si le recyclage des métaux est une filière pérenne, bien que soumise à de fortes variations économiques, ce n'est pas le cas de la plupart des autres filières de recyclage, qui pourtant forment la base des filières de valorisation. Sans débouché pour les matières recyclées, l'ensemble de la filière ne peut être viable. Le seul moyen qu'ont les constructeurs automobiles pour peser sur ce point est de s'intégrer à ce tissu industriel en utilisant le plus de matières recyclées possible. Ce qui est l'un des axes de travail des constructeurs, comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1.1.2.

1.2.3.4. Les installations de valorisations énergétiques

Le recyclage n'est pas la seule voie de valorisation possible proposée par la Directive Européenne. Le dernier mode de valorisation possible est la valorisation énergétique. Ce

mode de valorisation concerne principalement les résidus de broyage (RB) et quelques éléments issus de la phase de dépollution. Comme nous l'avons défini dans le paragraphe 1.2.1.1, la valorisation énergétique consiste à utiliser ces matériaux comme combustibles ou à les brûler en récupérant la chaleur. Pour ce faire il existe trois solutions possibles : l'utilisation comme combustible dans des fours cimentiers, la co-incinération avec d'autres déchets dans des installations spécifiques, ou encore l'incinération dans des installations dédiées au traitement des RB.

La première solution possible pour traiter le RB est de l'utiliser comme combustible dans des fours cimentiers. En effet, le processus de fabrication du ciment est très énergivore et nécessite l'utilisation d'une quantité importante de combustible. Les fours cimentiers fonctionnent à très hautes températures ($\approx 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$), ce qui permet d'utiliser certains déchets comme combustible. De plus, ce procédé ne génère aucun déchet puisque les cendres issues de la combustion sont noyées dans le ciment.

La principale exigence des cimentiers par rapport au RB est liée à la présence de chlore. En effet, la combustion des produits chlorés entraîne la formation de sels chlorés qui se condensent en formant des concrétions dans le four, obligeant à de lourdes opérations de maintenance. Cet état de fait a incité certains constructeurs à travailler sur l'élimination du chlore dans le RB [TONNELIER 97]. D'un point de vue économique, l'élimination de déchets dans les fours cimentiers a un coût et les cimentiers facturent cette prestation, ne considérant pas le RB comme un combustible.

La deuxième solution est de valoriser le RB en le mélangeant avec des OM⁸, des DIB⁹ ou des DIS¹⁰ dans des installations de co-incinération. Les exigences de ce type d'installations sont plus importantes que celles des cimentiers. Les deux principales contraintes sont liées au chlore et à l'hétérogénéité des RB. Le taux de chlore doit être inférieur à 1 % pour respecter la réglementation, au-delà de cette limite l'incinération doit s'effectuer à des températures supérieures. La variation de la composition du RB, quant à elle, pose des problèmes de régulation du PCI¹¹ des produits entrant dans les fours. En effet, les fours n'acceptent pas de trop grandes variations de PCI sous peine d'endommagement. Il faut noter qu'il existe peu de

⁸ OM : Ordures Ménagères.

⁹ DIB : Déchets Industriels Banaux.

¹⁰ DIS : Déchets Industriels Spéciaux.

¹¹ PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur.

capacités d'incinération disponibles en France. Ces différents paramètres font que, là aussi, le traitement des déchets dans ces installations présente un coût non négligeable.

La troisième voie possible est de valoriser le RB dans des installations spécialement étudiées pour utiliser ce type de combustible. Certains procédés sont aujourd'hui à l'étude, telles les technologies de gazéification ou de thermolyse et de pyrolyse. Aujourd'hui, la plupart des filières n'existent qu'à l'échelle de pilote. A l'avenir, il semble que la voie envisagée sera d'utiliser des installations permettant d'incinérer une large gamme de déchets, soit pour répondre à un problème local, soit pour rentabiliser l'installation avec des déchets bien rémunérés. Le développement de telles installations nécessite des investissements très lourds et très risqués, ce qui freine aujourd'hui leur déploiement [BORIES 02].

En conclusion, les procédés et les installations de valorisation existent, mais ce type de traitement est encore très onéreux. Si la Directive Européenne autorise jusqu'à 5 %, puis 10 % de valorisation énergétique pour atteindre les objectifs de valorisation de 2006 et 2015, ces solutions ne seront adoptées sur le terrain que lorsque le prix de ce type de traitement aura baissé ou que le coût de mise en décharge sera devenu suffisamment dissuasif.

1.3. Les actions réalisées chez PSA Peugeot Citroën

Le chapitre précédent nous a permis de présenter la réglementation, le schéma de traitement et les différents acteurs intervenant dans le traitement de VHU. Nous allons maintenant voir les différentes actions mises en place par PSA Peugeot Citroën pour prendre en compte ce contexte.

Ces actions se sont déroulées en trois étapes. Chronologiquement, la première étape a consisté en une phase d'apprentissage pendant laquelle PSA Peugeot Citroën a acquis des connaissances sur le contexte du VHU, notamment sur les filières de valorisation. La deuxième étape a été la traduction de ces connaissances afin de les rendre exploitables par l'entreprise, et plus particulièrement par les différents acteurs de la conception. Enfin, la dernière étape a conduit au développement d'une méthode de « Design for Recycling », permettant d'évaluer les différents paramètres de la valorisation des véhicules lors de la conception et de faciliter la prise en compte de ces nouvelles connaissances par les concepteurs. Pour conclure ce chapitre, nous présenterons la question posée par PSA Peugeot Citroën dans le cadre de ce travail de recherche.

1.3.1. L'acquisition de connaissances

Comme nous l'avons vu précédemment, les constructeurs ont participé, dès la signature de l'Accord Cadre, à différents travaux pour accroître leur connaissance du sujet et faire progresser les filières de valorisation. PSA Peugeot Citroën a mis en place à cette époque une structure entièrement dédiée à cette problématique : le service recyclage.

La première action de PSA Peugeot Citroën a été la mise en œuvre d'un site pilote de traitement des VHU, à Saint-Pierre-de-Chandieu (Rhône), dans le cadre d'un GPI¹² en collaboration avec la Compagnie Française des Ferrailles (CFF) et le cimentier VICAT. De 1991 à 1994, l'unité de dépollution et de désassemblage aura traité plus de 10 000 véhicules¹³. Cette expérience a permis de tester une filière de traitement type en introduisant les phases de dépollution, de réutilisation, de rénovation et de traitement des résidus de broyage. Ce schéma de traitement maintenant validé a été en partie repris dans la réglementation actuelle.

Parmi les différents travaux engagés par PSA Peugeot Citroën, nous pouvons également citer :

- La participation à des programmes de recherche sur le recyclage des matières plastiques (Recap [RECAP 97], Valcor [VALCOR 97], Autovinyle [AUTOVINYLE 98], etc.).
- La mise en place de Relais Vert Auto, concept de « garage propre » pour les concessionnaires.
- Le programme SECOIA de collecte des pièces pour la rénovation [PSA 01].

Ces différents travaux ont contribué à développer les connaissances de PSA Peugeot Citroën sur les étapes du traitement des véhicules en fin de vie et sur les métiers des différents acteurs intervenant dans ce schéma de traitement.

1.3.2. La prise en compte en conception

L'ensemble de ces études a permis d'approfondir la connaissance des filières et de leurs contraintes. Ces connaissances ont conduit, dans un premier temps, à la rédaction de

¹² GPI : Grand Projet Innovant soutenu par le ministère de l'industrie.

¹³ Il faut noter que des travaux équivalents ont été menés à la même période par Renault avec le développement d'un site de traitement des VHU à Athis Mons.

préconisations de conception afin de s'assurer de la valorisabilité des futurs véhicules. Dans un deuxième temps, deux indicateurs ont été développés, l'un permettant de vérifier l'atteinte des quotas de valorisation (objectifs de l'Accord Cadre) et l'autre de mesurer et d'améliorer l'aptitude à la dépollution des véhicules.

1.3.2.1. Les préconisations de conception

Il résulte de ces travaux sur les filières un ensemble de principes de conception visant à améliorer le traitement des VHU.

Ces recommandations se situent à quatre niveaux :

- La conception en vue de la dépollution :
 - assurer la bonne accessibilité des éléments à dépolluer ;
 - faciliter leur extraction ;
 - veiller à la sécurité d'intervention.
- Le choix des matériaux :
 - privilégier la conception mono-matériau ;
 - limiter l'emploi de matériaux pouvant gêner la valorisation énergétique du RB (substances indésirables) ;
 - limiter les produits revêtus ;
 - associer des matériaux compatibles d'un point de vue chimique ou en terme de facilité de tri après broyage ;
 - utiliser les matériaux recyclés référencés.
- La conception en vue de l'extraction :
 - intégrer les fonctions ;
 - utiliser des systèmes d'assemblage adaptés au démontage rapide (clips, agrafes, etc.) ;
 - réduire le nombre de fixations au sein d'une même fonction et les uniformiser ;
 - faciliter l'accès aux fixations.
- Le marquage des pièces :
 - faciliter l'identification des matériaux (d'après des normes sur le marquage des pièces plastiques et caoutchoucs [ISO 93]) ;
 - faciliter le tri des pièces en fin de vie.

A partir de ces préconisations, une norme rédigée en collaboration avec Renault [PSA 94] [RENAULT 94] a été établie et diffusée chez PSA Peugeot Citroën et chez ses différents fournisseurs, que ce soit les équipementiers ou les producteurs de matières. Cette norme fixe les modalités à prendre en compte dès la conception des véhicules afin d'optimiser leur valorisation en fin de vie.

1.3.2.2. L'aptitude à la dépollution d'un véhicule

Le développement des préconisations a amené une première réflexion sur leur diffusion et leur utilisation par les concepteurs.

Suite aux engagements pris dans l'Accord Cadre, PSA Peugeot Citroën a entrepris des travaux sur la dépollution de ses véhicules (développement d'outils spécifiques pour faciliter la dépollution, préconisations de conception). Pour concrétiser ces travaux, il est apparu important de savoir évaluer pendant la phase de conception cette aptitude à la dépollution. Cette réflexion a conduit au développement d'un outil spécifique pour la prise en compte des préconisations liées à la dépollution des véhicules : l'ADV (Aptitude à la Dépollution d'un Véhicule).

L'ADV est un outil d'évaluation qualitatif permettant d'estimer l'aptitude à la dépollution des différents éléments devant être traités sur un véhicule. Il se présente sous la forme d'une de listes de questions réparties par élément et par méthode de dépollution. Les résultats sont exprimés par une note sur vingt pour l'ensemble du véhicule (ADV) et d'une note par élément traité (Aptitude à la Dépollution d'un Élément, ou ADE). Cet outil est pour l'instant utilisé par un expert qui évalue les différents véhicules en fin de conception.

1.3.2.3. L'indice de valorisation du véhicule

Parallèlement aux travaux sur les préconisations de conception et sur l'évaluation de l'aptitude à la dépollution, PSA Peugeot Citroën a développé un indicateur permettant de mesurer le taux de valorisation d'un véhicule afin de s'assurer de l'atteinte des objectifs de l'Accord Cadre. Le résultat de ces travaux est l'Indice de Valorisation du Véhicule (IVV). Ce calcul est réalisé à partir de la composition en masses et en matières du véhicule et de la masse de certaines de ses fonctions. Selon les matières et les fonctions, différents taux de valorisation sont appliqués. Ces taux sont issus des données de terrain collectées auprès des

filières de traitement existantes ou à la suite des expérimentations de Saint-Pierre-de-Chandieu.

Ce calcul est à la charge d'un expert. En effet, il n'a pas pu être informatisé car il n'existait pas de base de données structurée permettant d'extraire automatiquement les données de masses et de matières de l'ensemble des pièces du véhicule. Cet outil est toutefois le seul permettant d'obtenir une évaluation sur l'ensemble du véhicule.

En conclusion, les préconisations de conception, l'évaluation de l'aptitude à la dépollution et le calcul de l'indice de valorisation du véhicule ont permis de définir les notions de base de ce qui fait l'aptitude à la valorisation d'un véhicule. Mais la prise en compte de ces données par les concepteurs reste difficile et, dès 1997, les prémisses de la future Directive Européenne font apparaître un paramètre d'homologation sur le critère de recyclabilité et un paramètre économique en impliquant financièrement les constructeurs. Ces deux facteurs vont inciter PSA Peugeot Citroën à faire évoluer l'IVV et à développer de nouveaux outils.

1.3.3. Développement d'outils de Design for Recycling

Afin de systématiser la prise en compte du recyclage en conception et de maîtriser les coûts engendrés par la fin de vie, PSA Peugeot Citroën a souhaité développer une méthode de conception en vue du recyclage, ou « Design for Recycling ». Cette étude a été confiée à Christophe Coppens dans le cadre d'une thèse réalisée entre 1996 et 1999 [COPPENS 99]. Cette démarche n'est pas isolée chez les constructeurs, puisque à la même période, Renault a engagé des travaux équivalents [GAUCHERON 00].

Coppens a orienté ses travaux au niveau de la fonction¹⁴ et de l'activité du concepteur, considérant celui-ci comme l'acteur le plus apte à prendre en compte les différentes notions liées à la fin de vie du véhicule.

Cette approche l'a amené à proposer deux outils informatisables permettant au concepteur d'évaluer et d'améliorer l'aptitude à la valorisation d'une fonction. Il s'agit d'une base de règles structurée apportant différents niveaux de préconisations en fonction des étapes du

¹⁴ Par fonction, Coppens entend « sous-ensemble du véhicule tels que le siège, la planche de bord, le pare-chocs, etc. ».

processus de conception, et d'un outil d'évaluation permettant de représenter, d'évaluer et de re-concevoir une fonction. Nous allons maintenant détailler ces deux outils.

1.3.3.1. La base de règles

Le premier outil développé par Coppens est une base de règles. Elle permet de structurer les préconisations de conception en prenant en compte les différents niveaux de préconisations liées à l'intégration du paramètre valorisation en fonction des étapes du processus de conception et de l'activité du concepteur : préconisation de sensibilisation, préconisations générales, préconisations par fonctions.

La structure et l'informatisation de cette base permettent de faciliter la diffusion des préconisations auprès des concepteurs.

Cette base de règles a été mise à disposition sur l'intranet de la société (Figure 3).

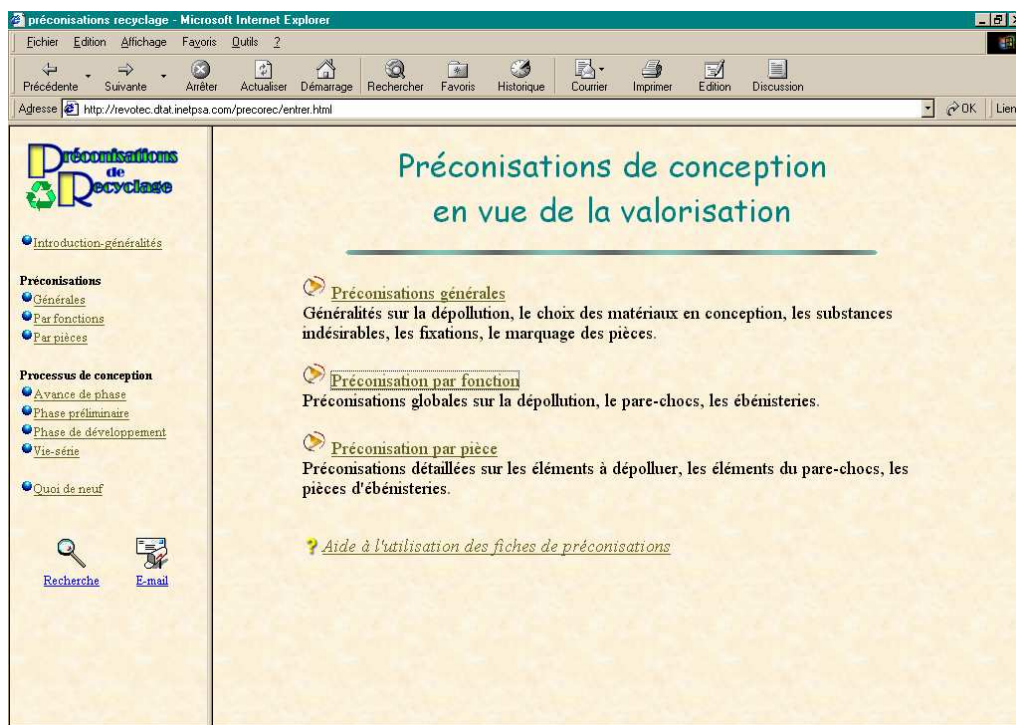


Figure 3 : Page de garde du site de préconisations PrécoRec

1.3.3.2. L'outil d'évaluation quantitatif

Le deuxième outil développé est un outil d'évaluation quantitative. Il permet d'évaluer l'Aptitude à la Valorisation d'une Fonction (AVF). Cette méthode d'évaluation permet de calculer, à partir d'une fonction complètement définie (de manière physique ou virtuelle), le taux de valorisation et le coût de traitement associé, selon un scénario fin de vie¹⁵ déterminé.

La démarche globale du calcul de l'AVF consiste tout d'abord à déterminer la destination fin de vie de l'ensemble des composants de la fonction étudiée. Dans un deuxième temps, une étude structurale permet d'identifier les liaisons à rompre pour respecter ces destinations fin de vie. Cette étude structurale s'appuie sur un graphe de liaisons (GL) et sur un graphe de décomposition (GD). La dernière étape consiste à évaluer l'AVF, c'est-à-dire déterminer la gamme de désassemblage, évaluer la masse de matière valorisée issue du scénario et la rentabilité associée. Nous allons détailler les principales étapes de cette démarche.

La première étape de détermination des destinations fin de vie de chaque composant est réalisée à partir de la liste des composants de la fonction et de leur composition en matières, d'une liste de composants susceptibles d'être rénovés et/ou réutilisés et d'une liste des matières recyclables. La destination fin de vie pouvant être la réutilisation, le recyclage, la valorisation énergétique ou la mise en décharge. Une fois qu'une destination fin de vie a été affectée pour chaque composant, l'étude structurale de la fonction peut être réalisée. Celle-ci consiste à établir le graphe de liaisons et le graphe de décomposition de la fonction.

Le graphe de liaisons représente les liaisons géométriques entre les différents composants. Sont représentés sur ce graphe les composants de la fonction, leur destination fin de vie (selon les symboles utilisés pour représenter les différentes pièces) et le type de liaison entre chaque composant (Figure 4).

¹⁵ Scénario fin de vie : Choix d'une destination fin de vie, parmi les différents modes de valorisation possible et la mise en décharge, pour chaque composant de la fonction.

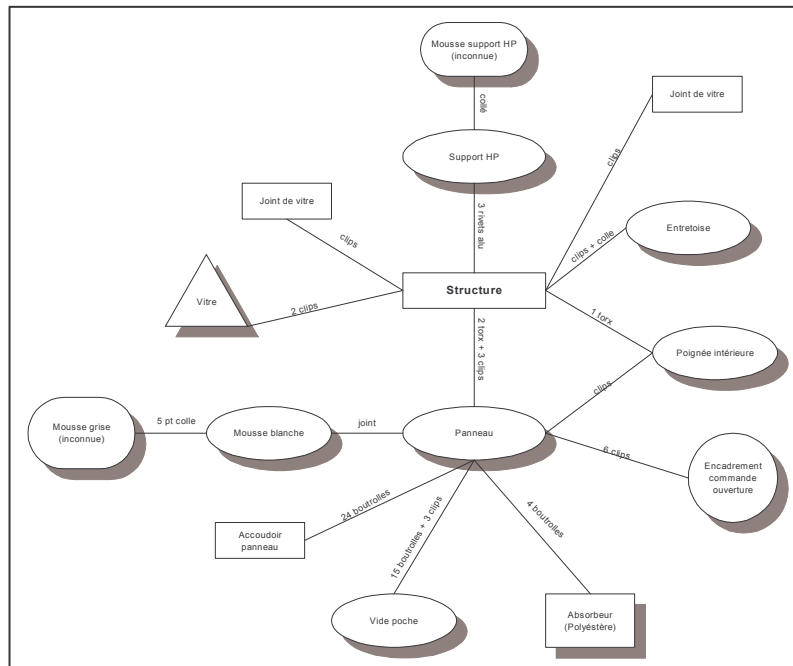


Figure 4 : Exemple de graphe de liaisons d'un panneau de porte

Le graphe de décomposition permet de représenter les antériorités de démontage entre les composants de la fonction. Il est établi à partir d'un démontage virtuel (sur maquette numérique) ou d'un démontage physique (Figure 5).

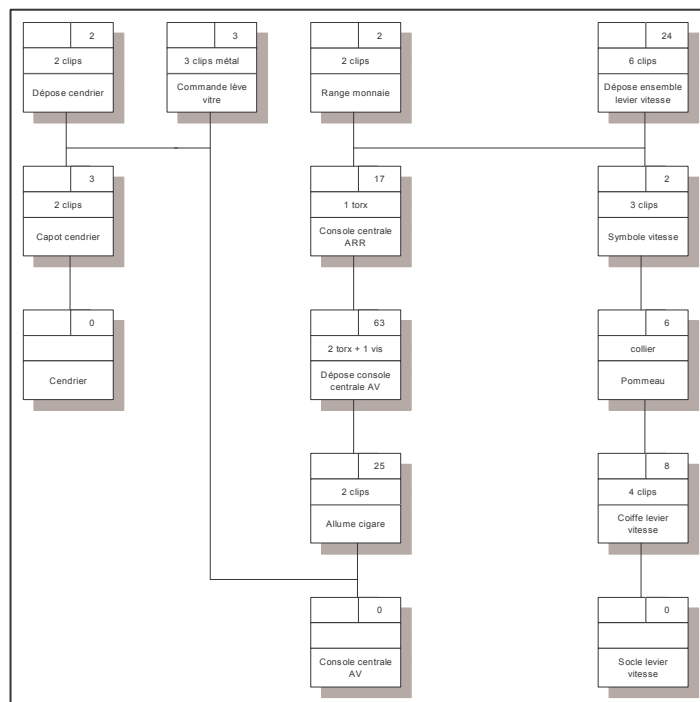


Figure 5 : Exemple de graphe de décomposition d'une console centrale

A partir du graphe de liaisons, les liaisons à rompre pour obtenir les composants à démonter en vue de leur recyclage ou de leur réutilisation sont identifiées. Le graphe de décomposition permet ainsi d'établir la gamme de désassemblage complète de la fonction.

Une fois ces opérations réalisées, l'AVF peut être évaluée. Elle est définie par un scénario fin de vie et des indicateurs quantitatifs. Le scénario fin de vie correspond au couple constitué de la destination fin de vie des différents composants et de la gamme de démontage associée permettant de respecter ces destinations. Cette gamme de démontage est établie en respectant les antériorités fournies par le graphe de décomposition.

Deux indicateurs quantitatifs permettent de caractériser l'AVF : il s'agit du taux de masse de matière valorisée (M) et de la rentabilité économique associée (R).

- M est donné par la formule suivante (Equation 1) :

$$M = \frac{\sum (\text{Masses valorisées})}{\text{Masse totale}}$$

Equation 1 : Calcul du taux de matière valorisée

Les différentes masses valorisées sont déterminées à partir des destinations fin de vie, des taux de réutilisation ou de rénovation et des taux de valorisation énergétique sur la base de la répartition masses/matières de la fonction.

- R est donné par la formule suivante (Equation 2) :

$$R = \text{Revenus liés à la valorisation} - \text{Coûts liés à la valorisation}$$

Equation 2 : Calcul de la rentabilité

Il existe différentes manières de caractériser une rentabilité en fonction des revenus et des coûts que l'on considère. Les paramètres qui ont été retenus ici sont les suivants :

- Les revenus sont constitués par les bénéfices liés à la revente de la matière recyclée et des composants ou boîtiers à réutiliser ou rénover ;
- Les coûts sont constitués par les dépenses liées au temps de démontage associé à la gamme, aux coûts de valorisation énergétique et de mise en décharge.

En comparant la rentabilité obtenue à une rentabilité seuil, il est possible de déterminer si la pièce est valorisable selon le scénario défini.

L'outil AVF intègre, par ailleurs, une aide à la re-conception de la fonction grâce à l'identification des points bloquants.

1.3.4. Question posée par PSA

Les différents travaux engagés par PSA Peugeot Citroën que nous venons de présenter ont été motivés par des évolutions réglementaires (Figure 6).

Les prémisses de l'Accord Cadre ont incité PSA Peugeot Citroën à acquérir des connaissances sur les filières de valorisation des VHU, ce qui s'est concrétisé, entre autres, par l'étude menée à Saint-Pierre-de-Chandieu. Avec la signature de cet Accord et l'apparition d'objectifs de valorisation, PSA Peugeot Citroën a mis en place un indicateur afin de mesurer le taux de valorisation des véhicules, mais a également cherché à améliorer ce taux de valorisation en développant des préconisations de conception.

Avec le projet de Directive Européenne, PSA Peugeot Citroën a voulu anticiper les futures contraintes réglementaires, liées aux nouveaux taux de valorisation et à la responsabilisation économique des constructeurs. Ainsi, l'entreprise a décidé de se doter d'outils permettant d'améliorer la prise en compte du recyclage en conception. Le développement de l'AVF a permis d'associer la notion de coût de traitement à un calcul du taux de valorisation. Mais cet outil, complété par la base de règles, permet essentiellement des interventions au niveau de la fonction. De plus, cet outil est à destination d'un expert et ne prend pas en compte les contraintes organisationnelles fortes liées au processus de conception.

En l'état, seul l'IVV permet d'avoir une vue d'ensemble du véhicule, mais uniquement au niveau du taux de valorisation.

Or, la Directive Européenne introduit deux notions : l'obligation d'homologuer les véhicules sur un critère de recyclabilité et la prise en charge par le constructeur du coût de traitement en cas de valeur marchande négative du VHU. L'obligation d'homologation nécessite d'avoir la maîtrise du taux de valorisation tout au long du processus de conception. Cela implique la prise en compte du schéma de développement du véhicule et nécessite une intégration complète de cette notion en conception. De même, la responsabilité financière du constructeur nécessite, si le risque est avéré, de pouvoir évaluer le coût global de traitement du véhicule en conception. D'où le besoin de fournir aux équipes responsables du développement des

véhicules une méthode permettant d'évaluer et de gérer l'ensemble des données liées à la valorisation, aussi bien en termes de taux de valorisation que de données économiques. L'objectif est de pouvoir réduire et maîtriser le coût global, tout en respectant les taux de valorisation définis par la réglementation.

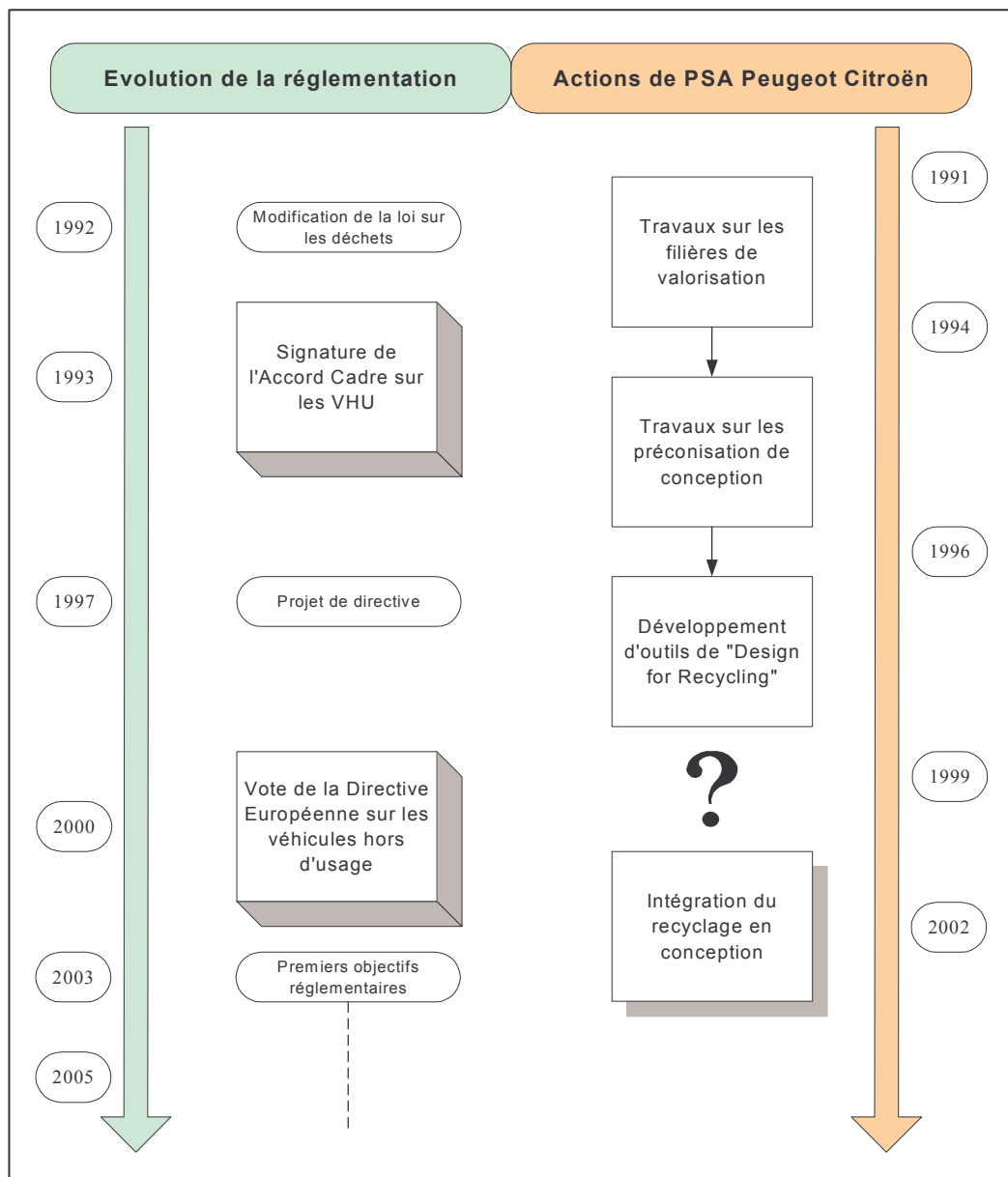


Figure 6 : Evolution de la réglementation et actions engagées par PSA Peugeot Citroën

La question qui nous est posée par PSA Peugeot Citroën est donc :

Comment prendre en compte la valorisation des véhicules en conception afin de répondre aux exigences réglementaires ?

2. Analyse du contexte et problématique

PSA Peugeot Citroën souhaite répondre à moindre coût aux objectifs de la Directive Européenne, tout en se prémunissant des éventuelles évolutions de cette nouvelle réglementation. En effet, les conséquences peuvent se révéler très pénalisantes pour l'entreprise si les taux de valorisation pour l'homologation ne sont pas atteints, ou s'il s'avérait que le coût de traitement des VHU implique une participation financière de l'entreprise. Un tel objectif passe par la maîtrise, dès la conception, des différentes composantes de la notion de valorisation, donc l'intégration de cette notion dans le processus de conception.

Pour pouvoir prendre en compte cette nouvelle contrainte, nous allons tout d'abord analyser ce que recouvre la notion de valorisation. Nous verrons que cette notion est complexe. Nous allons dans un premier temps décrire la diversité des modes de calcul de la valorisation existants. Ces modes de calcul nous permettront de définir les composantes de la notion de valorisation. Nous verrons également que pour prendre en compte cette notion, il faut intégrer d'un facteur essentiel : le temps. En effet, il existe un décalage important (environ 15 ans) entre la conception d'un véhicule et sa fin de vie. Or, ce décalage est créateur d'incertitude. Au cours de cette période, les principaux éléments définissant l'aptitude à la valorisation d'un véhicule sont susceptibles d'évoluer. Nous verrons comment ces composantes, c'est-à-dire la réglementation, les filières de valorisation et la composition du véhicule, peuvent évoluer dans le temps. Au regard de ces différents futurs possibles, nous verrons quelles sont les évolutions potentielles de la notion la valorisation et les incertitudes et les risques qu'elles génèrent.

Dans un deuxième temps, nous décrirons le lieu de l'intégration, c'est-à-dire le processus de conception d'un véhicule. Nous verrons toute la complexité de ce processus chez PSA Peugeot Citroën. Nous constaterons que ce processus s'appuie sur une organisation complexe faisant intervenir de très nombreux acteurs. Nous présenterons ensuite les différents outils méthodologiques structurant le processus. Puis, nous verrons les systèmes d'informations (outils informatiques, bases de données, etc.) qui sont utilisés en conception.

Enfin nous ferons un bref panorama des démarches d'intégration existantes, tant du point de vue technique, avec les approches instrumentées, que du point de vue management.

Nous terminerons ce chapitre en explicitant la problématique de l'intégration d'une notion complexe – la valorisation – dans un univers complexe – la conception – que nous avons cherché à résoudre au cours de cette étude.

2.1. Complexité de la valorisabilité

Pour définir le premier pôle de notre problématique, nous allons dans un premier temps rappeler les méthodes employées pour évaluer l'aptitude à la valorisation. Puis, nous présenterons les incertitudes liées à l'évolution dans le temps des différents paramètres permettant de définir l'aptitude à la valorisation que sont la réglementation, les filières de valorisation et le véhicule.

2.1.1. Diversité des modes du calcul de la valorisation

L'évaluation de l'aptitude à la valorisation peut être réalisée de différentes façons, selon les résultats souhaités et selon les hypothèses choisies. Cela va du simple indicateur du taux de valorisation, sur la base de la composition en matières du produit à évaluer, à une analyse économique précise, en évaluant de manière exhaustive les différentes étapes du traitement en fin de vie du produit à l'aide d'outils de simulation. Nous allons voir comment ces différents types d'évaluation sont réalisés.

2.1.1.1. Les indicateurs de valorisation

La plupart des constructeurs automobile ont anticipé sur la réglementation en réalisant des travaux sur leurs propres indicateurs.

En France, PSA Peugeot Citroën et Renault ont développé un indicateur de conception dans le cadre des travaux relatifs à l'ISAC (Institut de Suivi de l'Accord Cadre) [ISAC 96]. L'objectif de cet indicateur est d'évaluer le potentiel de valorisation d'un nouveau véhicule. L'Indicateur de Conception ISAC (ICI) est égal à la somme des pourcentages des masses valorisées à

chaque phase de traitement du VHU (c'est-à-dire les phases de dépollution, extraction, broyage/tri et traitement des RB).

Chaque constructeur a également développé ses propres indicateurs. Nous avons déjà détaillé les indicateurs de PSA Peugeot Citroën dans le paragraphe 1.3.2 : l'Indice de Valorisation Véhicule (IVV) et l'Aptitude à la Dépollution du Véhicule (ADV). Renault a, pour sa part, mis en place un Indicateur de Recyclage Véhicule (IRV), très voisin de l'ICI.

Des travaux équivalents ont été menés au niveau européen. Au sein du groupe de travail EURINDEX de EUCAR¹⁶ [EUCAR 96] réunissant Audi, Fiat, Ford, Mercedes-Benz, Opel, Porsche, PSA Peugeot Citroën, Renault, Rover, Volvo et Volkswagen, la « valorisabilité » a été définie comme « le pourcentage en masse de composants, de matériaux et de résidus qui peuvent être extraits du VHU et utilisés comme pièce fonctionnelle, matériau vierge ou source d'énergie ». Cette évaluation de l'aptitude à la valorisation est fondée sur le schéma de traitement du VHU en quatre phases. A chaque étape du schéma de traitement est affecté un pourcentage en poids de masse valorisée. Le calcul de ces pourcentages est fonction de paramètres techniques, économiques et réglementaires. La consolidation au niveau du véhicule complet est effectuée en sommant les masses valorisées à chacune des quatre étapes du schéma de traitement. Cette aptitude à la valorisation est exprimée par rapport à la masse du véhicule en ordre de marche. Ces travaux ont conduit à la rédaction de la norme ISO 22628 [ISO 02], qui est une proposition de norme de calcul de l'homologation des véhicules prévue par la Directive Européenne.

L'AAAM (American Association of Automobile Manufacturers) a proposé en 1998 [AAAM 98] son mode de calcul de la valorisabilité du véhicule à l'AIAM (Association of International Automobile Manufacturers), afin de trouver un consensus à l'échelle internationale, pouvant être adapté aux conditions technico-économiques locales de chaque pays. Il se fonde sur la définition de catégories de valorisation. Chaque pièce du véhicule est affectée dans une catégorie qui correspond à une pièce couramment recyclable, potentiellement recyclable, organique ou inorganique, valorisable énergétiquement ou destinée à une mise en décharge. La consolidation au niveau du véhicule est effectuée en sommant les pièces appartenant à chaque catégorie sur l'ensemble du véhicule. Quatre indicateurs sont ainsi obtenus pour le

¹⁶ EUCAR : European Council for Automotive R&D.

véhicule complet (pourcentage couramment recyclable, pourcentage couramment valorisable, pourcentage potentiellement recyclable, pourcentage potentiellement valorisable).

2.1.1.2. L'évaluation économique de la valorisation

L'aptitude à la valorisation peut également être définie comme étant un taux de valorisation et un coût de traitement associé. Le calcul peut alors être beaucoup plus complexe. Dans ce cas de figure, on distingue deux approches : une évaluation économique simple à l'aide d'indicateurs, et une approche plus exhaustive, avec des outils de calcul et de simulations complexes.

a) Indicateurs économiques

Le volet économique apparaît dans certains indicateurs, comme dans ceux proposés par EUCAR ou par Renault.

Pour évaluer l'aptitude d'un matériau ou d'un composant à être recyclé, le groupe de travail EUCAR a proposé un indicateur : l'Economical Recycling Indicator (ERI). Cet indicateur est défini par la formule suivante (Equation 3) :

$$\text{ERI} = \frac{\text{Coût de mise en décharge} + \text{Coût de la matière vierge}}{\text{Coût de démontage} + \text{Coût de logistique} + \text{Coût du process de recyclage}}$$

Equation 3 : Formule du calcul de l'ERI

Cet indicateur permet d'évaluer une aptitude à la valorisation en s'appuyant sur des paramètres économiques. Il est ainsi possible de déterminer s'il est rentable ou non de recycler une pièce avant broyage (entraînant des coûts de démontage, de logistique et de recyclage) plutôt que de la mettre en décharge, opération qui nécessite l'introduction de nouvelle matière vierge dans le process. Ce point de rentabilité est atteint lorsque l'ERI est égal à 1. L'inconvénient principal de cet indicateur est qu'il dépend des marchés locaux et qu'il n'est donc pas possible d'en déduire des quotas au niveau européen.

L'équilibre économique peut être exprimé sous différentes formes. Mercedes et Renault [EUCAR 96] ont, par exemple, reformulé l'équation 3 ci-dessus afin de déterminer si un matériau ou un composant doit être démonté en vue de son recyclage.

Volkswagen [LOTZ 99], tout comme BMW [BMW 92], ont adopté une classification des pièces ou des assemblages en différentes catégories, en fonction des résultats de l'ERI :

- Classe R1 si $ERI > 100 \%$
- Classe R2 si $80 \% < ERI < 100 \%$
- Classe R3 si $ERI < 80 \%$

Volkswagen [LOTZ 99] utilise cette classification afin de calculer le bilan global du véhicule. Cet indicateur de valorisation du véhicule est en effet la somme, ramenée à la masse du véhicule en ordre de marche, des masses des pièces de classe R1 et R2, cette dernière classe étant pondérée par un coefficient variable selon sept familles de matériaux (plastiques, élastomères, câbles, fluides, verre, métaux ferreux et métaux non ferreux).

Avec ces indicateurs quantitatifs, la rentabilité peut être exprimée de différentes manières (en relatif ou en absolu) et possède une signification différente selon les données considérées (prise en compte des coûts de non-broyage et des coûts de non-mise en décharge).

b) Démarche d'évaluation économique

En plus de ces indicateurs, des méthodes et des outils de calcul beaucoup plus complets ont été développés. Ainsi, l'évaluation de la recyclabilité en terme de coût est l'objet d'un certain nombre de travaux, principalement dans le domaine des produits électriques et électroniques.

Sur l'ensemble des travaux, les démarches proposées sont relativement similaires : il s'agit de réaliser des évaluations sur des produits en cours de développement (souvent par l'intermédiaire d'un modèle numérique), de construire un modèle spécifique pour l'évaluation et enfin de réaliser l'évaluation elle-même.

Cette démarche est employée dans la plupart des logiciels ayant été développés sur le sujet (Tableau 3).

Logiciels	Fonctionnalités
DEMROP [EBACH 97]	Analyse de différents scénarios de recyclage à partir de la description des produits.
LASER [ISHII 94]	Evaluation de l'assemblage des pièces, étude de réparabilité, études de la recyclabilité en termes de coûts.
ReGrEd [FELDMANN et al. 95]	Simulation et calcul des process de désassemblage.
ReStar [NAVIN CHANDRA 93]	Optimisation du désassemblage des produits par l'évaluation du rapport gains économiques / coûts de l'opération.
AsTROiD [HESSELBACH et al. 96]	Evaluation qualitative du désassemblage, des temps et des coûts de désassemblage.

Tableau 3 : Exemples de logiciels permettant une analyse de la recyclabilité en termes de coûts

Cette démarche se décompose de la manière suivante [ENGELBORGHES 96], [DINI 97] :

- Construction d'un modèle du produit à partir d'un modèle CAO ;
- Sélection et validation de sous-ensembles ;
- Génération et évaluation de gammes de désassemblage.

Le tout étant supporté par un ensemble de bases de données [DINI 99], [SPATH 95] :

- Base de données « désassemblage » : outils de désassemblage, sources d'énergie, temps de travail... ;
- Base de données « marché » : coût du travail, coût de l'énergie, coût de mise en décharge, cours des matériaux... ;
- Base de données « produit » : matériaux, fixations, degré d'endommagement...

L'évaluation de la gamme de désassemblage permet de déterminer la profondeur optimale de désassemblage [ZUSSMAN 94], [ENGELBORGHES 97], [DINI 99]. Un calcul de rentabilité est réalisé à chaque étape de la gamme. Un opérateur intervient dans le choix final de la gamme (souvent pour valider les sous-ensembles retenus).

L'évaluation se fait généralement en termes de rentabilité de l'opération de désassemblage et non en termes de taux de valorisation. Cette dernière notion n'apparaît que rarement [WANG 94], on parle plus souvent d'indicateurs environnementaux du produit [HARJULA 96], [SPATH 95], [SODHI 98].

La génération des gammes est, en général, fondée sur une représentation par réseau de Petri ou d'autres formes de graphes de liaisons [ZUSSMAN 99], [ZHANG 97a], [LAMBERT 97].

En termes de méthodologie, certains modèles intègrent les démolisseurs. Dans ce cas, le flux d'informations sortant (la gamme de désassemblage) est orienté vers les démolisseurs, ces derniers alimentent en retour la base de données de désassemblage [WESTKAMPER 99], [SPATH 96].

Cette démarche peut être schématisée sous la forme suivante (Figure 7) :

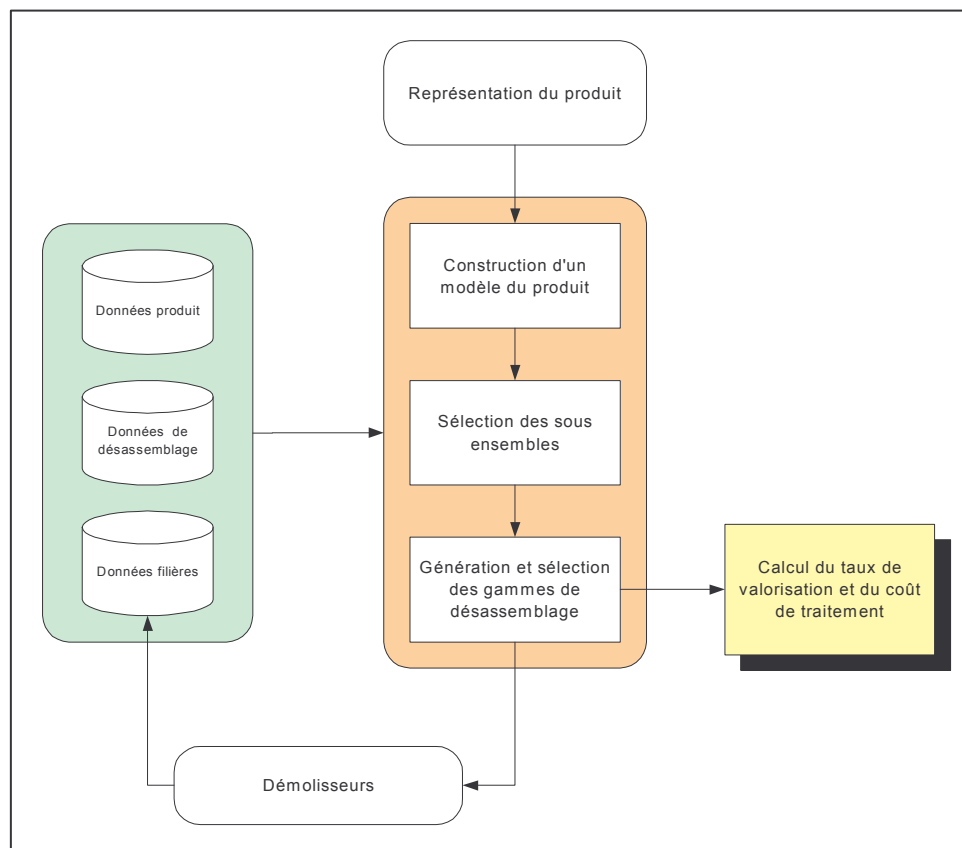


Figure 7 : Démarche d'évaluation de l'aspect économique de la valorisation

La démarche est relativement semblable à celle retenue par C. Coppens pour l'AVF [COPPENS 99].

2.1.2. Evolution de la réglementation

Le schéma précédant (Figure 7) fait apparaître les principales composantes nécessaires à l'évaluation de l'aptitude à la valorisation : les données liées au produit et les données liées aux filières de valorisation. Il faut ajouter à ces deux paramètres la réglementation, qui fixe les seuils à atteindre. Nous allons maintenant voir les différentes évolutions possibles de ces paramètres dans le temps et leur influence sur la notion de valorisation.

La réglementation fixe les objectifs de valorisation, mais, comme toute réglementation, celle sur les VHU est amenée à évoluer au cours du temps.

La première évolution de cette réglementation est liée à la transcription de la Directive Européenne. En effet, chaque Etat membre de l'Union avait 18 mois pour transcrire la Directive en droit national. La transcription doit permettre de préciser le rôle de chaque acteur de la filière VHU, ce qui entraîne certaines précisions dans l'application de la Directive par rapport à l'interprétation qui pouvait en être faite.

Si l'on se réfère aux contraintes réglementaires liées à l'environnement, comme celles sur les emballages, nous pouvons constater qu'elles se sont régulièrement sévériées dans le temps. Il en est de même pour celles liées à l'automobile, telles que celles sur la résistance aux chocs ou sur les émissions (voir Figure 8).

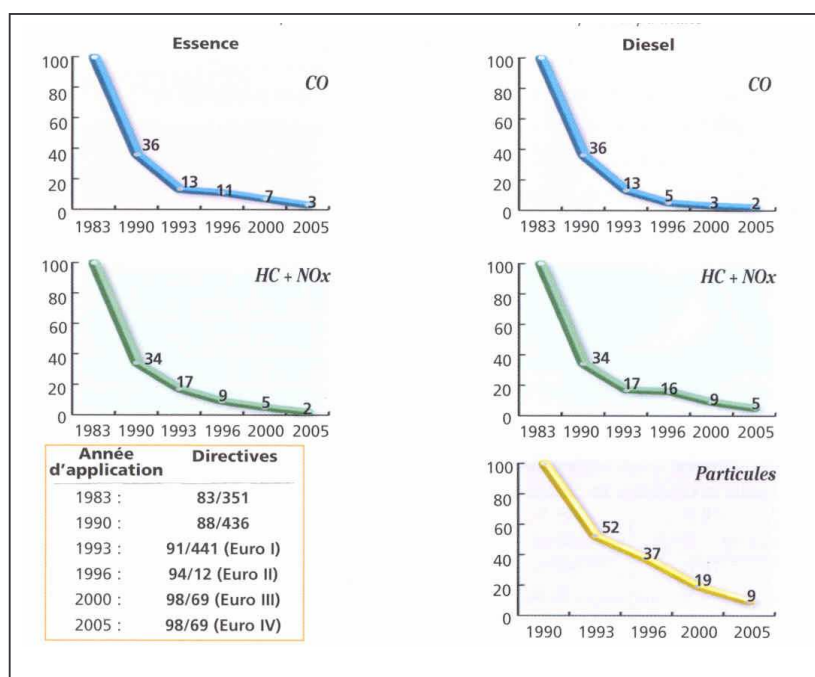


Figure 8 : Evolution de la réglementation sur les émissions automobiles en Europe

Dans le cas de la réglementation sur les VHU, la mise en application des premiers objectifs de la Directive sur le terrain fera sans doute évoluer certains paramètres. Ainsi, des modes de calcul devront être développés pour mesurer l'atteinte des objectifs de valorisation et pour mesurer le déficit de la filière de traitement dû à la reprise gratuite (s'il y a lieu). Le mode de calcul pour l'homologation sera définitivement fixé par une Directive à venir. Elle permettra de définir, entre autres, quelles catégories de véhicules devront être homologuées et à quelles dates.

Les risques liés à cette sévénisation sont d'ordre réglementaire, en cas d'évolution du mode de calcul de l'homologation, et d'ordre économique si le législateur décide d'impliquer financièrement le constructeur si la filière de retraitement des VHU ne s'avère pas rentable. Ces évolutions, si elles paraissent relativement inéluctables, peuvent néanmoins être anticipées par un suivi des actions réglementaires aux niveaux national et international.

2.1.3. Evolution des filières de valorisation

Le deuxième risque d'évolution est celui des filières de valorisation. Ce risque est d'autant plus important que ce sont ces filières qui conditionnent les préconisations de conception et les hypothèses de calcul de l'aptitude à la valorisation. Les deux axes potentiels d'évolution des filières de valorisation sont liés à l'aspect technologique des installations et à la viabilité économique des filières.

Ainsi, l'apparition d'une nouvelle technologie de traitement peut radicalement modifier la notion de valorisation. Ce fut le cas lorsque le Groupe Galloo a présenté sa technologie de tri des polyoléfines dans les résidus de broyages [DE FERAUDY 00]. Cette technologie, à l'étude depuis plusieurs années, a été éprouvée et est, d'après Galloo, économiquement viable. Elle offre une alternative au démontage des pièces en polyoléfine qui était envisagé auparavant. Ce nouveau processus permet donc de recycler sans démonter, et ainsi de concevoir sans contraintes de démontage. Il faut signaler que cette question du démontage des polyoléfines est un problème majeur chez les constructeurs automobile. Il n'existe pour l'instant qu'une seule installation en Europe réalisant du recyclage post-broyage, et le retour d'expérience n'est pas suffisant pour s'assurer de sa rentabilité.

De nombreuses technologies ont été développées ou sont en développement concernant le recyclage ou la valorisation énergétique. Pour le recyclage, on peut citer les études réalisées sur les plastiques [RECAP 97], les composites [VALCOR 97], les mousses de sièges [RECAP 97] ou encore le verre des pare-brise. Si ces procédés sont au point, ils ne sont pas ou très peu industrialisés n'étant pas ou peu rentables, ou ne bénéficiant pas d'approvisionnement suffisant. Il en va de même pour la valorisation énergétique. Différents procédés existent ou sont en développement pour valoriser le RB. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1.2.3.4, les débouchés possibles sont les cimentiers, la co-incinération avec des ordures ménagères [CYCLERGIE 94], ou les installations dédiées [BORIES 02].

Le cas de l'industrie cimentière est symptomatique. Suite à différentes études¹⁷, le secteur automobile a rapidement considéré les fours cimentiers comme étant une solution intéressante pour traiter la fraction combustible du RB. En effet, leur technologie, bien que contraignante du fait du cahier des charges imposé sur les produits entrant, ne génère pas de déchets. Ce qui a conduit PSA Peugeot Citroën, en partenariat avec la CFF¹⁸, à mener des travaux en vue d'améliorer la qualité du RB et ce dans le but de le revendre aux cimentiers en tant que combustible. La contrainte majeure est une limitation du taux de chlore, malheureusement très présent dans le RB. Les constructeurs tendent ainsi à limiter la présence de composés chlorés dans leurs véhicules (cette contrainte n'est toujours pas réglementaire) en cherchant des solutions de substitution. Il s'agit bien ici d'une préconisation issue des filières. Malheureusement, en 2000, les cimentiers ont été très sollicités pour traiter un déchet arrivant en grande quantité lié à l'affaire de la vache folle : les farines animales [GROSRIECHARD et al. 02]. Les cimentiers sont rémunérés pour traiter ce déchet. L'alimentation des fours cimentiers en RB est ainsi devenue marginale, posant de nouveau aux constructeurs le problème de la valorisation énergétique des résidus de broyage.

Cet exemple montre bien l'influence des filières sur les préconisations, mais également les incertitudes liées à ces filières et dues aux nombreuses fluctuations sur le « marché » des déchets.

¹⁷ PSA Peugeot Citroën a mis en œuvre, en collaboration avec la Compagnie Française des Ferrailles et le cimentier VICAT, un site pilote de traitement des VHU à Saint-Pierre-de-Chandieu, dans le Rhône. L'un des objectifs était de produire un combustible de substitution pour le cimentier VICAT.

¹⁸ CFF : Compagnie Française des Ferrailles.

Le dernier aspect des incertitudes liées aux filières de valorisation est l'évolution du coût de mise en décharge. Ce coût est en effet un paramètre très important pour l'équilibre économique des filières. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 1.2.1, les décharges classiques doivent fermer à partir du 1^{er} juillet 2002, ce qui a théoriquement pour conséquence de destiner les déchets aux décharges pour déchets spéciaux dont le coût est beaucoup plus élevé. Cette réglementation a pour l'instant beaucoup de mal à entrer en vigueur, car les solutions de substitution à la mise en décharge n'existent pas (à l'heure de la mise en application de la Directive, la moitié des décharges concernées sont encore ouvertes [BUFFIER 02]). Néanmoins, lorsque toutes les décharges seront aux normes, les coûts de la mise en décharge vont très certainement augmenter, ce qui pourrait avoir une influence importante sur l'ensemble de l'économie de la filière.

2.1.4. Evolution du produit automobile

Les incertitudes à l'égard de l'évolution du produit sont liées aux évolutions technologiques ayant une forte influence sur la composition en matière du véhicule.

Actuellement, l'une des motivations principales de l'évolution des matériaux est l'allègement, principalement dû aux travaux sur la réduction de la consommation des véhicules, ainsi qu'à la réglementation sur les émissions, au CAFE¹⁹, etc.

Les bureaux d'études analysent des solutions d'allègement, telles que les éléments de carrosserie en plastique (thermodurcissable et thermoplastique), les vitrages organiques, mais aussi le remplacement d'éléments de carrosserie ou de structure par de l'aluminium, ou encore l'utilisation du magnésium [MEDINA 01], [MEADER et al. 98].

L'apparition de nouvelles technologies, telles que les commandes de freins ou de direction électriques, dites « by wire », qui font disparaître certaines fonctions mécaniques, ou encore l'augmentation des fonctions électriques ou l'électronique embarquée, peuvent également avoir une influence sur la composition du véhicule.

En regardant à plus long terme, nous pouvons également citer les systèmes de propulsion hybride (thermique/électrique) ou les piles à combustibles.

¹⁹ CAFE : Corporate Average Fuel Economy, norme américaine sur la consommation de carburant.

Toutes ces solutions technologiques feront évoluer la composition du véhicule. Et même si la solution peut paraître bonne en termes de valorisation de manière isolée, elle peut s'avérer négative si l'on considère le véhicule dans son ensemble. Prenons le cas de l'aluminium qui est utilisé en substitution de l'acier. Les deux matériaux ont la même aptitude au recyclage. Mais la perte de poids engendrée par l'utilisation de l'aluminium fait augmenter la part des autres matériaux, qui eux ne sont pas autant recyclables. Ce qui a pour effet de diminuer le taux de valorisation global du véhicule.

2.1.5. Quelles évolutions possibles de la valorisabilité ?

D'une manière générale, la notion d'aptitude à la valorisation peut être définie comme la capacité d'un véhicule à être traité par des filières de valorisation. Ainsi, pour analyser l'aptitude d'un véhicule à être valorisé, il faut comparer les caractéristiques de ses composants, en termes de matière et d'architecture, aux capacités des filières à les traiter, aussi bien du point de vue technique qu'économique. Comme le précise Gaucheron [GAUCHERON 00], cela revient à définir la notion de valorisation comme étant le passage d'un produit en fin de vie dans un process de valorisation. Pour pouvoir qualifier cette aptitude à la valorisation, il faut mettre en regard les capacités du process avec les caractéristiques du produit. Pour juger de la corrélation entre le produit et le process, la réglementation nous fournit différents critères : de manière explicite, avec l'interdiction de certaines substances et en fixant des taux de valorisation, et de manière implicite avec le coût de traitement. Dans le cas du taux de valorisation, la réglementation fournit différentes définitions pour l'homologation et pour la valorisation sur le terrain, ainsi que des seuils minimaux à atteindre. Ainsi, la recyclabilité, ou valorisabilité au sens large, est donc la mesure de la corrélation entre le produit et le process à l'instant t.

Mais la véritable difficulté de ce problème est liée à un autre élément : le temps. En effet, la durée de vie moyenne d'un véhicule est actuellement comprise entre 12 et 15 ans. Ce qui signifie que les véhicules conçus aujourd'hui sur des critères et avec des préconisations issues de l'analyse des filières actuelles ne passeront dans ces filières que dans 15 ou 20 ans.

Cette situation nécessite de savoir faire un travail prospectif et d'être en mesure d'émettre des hypothèses sur l'avenir. Dans ces conditions, ce sujet devient un problème stratégique pour l'entreprise. Pour définir sa stratégie, l'entreprise doit pouvoir être en mesure d'identifier une

ou plusieurs orientations parmi tous les scénarios possibles de l'évolution de la corrélation entre le produit et le process.

La variété de ces différents futurs possibles rend difficile une vision à long terme pour l'entreprise. Face à ces différents cas envisageables, quelle est la meilleure option d'intégration de la notion de valorisation ? Nous allons voir que cette question est essentielle au vu de la complexité du processus de conception et des processus à mettre en place pour assurer une intégration pérenne dans ce processus.

2.1.6. Conclusion

L'évaluation de l'aptitude à la valorisation peut être réalisée de différentes manières selon le type de résultats souhaité, depuis un calcul simple jusqu'à une simulation très complexe. Plus le mode de calcul sera évolué, plus il permettra de maîtriser l'aptitude à la valorisation du produit. Dans tous les cas, cette évaluation nécessite d'avoir une connaissance exhaustive des constituants du produit étudié. Mais la complexité de la notion de valorisation est surtout liée à l'évolution dans le temps des éléments qui la définissent. Ces évolutions génèrent de l'incertitude par rapport à la notion même de valorisation et donc par rapport au choix du mode de calcul le plus approprié vis-à-vis du contexte et à ses futures transformations.

2.2. Complexité du processus de conception

La prise en compte d'une nouvelle contrainte dans l'entreprise passe par une analyse de l'organisation et des méthodes de travail de celle-ci. Dans le cas de la valorisation des véhicules en fin de vie, la contrainte est liée au produit. Nous allons nous intéresser au processus de conception et à l'ensemble des éléments qui y sont liés, car l'une des spécificités du paramètre recyclage est de nécessiter la prise en compte de l'intégralité des composants du véhicule. Or, le produit automobile est un produit très complexe, composé de plus de 3500 pièces, avec une multitude de variantes. Le processus de conception est à la hauteur de la complexité du produit. Nous allons passer en revue les différents aspects de ce processus, c'est-à-dire son organisation, ses supports méthodologiques et les systèmes d'information permettant de gérer l'ensemble.

2.2.1. Structure organisationnelle

La structure organisationnelle de la conception d'un véhicule est fondée sur la notion de projet. Comme le décrit Midler [MIDLER 92], un projet est constitué d'une équipe qui va suivre le développement d'un véhicule du début à la fin, c'est-à-dire de la prise de décision par les dirigeants de lancer un nouveau véhicule sur le marché à la livraison du premier véhicule au client. Cette équipe est assistée par des personnes détachées par les différents métiers : les métiers de conception (carrosserie, moteur, etc.), mais aussi des métiers tels que la qualité, les achats, etc. A ces métiers, il faut ajouter les équipementiers, qui sont des acteurs majeurs de la conception. Ainsi, la conception d'un véhicule mobilise, chez PSA Peugeot Citroën, entre 300 et 600 personnes.

L'organisation chez PSA Peugeot Citroën s'articule autour de deux entités : les plates-formes et les projets, les plates-formes regroupant les projets.

2.2.1.1. Les plates-formes

Le terme de « plate-forme » regroupe deux notions : une réalité physique et un concept d'organisation (Figure 9).

D'un point de vue physique, les plates-formes correspondent à des bases véhicule. Une base véhicule est composée du soubassement, du groupe motopropulseur, de la transmission, des liaisons au sol, etc.

En termes d'organisation, elles permettent de regrouper différentes équipes projet sous la responsabilité d'une direction de plate-forme.

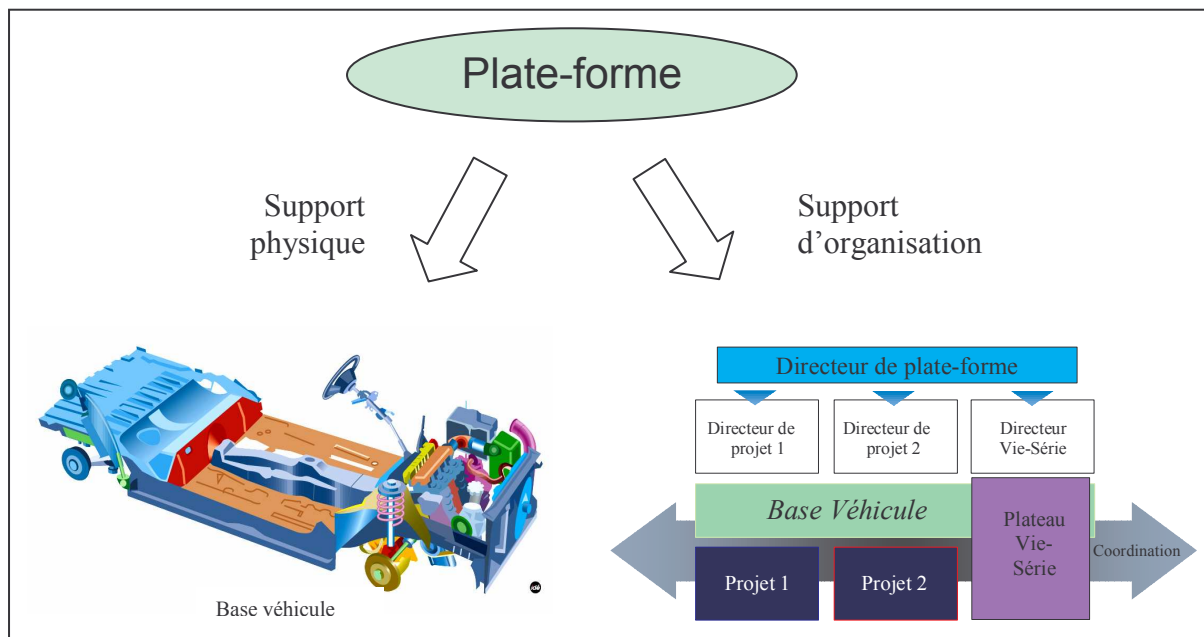


Figure 9 : La plate-forme

Les plates-formes sont au nombre de quatre et correspondent chacune à un type de véhicule :

- la Plate-Forme 1 (PF1) : petits véhicules ;
- la Plate-Forme 2 (PF2) : véhicules de milieu de gamme ;
- la Plate-Forme 3 (PF3) : grands véhicules ;
- la Plate-Forme Coopération (PFC) : monospaces et utilitaires.

Chaque plate-forme dispose de sa propre équipe projet, entièrement dédiée à son développement. Cette équipe doit également assurer la cohérence entre la plate-forme et les différents projets véhicules développés sur cette même base.

Il existe une cinquième plate-forme (qui découle de la notion d'organisation des plates-formes) qui n'est pas associée à un type de véhicule :

- La Plate-Forme Organe (PFO) : moteurs, boîtes de vitesses et liaisons au sol.

Cette plate-forme regroupe le projet de développement des organes mécaniques. Ces projets sont réalisés de manière indépendante par rapport au projet véhicule.

Cette notion de plate-forme implique qu'une partie significative du véhicule n'est pas développée par le projet, mais en parallèle ou en amont de celui-ci.

2.2.1.2. L'équipe projet

L'équipe projet est constituée d'un directeur de projet, assisté de plusieurs adjoints (coût, qualité, etc.), d'un responsable conception véhicule et d'un responsable technique (Figure 10). Le responsable conception a en charge les métiers de nature fonctionnelle, c'est-à-dire les métiers qui définissent les fonctions et les prestations à fournir. Ces métiers sont essentiellement des métiers de synthèse, tels que l'architecture, la thermique véhicule, la dynamique véhicule, l'acoustique, etc.

Le responsable technique a en charge les métiers de nature organique, c'est-à-dire les métiers qui traduisent les fonctions en organes en apportant des solutions concrètes. Ces métiers sont ceux qui définissent les différentes parties physiques du véhicule. Par exemple, les équipements intérieurs, extérieurs, la structure et les ouvrants, les liaisons au sol, etc.

Ces métiers sont regroupés en Zones de Travail en Commun (ZTC). Les ZTC sont des lieux géographiques où sont rassemblés les équipes métiers (produits et process), les fournisseurs et toute personne qui travaille en ingénierie simultanée sur la partie organique du projet véhicule. Ces ZTC sont sous la direction d'un Pilote Produit Process (PPP). Le PPP est le responsable opérationnel de la définition détaillée et du développement organique d'un sous-ensemble du véhicule. Lors de la conception, le véhicule est découpé en lots de conception. Ces lots sont répartis dans les différentes ZTC. Chaque lot est sous la responsabilité d'un chef de section.

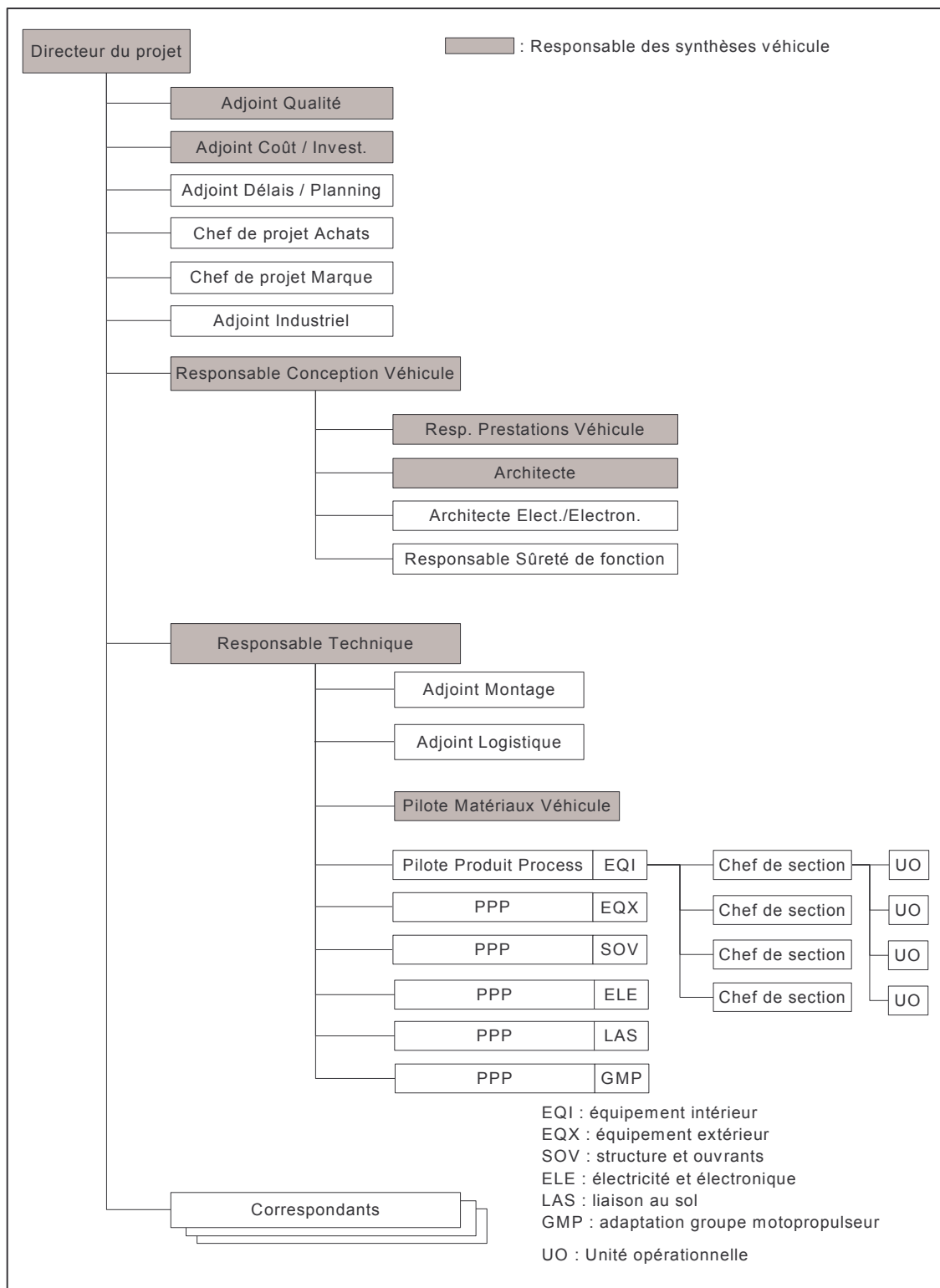


Figure 10 : Organigramme d'un projet

2.2.2. Supports méthodologiques

Les différents acteurs « projet » étant identifiés, et plus particulièrement ceux travaillant sur les synthèses véhicule, nous allons voir les principaux supports méthodologiques de cette équipe projet.

PSA Peugeot Citroën utilise trois principaux supports méthodologiques pour modéliser et structurer le processus de conception : l'Ingénierie Système Automobile (ISA), le Processus de Conception Produit Process (PCPP), le Schéma Opérationnel de Développement (SOD). Ces trois supports méthodologiques sont ici présentés séparément bien qu'ils soient profondément interdépendants.

2.2.2.1. L'Ingénierie Système Automobile

L'Ingénierie Système Automobile (ISA) est une démarche qui permet d'exprimer un problème « complexe » et de le résoudre. Cette démarche intègre toutes les disciplines impliquées dans le cycle de vie d'un système en tenant compte des différents besoins, pour pouvoir développer une solution à la fois économique, performante et satisfaisant tous les points de vue de toutes les parties prenantes (clients, utilisateurs, états, fabricants, projets, réparateurs).

La définition de l'Ingénierie Système Automobile est la suivante : « Approche interdisciplinaire coopérative pour le développement progressif et la vérification d'une solution optimisée satisfaisant aux attentes d'un client. » [IEEE 98]

Les grands principes de l'Ingénierie Système Automobile chez PSA Peugeot Citroën sont les suivants [ISA 99] :

- décomposer successivement le problème en problèmes de plus en plus simples ;
- confier chacun de ces problèmes simples à une équipe multi-métiers animée par un responsable garant de la solution apportée ;
- valider les solutions « petit à petit » et les assembler au fur et à mesure pour obtenir finalement la solution au problème posé.

De plus, il faut :

- prévoir à chaque étape les conditions d'intégration de la solution définie ;

- valider le passage à chaque étape d'intégration par des essais selon les modalités définies en conception.

La représentation du processus de conception dans le cadre de l'ISA est le cycle en V (Figure 11). Le cycle en V est décomposé en deux branches et quatre strates. La branche descendante du V correspond à la démarche de conception/spécification, partant des prestations client pour arriver aux définitions de composants, et s'appuyant sur une décomposition fonctionnelle, puis organique du véhicule. La branche remontante correspond à une démarche d'intégration/validation fondée sur une remontée des réalisations partant du particulier (composants) pour arriver au général (véhicule).

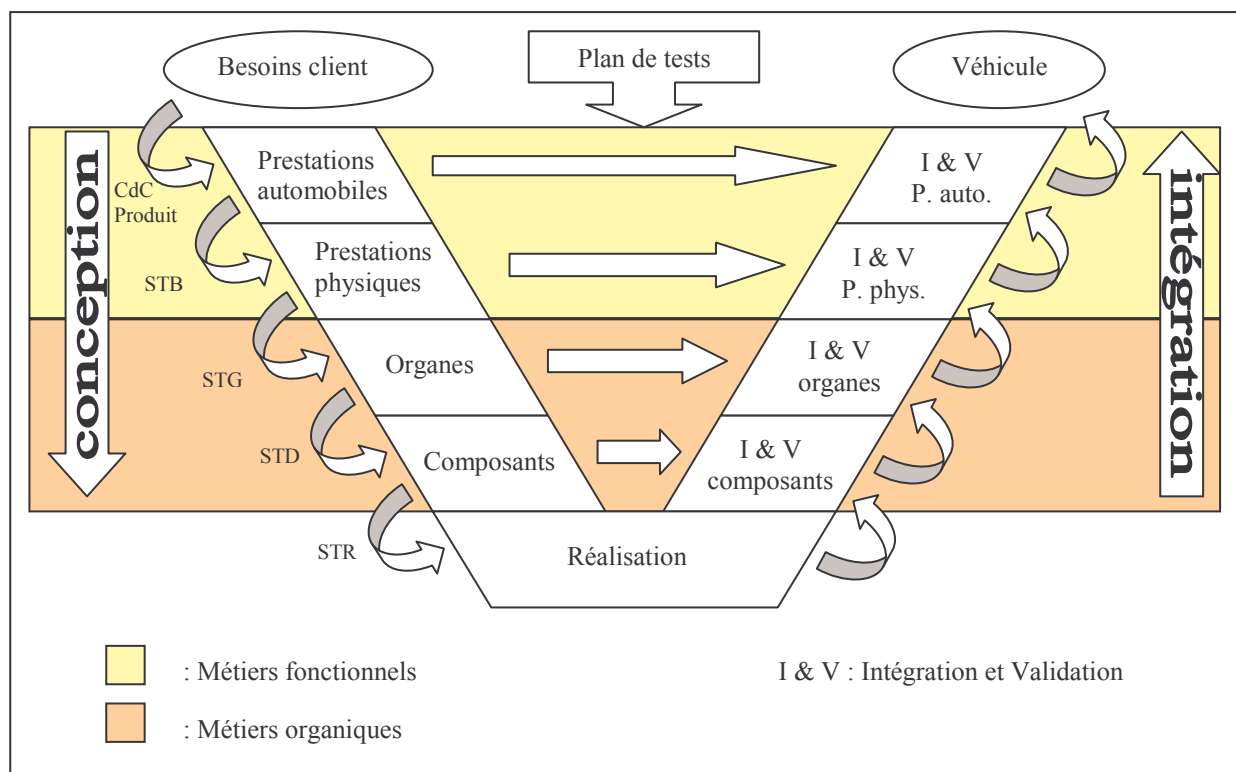


Figure 11 : Cycle en V

Dans la branche de conception, chaque passage de strate correspond à un dossier : ce sont les spécifications techniques (STx).

- **CdC Produit (Cahier des Charges Produit) :** il regroupe l'ensemble des attentes client, formalisées sous forme de Prestations Client, ainsi que l'ensemble des objectifs marketing et les contraintes projet ;

- STB (Spécifications Techniques de Besoins) : elles définissent les exigences techniques du véhicule ;
- STG (Spécifications Techniques Générales) : elles définissent les exigences techniques des organes composant les divers sous-systèmes ;
- STD (Spécifications Techniques Détaillées) : elles spécifient les composants des différents organes ;
- STR (Spécifications Techniques de Réalisation, ou dossiers de réalisation) : elles contiennent toutes les informations nécessaires à la réalisation des composants (plan, etc.).

Les STx sont accompagnées de dossiers de justification et d'un plan de tests, qui correspondent aux données d'entrées de la phase d'intégration/validation pour la même strate.

Chaque étape (ou strate) du processus de conception se décompose en processus d'ingénierie. Ces processus peuvent être représentés comme suit (Figure 12) :

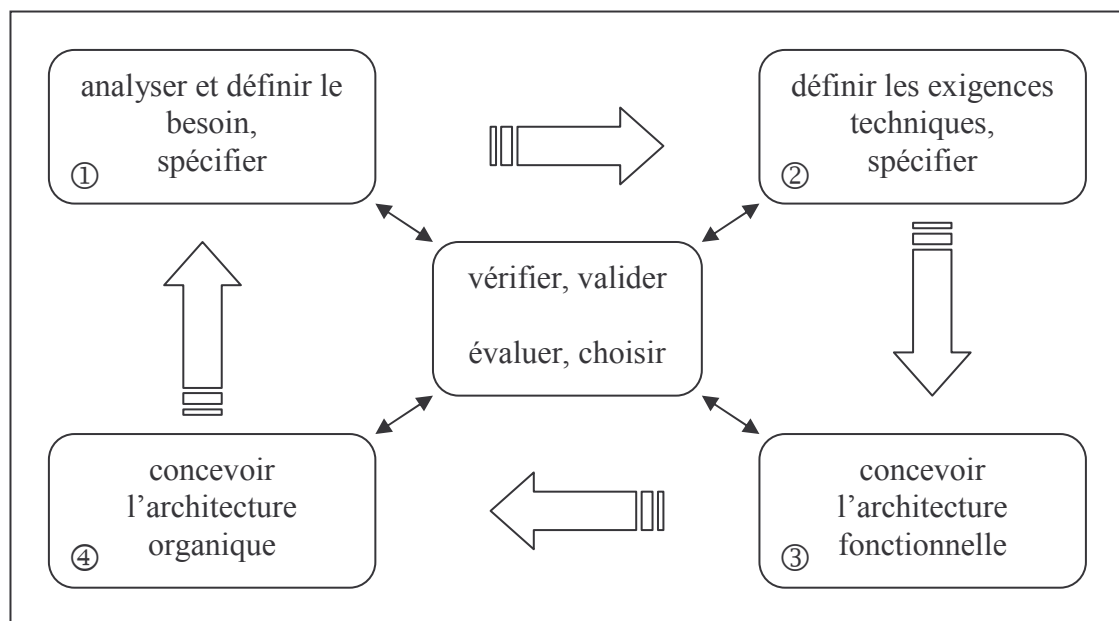


Figure 12 : Les processus d'ingénierie

Chaque processus génère les documents qui permettront de passer à la strate suivante.

Les processus sont exécutés de façon itérative, ce qui permet de fournir des informations aux strates inférieures pour démarrer leurs propres processus, favorisant ainsi la simultanéité des tâches.

2.2.2.2. Le Processus de Conception Produit Process

Le Processus de Conception Produit Process est une représentation, sous la forme d'une suite séquentielle de tâches à réaliser, du processus de conception d'un véhicule et de son process de fabrication. Cette représentation permet de formaliser les processus des différents métiers et de les rattacher aux différentes tâches du processus de base (PCPP) (Figure 13).

La modélisation des processus métier permet d'identifier les données d'entrée et de sortie des différentes tâches à effectuer par le métier. Elle permet également de visualiser les données d'entrée devant être récupérées auprès de certains métiers, et les données de sortie devant être fournies aux autres métiers.

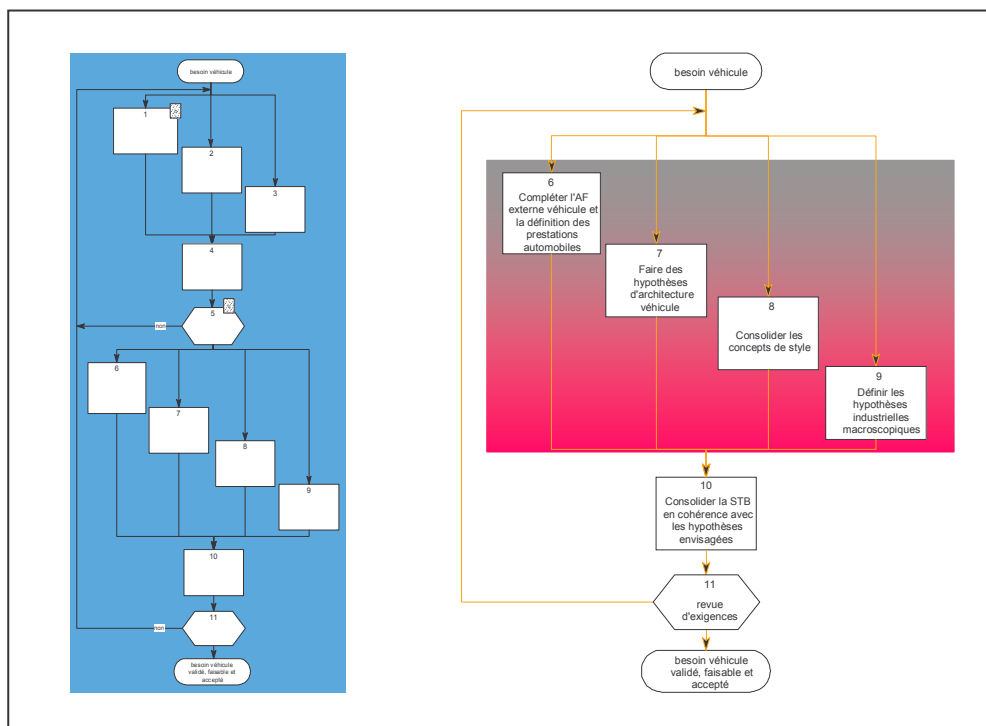


Figure 13 : Exemples de représentation de processus métier

2.2.2.3. Le Schéma Opérationnel de Développement

Une fois le PCPP mis en place et les différents processus métier rattachés à ce dernier, il faut positionner ces opérations dans le temps ; c'est le rôle du schéma opérationnel de développement (SOD).

Le schéma opérationnel de développement est une mise en planning « type » du processus de conception et des activités de pilotage. Il est composé :

- d'éléments temporels appelés « phases », qui sont des laps de temps séquentiels qui ne se chevauchent pas ;
- de points de décisions, appelés « jalons » ou « revues », qui permettent de contrôler et de maîtriser la progression correcte du projet. Chaque phase est séparée de la suivante par un jalon.

Les différentes phases sont les suivantes :

- l'avance de phase : elle débute par l'ouverture du projet. C'est la phase de construction du projet. C'est au cours de cette période que vont être définis les prestations automobiles, les objectifs et les contraintes du projet, ainsi que l'organisation du projet. Cette étape se termine par le choix du concept à développer. Elle dure environ un an.
- la phase préliminaire : cette phase correspond à la conception du véhicule. Le style, le dimensionnement ainsi que l'architecture fonctionnelle et organique sont définis pendant cette phase. Elle se termine au bout d'un an par l'approbation du style.
- la phase de développement : c'est au cours de cette phase, qui dure environ deux ans, que se déroule le développement du produit et du process. Les définitions détaillées des organes vont être réalisées, la conception sera validée et le process sera définir et valider. La dernière étape de cette phase est le démarrage de la série, qui clôt le projet.

Ces différentes phases sont représentées sur le SOD (Figure 14), ainsi que les éléments issus du PCPP (comme les différentes tâches à réaliser) et de l'ISA (comme les spécifications techniques).

Les actions des principaux métiers, comme le style, le produit, les achats, l'architecture, la qualité, l'industrialisation, la conception, etc., vont également être positionnées sur le SOD.

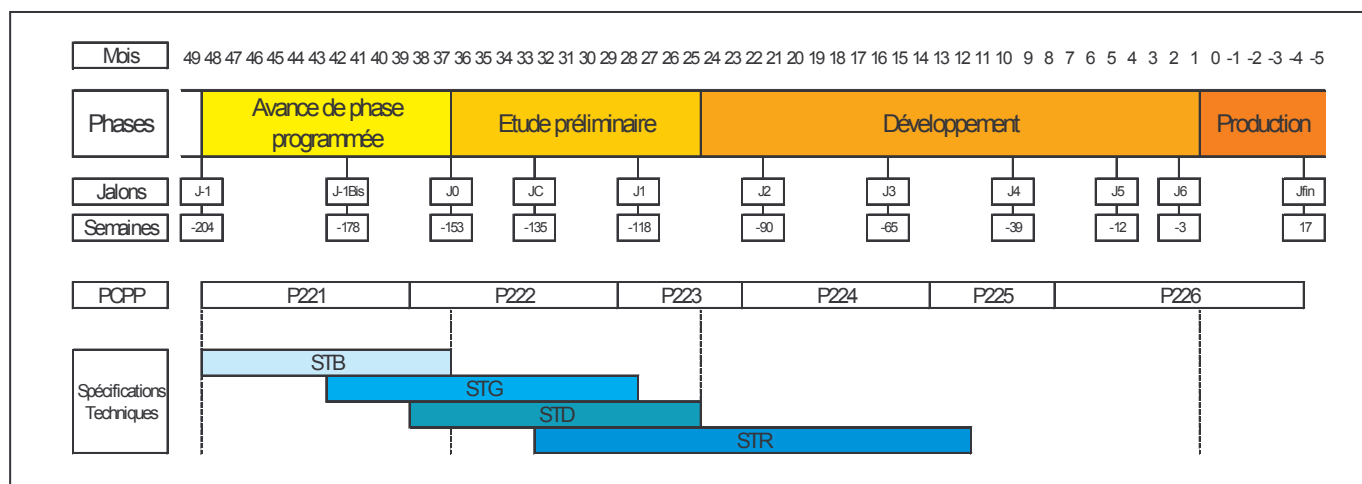


Figure 14 : Schéma Opérationnel de Développement

Une phase n'apparaît pas sur le schéma ci-dessus : il s'agit de l'avance de phase générique. Elle se situe en amont de tous les projets, c'est la phase d'exploration des concepts et de validation des innovations. Elle ne fait pas partie des projets de développement des véhicules, mais elle est une source d'informations et de données pour les projets.

Ainsi, le calendrier (planning) d'un projet est établi à partir du schéma opérationnel de développement générique (SOD), de l'enchaînement des tâches (PCPP) et des paramètres propres du projet.

2.2.3. Les systèmes d'information

Le processus de conception génère et utilise une quantité très importante de données, en particulier celles liées au produit. Les représentations possibles d'un produit sont nombreuses. Nous pouvons citer, entre autres, les nomenclatures, les plans (2D), les maquettes numériques (3D), les maquettes physiques, etc.

Les systèmes d'information liés à la représentation du produit et à la conception sont en cours de restructuration chez PSA Peugeot Citroën. A terme, ils doivent permettre de gérer en temps réel le développement du véhicule et la mise à disposition des données pour tous les acteurs du projet. Nous allons faire un rapide panorama de ces systèmes d'information, en

positionnant les outils liés à la conception dans l'ensemble des systèmes d'information du groupe, puis nous détaillerons ceux liés spécifiquement à la conception. Enfin, nous verrons les outils connexes ou supports à la conception.

2.2.3.1. Gestion des processus de l'entreprise

PSA Peugeot Citroën a choisi d'utiliser un ERP (Enterprise Resource Planning) comme support de gestion global. Un ERP peut être défini sommairement comme un progiciel intégré permettant de gérer et planifier les ressources financières, techniques et humaines de l'entreprise. L'ERP permet ainsi de traiter un champ très large, depuis le processus de définition et de développement du produit jusqu'à la relation client.

2.2.3.2. Conception des véhicules : le projet INGENUM

Le projet INGENUM (ingénierie numérique) a pour objectif de regrouper dans un système cohérent toutes les applications intervenant dans la conception produit/process. Il remplacera les applications actuelles qui fonctionnent dans une logique de conception séquentielle, pour passer à une logique de conception concourante.

Le déploiement de ce projet est prévu en trois étapes principales :

- Etape 1 :

Déployer la maquette numérique, dans le cadre de l'entreprise étendue (PSA Peugeot Citroën, fournisseurs et partenaires) ;

Mettre en place le modèleur CATIA en carrosserie (uniformisation avec les autres métiers) ;

Déployer la maquette numérique sous VPM (Virtual Project Manager).

- Etape 2 (en cours) :

Définir et mettre en place le concept de nomenclature progressive dans un référentiel partagé et assurer les interfaces avec les applications du domaine de la fabrication et du commerce ;

Travailler en entreprise étendue (CAO conférence, consultation de la maquette numérique à travers le portail de la relation fournisseur).

- Etape 3 :

Construire l'usine numérique et élargir le référentiel aux données du process ;
Intégration du domaine de l'électronique embarquée.

Nous allons développer les principaux outils mis en place dans le cadre d'INGENUM.

a) Virtual Project Manager

La partie « Virtual Project Manager » (VPM) a été déployée dans le cadre d'INGENUM. Cet outil (progiciel) est destiné à la gestion des objets CAO. VPM contient donc l'arborescence des différents ensembles fonctionnels et gère le stockage des définitions CAO des pièces conçues ainsi que les maillages de ces pièces utilisées par le domaine du calcul. Les travaux actuels sur cet outil concernent la co-conception et la gestion des données CAO en « entreprise étendue » avec les fournisseurs.

b) Référentiel article

Le référentiel article est une base de données regroupant toutes les informations sur un article conçu, fabriqué ou vendu. Le référentiel article est le point central qui doit permettre de rassembler les données des différents métiers dans la logique de la conception concourante et contenir les données nécessaires aux achats, à la gestion/finance, etc. Ces données sont stockées et organisées dans le référentiel article de manière à assurer l'accessibilité des « bons paramètres » aux « bons acteurs ». La définition des attributs d'un article dépend donc de la structure organisationnelle à laquelle il appartient et des flux de gestion dans lesquels il intervient.

c) Langage Commun Définition Véhicule

Les nomenclatures de définition des véhicules ne sont pas les mêmes suivant les phases de leur cycle de vie. Il existe en effet des nomenclatures spécifiques pour répondre aux besoins des activités telles que la conception, le commerce ou la fabrication. Cependant ces définitions sont en relation les unes avec les autres. La gestion et la définition de ces données seront reprise dans le cadre de la refonte actuelle des systèmes d'information. La définition des différentes variantes d'un modèle de véhicule sera progressivement intégrée à ces projets en remplacement des systèmes actuels.

Le Langage Commun Définition Véhicule (LCDV) est utilisé pour décrire les véhicules du groupe PSA Peugeot Citroën . Il permet :

- De créer, d'exploiter et d'échanger toutes les informations relatives à la description d'un véhicule ;
- De décrire les propriétés de chaque modèle, à savoir son type de motorisation, sa puissance fiscale, etc. ;
- De structurer, en aval, les nomenclatures techniques nécessaires à la conception du véhicule et du process, puis à sa fabrication ;
- De représenter commercialement un véhicule.

Les besoins en prestation véhicule sont, dans un premier temps, définis par le marketing, qui élabore les variantes des véhicules à mettre sur le marché. Ces définitions alimentent ce qui est appelé la partie haute de la nomenclature LCDV. La partie basse du LCDV contient la définition détaillée des ensembles techniques. Cette partie de la nomenclature fait le lien entre ces ensembles et les produits du référentiel article. Lors de chaque projet véhicule, le langage de définition est élaboré. Le LCDV est donc mis en place au cours des projets véhicules et permet de structurer la composition des différentes variantes d'un modèle.

Le LCDV est au service de deux processus de l'entreprise (Figure 15), à savoir :

- la conception produit-process (définir et se préparer à produire des véhicules) ;
- la vente des véhicules (commander et produire des véhicules).

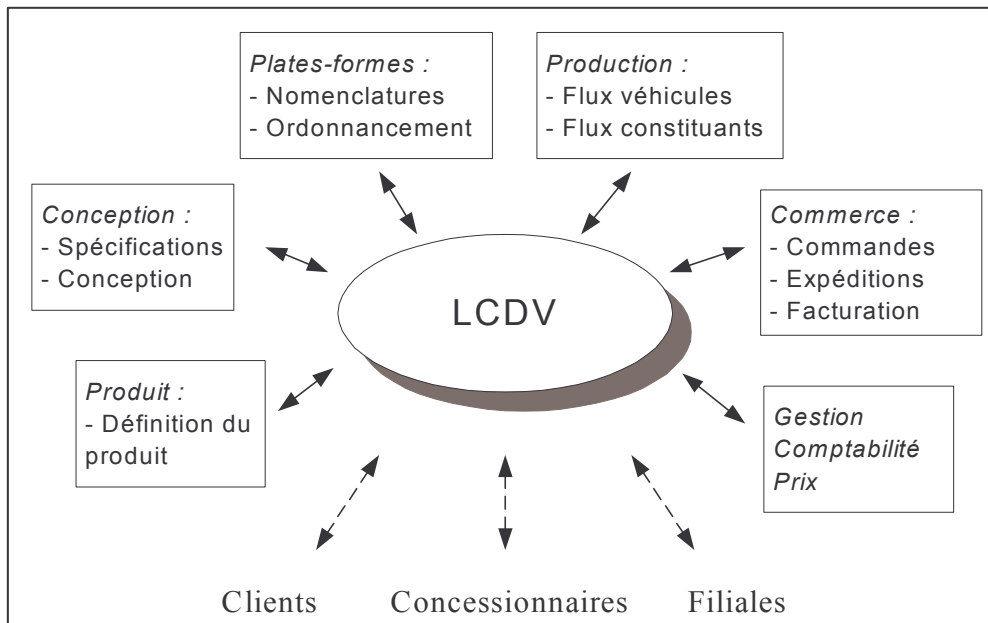


Figure 15 : Périmètre couvert par le LCDV

d) Officialisation

Ce projet est lié au projet LCDV ; il concerne le suivi et la validation des ensembles conçus. L'officialisation est divisée en une officialisation de la partie haute de la nomenclature et une officialisation de la partie basse (cas d'emplois et nomenclature partie basse). Le processus d'officialisation doit prendre en charge toute la gestion des articles conçus. La première étape est la diffusion d'une définition numérique (CAO) d'un ensemble ou d'une pièce. La diffusion rend accessible cette définition numérique aux acteurs du projet véhicule qui y sont autorisés. Le processus d'officialisation gère ensuite les modifications de ces pièces et la mise à jour de la définition numérique disponible. L'étape finale, dite d'officialisation de la définition d'une pièce, correspond à sa validation. Une fois officialisée, une pièce est figée.

2.2.3.3. Autres supports de la conception

Nous pouvons également citer d'autres supports intervenant dans les activités de conception tels que :

- Pilotage des activités d'ingénierie : projet CRISTAL

Le projet CRISTAL concerne le pilotage des activités d'ingénierie ; son objectif est de passer d'un suivi du consommé à un pilotage du reste à faire. Les points critiques des systèmes de pilotage sont la gestion des ressources humaines et la maîtrise des dépenses ponctuelles.

- Support de l'ingénierie système : DOORS

DOORS est l'outil informatique support de l'ingénierie système. Il permet la publication et la diffusion des exigences. C'est dans cet outil que sont stockés les documents de spécification technique de besoin (STB), générales (STG) et détaillées (STD). Si pour l'instant ces spécifications sont des recommandations générales, cet outil pourra servir de supports à la diffusion d'objectifs personnalisés pour chaque fonction par l'intermédiaires des spécification technique détaillées.

2.2.4. Conclusion

En conclusion, les trois aspects du processus de conception que nous venons de développer, c'est-à-dire l'organisation, les méthodes et les systèmes d'information, sont indissociables. Les différents outils que nous avons présenté ne sont que des supports génériques qui sont adaptés aux contraintes spécifiques de chaque projet. De plus, le processus de conception est en perpétuel évolution, les temps de développement imposés aux concepteurs sont de plus en plus courts (ces dix dernières années, la durée de développement d'un véhicule est passée de 5 ans à 3 ans) alors que le nombre de contraintes qu'ils ont à gérer augmente (de nouvelles prestations sont apparues, tel que la sécurité passive ou l'électronique embarquée, et des réglementations toujours plus sévères). Ce qui fait de la conception un univers qui peut être qualifié de complexe et d'hyper-contraint.

2.3. *Panorama des démarches d'intégration existantes*

Après avoir analysé les deux éléments structurant cette étude, c'est-à-dire la notion de valorisation et le processus de conception, nous allons nous intéresser aux solutions permettant de faire le lien entre ces éléments, c'est-à-dire la notion d'intégration. Nous pouvons également la définir comme l'action d'adjoindre une nouvelle activité à l'activité propre. Une démarche d'intégration englobe deux aspects : un aspect technique et un aspect managérial. L'aspect technique définit l'instrumentation (outils et méthodes) à mettre en place pour prendre en compte un nouveau critère en conception. Cette approche est souvent

qualifiée de « Design for X²⁰ ». L'aspect managérial définit le mode de management à mettre en place pour gérer le changement qu'implique la prise en compte du nouveau paramètre. Nous allons étudier comment ces deux aspects sont abordés dans la littérature. Pour finir, nous présenterons l'approche de certains métiers de l'automobile ayant des problématiques proches de la notre.

2.3.1. Aspect technique de l'intégration

L'aspect technique de l'intégration recouvre les outils, méthodes ou démarches qui sont employés pour faire prendre en compte un nouveau paramètre dans l'entreprise.

L'intégration de l'environnement dans l'entreprise et plus particulièrement l'intégration du recyclage en conception a fait l'objet de nombreux travaux, principalement dans les secteurs soumis à une réglementation environnementale contraignante comme l'automobile, les produits électriques / électroniques ou le domaine de l'emballage [BULLINGER 99], [KRIWET et al. 95], [KROLL 98]. La solution la plus répandue est l'intégration instrumentée, basée sur l'utilisation d'outils (logiciel de Design for X, guides de conception, check-lists...) et de méthodes (telles que l'ACV²¹...). Devant la recrudescence des moyens existants, des études ont été menées par des équipes de recherche dans le but de les classer par thèmes (évaluation, amélioration de la conception, sensibilisation, communication...) afin de guider les futurs utilisateurs dans leurs choix [BISTAGNINO et al. 99], [JANIN 00].

Nous nous focaliserons ici uniquement sur les outils dédiés à la valorisation en fin de vie des produits. Nous pouvons noter que même pour ce seul aspect les thèmes abordés sont nombreux et variés.

Ces outils peuvent être classés en trois catégories : les guides d'aide à la conception, les indicateurs et les logiciels.

- Les guides d'aide à la conception

Les guides d'aide à la conception regroupent un ensemble de préconisations de conception. Ces préconisations sont regroupées en catégories, allant des préconisations les plus générales

²⁰ Dans la locution « Design for X », le X correspond à des notions telles que l'assemblage, la réparabilité, le recyclage, l'environnement, etc.

²¹ ACV : Analyse du Cycle de Vie

à des exemples concrets. Les thèmes les plus courants sont liés aux matériaux et au désassemblage des produits [AFNOR 98], [BEHRENT et al. 97], [BROWN et al. 93], [ZUMBROICH 94]. Certains travaux intègrent également dans les guides la notion de séparation et de tri pré et post broyage des matériaux [COULTER 98], [SODHI 98], ou des notions liées à l'automatisation des opérations de recyclage [KALISVAART 96].

- Les indicateurs de valorisation

Il existe deux sortes d'indicateurs : les qualitatifs et les quantitatifs. Ils permettent d'obtenir une première évaluation permettant de positionner les éléments traités par rapport à un objectif de taux ou d'aptitude à la valorisation. Les indicateurs qualitatifs sont la plupart du temps réalisés à l'aide de questionnaires ou de check-list, reprenant souvent les mêmes items que les guides d'aide à la conception. Les indicateurs qualitatifs utilisent généralement des données relativement simples, tel que la proportion des différentes familles de matériaux composant un produit, pour pouvoir réaliser des évaluations rapides (voir paragraphe 2.1.1.1).

- Les logiciels

Les logiciels regroupent souvent les deux éléments précédents [EHRENFELD et al. 97]. Ils apportent néanmoins des fonctionnalités supplémentaires [GUPTA 97]. Ils permettent de faire des liaisons avec les modèles numériques des produits, de réaliser des calculs plus complexes, par exemple sur le désassemblage (voir paragraphe 2.1.1.2). Ils sont le plus souvent orientés vers l'aide à la reconception.

Pour améliorer l'intégration de ces éléments, ces différents outils sont souvent combinés entre eux. L'une des approches les plus classiques est de proposer une méthode composée de deux outils : un guide de conception et un outil d'évaluation de la recyclabilité [WANG 94]. D'autres combinaisons plus exhaustives sont également proposées. Ainsi, David préconise la mise en place d'un modèle de représentation multi-vues, à l'aide de trois outils : une bibliothèque d'assemblage, un outil permettant l'estimation de l'efficacité économique et écologique du produit en cours de conception, et un didacticiel permettant l'apprentissage des techniques de démontage [DAVID 99].

Une dernière approche est également intéressante. Il s'agit d'intégrer dans les modèles de représentation des données liées à la recyclabilité ou à la « valorisabilité » du produit [GAUCHERON 00]. Cette solution fait apparaître dans la représentation du produit des

données propres au métier à intégrer. L'objectif étant d'inciter les équipes de conception à prendre en compte ces nouveaux paramètres et à stimuler les synergies entre les métiers autour d'éléments communs. Cette méthode peut paraître difficile à mettre en place à court terme dans une organisation de conception telle que celle de PSA Peugeot Citroën car elle nécessite de complètement repenser le système de représentation du produit.

Ces travaux ont souvent été développés par des équipes de recherches universitaires, sans rapport avec l'industrie. Comme le souligne Janin, Les exemples d'utilisations de ces outils dans l'industrie sont rares [JANIN 00]. Malgré cet état de fait, la mise en place d'outils d'évaluations est une nécessité dans la mise en place d'une démarche d'intégration de la notion de valorisation dans un processus de conception. Ne serait-ce que pour valider l'atteinte des objectifs de valorisation réglementaires.

2.3.2. Aspect managérial de l'intégration

Intégrer un nouveau domaine dans une organisation telle qu'une grande entreprise implique non seulement de s'interroger sur les aspects techniques et instrumentaux, mais aussi sur le mode de management à déployer pour gérer ce changement de manière optimale. Dans le domaine du changement organisationnel, la littérature est riche de propositions, et nous allons voir quelles sont les orientations managériales associées à l'intégration d'un nouveau domaine.

Foulard, dans un ouvrage sur la modélisation en entreprise, montre que l'instauration d'un changement au sein d'une entreprise nécessite d'agir à différents niveaux. En plus des actions à mener sur l'organisation, il insiste sur la nécessité d'agir simultanément sur les méthodes de travail et sur les différents acteurs de l'entreprise [FOULARD 94]. En effet, s'il est reconnu que la modification de l'organisation interne d'une société participe à celle du cadre de référence de ses acteurs et représente ainsi un moyen efficace pour signifier une rupture. Un changement de cap dans les pratiques reste en effet insuffisant pour ancrer le changement dans le quotidien de l'entreprise [PROBST 92].

Pour instaurer un tel changement, plusieurs possibilités se présentent aux managers d'une entreprise : les approches Top-Down, les approches Bottom-Up et les approches intermédiaires. Nous allons en présenter les avantages et inconvénients.

2.3.2.1. Les approches Top-Down

Une approche Top-Down se caractérise par la déclinaison d'une stratégie définie par la direction de l'entreprise en actions à travers les différentes structures fonctionnelles et hiérarchiques de l'entreprise. Cette approche est issue d'une volonté hiérarchique forte et correspond à l'identification d'enjeux cruciaux pour la pérennité de l'entreprise.

L'avantage majeur de ce type d'approche réside dans l'implication forte de la hiérarchie (à l'origine de la démarche) et se traduit donc par la mobilisation de moyens adaptés (techniques, humains et financiers) et par la mise en place d'un suivi actif des actions.

Du fait des difficultés relatives à la prise en compte de la notion de valorisation au sein des entreprises du secteur automobile (de par le manque de connaissances, la complexité et l'évolution permanente du contexte réglementaire et de son interprétation), ce type d'approche ne nous semble pas répondre de manière pertinente au problème posé et nous paraît plus adapté à la mise en place d'un changement relevant d'un domaine plus mature (pour lequel les connaissances préexistent et peuvent en conséquence être rapidement traduites en actions concrètes).

2.3.2.2. Les approches Bottom-Up

Les approches Bottom-Up sont construites sur un modèle dont les flux d'informations sont opposés aux précédents, c'est-à-dire que la stratégie globale est construite à partir des savoir-faire émergents de l'entreprise. L'avantage essentiel de ce type d'approche du management est son aspect concret, de terrain, dont les effets peuvent être mesurés rapidement à des échelles locales. En contrepartie, la difficulté est de construire une démarche globale, cohérente au niveau de l'entreprise, à partir des différents savoir-faire, c'est-à-dire de réussir à identifier, parmi la diversité de ses savoir-faire locaux, les éléments cruciaux sur lesquels l'entreprise pourra s'appuyer à court terme et également élaborer une vision stratégique pour le long terme. Du point de vue de l'acceptation de la démarche par les acteurs de l'entreprise, une telle approche remporte d'autant plus facilement l'adhésion du personnel que leur activité quotidienne est prise en compte, et donc implicitement valorisée, dans l'élaboration d'une stratégie plus globale.

La critique que l'on peut faire de ce type d'approche est paradoxalement son caractère très concret, pragmatique, qui permet d'être opérationnel sur le court terme mais qui peut limiter la capacité de l'entreprise à construire une stratégie viable sur le long terme.

2.3.2.3. Les approches intermédiaires

Les deux approches précédentes proposent des solutions de management unidirectionnelles, qui comportent les atouts et les inconvénients que nous avons pu identifier et ne sont donc que partiellement satisfaisantes. En s'inspirant de ces deux types d'approches, Mintzberg, dans un article sur les cycles de changement dans les organisations [MINTZBERG et al. 92], présente deux formes majeures du changement dans les organisations : les formes déductives et inductives, qui s'appliquent elles aussi aux différents niveaux de l'entreprise.

Mintzberg insiste sur le fait que les changements importants sont simultanément inductifs et déductifs. Il rompt ainsi avec les visions unidirectionnelles précédentes et suggère un déroulement itératif, plus que linéaire, des processus à mettre en œuvre pour réaliser un changement pérenne. Cette vision du management est en partie partagée par Nonaka, qui, s'intéressant à la gestion des connaissances, propose de s'appuyer sur une forme de management intermédiaire nommée « middle-up-down management », qui conjugue au mieux les approches inductives et les approches déductives [NONAKA 88]. Il précise en effet que les acteurs de la hiérarchie intermédiaire des entreprises occupent une position idéalement située, à l'interface entre la hiérarchie dirigeante et les équipes opérationnelles, et que ces personnes ont, de fait, une capacité importante de traduction et de communication des informations montantes aussi bien que descendantes.

Cette vision du management est une voie particulièrement intéressante pour l'intégration de la valorisation, à la fois parce qu'elle est moins « radicale » que les approches Top-Down ou Bottom-Up, mais surtout parce qu'elle réussit à combiner leurs avantages.

2.3.3. Intégration d'autres domaines : exemple des métiers « fonctionnels »

Pour alimenter notre réflexion, nous avons étudié les choix réalisés par d'autres métiers de l'automobile confrontés à une problématique similaire à la nôtre. Nous avons choisi des métiers dits « fonctionnels » ayant comme contrainte d'avoir une approche globale du véhicule. Ces métiers sont chargés de gérer certaines prestations du véhicule, telles que la masse, l'acoustique, l'aérodynamique, etc. Ces prestations sont toujours transversales et impactent différents métiers dits « organiques ». Ces derniers ont en charge le développement des éléments physiques du véhicule (organes, fonctions, pièces, etc.). Le métier recyclage s'apparente plus à un métier fonctionnel qu'à un métier organique, puisque c'est un métier

très transversal, impactant toutes les pièces du véhicule. Dans cette optique, nous présenterons ici deux métiers dont la problématique nous semble proche de celle du recyclage : le service acoustique et vibrations, et le service masse.

2.3.3.1. Service « Acoustique et Vibrations »²²

En termes d'organisation, le service Acoustique et Vibrations (ACV) est divisé en cinq pôles répondant chacun à un problème spécifique et formant le noyau dur du métier. ACV dispose également d'une équipe entièrement dévolue au problème du groupe motopropulseur (GMP). Sur les plates-formes, ACV a un responsable synthèse sur chaque projet. De plus, le service a un interlocuteur prestation par métier. Enfin, un responsable synthèse s'occupe de l'avance de phase générique.

Pour faire appliquer ses exigences, le service ACV utilise depuis longtemps l'Ingénierie Système. Ses spécifications techniques de besoins (STB) et les spécifications techniques générales (STG) sont complètes. Le passage de la STB aux STG se fait par l'intermédiaire d'une matrice de passage. Ces dernières sont rédigées en collaboration avec les interlocuteurs dans les différents métiers. Pour améliorer cette démarche, de la même manière que le service masse, ACV souhaite mettre en place une méthode de modélisation d'un véhicule cible acoustique.

Pour réaliser les synthèses véhicules, chaque métier organique dispose de ses propres moyens d'essais, le responsable synthèse devant récupérer les informations transmises par chacun. Seules certaines fonctions à problèmes sont traitées en interne par ACV.

Ainsi, le métier ACV utilise les différentes méthodes mise en place chez PSA Peugeot Citroën, telle que l'ISA, et à multiplier les experts, aussi bien dans les métiers que dans les projets, pour être le plus en accord avec le modèle d'organisation mis en place par l'entreprise.

²² Informations issues d'un entretien avec M. Marc NOLIN, responsable méthodologie chez ACV

2.3.3.2. Service « Masse »²³

Dans le cas du service « Masse », nous allons nous intéresser à une des méthodes mise en place pour répondre à l'évaluation du véhicule dans les phases amont de la conception. Le service masse a développé une méthode d'allocation et de réduction des masses. Cette méthode permet de modéliser la masse d'un véhicule ou d'un organe à partir d'un nombre limité de paramètres.

Pour obtenir une évaluation de la masse d'un véhicule à partir d'un nombre limité de paramètres, le service masse dispose d'un modèle statistique, obtenu à partir d'un échantillon de 125 véhicules, reliant la masse du véhicule à quelques grandeurs principales. Cette modélisation permet d'optimiser, en cohérence avec les règles de conception d'un véhicule, la masse du véhicule et les prestations automobiles. Le même principe est appliqué à certains organes : moteurs, boîtes de vitesses, liaisons au sol, freins / roues et, à l'avenir, structures de caisse et d'autres équipements. Cette méthode permet d'appréhender plus justement l'impact des choix d'architecture sur la masse finale des organes. Une fois l'ensemble des organes mis en équation, environ 60 % de la masse du véhicule est modélisée. Le support futur de cette méthode sera un logiciel à utilisation restreinte, nécessitant un suivi régulier (mise à jour, etc.). L'objectif principal de ces travaux est de pouvoir traiter les incohérences provenant de la traduction de toutes les demandes issues du cahier des charges du véhicule. Le même type de démarche est à l'étude pour modéliser les relations entre prix et prestations. Cette démarche de modélisation très en amont permet d'anticiper les problèmes au plus tôt et de mieux gérer les conflits entre prestations.

D'un point de vue organisationnel, le service « Masses » a un correspondant dans chaque projet, responsable de la collecte et de la synthèse des informations nécessaire au calcul de la masse du véhicule.

2.3.4. Conclusion

Le panorama des démarches d'intégration présenté ici a permis de montrer la variété des approches d'intégration (aspects techniques et managériaux). Elle permet par ailleurs de

²³ Informations issues du document : « Allocation et réduction des masses », document DOGN - interne PSA Peugeot Citroën.

mettre en lumière l'aspect embryonnaires de recherches menées dans ce domaine. L'on conçoit bien qu'une « bonne » intégration doit combiner les aspects techniques et manageriaux, et au sein de ce dernier de mixer les aspects Top-Down et Bottom-Up. L'on peut aussi affirmer aujourd'hui l'inexistence d'un modèle formalisé de démarche d'intégration « complète » satisfaisant à l'ensemble des exigences liées à la complexité de la notion à intégrer et la complexité du processus de conception.

2.4. Problématique

Pour répondre à la question qui nous est posée par PSA Peugeot Citroën, à savoir « comment prendre en compte la notion de valorisation des véhicule dès la conception », nous avons analysé le contexte de la valorisation des véhicules en fin de vie, le processus de conception de l'entreprise et les solutions proposées dans la littérature.

Nous avons pu constater que la notion de valorisation est très complexe, ce qui est dû à plusieurs éléments. Tout d'abord, la notion de valorisation est liée à de nombreux facteurs : la réglementation, les filières de valorisation et le produit automobile. Ensuite, la valorisation est une problématique à long terme, du fait de la durée entre la conception d'un véhicule et sa fin de vie. Pendant ce laps de temps, les critères définissant la valorisation sont susceptibles d'évoluer. Cela nous a conduit à envisager différents scénarios d'évolution possibles de la valorisation des véhicules hors d'usage. Ces scénarios impliquent des risques différents pour l'entreprise, et donc des exigences différentes en termes de moyens à mettre en œuvre pour y répondre.

La seconde complexité, qui vient s'ajouter à celle inhérente à la notion de valorisation, est liée au lieu d'intégration, c'est-à-dire le processus de conception. En effet, ce processus est extrêmement complexe dans l'automobile de par le nombre d'acteurs qu'il fait intervenir, mais également par rapport à ses différentes dimensions, organisationnelles, méthodologiques et informationnelles. Ces différents éléments font apparaître de nombreux leviers d'intégration possibles pour la valorisation. La mise en place d'une démarche d'intégration nécessite de définir les acteurs de l'entreprise devant être impliqués, de savoir par quels biais les impliquer, et à quels moments les impliquer. Faut-il impliquer l'ensemble des acteurs de l'entreprise, ce qui est une opération très difficile, ou se contenter du travail d'un expert, ce qui pourrait se révéler insuffisant au vu des risques potentiels ? Doit-on fournir aux acteurs de la conception un simple guide de conception, ou des logiciels de calculs complexes ? Faut-il

travailler tout au long du projet, ou doit-on se contenter de travailler en début ou en fin de projet ?

La littérature nous propose de nombreuses stratégies et méthodes d'intégration, mais souvent très théoriques ou trop éloignées de la réalité d'une grande entreprise. Il existe très peu d'exemples de démarche d'intégration complète ayant été mises en place de façon opérationnelle. Au vu de l'analyse que nous en avons faite, cela s'explique par plusieurs raisons : les solutions proposées ne sont pas adaptées au processus de conception de l'entreprise, elles n'impliquent pas l'ensemble des acteurs de l'entreprise et ne permettent pas de flexibilité par rapport aux évolutions possibles du sujet.

Comme nous l'avons vu, le processus de conception dans l'automobile est très complexe, mais surtout, il est constitué de trois composantes indissociables : l'organisation, les méthodes et les systèmes d'information. Or, les démarches proposées ne considèrent en général que partiellement l'ensemble de ces dimensions. Ces études sont généralement orientées vers le travail du concepteur, le reste de l'organisation étant généralement négligé. L'aspect méthodologique, généralement très spécifique à l'entreprise, n'est jamais abordé si ce n'est d'un point de vue très théorique. Dans le meilleur des cas, les démarches d'intégration proposent différents outils selon les étapes du processus de conception, ce qui reste, selon nous, insuffisant. Quant aux systèmes d'information, qui apparaissent pourtant comme une des dimensions clefs de la conception pour les années à venir, ils ne sont jamais abordés en dehors de liens potentiels des outils proposées avec les outils de CAO des concepteurs.

La situation par rapport à l'implication des acteurs de la conception est identique. Aucune démarche n'implique l'ensemble des acteurs de la conception. Quelques outils, intégrant des notions de stratégie, sont à destination des décideurs, mais sans liaison avec les outils à destination des opérationnels, et encore moins des hiérarchiques intermédiaires qui ont pourtant un rôle très important en termes de synthèses et de circulation de l'information.

Le dernier aspect, très spécifique à notre problématique, est lié à la rigidité des outils existants au regard de l'incertitude des aspects réglementaires et techniques liés au contexte des véhicules hors d'usage (à savoir la mise en place de la réglementation et ses évolutions futures, ainsi que les technologies utilisées par les filières de valorisation). Cet aspect est certainement celui qui freine le plus le déploiement des démarches d'intégration de la valorisation, et plus généralement de l'environnement, dans les entreprises. En effet, il semble difficile pour un responsable d'entreprise (a fortiori dans des grandes entreprises) d'assumer

la mise en place coûteuse d'outils et de méthodes pour intégrer une nouvelle contrainte dont les risques sont très difficiles à évaluer.

Ainsi, il n'existe pas à l'heure actuelle de solution complète et formalisée pour prendre en compte cette notion floue qu'est la fin de vie des véhicules dans l'univers hyper-contraint qu'est la conception automobile. La problématique à laquelle nous nous trouvons confronté concerne de ce fait l'élaboration d'une démarche d'intégration explicite permettant d'introduire progressivement, consciemment et globalement l'aspect fin de vie dans la conception des véhicules chez PSA Peugeot Citroën (Figure 16).

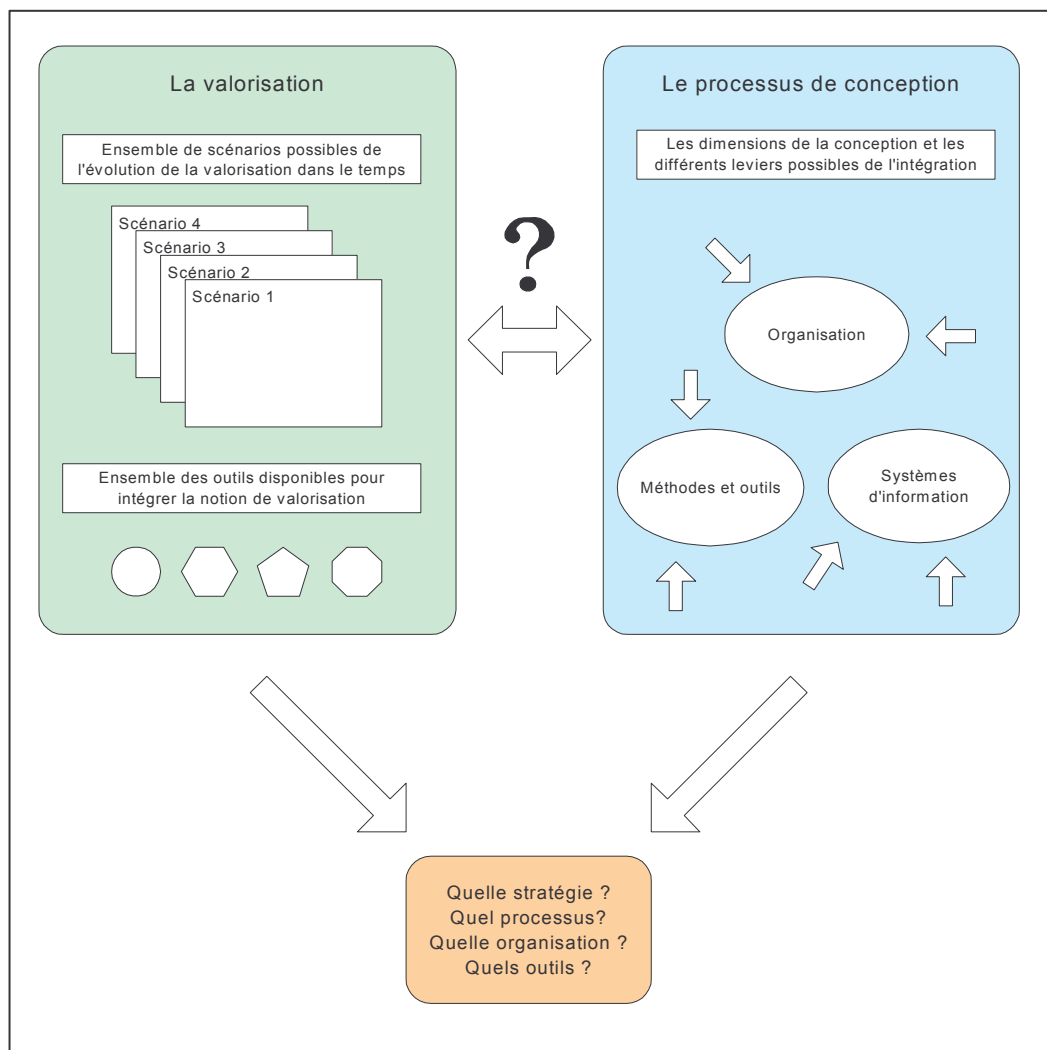


Figure 16 : Problématique

3. Hypothèses et protocole expérimental

Pour répondre à la problématique que nous venons de développer, nous allons définir les critères que nous jugeons nécessaires à l'élaboration d'une démarche d'intégration de la valorisation des véhicules en fin de vie. Nous poserons ensuite les hypothèses qui nous permettront de construire cette démarche. Enfin, nous exposerons le protocole expérimental nous permettant de les mettre en œuvre.

3.1. *Hypothèses*

A la suite de l'analyse des différentes dimensions du contexte de notre étude, à savoir la complexité de la notion de valorisation appliquée au domaine de l'automobile et la complexité du processus de conception des véhicules, nous posons le postulat qu'une intégration pérenne résulte d'une démarche participative des acteurs de la conception, d'une modification exhaustive des éléments constituant le processus de conception et d'une approche évolutive permettant de répondre aux incertitudes liées aux différents scénarios envisageables de l'évolution de la notion de valorisation.

Un processus participatif suppose d'impliquer l'ensemble de l'équipe de conception au sens large, de la direction de l'entreprise aux opérationnels pour que les connaissances émergentes au niveau de ces derniers entre à tout moment en résonance avec la stratégie de l'entreprise.

Une modification exhaustive implique de prendre en compte simultanément et à poids égal les aspects méthodologiques et organisationnels du processus de conception, c'est-à-dire les acteurs de la conception, les outils et méthodes utilisés, le schéma de développement du véhicule et les systèmes d'information liés à la conception.

Une approche évolutive sous-entend une flexibilité des vecteurs d'intégration mis en œuvre vis-à-vis de l'évolution et de l'incertitude des aspects à la fois réglementaires et techniques, à savoir la sévérisation de la réglementation, ainsi que les évolutions technologies exploitables par les filières de valorisation.

Pour développer une démarche d'intégration répondant à l'ensemble de ces critères, notre stratégie consiste à accroître notre connaissance de l'aptitude à la valorisation des véhicules et simultanément notre connaissance du processus de conception. Ce nouveau savoir devra nous

permettre de proposer des scénarios d'évolution interne répondant aux exigences développées dans la problématique. Pour ce faire, nous avons posé les hypothèses suivantes :

- L'acquisition de connaissances sur l'aptitude à la valorisation et sur le processus de conception passe par le développement et l'expérimentation d'outils d'investigation des champs d'ignorance identifiés dans ces deux domaines.
- Le choix d'une stratégie d'intégration consciente nécessite l'identification d'un scénario d'évolution interne le plus à même de répondre au scénario d'évolution externe le plus probable.

3.1.1. Expérimentation d'outils d'investigation

Les outils d'investigation (OI) doivent nous permettre d'explorer les champs d'ignorance que sont l'aptitude à la valorisation des véhicules et l'impact de l'intégration de cette notion dans le processus de conception.

L'élaboration des OI (avec les acteurs de la conception) et leur mise à l'épreuve lors de projets réels ou de simulations nous permettront :

- d'acquérir une meilleure connaissance de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule dans son intégralité ;
- de définir les outils à développer pour réaliser l'évaluation de l'aptitude à la valorisation et pour l'intégrer dans le processus de conception ;
- de juger de l'intérêt et de la faisabilité de ces outils dans l'optique d'une mise à disposition pour l'entreprise ;
- de juger de ce qu'implique la mise en place d'un scénario d'évolution interne dans le processus de conception.

Ainsi, les OI nous permettent de développer nos connaissances, mais également de préparer des outils que nous ré-exploiterons dans le cadre des scénarios d'évolution interne. Les OI peuvent être des méthodes ou des outils de calcul. Il peut s'agir d'outils préexistants mis en application afin de développer une expertise, ou d'outils spécialement développés pour l'occasion comme nous le verrons dans les expérimentations.

3.1.2. Développement d'une stratégie d'intégration consciente

Le développement d'une stratégie d'intégration consciente (SIC) a pour but de permettre à l'entreprise de mettre en place les méthodes et outils nécessaires à l'intégration de la valorisation au vu de l'analyse du contexte des VHU et des choix politiques qui en découlent. Cette stratégie pourra être établie à partir d'un ensemble de scénarios d'évolution interne (SEI) qui devront assurer l'exhaustivité de l'intégration, c'est-à-dire qu'ils devront prendre en compte les différentes composantes de la conception que nous avons identifiées dans la problématique. Chaque scénario d'évolution interne devra correspondre à un scénario d'évolution externe (SEE) issus de l'analyse du contexte (évolution produit / process / réglementation) faite par l'entreprise.

A partir de différents scénarios d'évolution interne, il sera alors possible de dresser une stratégie d'intégration de l'aspect fin de vie des véhicules au sein de l'entreprise.

Les scénarios d'évolution interne devront ainsi assurer l'exhaustivité de l'intégration et la flexibilité de la stratégie d'intégration consciente devra permettre de limiter les risques liés aux évolutions futures de la notion de valorisation.

3.2. *Protocole expérimental*

Pour concrétiser nos différentes hypothèses, nous avons mis en œuvre une série d'actions.

① Première étape : Identification des champs d'ignorance

Dans un premier temps, nous allons identifier les différents champs d'ignorance en relation avec l'aptitude à la valorisation du véhicule et l'intégration de cette aptitude dans le processus de conception.

② Deuxième étape : Développement des outils d'investigation

Pour chaque champ d'ignorance identifié, nous développerons les outils ou les simulations qui nous permettront d'accroître notre niveau de connaissances.

③ Troisième étape : Expérimentation des outils d'investigation

Nous mettrons en œuvre les outils développés ou existants afin sur différents cas concrets.

④ Quatrième étape : développement de la structure générique d'un scénario d'évolution interne

A partir des connaissances acquises et de l'analyse que nous avons faite du processus de conception de PSA Peugeot Citroën, nous allons définir les éléments nécessaires au développement d'un scénario d'évolution interne.

⑤ Cinquième étape : Définition des scénarios d'évolution externe

Dans le même temps, nous allons établir différents scénarios d'évolution externe correspondant aux choix stratégiques possibles de l'entreprise issus de l'analyse du contexte.

⑥ Sixième étape : Développement des scénarios d'évolution interne

A partir de ces scénarios d'évolution externe, des connaissances acquises et de l'ensemble des outils à notre disposition, nous développerons des scénarios d'évolution interne répondant, dans leur structure, aux contraintes du processus de conception.

⑦ Septième étape : Choix d'une stratégie d'intégration consciente

A partir de ces scénarios d'évolution interne que nous proposerons une stratégie d'intégration de la valorisation en conception.

Ces différentes étapes de ce protocole expérimental sont schématisées sur la figure suivante (Figure 17).

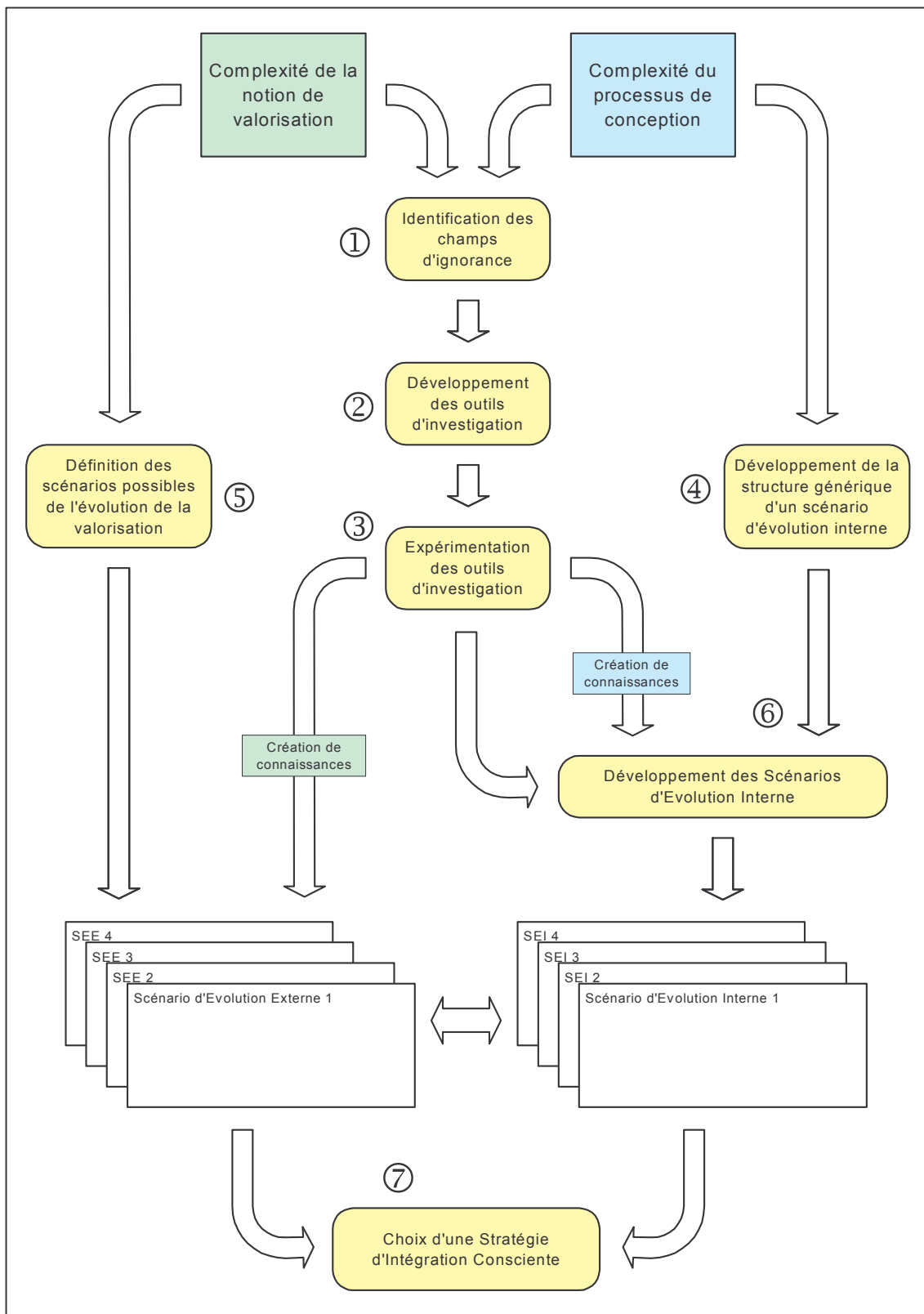


Figure 17 : Protocole expérimental

4. Expérimentations

Dans ce chapitre, nous allons développer les différentes étapes établies dans le protocole expérimental. Nous allons tout d'abord élaborer et expérimenter quatre outils d'investigation répondant chacun à un champ d'ignorance lié à la notion d'aptitude à la valorisation ou aux moyens à mettre en œuvre dans le processus de conception pour intégrer cette notion. Dans un deuxième temps, nous définirons les moyens nécessaires au développement d'une stratégie d'intégration consciente. Pour ce faire, nous développerons, sur la base d'une structure générique, quatre scénarios d'évolution interne correspondant à différents risques possibles liés à l'évolution de la notion de valorisation. A partir de ces scénarios, nous proposerons une démarche permettant de définir la stratégie d'intégration consciente.

4.1. Développement des outils d'investigation

Le développement des outils d'investigation a deux objectifs. Le premier est d'accroître notre niveau de connaissance pour appréhender au mieux le problème qui nous est posé. Le second est de préparer des outils pouvant être mis à la disposition de l'entreprise. Pour ce faire, nous avons choisi d'investiguer les champs d'ignorance autour de deux thèmes.

Le premier champ d'ignorance est lié à l'aptitude à la valorisation d'un véhicule. Quelle est la spécificité de cette évaluation par rapport aux méthodes d'évaluation existantes ? Quels sont les moyens à mettre en œuvre pour réaliser cette évaluation ?

Le second champ est lié au processus de conception, la question principale étant de savoir quels sont les vecteurs d'intégration les plus pertinents pour la notion de valorisation.

Pour répondre à ces questions, nous avons développé quatre outils d'investigation. Nous verrons dans un premier temps la méthode générale de calcul de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule (AVV) et la méthode de répartition des objectifs de valorisation du véhicule aux fonctions. Cela nous conduira à expérimenter la méthode AVF sur plusieurs véhicules et à juger de la faisabilité de l'automatisation de certaines opérations de cette méthode, telles que le calcul du taux de valorisation d'un véhicule et l'estimation des temps logistiques liés au démontage et à la dépollution. Enfin, nous terminerons par le développement d'un outil d'évaluation qualitatif de l'aptitude à la valorisation nous permettant de prendre en compte l'aptitude à la valorisation dès les phases amont de la conception.

Pour chaque étude, nous présenterons le champ d'ignorance que nous allons explorer, le développement de l'outil et la mise en oeuvre de celui-ci, puis nous verrons quelles sont les conditions d'utilisation de ces outils. Enfin, nous présenterons les apports en termes de connaissance sur la notion d'aptitude à la valorisation et sur l'intégration dans le processus de conception. Nous terminerons ce chapitre par une synthèse des résultats de ces travaux.

4.1.1. Outil d'investigation n°1 : outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule

Cette première étude a pour objectif de définir une méthode de calcul de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule et sa prise en compte dans le processus de conception. Nous allons détailler les objectifs de cette étude et les champs d'ignorance que nous souhaitons investiguer. Nous verrons ensuite comment réaliser l'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule. Puis nous proposerons, à partir de l'analyse d'un cas concret, une méthode de répartition des objectifs de valorisation devant nous permettre d'intégrer la notion de valorisation dans le processus de conception. Nous verrons quelles sont les conditions nécessaires pour pouvoir mettre ces outils à la disposition de l'entreprise, et plus particulièrement des acteurs de la conception. A partir de ces travaux, nous ferons le bilan des connaissances acquises, aussi bien du point de vue de la notion de valorisation que du point de vue du processus de conception.

4.1.1.1. Principe et objectifs

Le but premier de l'intégration de la valorisation en conception est de répondre aux objectifs réglementaires. Ceux-ci sont des objectifs de taux de valorisation au niveau du véhicule et, indirectement, des objectifs économiques. Nous avons défini, dans le paragraphe 2.1.1.2, une démarche d'évaluation générique de l'aspect économique de la valorisation à partir des différentes méthodes existantes. La question à laquelle nous voulons répondre est de savoir si cette démarche peut s'appliquer à l'automobile et dans quelles conditions.

La deuxième question est liée à la complexité du processus de conception et aux méthodes qui le structurent. Ainsi, d'après l'ingénierie système (ISA), un objectif défini au niveau véhicule doit être décliné, au travers des spécifications techniques, jusqu'au niveau des sous-ensembles, voir des pièces. Dans ce cas, si une méthode d'évaluation permet d'intégrer les résultats des évaluations de chaque pièce ou composant du véhicule, ce qui correspond à la

branche montante du cycle en V défini par l'ISA, comment décliner les objectifs de valorisation dans la branche descendante du cycle en V ?

L'ensemble de la démarche devra nous permettre de définir des objectifs de taux de valorisation et leur méthode de répartition afin d'atteindre l'objectif global de la réglementation.

4.1.1.2. Evaluation de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule

La méthode d'évaluation doit permettre de calculer le taux de valorisation et le coût de traitement associé d'un véhicule hors d'usage. Pour ce faire, nous avons déjà à notre disposition deux outils : l'indice de valorisation véhicule (IVV), qui nous permet de calculer le taux de valorisation, et la méthode d'évaluation de l'aptitude à la valorisation (AVF), qui autorise le calcul du taux de valorisation et le coût de traitement de sous-ensembles du véhicule. A partir de ces outils, plusieurs solutions sont envisageables. La première est d'étendre l'AVF à l'ensemble du véhicule, la seconde est de travailler à partir d'un bilan masses/matières du véhicule, comme pour l'IVV, en introduisant la notion de coût.

La première solution, si elle semble idéale, est pourtant difficilement applicable. En effet, un tel calcul demanderait des moyens de calcul très importants pour pouvoir modéliser l'ensemble du véhicule du fait du très grand nombre de pièces le constituant. De plus cette démarche n'aurait qu'un intérêt très limité, car le principal objectif des outils utilisant des modélisations du produit est de simuler des opérations de démontage. Or, dans le cas de l'automobile, le démontage, ou toute autre opération spécifique telle que la dépollution, est limité à un nombre de fonctions connues, qui ne représente pas la masse majoritaire des matériaux. Dans ces conditions, toutes les fonctions ne nécessitent pas d'être modélisées et cela en fonction de leur composition matière. En effet, les métaux étant récupérés après broyage, les éléments de la caisse ou les organes mécaniques ne seront pas démontés pour être recyclés.

Ainsi, nous avons choisi de développer une méthode fondée sur la construction d'un bilan de l'Aptitude à la Valorisation d'un Véhicule, ou bilan AVV. Ce bilan permet de regrouper sous le même formalisme les différentes évaluations issues des étapes successives du traitement du véhicule en fin de vie, c'est-à-dire des éléments devant être dépollués et démontés, ainsi que l'ensemble des autres pièces du véhicule qui sont broyées (Figure 18).

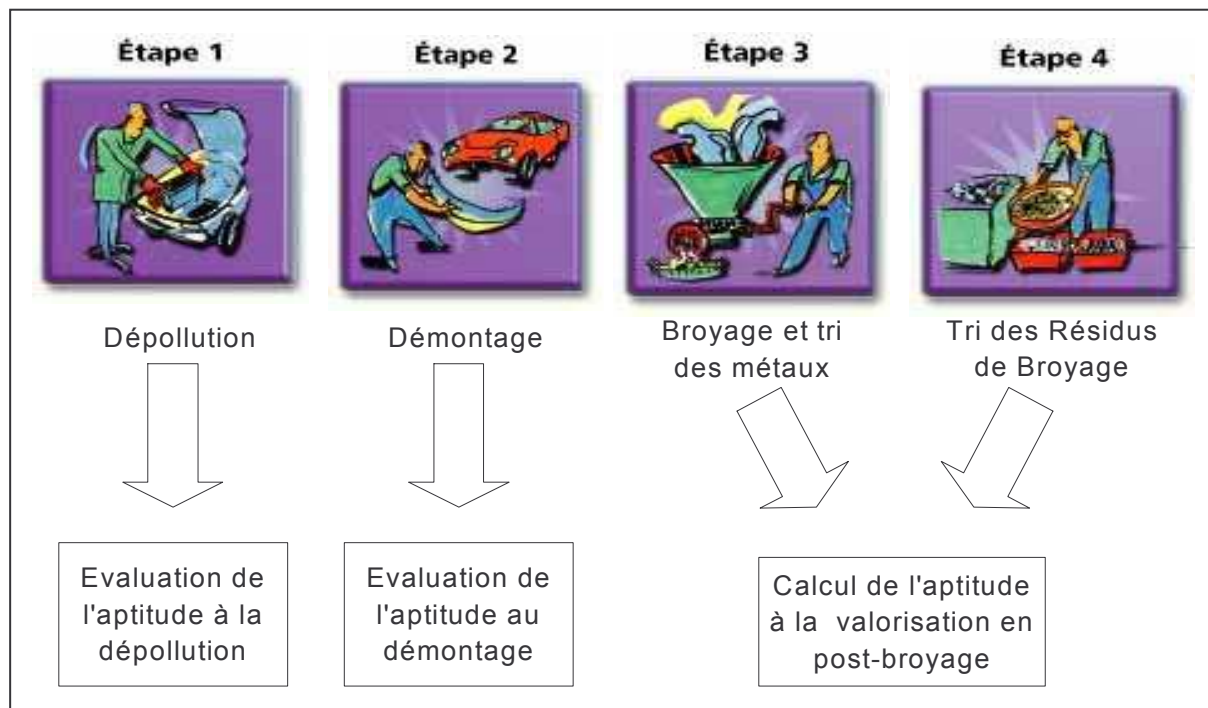


Figure 18 : Différents types d'évaluations

Le bilan AVV se fonde sur le bilan masses/matières du véhicule, des AVF réalisées sur des fonctions cibles définies par leur intérêt à être démonter en vue de leur recyclage, et des calculs sur les éléments à dépolluer. A partir de ce bilan, nous pourrions établir le tableau de bord recyclage. Ce tableau de synthèse nous servira d'outil de communication avec les différents acteurs de la conception, et plus principalement la direction du projet (Figure 19).

Si l'AVF nous permet de générer des gammes de désassemblage des fonctions, la somme de ces temps n'est pas représentative du temps global de démontage du véhicule. En effet, ils ne prennent pas en compte les déplacements et les opérations qui sont réalisées entre le démontage de chaque fonction.

Pour estimer ces temps, nous devons définir l'ensemble de ces opérations intermédiaires afin d'obtenir un temps de désassemblage global le plus représentatif possible des conditions réelles. Une méthode doit donc nous permettre de calculer les temps annexes de dépollution et de démontage et de générer des gammes macroscopiques qui, cumulées avec les gammes micro permettent d'obtenir la gamme optimale complète de dépollution et de désassemblage du véhicule en fin de vie.

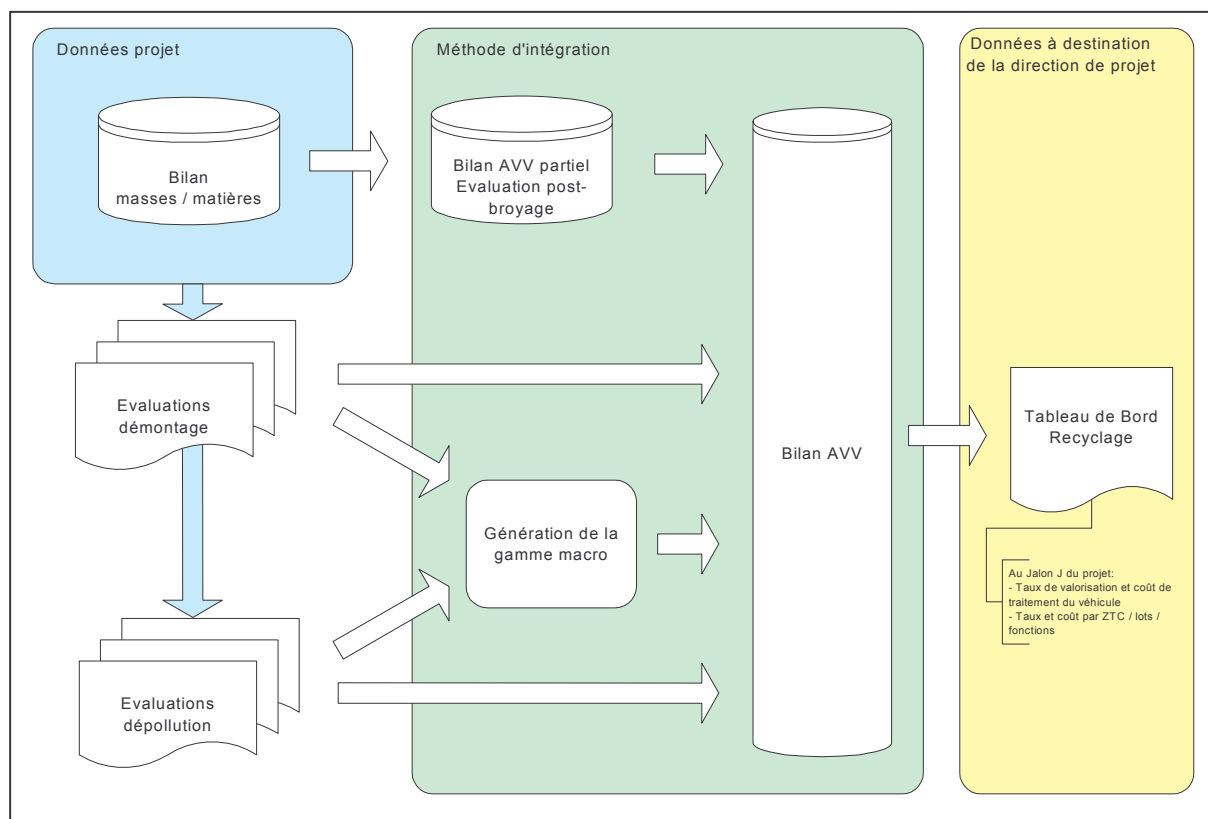


Figure 19 : Construction d'un bilan AVV

Pour réaliser ce bilan nous devons disposer d'un certains nombres de données et de méthodes de calculs.

Ces éléments sont les suivants :

- Le bilan AVV partiel

A partir d'un bilan masses/matières, le taux de valorisation du véhicule est calculé en appliquant une destination fin de vie par défaut à l'ensemble des pièces du véhicule en fonction de leur matière et en appliquant les coûts liés à la fin de vie (hors démontage). Pour ce faire, il faut disposer du bilan masses/matières complet du véhicule.

- Liste des données liées au démontage

Cette liste regroupe l'ensemble des AVF réalisées sur les pièces (fonctions) à démonter. Les AVF peuvent être réalisées sur des fonctions plus ou moins complexes (façade avant, planche de bord) ou sur des pièces simples (baguette latérale). Dans ce dernier cas, il s'agit d'avoir des données cohérentes entre tous les éléments traités.

Les données nécessaires sont :

- un taux de valorisation de l'élément traité ;

- un coût de traitement associé ;
- le scénario fin de vie qui permet d’obtenir ces résultats ;
- les données supplémentaires nécessaires au calcul macro (position sur le véhicule, changement d’outil dans la gamme de désassemblage de la fonction, etc.).
- Liste des données liées à la dépollution
Comme pour les données liées au démontage (AVF), les données liées à la dépollution sont issues de l’ensemble des éléments à dépolluer.
Les données nécessaires sont :
 - un taux de valorisation (souvent le taux de dépollution) ;
 - le coût de traitement (souvent le temps de dépollution de l’élément) ;
 - la localisation sur le véhicule ;
 - des données supplémentaires pour la génération de la gamme macro.

A partir du bilan AVV partiel, les résultats obtenus sur les pièces d’une fonction sur laquelle a été réalisée une évaluation de démontage ou de dépollution remplacent les évaluations réalisées dans le bilan partiel. Seuls les résultats de cette évaluation sont intégrés dans le calcul. De plus, les données de positionnement (et autres) sont récupérées pour établir la gamme macroscopique. Celle-ci nous permet de déterminer les temps annexes, donc les coûts, liés à l’atelier de démontage (et à la configuration du véhicule).

Le calcul se fait ensuite selon les étapes suivantes :

- Optimisation des temps annexes
 - Génération des gammes macroscopiques, l’une pour la dépollution, l’autre pour le démontage.
 - Calcul du coût de ces gammes.
- Calcul du bilan AVV complet
 - Remplacement dans le bilan AVV partiel des éléments traités par les AVF.
 - Remplacement dans le bilan AVV partiel des éléments traités par la dépollution.
 - Ajout des éléments annexes liés aux gammes macroscopiques (coûts).
 - Calcul de l’AVV.

La Figure 20 présente une forme schématique de ce que pourrait être un bilan AVV.

Bilan AVV		
Bilan AVV	Taux	Coût
évaluations dépollution		
ADE 1		
ADE 2		
ADE 3		
ADE 4		
coûts annexes dépollution		
évaluations démontage		
AVF 1		
AVF 2		
AVF 3		
AVF 4		
coûts annexes démontage		
bilan AVV restant		
Pièce 1		
Pièce 2		
Pièce 3		
Pièce 4		
Pièce 5		
Pièce 6		
Pièce 7		
Pièce 8		
Pièce 9		
Pièce 10		
Pièce 11		
Pièce 12		
Pièce 13		
Pièce 14		
total	$\sum \text{taux}$	$\sum \text{coût}$

Figure 20 : Forme schématique d'un bilan AVV

Les informations disponibles après un calcul AVV sont :

- le taux de valorisation du véhicule ;
- le coût de traitement du véhicule ;
- la gamme macroscopique optimisée pour la dépollution ;
- la gamme macroscopique optimisée pour le démontage.

Les outils nécessaires au développement de la méthode d'intégration sont les suivants :

- une méthode d'évaluation de l'Aptitude à la Valorisation d'une Fonction (AVF) ;
- une méthode d'évaluation de l'Aptitude à la Dépollution d'un Élément fournissant des résultats type AVF (taux de valorisation et coût de traitement) ;

- un bilan AVV partiel ;
- Une méthode de génération de gammes macroscopiques (gammes atelier).

Comme nous venons de le voir, le calcul de l'Aptitude à la Valorisation d'un Véhicule (AVV) est réalisé à partir d'un ensemble d'évaluations et de données de compositions matières et d'architecture du véhicule. Parmi celles-ci figurent les données issues du calcul de l'Aptitude à la Valorisation des Fonctions (AVF) que l'on souhaite démonter. Pour obtenir un résultat au plus proche des conditions de terrain, nous avons également souhaité évaluer le coût des opérations logistiques d'un atelier lors de la dépollution du véhicule et du démontage des pièces à valoriser.

Pour obtenir ces différentes informations, nous avons réalisé deux études, l'une sur l'évaluation de l'aptitude à la valorisation de l'ensemble des fonctions d'un véhicule pouvant être démontées en vue de leur valorisation, l'autre sur la génération d'une gamme de dépollution et de désassemblage comprenant les opérations logistiques dans un atelier. Ces études seront développées dans les paragraphes 4.1.2 et 4.1.3.

4.1.1.3. Méthode de répartition d'objectifs aux projets

La prise en compte de la valorisation en conception passe par l'intégration de ces paramètres dans les cahiers des charges du véhicule. Comme nous l'avons vu, PSA Peugeot Citroën se base sur l'Ingénierie Système Automobile (ISA) pour structurer les spécifications techniques des véhicules. L'ISA préconise de décomposer les spécifications globales en objectifs locaux.

Dans notre cas, le problème est de passer d'objectifs globaux connus, les taux de valorisation du véhicule définis par la réglementation, à des objectifs de valorisation locaux, compréhensibles et exploitables par les différents membres du projet.

La démarche que nous avons retenue est la suivante : nous réaliserons tout d'abord un état des lieux nous permettant de définir la répartition du taux de valorisation entre les différents lots de conception du véhicule. Nous verrons s'il est possible d'en tirer une loi de répartition qui soit généralisable sur tous les types de véhicules. A partir de ce constat, nous proposerons une démarche permettant de décliner les objectifs véhicule en objectifs par lot de conception. Enfin, nous proposerons un outil de suivi des indicateurs recyclage à destination de la direction de projet.

A partir de l'analyse d'un bilan masses/matières d'un véhicule connu, nous allons décliner le taux de valorisation par ZTC²⁴ et étudier les liens possibles entre la masse, la masse valorisée et le taux de valorisation de chacune d'entre elles. Nous verrons quelles conclusions nous pouvons en tirer.

La première étape de cette étude est l'analyse du bilan masses/matières d'un véhicule. Le véhicule traité est une Xsara Picasso. L'objectif de cette analyse est de mesurer la part de chaque ZTC dans le taux de valorisation d'un véhicule. Nous allons tout d'abord fixer les hypothèses de calcul, puis nous calculerons le taux de valorisation de chaque ZTC.

Les données étudiées sont issues d'un bilan masses/matières réalisé pour le calcul de l'IVV²⁵. Ce bilan regroupe l'ensemble des matériaux du véhicule regroupés en 20 familles (voir Tableau 4).

Famille	Matériaux
ABS	ABS
ALU	Aluminium
BATTERIE	Batteries
CARBURANT	Carburant
ELA	Elastomères
ELE	Electrique et électronique
FLU	Fluides
MF	Métaux ferreux
MNF	Métaux non ferreux
MOS	Mousses
MULTIMAT	Multi matériaux
PA	Polyamides
PE	Polyéthylènes
PEI	Peintures
PLASTIQUE	Plastiques divers
PNEU	Pneumatiques
PP	Polypropylènes
PVC	PVC
TEX	Textiles
VER	Verres

Tableau 4 : Familles de matériaux

Afin de calculer le taux de valorisation des différentes ZTC, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

- ✓ le recyclage matière est pris en compte en appliquant les taux de l'IVV (Tableau 5) ;

²⁴ ZTC : Zone de Travail en Commun ; une ZTC regroupe un ou plusieurs lots de conception.

²⁵ IVV : Indice de Valorisation d'un Véhicule, indicateur interne PSA.

- ✓ la dépollution est prise en compte par élément ;
- ✓ le réemploi n'est pas pris en compte.

Matériau (ou pièce)	Taux de recyclage	Remarques
MF	98 %	Rendement du broyeur
MNF	98 %	
ALU	98 %	
Batterie	100 %	Taux de dépollution
Pneu	100 %	Hypothèse réglementation pneumatique
Pare-brise	70 %	Découpe du pare-brise
Vitre latérale	70 %	Bris des vitres latérales
Carburant	95 %	Taux de dépollution

Tableau 5 : Taux de recyclage par matière

Pour effectuer ce calcul, nous avons besoin de la répartition des matériaux dans les différentes ZTC²⁶ (Figure 21 et Tableau 6).

- Répartition en masse de chaque ZTC

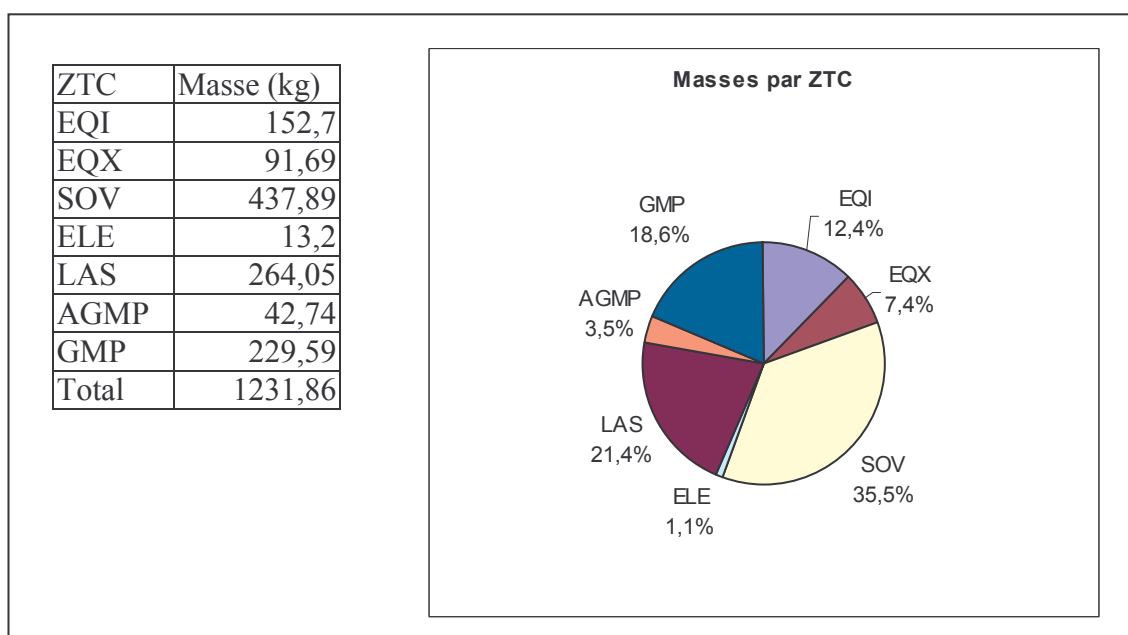


Figure 21 : Répartition en masse de chaque ZTC

²⁶ Les différentes ZTC sont : EQI (équipements intérieur), EQX (équipements extérieur), SOV (structure et ouvrants), ELE (électricité et électronique), LAS (liaisons au sol), AGMP (adaptation groupe motopropulseur), GMP (groupe motopropulseur).

○ Répartition des matériaux par ZTC (en kg)

	EQI	EQX	SOV	ELE	LAS	AGMP	GMP
ABS	1,06	0,7	0,87		2,27		
ALU	0,78	1,02	0,84	0,05	2,9	3,44	34,44
BATTERIE							17,32
CARBURANT		50,22					
ELA	0,08	0,41	12,34		2,52	1,27	1,06
ELE	0,02	0,03	0,05	0,41	0,02	0,054	1,74
FLU		1,44			1,1	11,77	7,93
MF	60,68	13,33	364,27	1,5	210,7	15,08	144,19
MNF			0,3	7,56	1,02	0,47	10,55
MOS	22,04		0,34				
MULTIMAT				0,08	3,21	0,15	0,09
PA	0,72	0,24	0,25	0,05	0,09	1,1	1,44
PE	3,44	0,83	0,38	0,23	0,14	0,16	2,14
PEI		0,01	8,53			0,04	0,49
PLASTIQUE	10,43	7,13	8,03	2,43	1,13	0,8	6,09
PNEU					37,44		
PP	21,01	16,34	0,28	0,88	1,52	8,39	1,99
PVC			2,65				
TEX	32,46						0,13
VER			38,74				
total par ZTC	152,72	91,7	437,87	13,19	264,06	42,724	229,6

 : matériau présent majoritairement dans une ZTC

 : matériau présent dans une seule ZTC

Tableau 6 : Répartition des matériaux par ZTC

A partir de ces données et des hypothèses de calcul, nous obtenons les taux de valorisation des différentes ZTC. L'ensemble des évaluations par ZTC est récapitulé dans le Tableau 7. La valorisation énergétique due à la dépollution a été intégrée dans le résultat final.

		EQI	EQX	SOV	ELE	LAS	AGMP	GMP	
	Masse (kg)	152,7	91,69	437,89	13,2	264,05	42,74	229,59	
	% du véhicule	12,40%	7,44%	35,55%	1,07%	21,43%	3,47%	18,64%	
Taux de valorisation par ZTC	Recyclage	40,18%	67,93%	85,70%	66,64%	93,87%	43,62%	88,24%	
	VE dépollution		1,96%				19,25%	2,52%	
	valorisation totale	40,18%	69,89%	85,70%	66,64%	93,87%	62,87%	90,76%	
	Résidus de Broyage	59,82%	30,11%	14,30%	33,36%	6,13%	37,13%	9,24%	
Taux de valorisation véhicule	Recyclage	4,98%	5,05%	30,47%	0,71%	20,12%	1,51%	16,45%	
	VE dépollution		0,15%				0,67%	0,47%	1,28%
	valorisation totale	4,98%	5,20%	30,47%	0,71%	20,12%	2,18%	16,92%	80,58%
	Résidus de Broyage	7,42%	2,24%	5,08%	0,36%	1,31%	1,29%	1,72%	19,42%

Tableau 7 : Taux de valorisation par ZTC

A partir de ces résultats, les différentes ZTC peuvent être classées en fonction leur taux de valorisation ou de masse valorisée (Figure 22).

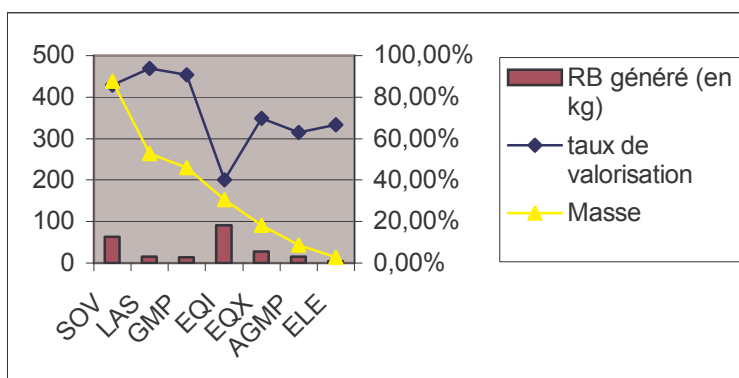


Figure 22 : Comparatif entre les ZTC

Le premier constat qui peut être fait à la suite de cette répartition est que les ZTC ayant un très bon taux de valorisation, comme SOV (avec 85 % de valorisation), ne sont pas forcément celles qui génèrent le moins de RB. Le facteur masse est déterminant.

Pour approfondir notre analyse, nous avons également tenté de trouver une corrélation entre les différents paramètres que sont la masse gérée par chaque ZTC, le taux de valorisation et la masse de RB générée.

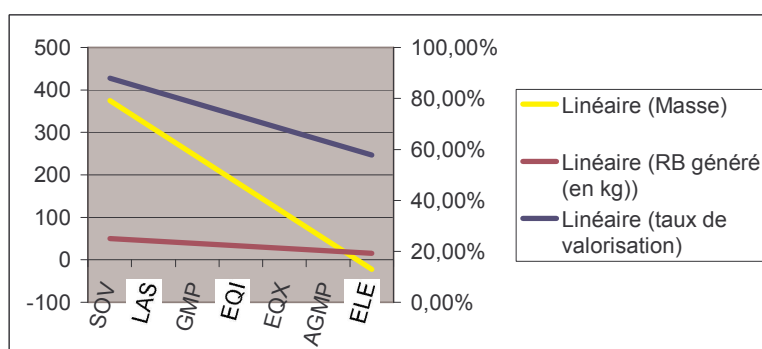


Figure 23 : Courbes de tendances

En traçant des courbes de tendances à partir des courbes de masses, de taux de valorisation et de RB généré (Figure 23) nous pouvons faire les constats suivants :

- Plus la masse de la ZTC est faible, plus le taux de valorisation est faible. Cela est essentiellement dû au fait que les ZTC les plus lourdes sont celles qui comportent le plus de métaux.
- Dans une moindre mesure, on constate que plus la masse gérée par la ZTC est faible, plus la masse de RB générée est faible.
- En revanche, il n'y a aucune corrélation entre le taux de valorisation d'une ZTC et la quantité de RB générée.

La principale conclusion de cette analyse est que le taux de valorisation ne peut pas être dissocié de la composition masses/matières d'une ZTC. Dans ces conditions, la mise en œuvre d'un mode de discrétisation d'un objectif global en objectifs locaux tel que le formule l'Ingénierie Système paraît peu réaliste dans le cas des objectifs de taux de valorisation. Pour pouvoir fixer des objectifs de valorisation par ZTC, il faut au préalable avoir fait une analyse de la répartition masses/matières du véhicule et de chaque ZTC.

A partir de ce constat, nous avons développé une démarche permettant de construire un bilan masses/matières prévisionnel du véhicule et de fixer des objectifs par ZTC ou par lots de conception. Cette démarche est présentée Figure 24.

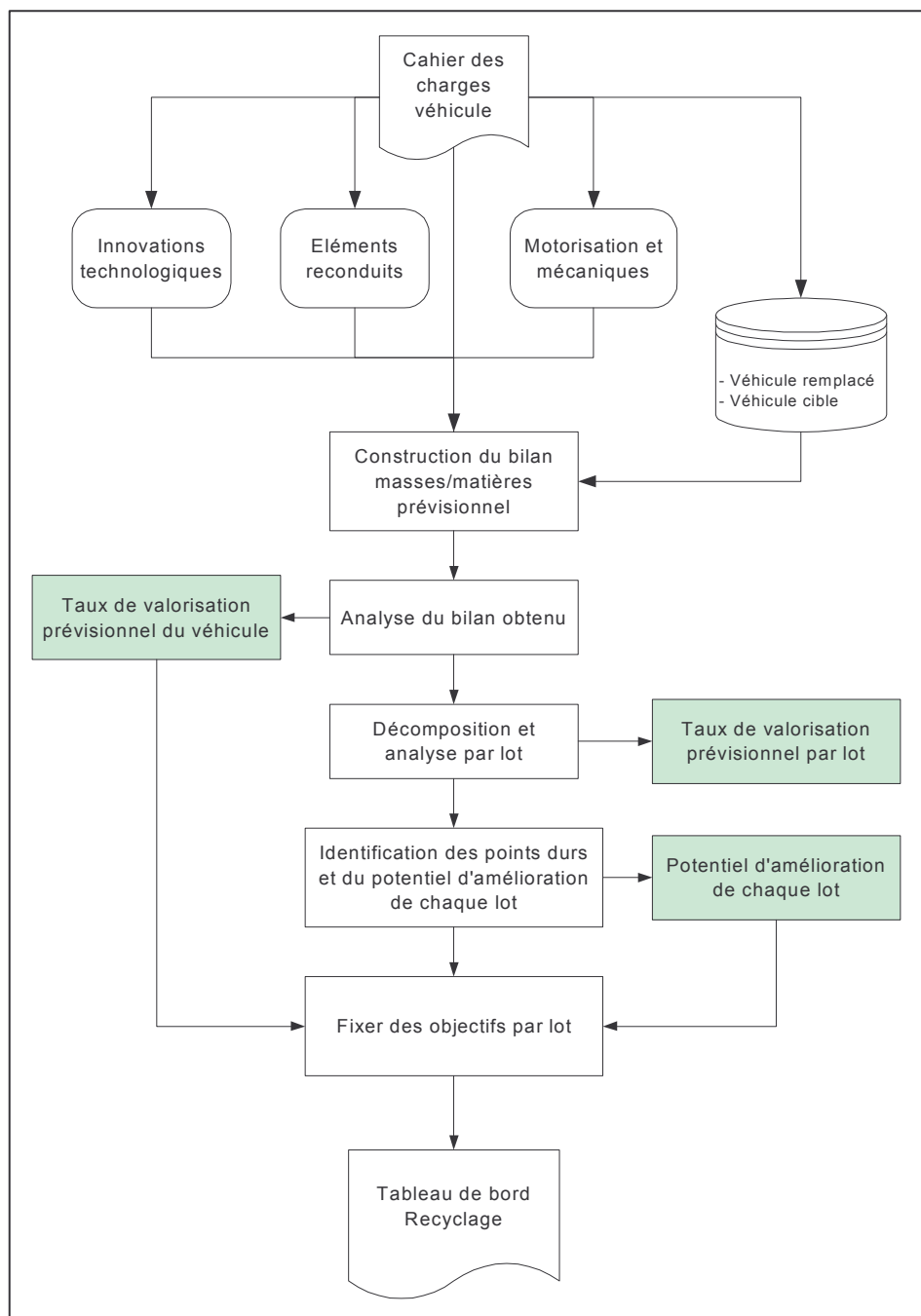


Figure 24 : Méthode de répartition des objectifs de valorisation

Cette méthode se décline en trois grandes étapes :

1) La construction du bilan masses/matières prévisionnel

Ce bilan est construit à partir du cahier des charges du futur véhicule, qui va nous permettre d'extrapoler des données à partir d'éléments similaires et de récupérer les données des

éléments existants. Le bilan doit être le plus représentatif possible de ce que sera le véhicule développé. Ce bilan prévisionnel est réalisé pendant les premières étapes du projet (avance de phase programmée).

A partir du cahier des charges du véhicule, les éléments suivants sont identifiés :

- ✓ le véhicule remplacé et le véhicule cible du projet ;
- ✓ les éléments reconduits, tels que la plate-forme et les éléments standardisés ;
- ✓ le moteur et les organes mécaniques s'ils sont déjà conçus ou s'ils sont en développement ;
- ✓ les innovations technologiques que la direction du projet souhaite intégrer dans le nouveau véhicule.

Pour l'ensemble de ces éléments, il s'agit de récupérer ou de définir un bilan masses/matières. Une fois réunies, ces informations autorisent la construction d'un bilan masses/matières prévisionnel du futur véhicule. C'est à partir de ce bilan que les travaux d'analyse peuvent commencer.

2) La décomposition par lot et l'analyse du bilan prévisionnel

Une fois le bilan prévisionnel établi, une première évaluation de l'aptitude à la valorisation du futur véhicule peut être faite.

La première évaluation est celle du taux de valorisation du véhicule. On utilise le même type de calcul que pour la méthode de recomposition de l'AVV. C'est-à-dire que l'on applique au bilan des taux de valorisation par famille de matériaux et des taux de valorisation pour les éléments dépollués et les pièces à démonter. On obtient le taux de valorisation prévisionnel du véhicule. Ce premier résultat permet de positionner le véhicule par rapport aux objectifs réglementaires.

On décline ensuite le bilan masses/matières par ZTC afin d'obtenir le taux de valorisation prévisionnel par ZTC, comme le montre la Figure 25.

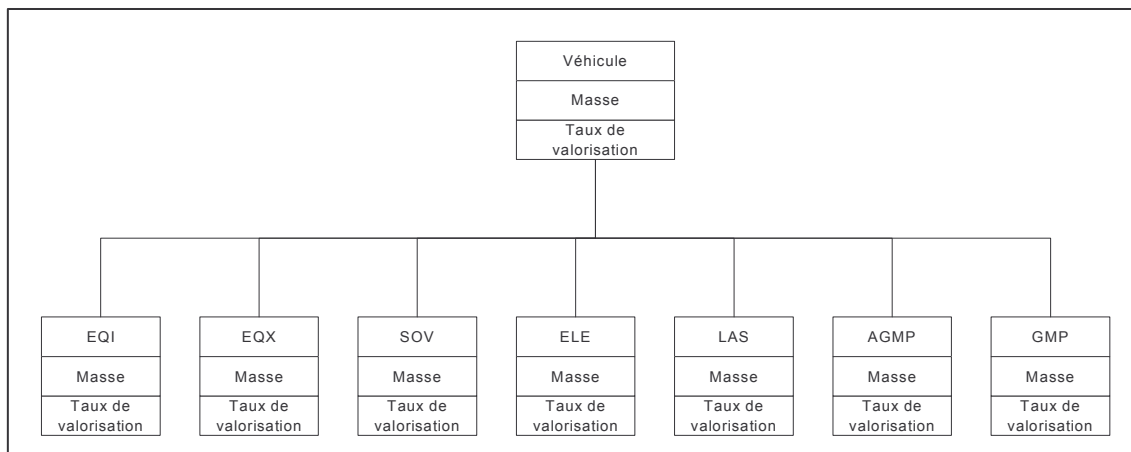


Figure 25 : Répartition des taux de valorisation prévisionnels par ZTC

Ces différentes étapes sont récapitulées par la Figure 26 :

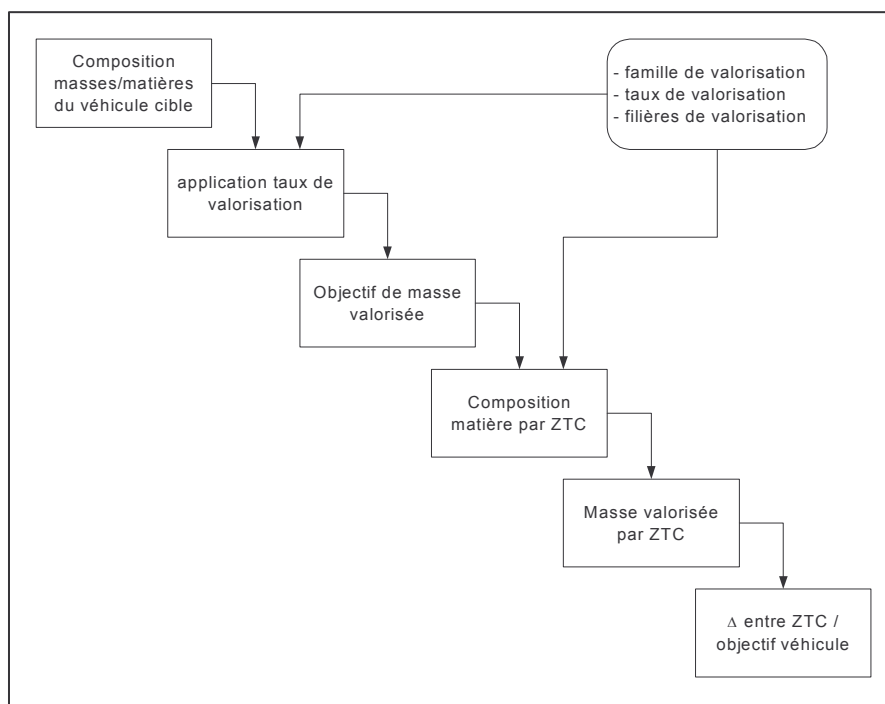


Figure 26 : Démarche d'analyse du bilan prévisionnel

A partir de cette décomposition, on peut définir la part de chaque ZTC dans le taux de valorisation du véhicule. Si le taux de valorisation du véhicule n'atteint pas les objectifs réglementaires, les parties du véhicule en cause peuvent être identifiées.

Il s'agit ensuite d'évaluer le potentiel de valorisation de chaque lot, de chaque ZTC. Il faut, en définitive, définir la marge de manœuvre possible en vue de l'amélioration du taux de valorisation de la fonction, du lot, de la ZTC.

C'est à partir de ce constat que peuvent être définis les objectifs par ZTC.

3) La répartition des objectifs par lot

Les objectifs de valorisation de chaque ZTC sont définis à partir du taux de valorisation et du potentiel d'amélioration de chaque ZTC. La répartition permet de fixer des objectifs aux différents lots de conception, mais aussi d'évaluer le potentiel d'amélioration de chacun d'eux. La somme de ces objectifs doit évidemment permettre d'atteindre l'objectif véhicule.

Cette méthode doit permettre de définir la criticité et la flexibilité des objectifs fixés et de renseigner les différentes strates de spécifications décrites par l'ISA.

4.1.1.4. Mise à disposition de l'outil

Pour pouvoir être mises à la disposition des acteurs de la conception, ces méthodes nécessitent le développement de certains supports. Nous allons dans un premier temps énoncer quelles sont les conditions d'informatisation d'un bilan véhicule tel que l'AVV. Pour ce faire, nous nous appuyons sur une étude réalisée pour informatiser l'IVV [HENNEBIQUE 00]. Puis nous décrirons deux éléments nécessaires à une mise en place des méthodes d'intégration (le calcul de l'AVV) et de répartition, à savoir une base de données véhicules et un tableau de bord recyclage.

1) Automatisation des calculs sur un bilan masses/matières

Comme nous venons de le voir, le calcul de l'AVV nécessite le calcul du taux de valorisation et du coût de traitement associé à partir d'un bilan masses / matières d'un véhicule. Au cours des différents travaux réalisés en interne, PSA Peugeot Citroën a développé un indicateur du taux de valorisation, l'IVV. Ces travaux vont nous servir de point de départ pour étudier l'automatisation du traitement du bilan masses / matières.

L'Indice de Valorisation d'un Véhicule (IVV) permet de déterminer le taux de valorisation d'un véhicule à partir de la répartition de ses composants en huit familles de valorisation.

Le calcul de l'IVV était jusqu'à présent réalisé manuellement par les experts recyclage sur les différents projets véhicule. Ces experts récupèrent les données masses et les données matières disponibles. Ils doivent ensuite compléter le bilan masses/matières du véhicule, classer les pièces par catégories de valorisation et appliquer des taux de valorisation aux différentes catégories.

Nous avons souhaité automatiser cette tâche en y ajoutant différentes fonctionnalités, parmi lesquelles le calcul d'un coût de traitement associé au calcul de l'IVV.

Pour pouvoir automatiser ces différents calculs, nous avons structuré les données du métier recyclage. Cela nous a amené à définir trois bases de données :

- Une base de données « Pièces »

La base de données des pièces est un référentiel qui permet, à partir du découpage PSA²⁷, de déterminer la destination fin de vie, le taux de valorisation et le coût fixe de la pièce identifiée, et d'affecter ces valeurs dans le fichier bilan masses / matières. Elle contient la plupart des pièces de réemploi / rénovation, recyclage et dépollution.

- Une base de données « Matières »

La base de données des matières est un référentiel qui permet, à partir du code de la matière, de déterminer le taux de valorisation, la destination fin de vie, le coût fixe et l'existence de coût de main-d'œuvre des différents matériaux qui composent une fonction si celle-ci ne fait pas partie de la base de données Pièces.

- Une base de données spécifiques

Les données spécifiques sont utilisées dans les calculs, mais peuvent faire l'objet de modifications :

- Le coût de main-d'œuvre est exprimé en seconde, le logiciel se charge de calculer le coût en euros sur la base du taux horaire moyen actuel (13,72 € de l'heure).
- Les coûts de mise en décharge sont actuellement évalués à 55 € la tonne et concernent les résidus qui ne peuvent plus être valorisés.
- Le coût de traitement de la valorisation énergétique selon le type de technologie retenu.

²⁷ Le découpage PSA est un système de codification standard de l'ensemble des pièces composant un véhicule.

Nous avons également structuré les données véhicule disponibles afin de les rendre exploitables. Cela nous a conduit à définir une structure type pour un bilan masses/matières. Celui-ci contient l'ensemble des matériaux qui composent le véhicule, le découpage PSA, la désignation normalisée et la masse du matériau.

A partir de l'ensemble de ces données, nous avons élaboré une maquette logiciel permettant de calculer les différents indicateurs souhaités. Il faut noter que le coût de traitement calculé pour le véhicule prend en compte des temps de démontage et de dépollution qui sont déjà évalués par ailleurs. Il s'agit donc bien d'un outil de calcul et non d'un outil de simulation.

Peugeot EW10J4/ BE4 NIV 1																																									
	Dépollution						Recyclage avant broyage								Recyclage après broyage				Mise en décharge		Bilan																				
	Eléments REC		Fluides VE		Carburant		Pneumatiques		Pièces de réemploi		Pièces plastiques		Vitrages démontés		Métaux		Non métaux		Masse	Coût	Masse totale	Masse REC et REE	Masse VE	Coût																	
	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse valo.	Coût	Masse	Coût																					
Lot AEE															15,26	3,63	8,31	-6,65	3,94	-1,38	27,51	18,34	5,23	-4,40																	
Lot AMO	0,50	0,00	7,45	-14,68											34,11	8,12	6,00	-4,80	5,93	-2,08	53,99	34,23	13,83	-13,44																	
Lot ARM	0,92	-2,51	3,40	0,00											68,35	16,26	2,32	-1,85	2,83	-0,99	77,82	68,50	6,49	10,91																	
Lot ASS															160,71	38,24	2,01	-1,61	1,86	-0,65	164,58	160,26	2,46	35,98																	
Lot ATR															43,51	10,35	0,69	-0,55	0,89	-0,31	45,09	43,01	1,19	9,49																	
Lot BV			1,65	-2,00											36,68	8,73			0,57	-0,20	38,90	36,26	2,07	6,53																	
Lot CMO															8,07	1,92	2,13	-1,70	1,67	-0,59	11,87	7,98	2,22	-0,37																	
Lot EEH															4,23	1,01	0,83	-0,66	0,39	-0,14	5,45	4,55	0,51	0,21																	
Lot EEM	15,00	3,30													13,16	3,13	0,62	-0,49	0,26	-0,09	29,04	28,44	0,34	5,85																	
Lot ESV			3,92	-8,09											10,01	2,38	1,23	-0,98	1,44	-0,51	16,59	10,09	5,05	-7,20																	
Lot EXT					59,81	-13,89					5,25	-2,25			20,65	4,91	22,16	-17,73	18,21	-6,37	126,07	83,73	24,14	-35,33																	
Lot FRN			0,47	-2,14			8,24	-11,81							114,90	27,48	18,90	-15,12	17,18	-6,01	159,69	107,98	34,53	-7,61																	
Lot INT															44,99	10,70	22,88	-18,31	9,57	-3,35	77,44	55,19	12,68	-10,95																	
Lot LAS			3,03	-3,40											128,80	30,65	3,07	-2,45	3,88	-1,36	138,78	127,32	7,57	23,43																	
Lot OUV													32,01	-12,42	86,92	20,68	31,99	-25,59	28,51	-9,98	179,43	113,12	37,80	-27,31																	
Lot PDC															32,23	7,67	15,43	-12,34	11,92	-4,17	60,58	32,86	15,80	-11,30																	
Lot STR															350,33	83,35	12,94	-10,35	9,71	-3,40	372,98	350,39	12,88	69,60																	
Total	16,42Kg	0,79 F	19,91Kg	-30,31 F	59,81Kg	-13,89 F	8,24Kg	-11,81 F	0,00Kg	0,00 F	5,25Kg	-2,25 F	32,01Kg	-12,42 F	1172,9Kg	279,21 F	151,5Kg	-121,20 F	118,7Kg	-41,57 F	1585,8Kg	1282,2Kg	184,79Kg																		
Coût de dépollution :																				-43,41 F		Coût de recyclage av. broyage : -26,48 F																			

Figure 27 : Feuille de synthèse

En conclusion, cette étude nous a permis de démontrer la faisabilité de l'automatisation d'un calcul du taux de valorisation d'un véhicule. Néanmoins, cette tâche implique d'avoir des données structurées du produit. Il convient donc de s'assurer que les systèmes d'informations de l'entreprise nous permettront de récupérer les données.

2) Outils complémentaires

Le développement des méthodes de calcul de l'AVV et de répartition des objectifs de valorisation nous a montré la nécessité de développer deux outils supplémentaires. L'un pour le métier recyclage, l'autre pour la communication auprès du projet : une base de données véhicules et un tableau de bord Recyclage.

- La base de données Véhicules

La base de données devra regrouper des véhicules entièrement évalués en termes d'aptitude à la valorisation. C'est-à-dire que les évaluations de dépollution et de démontage devront être réalisées sur l'ensemble des fonctions du véhicule et qu'un bilan masses/matières des éléments restants devra être disponible.

Les objectifs de la mise en place d'une base de données sont multiples. A court terme, elle doit fournir les informations permettant de développer la méthode de répartition et la méthode de génération de gammes macro. Elle permettra également de tester la méthode de recomposition. A plus long terme et une fois la méthode en place, la base de données permettra de définir un véhicule de référence à partir des premières données d'architecture et des choix technologiques du véhicule en développement.

Ce véhicule de référence permettra d'établir un premier bilan AVV et de rédiger le premier tableau de bord.

- Le tableau de bord Recyclage

Le tableau de bord Recyclage est un outil de gestion des paramètres liés à l'aptitude à la valorisation, destiné aux responsables d'un projet, c'est-à-dire le directeur de projet, le responsable conception et le responsable technique. Ce tableau de bord leur permettra d'avoir l'ensemble des éléments nécessaires à la prise de décision concernant les actions à entreprendre pour que le véhicule en cours de développement réponde aux exigences du cahier des charges.

Pour ce faire, il doit regrouper les données obtenues avec la méthode de répartition, c'est-à-dire les objectifs à atteindre par le véhicule et par les différents lots de conception. Ces données constituent le véhicule cible. En face de ces valeurs cibles figureront les résultats obtenus à partir du bilan AVV à un instant t du projet (exemple Figure 28).

La comparaison entre les résultats obtenus et les objectifs devra permettre d'orienter les actions à mener sur les différentes parties du véhicule.

	ZTC	LOT	Masse (kg)	Taux de valorisation par lot	% du lot dans le véhicule	% valorisé du véhicule par lot	% en masse du véhicule par ZTC	% valorisé du véhicule par ZTC	% de mise en décharge par ZTC
Projet véhicule	EQI	ASS	86,415	91,82%	6,97%	6,40%	12,31%	9,99%	2,32%
		INT	44,509	60,55%	3,59%	2,17%			
		PDC	21,565	81,04%	1,74%	1,41%			
	EQX	ESV	16,791	86,92%	1,36%	1,18%	7,40%	6,79%	0,61%
		EXT	74,897	92,82%	6,04%	5,61%			
	SOV	OUV	117,674	90,96%	9,50%	8,64%	35,34%	33,31%	2,03%
		STR	320,22	95,45%	25,84%	24,67%			
	ELE	AEE	10,396	91,46%	0,84%	0,77%	1,07%	0,92%	1,07%
		EEH	2,806	66,16%	0,23%	0,15%			
	LAS	ATR	16,708	96,46%	1,35%	1,30%	21,31%	20,32%	0,99%
		FRN	143,494	93,06%	11,58%	10,78%			
		LAS	103,849	98,32%	8,38%	8,24%			
AGMP	AMO	50,2025	78,64%	4,05%	3,19%	4,05%	3,19%	0,87%	
Projet organe	GMP	ARM	122,325	96,73%	9,87%	9,55%	18,53%	17,79%	0,74%
		EEM	30,3935	96,70%	2,45%	2,37%			
		CMO	26,318	94,02%	2,12%	2,00%			
		EBA	0,009	66,36%	0,00%	0,00%			
		BVM	34,209	96,66%	2,76%	2,67%			
		DIR	16,31	91,10%	1,32%	1,20%			
			1239,091		100,00%	92,29%	100,00%	92,29%	8,63%

Figure 28 : Feuille de synthèse d'un bilan AVV

La mise en place d'un tableau de bord Recyclage regroupant l'ensemble des indicateurs et des analyses faites sur le véhicule en développement est une étape indispensable à l'intégration de la méthode dans les projets.

Ce tableau de bord a plusieurs fonctions :

- être le vecteur d'information unique et synthétique du métier recyclage vers le projet ;
- être un support et un outil de justification pour rédiger les spécifications techniques (STx) ;
- être un outil d'identification et de suivi des points définis comme sensibles pour le projet ;
- être un outil de surveillance des dérives possibles par rapport aux objectifs réglementaires ;
- être un outil d'aide à la décision si des actions doivent être entreprises en cas de non atteinte des objectifs.

Ce tableau de bord pourrait avoir la forme suivante (Tableau 8) :

Tableau de bord Recyclage							
Véhicule	Véhicule concerné						
Objectifs	95 % / 85 %						
Taux actuel	x % / y %						
ZTC	EQI	EQX	SOV	ELE	LAS	AGMP	GMP
Objectifs	x' ₁ %	x' ₂ %	x' ₃ %	x' ₄ %	x' ₅ %	x' ₆ %	x' ₇ %
	y' ₁ %	y' ₂ %	y' ₃ %	y' ₄ %	y' ₅ %	y' ₆ %	y' ₇ %
Taux actuel	x'' ₁ %	x'' ₂ %	x'' ₃ %	x'' ₄ %	x'' ₅ %	x'' ₆ %	x'' ₇ %
	y'' ₁ %	y'' ₂ %	y'' ₃ %	y'' ₄ %	y'' ₅ %	y'' ₆ %	y'' ₇ %
Potentiel d'amélioration	z ₁ %	z ₂ %	z ₃ %	z ₄ %	z ₅ %	z ₆ %	z ₇ %
Actions envisageables							

Tableau 8 : Trame d'un tableau de bord Recyclage

Cette version du tableau de bord ne présente que l'indicateur « taux de valorisation » et la décomposition se fait au niveau de la ZTC. La forme restera la même si l'on souhaite intégrer le coût de traitement associé au taux de valorisation ou si l'on souhaite que le découpage s'effectue au niveau du lot de conception.

4.1.1.5. Gains de connaissances

Cette étude nous a permis d'étendre notre connaissance autour de trois thèmes : l'aptitude à la valorisation d'un véhicule, sa prise en compte dans le processus de conception et la transposabilité des méthodes développées.

Nous avons tout d'abord développé une méthode permettant de calculer l'aptitude à la valorisation d'un véhicule (AVV) à partir des différents systèmes d'évaluation à notre disposition, c'est-à-dire le calcul à partir du bilan masses / matières du véhicule, qui nous permet de le gérer dans son intégralité, et des méthodes de calcul spécifiques telle que l'AVF, qui nous permettent d'évaluer le démontage. Ainsi, l'évaluation de la valorisation prend en compte les différentes étapes du traitement des véhicules en fin de vie. Les différentes évaluations peuvent être synthétisées sous le même formalisme dans un bilan global.

Il faut également noter que les résultats de ces évaluations sont extrêmement dépendants des hypothèses de calcul qui ont été choisies. Cela est valable pour les évaluations simples (calcul

fait à partir du bilan masses/matières) ou pour les calculs nécessitant une méthode de simulation (type AVF).

Comme nous l'avons vu, seules les opérations de démontage et de dépollution nécessitent, pour obtenir des résultats probants, des méthodes de simulation. Ces méthodes, liées aux interventions d'opérateurs sur le véhicule, peuvent devenir très complexes si l'on souhaite prendre en compte l'ensemble des paramètres liés à ces opérations comme nous le verrons dans les chapitres suivants.

Si le mode de calcul de l'AVV est lié au schéma de traitement des véhicules, il est également lié au processus de conception. En effet, le fait de travailler au niveau du véhicule, et non plus au niveau d'une fonction, implique de s'adresser à l'ensemble du projet, et non plus à un petit groupe de concepteurs. Cette situation nécessite de prendre en compte le découpage qui est fait du véhicule pour l'organisation en ZTC et en lots de conception. De plus, les méthodes utilisées par les projets, telles que l'Ingénierie Système, nous ont amenées à définir une méthode de répartition des objectifs de valorisation et d'intégration des résultats des évaluations (le bilan AVV). La structure du projet nous impose également des outils spécifiques pour l'organisation, comme le tableau de bord Recyclage à destination de la direction du projet. Ce n'est qu'à ces conditions qu'il devient possible de calculer l'AVV et de l'intégrer dans le processus de conception.

Mais avant de mettre de tels outils à la disposition des projets, il sera nécessaire, au vu de la quantité de données à gérer, d'informatiser les différents supports de ces méthodes tels que le bilan AVV et ses modes de calcul. Ces outils, une fois informatisés, ne seront réellement efficaces que s'ils sont reliés à un ensemble de données structurées, aussi bien au niveau du développement du véhicule qu'au niveau du métier Recyclage.

4.1.2. Outil d'investigation n°2 : outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'une fonction

Comme nous l'a montré le développement de la méthode de calcul de l'AVV, l'un des aspects principaux de ce calcul est l'évaluation des fonctions destinées au démontage, que ce soit pour leur recyclage ou pour leur dépollution. Cette étude s'attachera à faire une application « expérimentale » de ce que pourrait être dans le futur le démantèlement systématique des VHU. Pour évaluer le démontage, nous allons utiliser la méthode AVF, développée par Coppens (voir paragraphe 1.3.3.2). L'objectif principal de cette étude est donc la mise en application systématique de cet outil à l'ensemble des fonctions d'un véhicule.

Dans ce chapitre, nous allons développer les objectifs et les principes retenus pour cette expérimentation. Nous présenterons ensuite les résultats obtenus, ainsi que le gain de connaissances résultant. Enfin, nous verrons quelles sont les applications possibles de cet outil dans une démarche d'intégration de la contrainte recyclage en conception, et quelles en sont les conditions.

4.1.2.1. Principe et objectifs

L'objectif de cette étude est d'accroître notre niveau de connaissance sur les fonctions pouvant être soumises à un démontage lors du traitement en fin de vie du véhicule. L'exploration de ce champ d'ignorance doit nous permettre :

- d'identifier et de délimiter chaque fonction ;
- d'évaluer chaque fonction en termes de taux de valorisation et de coût de traitement ;
- de hiérarchiser les différentes fonctions entre elles selon des critères de coût et de taux de valorisation ;
- de positionner différents véhicules les uns par rapport aux autres sur ces critères ;
- de développer et d'améliorer des préconisations de conception.

Cette étude doit également nous permettre de collecter des informations sur la mise en application de l'outil d'évaluation dans l'optique de sa mise à disposition des équipes de conception.

Le dernier objectif de cette étude est d'alimenter les bases de données en temps de démontage, en positionnement autour du véhicule lors du démontage, en bilan masses/matières ou encore en gamme de démontage. En effet, si PSA Peugeot Citroën possède différentes bases de données sur ses propres véhicules et sur les véhicules de la concurrence, les informations spécifiques au métier du recyclage, telles que les temps de démontage ou les gammes de démontage, sont absentes.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons réalisé l'analyse complète en termes d'AVF de plusieurs véhicules [BELTRAN et GOMOT 01]. Le but était de mettre en œuvre la méthode et de récolter un maximum d'informations sur les différentes fonctions étudiées.

Pour ce faire, nous avons réalisé le démontage d'une douzaine de fonctions cibles (Tableau 9) sur trois véhicules (Volkswagen Passat, Ford Focus et Peugeot 206).

Zone	Fonctions
1	Pare-chocs
	Accessoires moteur
2	Façade arrière
3	Sous véhicule
4	Latérale extérieure
5	Intérieur coffre
6	Portes avant
	Portes arrière
7	Habillage intérieur latéral
	Habillage central
8	Planche de bord
9	Assises avant
	Assises arrière

Tableau 9 : Liste des fonctions cibles

L'AVF raisonnant par fonction, la première difficulté consiste, lors d'une application sur un véhicule complet, à déterminer quelles pièces font parties de quelles fonctions. Ainsi, il faut choisir les limites de chaque fonction et définir leurs interfaces avec les autres pièces ou les autres fonctions du véhicule.

Pour chaque fonction, nous avons collecté les données nécessaires à l'évaluation des AVF :

- ✓ temps de démontage ;
- ✓ masses de pièces ;

- ✓ matières des pièces ;
- ✓ nature des liaisons entre les pièces ;
- ✓ antériorité de démontage entre les pièces.

Afin de pouvoir exploiter au mieux les données que nous avons recueillies lors des démontages des véhicules, nous avons envisagé différents scénarios de traitement, un scénario d'analyse de la fonction et trois scénarios d'évaluation :

✓ Scénario 0

C'est le scénario « de base », dans lequel on exploite les données de démontage comme nous l'avons réalisé sur les véhicules. Il nous permet de réaliser une analyse exhaustive de la fonction et d'identifier les points bloquants de la conception vis-à-vis de la valorisation. Pour sa réalisation, nous utilisons les graphes d'antériorités et de liaisons. Sur ce dernier nous avons cherché les regroupements possibles par matériaux ou filières de valorisation et nous avons classé les opérations de démontage en utilisant comme indice de performance le rapport « masse valorisable démontée / temps de démontage » tout en respectant les antériorités.

✓ Scénario 1 : démontage maximisant le recyclage

Ce scénario nous permet de positionner réellement la conception par rapport aux objectifs réglementaires, puisqu'il nous permet de connaître en termes de démontage, le taux de valorisation du véhicule démonté. Il nous permet de sortir deux chiffres représentatifs du potentiel du véhicule : M, le ratio de masse valorisée, et R, le coût de traitement associé.

✓ Scénario 2 : démontage en vue du recyclage des polyoléfines

Ce scénario nous permet de connaître le coût et le temps d'obtention de pièces en polyoléfines (PP et P/E). Cette approche est particulièrement intéressante, car la filière des polyoléfines est actuellement une des seules filières pérennes, ce qui sous-entend que si des démontages sont effectués, ces pièces seront les premières à être extraites.

✓ Scénario 3 : démontage en vue du recyclage des peaux de pare-chocs et des vitres latérales

Ce scénario nous permet de quantifier le démontage des grosses pièces telles que les pare-chocs avant et arrière, ainsi que les pare-boue et les vitres latérales. Dans ce dernier cas, le verre feuilleté, qui compose actuellement la majeure partie des pare-brise, va commencer à être utilisé pour les vitres latérales. Sachant que ce genre de vitre ne peut pas faire

l'objet d'un démontage destructif, nous avons voulu connaître le coût et le temps de leur démontage.

Les trois derniers scénarios correspondent aux différentes approches permettant d'atteindre les taux de valorisation réglementaires.

4.1.2.2. Évaluation et comparaison de l'aptitude à la valorisation de fonctions

Nous allons dans un premier temps présenter le type de données que nous avons collectées lors de l'étude, puis nous verrons les analyses qui peuvent en être faites. Nous comparerons ensuite les véhicules et les fonctions entre eux. Enfin, nous verrons quelles types de préconisations peuvent être faites, au regard de ces analyses, pour améliorer la conception des véhicules en vue de leur démontage.

a) Les fiches par véhicules

PSA Peugeot Citroën possède beaucoup de données sur les différentes masses et matières utilisées pour la conception de leurs véhicules ou ceux de la concurrence ; en revanche il n'existe quasiment aucune donnée sur les temps ou les séquences de démontage.

Notre premier objectif a donc été d'alimenter les bases de données de « temps de démontage » de véhicule, mais aussi celles de « masses/matières ».

Nous avons donc recueilli les différents temps de démontage, les masses et les matières des pièces au cours du démontage. Les données ont été synthétisées dans les scénarios 0.

Exemple de tableau de scénario 0 (Tableau 10) :

	Désignation	Qté	M (g)	M véhicule	Matière	Filière	Coef de val	Masse val	Décharge	Tps	Tps véhicule	
1	Pare-boue partie arrière	2	187	374	PE	Oui	1	374	0	21	42	
2	Pare-boue partie avant	2	230	460	PE	Oui	1	460	0	41	82	
3	Absorbeur gauche	1	95	95	PPE	Non	0,57	54,15	40,85	2	2	
4	Absorbeur droit	1	44	44	PPE	Non	0,57	25,08	18,92	1	1	
5	Antibrouillard arrière	1	98	98	Multimat	Non	0,57	55,86	42,14	2	2	
6	Pare-chocs	1	859	859	P/E	Oui	1	859	0	320	320	
7	Peau de pare-chocs	1	2572	2572	P/E	Oui	1	2572	0	0	0	
8	Optique	2	840	1680	Multimat	Non	0,57	957,6	722,4	62	124	
9	ouïe d'aération	2	39	78	Multi plastique	Non	0,57	44,46	33,54	3	6	
10	Insonorisation	2	27	54	Tissu recyclé	Non	0,57	30,78	23,22	3	6	
11	3ème feu	1	128	128	Multimat	Non	0,57	72,96	55,04	23	23	
			6442 g						5505,89 g 936,11 g		608 s	
M = Masse valorisée / Masse totale :					0,85							

Tableau 10 : Gamme de démontage de la façade arrière d'une Peugeot 206

b) Modes d'exploitation des résultats

Les différents démontages fournissent une quantité d'informations importante qu'il faut mettre en forme par l'intermédiaire de fiches adaptées à chacun de leurs destinataires. Ainsi nous avons adapté le scénario 0 à l'intention des concepteurs et le scénario 1 plus particulièrement à l'intention des décideurs.

✓ Le scénario 0

Un des buts de l'AVF est de fournir un outil permettant d'élaborer des règles de conception simples. L'étude d'architectures existantes doit donc permettre de mettre en avant les avantages et les inconvénients des différentes solutions, mais aussi de faciliter la re-conception d'un produit existant.

Les scénarios 0, en regroupant l'ensemble des pièces d'une fonction et en respectant les antériorités, sont le reflet exact de la conception d'un véhicule. Nous avons classé les pièces en quatre catégories :

- les pièces recyclables intéressantes par leur masse et leur temps de démontage faible ; ces pièces sont caractérisées par une pente élevée dans leur représentation par le graphique masse valorisable / temps ;
- les pièces recyclables dont le démontage est fastidieux ; ces pièces sont caractérisées par une pente faible dans leur représentation par le graphique masse valorisable / temps ;
- les pièces valorisées énergétiquement imposant un démontage car précédant une pièce recyclable ;
- les pièces valorisées énergétiquement n'imposant pas un démontage en accord avec le graphique des antériorités.

L'identification de ces différentes pièces permet de mettre en avant les points bloquants dans une architecture. Nous avons donc mis en place un code couleur et un code graphique afin de faciliter la lecture des fiches. De plus cette codification simplifie le traitement des données pour l'élaboration des scénarios 1, 2 et 3.

Prenons en exemple la face arrière de la Peugeot 206 (Figure 29). Il apparaît clairement que les pièces démontées après la peau du pare-chocs, c'est-à-dire les optiques, les ouïes d'aération, l'insonorisant et le troisième feu stop ne seront pas démontées dans le cadre d'un démontage systématique (dernières pièces de la gamme de démontage). D'autre part, les

pièces valorisées énergétiquement imposant un démontage, ne représentent pas un point de blocage particulier (faible masse, faible temps de démontage). En revanche, le temps de dépose du pare-chocs étant long (environ 500 secondes), il semble être un facteur limitant la rentabilité du démontage d'une telle architecture.

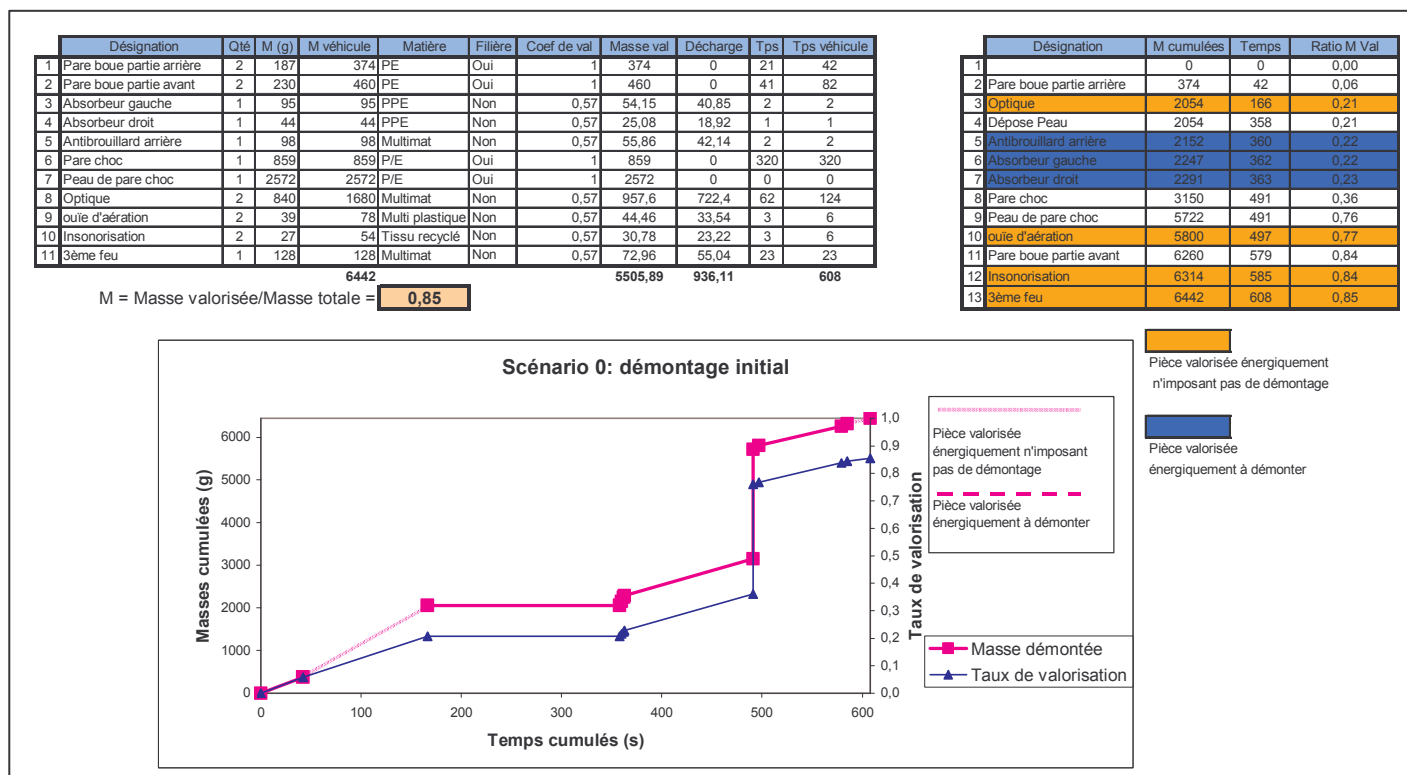


Figure 29 : Graphe de démontage de la façade arrière d'une Peugeot 206 pour le scénario 0

Ce scénario apporte donc une aide non négligeable à la conception ou à l'analyse d'architecture, même si son utilisation requiert un graphique de liaisons et d'antériorité pour une exploitation complète de l'information.

✓ Le scénario 1

Les scénarios 1 permettent d'observer la masse réellement démontée à chaque moment de l'opération de traitement, mais aussi de suivre l'évolution du coût de traitement. Lorsque l'opération de démontage commence sur une fonction, une masse valorisable peut apparaître ; elle correspond à la masse laissée sur le véhicule affectée de son coefficient de valorisation (0,57 pour la valorisation énergétique ou 0,98 pour les métaux). Ces éléments resteront liés à la structure et seront broyés. Le coût de traitement initial est lui aussi non nul car il existe déjà

un « coût de traitement matière » affecté à ces éléments. Au fur et à mesure du démontage, la masse et le coût total vont évoluer en cumulant les valeurs affectées aux pièces démontées. Toutefois, si le démontage est arrêté avant la fin du scénario, ces deux résultats vont prendre des valeurs différentes car ils ne prennent pas en compte le « coût matière » des éventuelles pièces alors non démontées. Nous avons donc calculé les différents « Coûts si Arrêt », « Masse Valorisée si Arrêt » et « Ratio si Arrêt ». Ces résultats, en les comparant aux valeurs finales et aux objectifs fixés, indiquent aux responsables du traitement si un démontage partiel est éventuellement envisageable.

Dans le cas de l'habillage latéral de la Ford Focus (Figure 30) on peut ainsi envisager trois solutions de démontage :

- démontage total ($t = 920$ s) $M=0,81$; $R = -23,93$ F
- démontage partiel ($t = 660$ s) $M=0,79$; $R = -18,78$ F
- démontage partiel ($t = 300$ s) $M=0,74$; $R = -12$ F
- aucun démontage ($t = 0$ s) $M=0,57$; $R = -3,64$ F

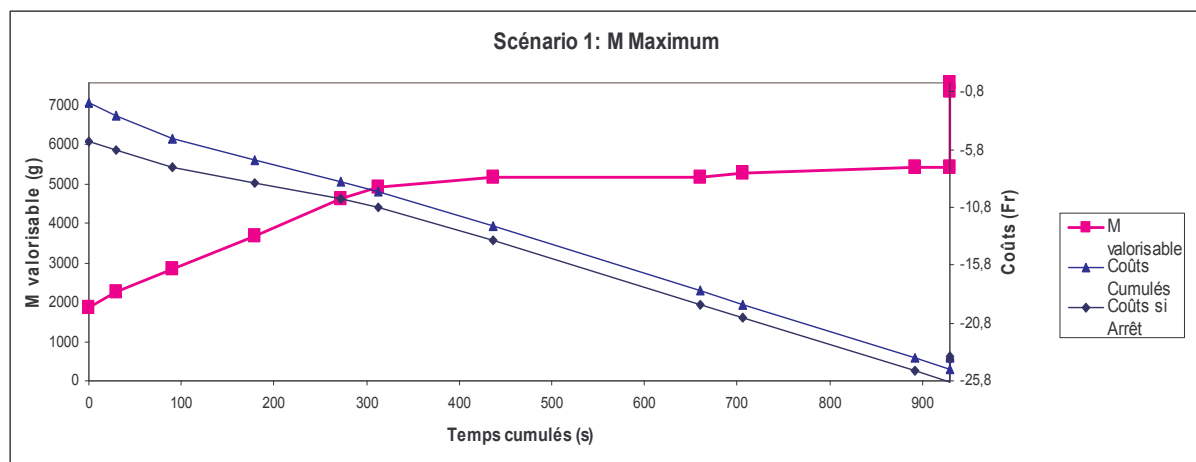


Figure 30 : Graphique de coût et de masse valorisable de l'habillage latéral d'une Ford Focus

Ce type d'informations permet de mettre en évidence, par exemple, l'inutilité du démontage des assises avec structure métallique (toutes les assises avant) tant qu'il n'existe pas de filière de retraitement pérenne des mousses d'assises.

En ajoutant des informations indispensables à une vision globale du démontage, le scénario 1 apporte les éléments nécessaires à la définition d'un démontage optimal de chaque fonction.

c) Comparaison par véhicule et par fonction

En appliquant la méthode AVF à des véhicules complets, nous obtenons des résultats qui nous permettent une comparaison entre les fonctions d'un même véhicule et entre des véhicules différents.

Nous avons récapitulé les principaux résultats de ces évaluations pour chaque fonction de chacun des véhicules dans les graphiques ci-dessous (Figure 31 et Figure 32).

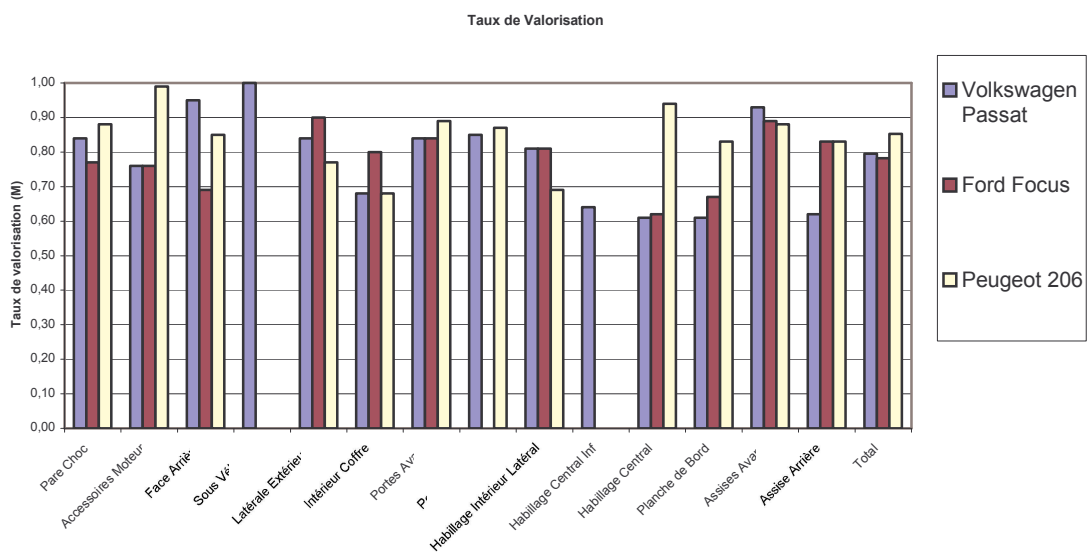


Figure 31 : Taux de valorisation par fonction et par véhicule

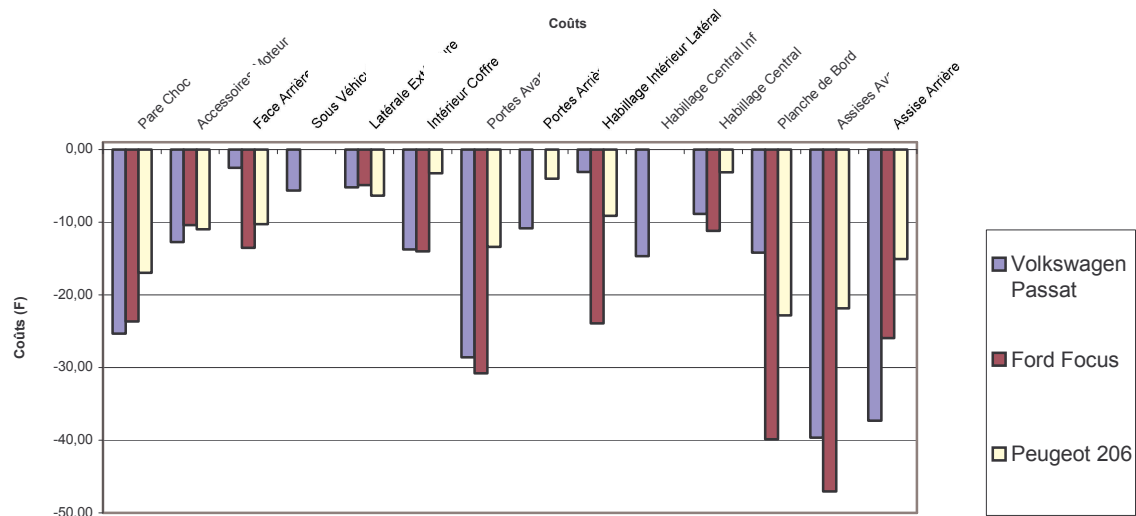


Figure 32 : Coût de traitement par fonction et par véhicule

Pour cette comparaison, nous avons sélectionné le scénario 1 qui reflète le potentiel maximal des différents modèles. Les critères choisis sont la masse totale, le taux de valorisation total, le taux de recyclage total et le coût de traitement. Ils permettent de situer un ensemble de fonctions par rapport aux objectifs réglementaires.

Ces résultats restent cependant partiels, car ils sont restreints aux fonctions étudiées en excluant la structure et la mécanique qui possèdent un fort potentiel de valorisation. De plus, la comparaison s'effectue ici sur des véhicules de segments différents ce qui engendre des niveaux de finitions et d'équipements très différents :

- Volkswagen PASSAT 1.8T Tiptronic, Segment M2, berline 4 portes ;
- Ford Focus 2.0 16V Ghia, Segment M1, coupé 3 portes ;
- Peugeot 206 1.9D XR Présence, Segment B2, berline 5 portes.

Ces différences s'expriment premièrement dans la masse des fonctions étudiées. Ainsi, la masse de l'habillage intérieur et des sièges des véhicules est proportionnelle aux niveaux de gamme. De plus, les portes de la Focus sont plus grandes (accès aux places arrière), leurs habillages sont donc évidemment plus lourds. Une finition soignée s'accompagne aussi souvent d'un taux de valorisation faible dû à l'utilisation de matériaux plus nobles (tels que le bois ou le cuir) et souvent moins valorisables (cf. planche de bord).

Globalement, la masse totale démontée sur chacun des véhicules représente un pourcentage équivalent de la masse globale (Tableau 11) :

	Masse démontée (kg)	Masse totale (kg)	Pourcentage
Peugeot 206	137,8	1055	13 %
Ford Focus	172,9	1150	15 %
Volkswagen Passat	212,5	1550	14 %

Tableau 11 : Ratio de la masse démontée par rapport à la masse totale du véhicule

En supposant que la hiérarchie de taux et de coût est conservée lors de la recomposition au niveau global du véhicule, nous pouvons affirmer que la Peugeot 206 est la plus performante (en taux et en coût), suivie de la Volkswagen Passat et de la Ford Focus. Le coût total de

traitement de la 206 est inférieur de 38 % à celui de la Passat et de 44 % à celui de la Focus pourtant de segment plus proche.

Pour pouvoir améliorer un produit, il est indispensable de cibler les fonctions qui possèdent un potentiel de progression intéressant. Dans ce but, nous avons réalisé un tableau récapitulatif pour la 206 (Figure 33).

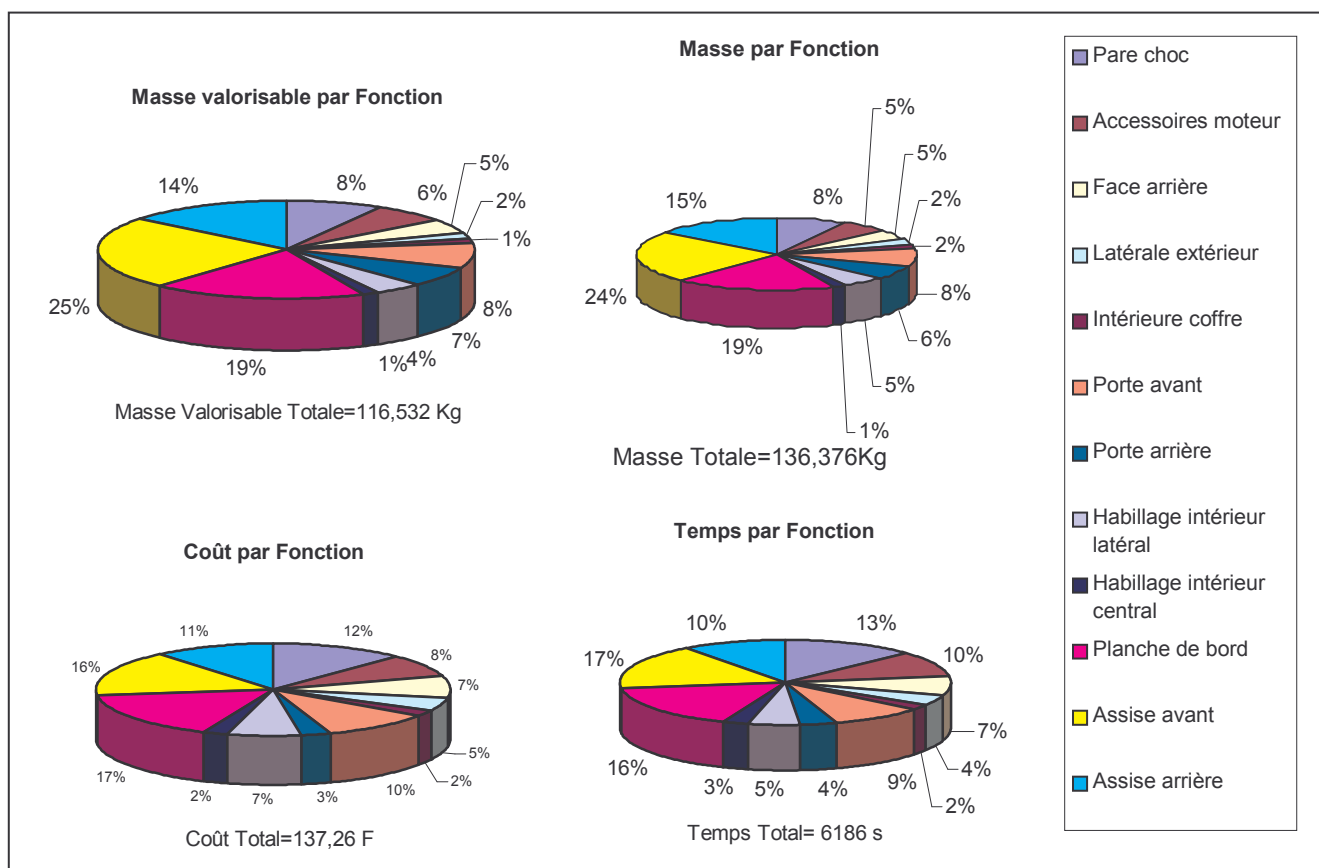


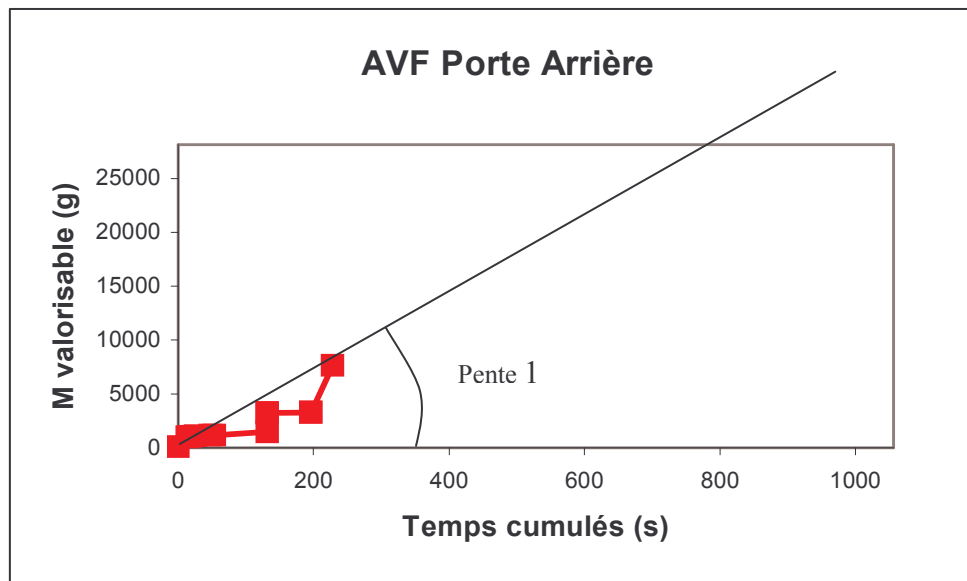
Figure 33 : Comparatif des fonctions de la Peugeot 206

Nous pouvons noter que le coût total est étroitement lié au temps de démontage (même répartition dans les diagrammes), une diminution du coût de démontage passe donc irrémédiablement par une diminution des temps des opérations.

Pour comparer et classer les fonctions d'un même véhicule entre elles, nous avons tracés les graphiques du scénario 1 dans des fenêtres de dimensions équivalentes. Nous avons mis en avant les fonctions dont le rapport « masse démontée » sur « temps total de démontage » était le plus élevé. Nous avons également fait apparaître quatre indicateurs :

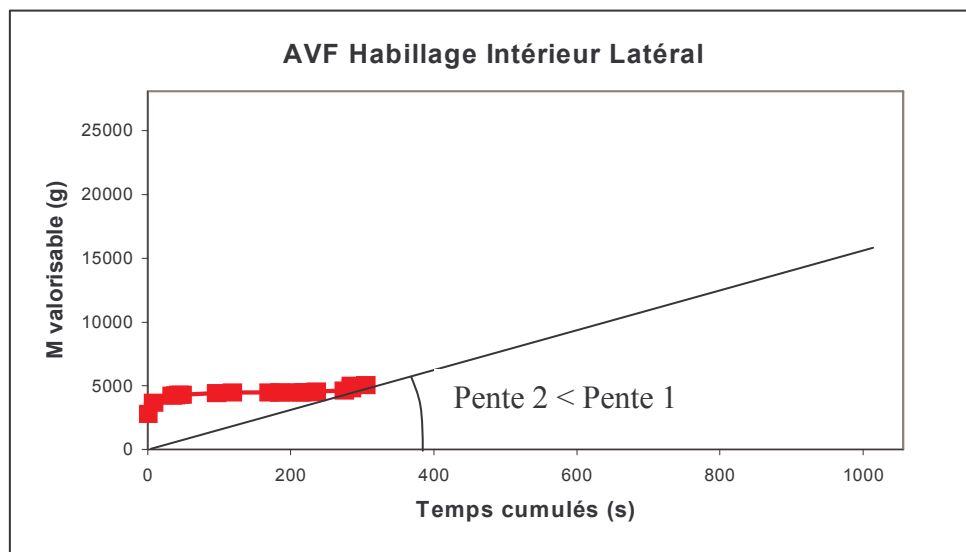
- le taux de valorisation avec démontage (M) ;
- le coût de traitement démontage (R) ;
- le taux de valorisation sans démontage (M ($t = 0$))
- le coût de traitement sans démontage (R ($t = 0$))

En procédant de la sorte la fonction « Porte Arrière » précède la fonction « Habillage Intérieur Latéral ». Ces données nous permettent de hiérarchiser les fonctions mais également de justifier les choix en termes de démontage (Figure 34 et Figure 35).



M avec démontage	R démontage	M sans démontage	R sans démontage
0,83	-4,01	0,57	-4,69

Figure 34 : AVF de la porte arrière d'une Peugeot 206



M avec démontage	R démontage	M sans démontage	R sans démontage
0,69	-9,15	0,57	-3,89

Figure 35 : AVF de l’habillage intérieur latéral d’une Peugeot 206

d) Préconisation de conception

Un autre objectif de cette étude était d’apporter les premières préconisations évidentes de conception. Nous nous attacherons donc dans cette partie à comparer la même fonction « Pare-chocs avant » entre les trois véhicules démontés, afin de déterminer certaines préconisations de conception.

- Problèmes de définition de zone

Le premier problème que nous avons rencontré lors de la comparaison entre véhicules est la définition de « zone de travail » et la délimitation de la fonction étudiée.

Ainsi, pour l’étude des pare-chocs avant des trois véhicules démontés, les tableaux de pièces montrent que les périmètres des fonctions ne sont pas les mêmes (Tableau 12).

Pour l’étude des pare-chocs, le problème est que pour la Volkswagen Passat, le radiateur (en multimatériaux de 8208 grammes) doit être retiré pour permettre l’accès à d’autres pièces volumineuses. Le bilan masses/matières est donc tronqué, puisque nous ne comparons plus

des pièces de même « nature ». C'est pour cela que la définition des zones et la limite des fonctions doivent bien être précisées avant de commencer toute comparaison.

Une fois cet élément pris en compte, nous pouvons confronter les différentes conceptions de la fonction pare-chocs.

Peugeot 206		Volkswagen Passat		Ford Focus	
1	Défecteur calandre	1	Pare-Boue	1	Couvercle bac batterie
2	Écusson	2	Écran aérolite	2	Bac batterie
3	Calandre gauche	3	Calandre	3	Fixation batterie
4	Calandre droite	4	Bouclier	4	Réservoir lave vitre
5	Optique gauche	5	Clignotant	5	Boîtier fusible
6	Optique droit	6	Support écusson	6	Bocal dégazage
7	Pare-boue	7	Décor écusson	7	Grille auvent droit
8	Défecteur	8	Bandeau	8	Grille auvent gauche
9	Sous calandre	9	Sous calandre	9	Boîte à air
10	Pare-chocs	10	Défecteur	10	Résonateur
11	Peau pare-chocs	11	Optique	11	Durite boîte à air
12	Absorbeur	12	Corne	12	Col entrée air
		13	Avertisseur sonore	13	Hélice
		14	Gâchette serrure capot	14	Grille hélices
		15	Durite d'air	15	Essuie glace
		16	Hélice ventilateur	16	Cache essuie-glace
		17	Support ventilateur	17	Insonorisation sous capot
		18	Moteur ventilateur		
		19	Poutre		
		20	Durite turbo		
		21	Aérolite		
		22	Radiateur		
		23	Protection de serrure		
		24	Façade avant		
		25	Entrée d'air		
		26	Conduit		

Tableau 12 : Comparaison des pare-chocs des trois véhicules

- Conception de pare-chocs

Nous mènerons dans cette partie une comparaison entre la même fonction « Pare-chocs avant » des trois véhicules démontés et nous montrerons les préconisations élémentaires que nous pouvons en retirer.

D'après la répartition des matières (donnés par le bilan masses/matières fait après démontage) pour les trois pare-chocs des véhicules (en prenant en compte la remarque précédente sur la présence du radiateur pour la Volkswagen Passat) nous constatons que les trois solutions emploient différemment le PP et le multimatériaux :

- Volkswagen Passat : 35 % Multimatériaux, 29 % PP et 32 % de métal
- Ford Focus : 50 % Multimatériaux et 45 % PP

- Peugeot 206 : 30% Multimatériaux et 66 % de PP

Nous constatons que le taux de valorisation (M) et le taux de recyclage (M*) de la Peugeot 206 (M = 0,88 et M* = 0,71) sont bien supérieurs aux résultats de la Ford Focus (M = 0,77 et M* = 0,47).

L'emploi du PP (polyoléfine), qui est actuellement l'élément dont la filière de retraitement est la plus pérenne, permet à la Peugeot 206 d'avoir un meilleur potentiel de valorisation que les deux autres véhicules.

L'architecture des pare-chocs est différente suivant les véhicules. Dans certains cas il est possible d'effectuer des regroupements autour de la pièce cible que constitue le pare-chocs.

Ford Focus :

- ↳ Peau de pare-chocs (PP) : 1900 grammes

Volkswagen Passat :



- ↳ Pare-chocs + bandeau (PP) = 3811 grammes

Peugeot 206 :



- ↳ Pare-chocs + peau de pare-chocs + sous calandre = 3700 grammes

Comme nous l'avons indiqué précédemment, le temps est le paramètre qui a le plus d'influence sur le coût de démontage. Cet exemple de regroupement de matière est particulièrement éloquent au regard du coût de traitement des différents pare-chocs (16,95 F pour la Peugeot 206 et 23,68 F pour la Ford Focus soit une différence de 28 %).

- Préconisations

Le but des préconisations est double : diminuer le coût de valorisation par démontage et maximiser les taux de valorisation et de recyclage.

En s'appuyant sur ces travaux, plusieurs préconisations élémentaires apparaissent (voir Tableau 13) :

- Pour la maîtrise des coûts : il faut limiter le temps de démontage en favorisant les groupements de pièces qui suivent la même filière de valorisation. L'architecture des fonctions et les liaisons entre les pièces doivent permettre de tels regroupements.
- Pour maximiser les taux de valorisation et de recyclage : il faut favoriser l'utilisation de matières possédant des filières de valorisation pérennes.

	Conseillé	Déconseillé	Exemples rencontrés
Entre deux pièces compatibles	Fixation compatible (clips plastiques sans insert métallique) Bouterolles Colle	Agrafes métalliques Insert métallique	Déflexeur pare-chocs 206 (8 agrafes métalliques) Sous calandre 206
Entre deux pièces incompatibles (filières de valorisation différentes)	Bouterolles Insert sur pièce non recyclable	Insert sur pièce recyclable Liaisons permanentes	Montant central supérieur 206 : mousse collée sur P/E Panneaux de porte bouterollés (une à deux secondes par bouterolle)

Tableau 13 : Exemples de préconisations de conception

Exemples :



L'expérience acquise lors de cette étude nous a ainsi permis d'enrichir et de valider la liste des préconisations déjà existantes.

4.1.2.3. Mise à disposition de l'outil

La méthode AVF est donc l'outil que nous avons retenu pour réaliser les évaluations quantitatives de certaines fonctions. Cet outil destiné au concepteur reste un maillon indispensable de l'analyse du véhicule. Conçu à l'origine pour être informatisé afin d'être mis à disposition des concepteurs, nous avons poursuivi ces travaux en cherchant à automatiser l'un des éléments essentiels de la méthode, c'est-à-dire la génération de la gamme de désassemblage. En l'état, cette action nécessite en effet l'intervention d'un expert.

Nous avons ainsi réalisé une étude, en collaboration avec le LAB²⁸ [LEHMANN et al. 00], afin de déterminer une méthode permettant l'automatisation de cette tâche.

Pour résoudre ce problème, la première étape de l'étude a été la modélisation du produit sur la base des travaux réalisés par le LAB [HENRIOUD 89] afin de pouvoir établir des gammes de désassemblage. Cette modélisation passe par l'acquisition des caractéristiques des pièces (matière, poids), des caractéristiques des liaisons (noms des pièces solidarisiées, liste des liaisons dites antérieures, temps de démontage, type d'outil à utiliser) et des caractéristiques des solidarisations (liste des liaisons qu'elle solidarise, liste des liaisons qui doivent être brisées antérieurement, temps de démontage, outil de démontage).

²⁸ LAB : Laboratoire d'Automatique de Besançon.

A partir de cette modélisation, il faut être en mesure de sélectionner la meilleure gamme de désassemblage possible. Une des solutions serait de générer toutes les gammes envisageables et de sélectionner la meilleure à l'aide d'un algorithme « simple ». Malheureusement, et comme nous avons pu le constater, le nombre de gammes possibles augmente très rapidement dès que l'on ajoute un composant au système. Cette situation entraîne, pour certaines fonctions complexes (comme une planche de bord), et a fortiori au niveau d'un véhicule complet, des problèmes d'explosion combinatoire. Nous avons donc choisi de nous orienter vers des algorithmes stochastiques²⁹ [PRINS 94], [CHARON 96] qui permettent de déterminer la meilleure solution en ne générant qu'un nombre limité de gammes.

Pour créer une gamme, il faut d'abord vérifier les contraintes d'antériorité, afin de savoir si la gamme est physiquement réaliste. En modélisant les gammes, nous avons vu qu'elles pouvaient s'identifier à une suite d'opérations, et que nous pouvons ainsi facilement élaborer une gamme voisine en permutant les blocs d'opérations.

Ainsi, la méthode choisie se décompose en trois étapes :

- La génération d'un graphe de précedence ;
- La recherche d'une gamme de désassemblage par défaut ;
- La recherche d'une gamme optimale.

Afin de tester et valider cette méthode, une maquette logicielle (GADESA) a été développée.

La recherche des gammes de désassemblage en utilisant les algorithmes stochastiques s'est révélée très performante en comparaison des méthodes d'exploration systématique. Une comparaison a été faite sur une fonction simple (un panneau de porte). Les résultats sont obtenus en quelques secondes pour la méthode que nous avons retenue, contre 5 à 10 minutes pour un algorithme explorant toutes les solutions et cherchant la meilleure.

4.1.2.4. Gains de connaissances

Nous avons tout d'abord pu accroître notre connaissance sur l'aptitude à la valorisation des fonctions pouvant être démontées, ainsi que sur la méthode d'évaluation de cette aptitude.

²⁹ Stochastique : se dit de phénomènes dont l'évolution ne semble pas déterminée par le passé, mais soumise au hasard.

Nous avons défini l'ensemble des fonctions pouvant être démontées ainsi que le périmètre de chacune d'elles. Nous avons également pu constater que ces différentes fonctions étaient indépendantes les unes des autres, c'est-à-dire qu'aucune pièce n'est commune à deux fonctions différentes. Ceci permet de réaliser l'évaluation de chaque fonction de manière indépendante. L'ensemble des données que nous avons obtenues nous a permis de comparer les fonctions d'un même véhicule entre elles et de comparer des fonctions similaires de plusieurs véhicules. Cela nous a amené à sélectionner et à hiérarchiser les différentes fonctions d'un point de vue démontage (pertinence du démontage, profondeur de démontage optimum...). L'ensemble de ces résultats fait clairement apparaître que le coût de traitement de la fonction est étroitement lié au temps de démontage. De plus, aucun démontage n'est économiquement rentable. Seul un gain important au niveau du temps de démontage rendrait celui-ci économiquement viable. Néanmoins, l'expertise acquise lors des démontages nous a permis de valider les préconisations de conception existantes chez PSA Peugeot Citroën et d'en proposer de nouvelles.

La mise en œuvre de la méthode AVF sur un nombre important de fonctions (une quarantaine) nous a conduit à constater la nécessité de son informatisation dans l'optique d'une mise à disposition des concepteurs. L'étude réalisée avec le LAB nous a permis de valider la faisabilité de cette informatisation. Ces travaux nous ont également amenés à mesurer les limites de la méthode. Il semble en effet utopique de vouloir étendre cette méthode à l'ensemble du véhicule. La méthode employée serait surdimensionnée par rapport aux résultats attendus. Dans tous les cas, cette méthode ne peut être utilisée que lorsque toutes les données nécessaires sont disponibles pour la fonction étudiée, ce qui n'est possible que relativement tardivement durant le processus de conception. De plus, et comme nous l'avons souligné en conclusion du chapitre précédent pour l'AVV (voir paragraphe 4.1.1.5), son déploiement auprès des concepteurs nécessiterait d'avoir des données structurées au niveau de la définition du produit afin de pouvoir automatiser un maximum de tâches, ce qui n'est pas encore le cas.

En l'état, et même après avoir proposé une méthode d'analyse des évaluations qui permet une lecture et une comparaison plus simples entre les fonctions, comme nous l'avons fait, cet outil reste avant tout un outil d'expertise.

4.1.3. Outil d'investigation n°3 : outil de simulation d'un atelier de démontage

Cette étude a pour objectif d'accroître notre connaissance sur l'activité du démolisseur. Pour ce faire, nous avons choisi de réaliser une simulation des activités d'un atelier de démontage. Nous allons donc définir les différentes données que nous souhaitons acquérir à travers cette étude. Nous développerons ensuite la méthode mise en œuvre pour obtenir ces résultats. Nous verrons quelles sont les conditions d'utilisation de l'outil qui a été développé dans le cadre de l'intégration de la valorisation en conception. Enfin, nous ferons une synthèse des différents apports de cette étude qui a été réalisée en collaboration avec le LAB³⁰ [PISTER 01].

4.1.3.1. Principe et objectifs

Le développement de l'AVV (paragraphe 4.1.1) nous a permis de définir que l'aptitude à la valorisation peut être calculée à partir de la somme des évaluations correspondant aux différentes étapes de traitement d'un VHU. Parmi celles-ci, l'étape de démantèlement est la plus complexe à évaluer. En effet, si l'AVF nous permet de générer des gammes de désassemblage des fonctions, la somme de ces temps n'est pas représentative du temps global de démontage du véhicule, car elle ne prend pas en compte les déplacements et les opérations qui sont réalisés entre le démontage de chaque fonction. Pour estimer ces temps, nous devons définir l'ensemble de ces opérations annexes afin d'obtenir un temps de désassemblage global le plus représentatif des conditions réelles.

L'objectif de cette étude est de définir une méthode de modélisation et de calcul nous permettant d'évaluer les temps, et donc les coûts, liés aux opérations logistiques dans un atelier de démolition, et ce pour le pré-traitement (dépollution) et pour le démontage.

Pour ce faire, la première étape est de définir un atelier type. Cet atelier virtuel nous permettra ensuite, en y positionnant le véhicule, de générer les différents déplacements et les différentes actions réalisées par l'opérateur entre chaque démontage. Les données d'entrées de cette étude sont une nomenclature type des moyens disponibles chez un démolisseur et les temps techniques de dépollution et de démontage.

³⁰ LAB : Laboratoire d'Automatique de Besançon.

Dans un deuxième temps, nous devons développer une méthode de calcul nous permettant d'estimer l'ensemble des temps liés à la logistique de l'atelier. Un nombre important de données est nécessaire à ce calcul. Il s'agit essentiellement des données liées aux dimensions du véhicule, à la position des différentes fonctions traitées et aux opérations issues des gammes micro (AVF et dépollution) nécessitant des grands déplacements ou des opérations spéciales.

Cette méthode doit nous permettre de calculer les temps annexes de dépollution et de démontage et de générer des gammes macroscopiques qui, cumulées avec les gammes micro, permettent d'obtenir la gamme optimale complète de dépollution et de désassemblage du véhicule en fin de vie. L'ensemble des données d'entrées et des résultats attendus est présenté sur la Figure 36 :

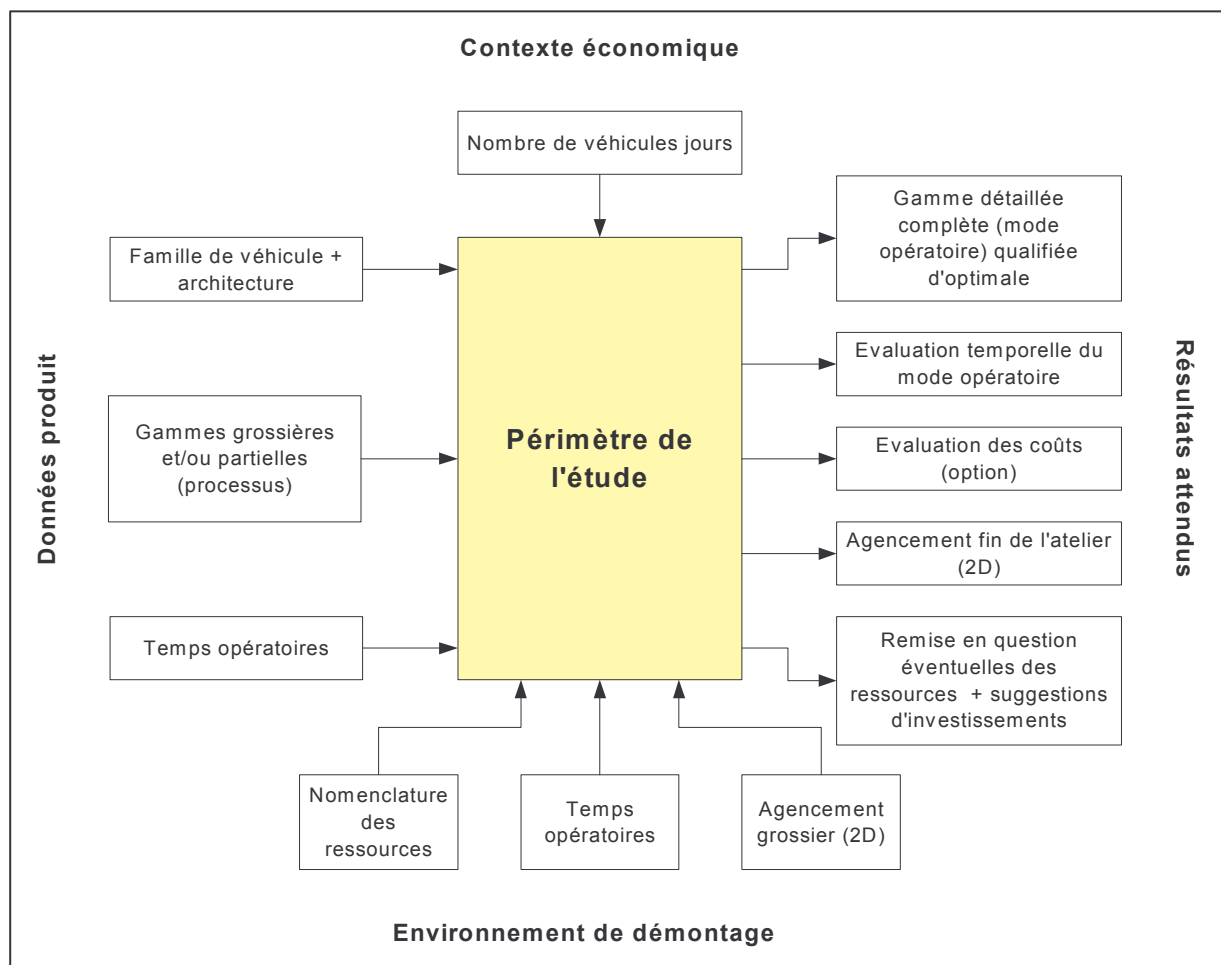


Figure 36 : Données d'entrée et résultats attendus

4.1.3.2. Développement de l'outil de simulation

Le développement de l'outil de simulation se fait en deux étapes : la modélisation du problème et la recherche de solutions nous permettant d'effectuer le calcul.

a) Modélisation du problème

La première étape de l'étude a été de modéliser le problème et de poser les hypothèses de départ.

Les principales hypothèses retenues sont les suivantes :

- Des zones sont déterminées sur les VHU (par exemple le pare-chocs avant) et des AVF (évaluation de l'Aptitude à la Valorisation d'une Fonction) sont déterminées pour chaque zone. Les AVF sont des gammes qui intègrent les temps opératoires et sont réputées optimales. Ces gammes doivent être ordonnées et des éléments annexes, qui n'apparaissent pas dans les AVF, sont à prendre en compte. Cela est représenté par le schéma suivant (Figure 37) :

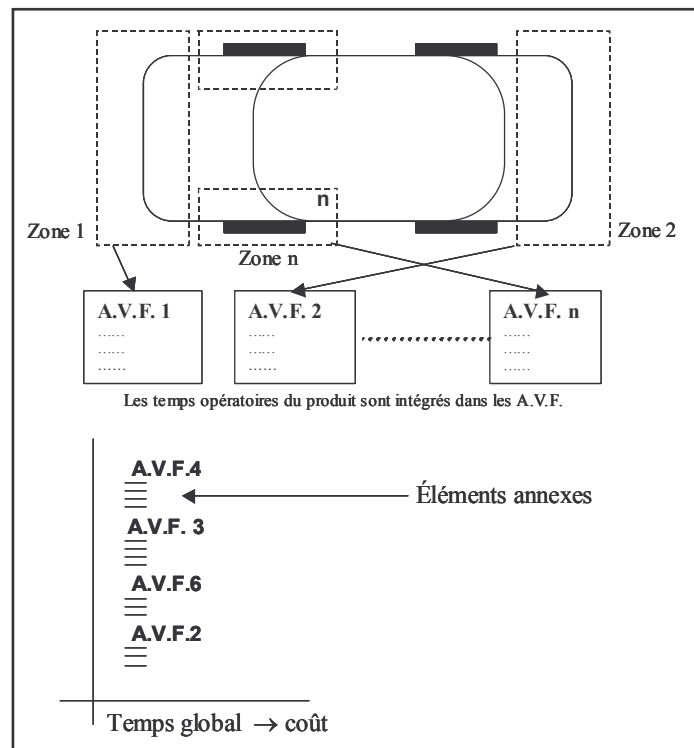


Figure 37 : AVF et zones de démontage

- Les opérations techniques (démontage ou dépollution) sont considérées comme des entités composées d'un certain nombre d'informations et sont insécables. Ces opérations sont constituées de :
 - ✓ positions de départ et de fin de l'opérateur ;
 - ✓ premier et dernier outils nécessaires à l'opération ;
 - ✓ position du véhicule (haute ou basse) ;
 - ✓ liste des matériaux ou des pièces issus du démontage ou de l'opération de dépollution.
- Lors d'un démontage, on considère que l'opérateur effectue l'ensemble des tâches affectées à l'opération technique et ne va déposer dans les lieux de stockage les éléments qu'il a récupérés qu'à la fin de l'opération.

La modélisation s'appuie sur une représentation en deux dimensions d'un atelier et du véhicule. Ainsi, les éléments constituant l'atelier et le véhicule sont assimilés à des obstacles lors des déplacements de l'opérateur. Les données issues des opérations techniques permettent de connaître les différentes positions de l'opérateur (voir Figure 38).

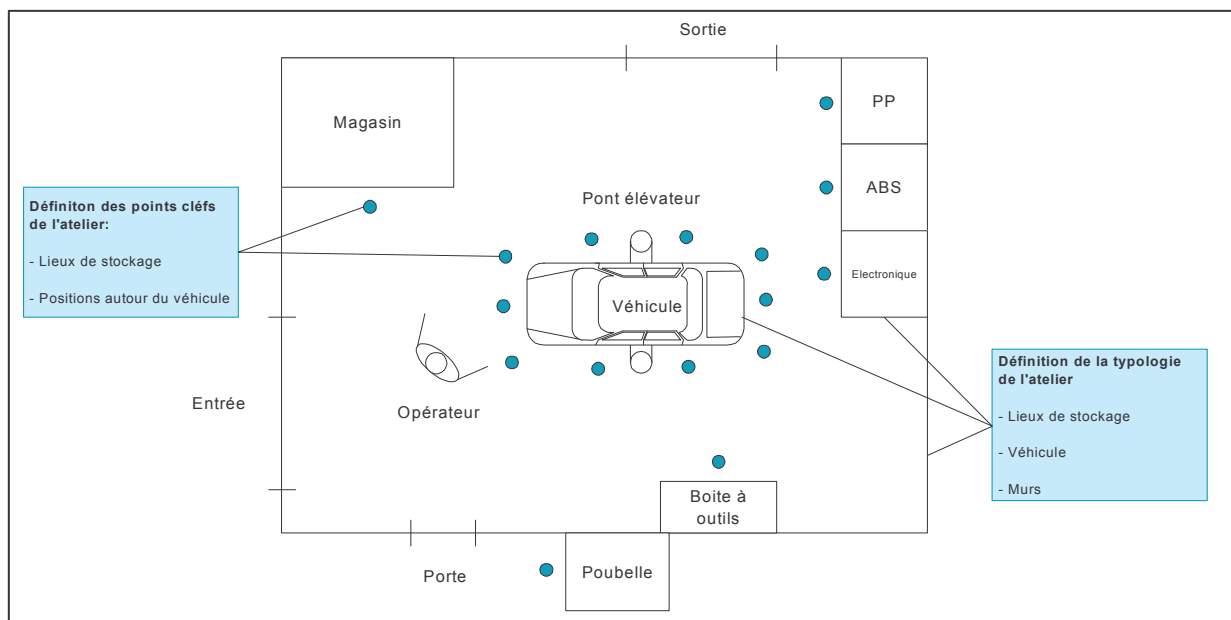


Figure 38 : Définition de l'atelier en 2D

b) Traitement du problème

A partir de ce travail, le problème est assimilé au problème du « voyageur de commerce ». Ce problème est adapté afin que la « ville » de départ (fin de l'opération $n - 1$) soit différente de la « ville » d'arrivée (début de l'opération n). Les « villes » à visiter sont les lieux de stockage et éventuellement les lieux de changement d'outils.

La résolution du problème du voyageur de commerce passe souvent par l'utilisation d'algorithmes itératifs.

Les différentes solutions étudiées sont :

- Calcul de toutes les possibilités
- Les algorithmes stochastiques
 - ✓ Les algorithmes itératifs
 - La méthode de descente
 - La méthode des sauts (kangourou)
 - La méthode Tabou
 - La méthode de recuit simulé
 - ✓ Les algorithmes génétiques
 - ✓ L'algorithme des fourmis
- Les algorithmes d'arborescences
 - ✓ Le branch and bound

La solution retenue a priori est la méthode des sauts. A l'aide des données disponibles et en utilisant cet algorithme, nous déterminons, pour tous les enchaînements possibles d'AVF, le meilleur trajet de l'opérateur. Cette étape correspond au premier niveau de combinatoire. Elle nous permet d'évaluer les temps logistiques compris entre deux opérations techniques. Pour obtenir un temps global optimal, il faut réaliser un deuxième niveau de combinatoire qui permettra d'obtenir l'ordre dans lequel doivent être effectuées toutes les opérations techniques (Figure 39).

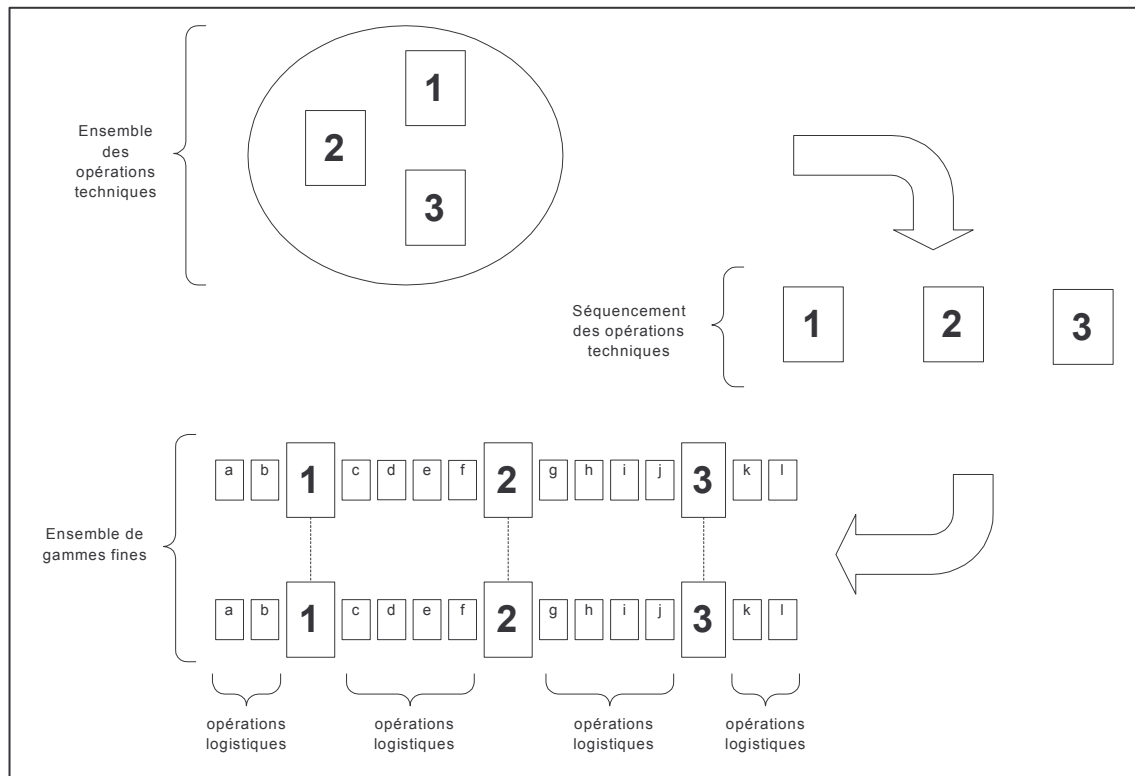


Figure 39 : Combinatoires de l'étude

La génération de cette gamme se fait à partir de l'ensemble des enchaînements de deux AVF optimisés. Les temps logistiques sont stockés dans une matrice ayant la forme suivante (voir Tableau 14) :

	AVF 1	AVF 2	AVF 3	AVF 4	AVF 5
AVF 1	X	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
AVF 2	F_{21}	X	F_{23}	F_{24}	F_{25}
AVF 3	F_{31}	F_{32}	X	F_{34}	F_{35}
AVF 4	F_{41}	F_{42}	F_{43}	X	F_{45}
AVF 5	F_{51}	F_{52}	F_{53}	F_{54}	X

Avec : F_{ij} : coût logistique entre l'AVF i et l'AVF j

Remarque : $F_{ij} \neq F_{ji}$

Tableau 14 : Matrice des coûts pour les enchaînements d'AVF

L'objectif est de trouver l'enchaînement d'AVF de coût total minimal. Cela équivaut au cas du voyageur devant minimiser les coûts de trajet en passant par toutes les villes. Pour la

résolution de cette combinatoire, l'algorithme des sauts est utilisé et permet de trouver l'enchaînement optimal des AVF ou, en d'autres termes, la gamme réputée optimale. Ainsi, l'optimisation des opérations logistiques permet un gain de 64 % par rapport aux opérations non optimisées.

Pour valider ces hypothèses, nous avons développé une maquette informatique. Cette maquette nous a permis d'obtenir, grâce à certaines hypothèses simplificatrices, des résultats représentatifs de la réalité industrielle tels que :

- l'optimisation des opérations logistiques entre deux AVF ;
- la gamme fine réputée optimale pour un véhicule donné ;
- le coût temporel des opérations logistiques ;
- le coût temporel de cette gamme fine.

4.1.3.3. Mise à disposition de l'outil

Dans le cadre de l'intégration de la valorisation dans le processus de conception, l'outil de simulation de l'atelier de démontage serait le dernier maillon de la chaîne du calcul permettant d'évaluer de manière précise l'aptitude à la valorisation du véhicule. Dans ce cas de figure, cet outil serait à la disposition d'un expert responsable de la synthèse de l'ensemble des données nécessaires au calcul de l'AVV. Il faut en effet être en possession de l'ensemble des évaluations locales de démontage et de dépollution pour pouvoir réaliser la simulation permettant d'évaluer les temps logistiques dans l'atelier.

De plus, si l'outil de simulation doit être mis à la disposition de l'expert, son développement nécessitera l'automatisation de certaines tâches. Prenons le cas de la détermination des différents trajets possibles de l'opérateur. Lorsque ceux-ci ne sont pas rectilignes, c'est-à-dire lorsque l'opérateur rencontre un obstacle, la maquette logicielle propose à l'utilisateur d'entrer manuellement des points intermédiaires permettant le contournement de ces obstacles. L'entrée de ces points intermédiaires est particulièrement fastidieuse pour l'utilisateur. L'automatisation de cette tâche semble donc indispensable. Elle peut être réalisée à l'aide d'un algorithme spécialement adapté au contournement des obstacles que nous avons étudié au cours de ces travaux l'algorithme des fourmis.

Le dernier point concernant l'implémentation de cet outil est la nécessité de définir de manière très précise les éléments concernant la définition de l'atelier. Le choix de l'atelier a en effet un rôle primordial dans l'estimation qui est réalisée. Dans ces conditions, le choix de

l'atelier n'est pas qu'un choix technique, c'est aussi un choix stratégique par rapport au type de résultats recherché.

4.1.3.4. Gains de connaissances

Cette étude nous a permis d'accroître nos connaissances sur la phase de traitement des véhicules en fin de vie chez le démolisseur. Nous avons pu juger de la faisabilité de la simulation des activités de l'opérateur autour du véhicule et mesurer l'impact de ces activités sur le coût de traitement global du véhicule.

Le calcul des temps logistiques nous a permis de calculer le ratio temps logistiques / temps techniques. Il apparaît que le temps des opérations logistiques optimisées sont faibles mais non négligeables par rapport au temps total de la gamme fine et même par rapport au temps de la gamme brute. Le cumul des temps logistiques représente en effet environ 5 % du temps total de traitement du véhicule (Tableau 15). Ce ratio nous incite pour l'instant à ne pas privilégier l'optimisation des temps logistiques, mais à continuer le travail sur les temps de démontage des fonctions. Il est important de nuancer ces résultats, car les AVF comportent une proportion d'opérations logistiques non chiffrées. Les temps issus d'un modèle plus complet et d'hypothèses moins réductrices feraient sans doute évoluer largement le ratio en défaveur des temps logistiques.

	Σ temps AVF (s)	Temps logistiques (s)	Temps total (s)
Peugeot 206	5620	351 (5,9 %)	5971
		non optimisé 988 (15 %)	6608
Volkswagen Passat	9140	386 (4 %)	9526

Tableau 15 : Ratio temps de démontage / temps logistiques

Dans tous les cas, cette étude aura permis d'avoir une meilleure vision des moyens de simulations possibles d'un démolisseur. En plus de l'analyse sur les coûts logistiques à l'intérieur de l'atelier développée ici, on peut imaginer approfondir l'analyse en travaillant sur

l'ensemble de la logistique chez le démolisseur. Une modélisation de type OGP³¹, avec des analyses de flux de véhicules et d'occupation des installations, par exemple, permettrait de modéliser non plus un atelier type, mais un démolisseur type. A terme, un tel outil pourrait être un outil de négociation pour optimiser la taille du démolisseur et les investissements nécessaires.

³¹ OGP : Organisation de la Gestion de Production.

4.1.4. Outil d'investigation n°4 : outil qualitatif d'évaluation de l'aptitude à la valorisation

Les différents travaux que nous avons réalisés autour de la notion d'aptitude à la valorisation grâce aux OI nous ont permis d'accroître notre connaissance sur l'aspect quantitatif de cette notion. Mais, pour qu'elle soit complètement prise en compte dans le processus de conception, il est important de savoir évaluer l'aptitude à la valorisation très tôt lors de la conception. Malheureusement, l'approche quantitative ne nous le permet pas. En effet, nous devons avoir à notre disposition des informations précises sur la nature des éléments à évaluer. Pour pouvoir intervenir très en amont, il est nécessaire de pouvoir faire des évaluations qualitatives. Nous allons exposer ici les objectifs du développement d'une telle méthode. Nous décrirons ensuite la conception d'un outil d'évaluation qualitatif et les conditions de son utilisation en conception. Nous conclurons par une synthèse des connaissances acquises grâce à cet outil.

4.1.4.1. Principe et objectifs

Dans le cadre du développement de la méthode AVV, nous avons choisi d'utiliser l'AVF pour réaliser les évaluations sur les fonctions. Elle permet de calculer un indicateur d'Aptitude à la Valorisation d'une Fonction à partir de données sur l'architecture de la fonction, sur les matériaux utilisés, sur le coût de démontage et de traitement des différentes pièces, etc. Cette évaluation ne peut donc se faire que tardivement lors de la conception. En effet, les données nécessaires au calcul ne sont disponibles que lors de la phase de développement du véhicule. Or, certaines décisions concernant les choix d'architecture ou de solutions technologiques ayant une influence majeure sur la valorisabilité d'une pièce, d'une fonction, et plus globalement du véhicule, sont prises très tôt lors du processus de conception. Et comme le rappelle Millet [MILLET 95], il est toujours plus efficace d'agir sur le produit le plus en amont possible de la conception pour avoir les résultats les plus probants en termes de valorisation.

Il est donc important de fournir aux concepteurs un outil permettant d'évaluer l'aptitude à la valorisation d'une pièce, d'une fonction, voire d'un concept, dès les phases amont du processus de conception. Cette évaluation ne pouvant être basée sur des données figées, elle

ne peut être que qualitative. L'objectif de cette étude est donc de valider la faisabilité d'une telle approche et de juger de la mise à disposition d'un tel outil aux concepteurs.

L'outil doit permettre d'évaluer, d'une manière rapide, un élément (fonction, sous-ensemble, etc.) à un instant t de sa définition pour pouvoir comparer différentes solutions et indiquer quels sont les points à améliorer si l'on veut obtenir un meilleur résultat en termes d'aptitude à la valorisation. De plus, cette évaluation doit être un constat du concepteur par rapport à l'architecture et aux matériaux utilisés pour l'élément étudié. Il ne doit en aucun cas faire des choix quant à la destination fin de vie de la fonction qu'il traite. Ces choix doivent être intrinsèques à l'outil et transparents pour l'utilisateur. De plus, l'outil doit être le plus convivial possible et utiliser des termes « parlants » pour les concepteurs. Cet outil devra également permettre d'évaluer des pièces et des fonctions existantes pour les comparer rapidement entre elles.

4.1.4.2. Développement et expérimentation de l'outil

Nous allons dans un premier temps décrire les différentes solutions que nous avons retenues pour le développement d'un outil d'évaluation qualitatif, puis nous l'expérimenterons sur des cas concrets.

a) Développement de l'outil

L'analyse qualitative est généralement liée aux Sciences Humaines. Il s'agit en effet de recueillir et de traiter des informations fournies par l'estimation d'un individu et non pas des grandeurs physiques mesurées. Ces informations sont par nature subjectives, car liées à l'individu qui les fournit. L'analyse qualitative essaye de rationaliser ces données en les évaluant et en les hiérarchisant. Pour cela, on définit une liste de critères la plus objective possible pour réduire la subjectivité.

Pahl et Beitz [PAHL & BEITZ 96] ont exposé les principes de base d'une évaluation qualitative, qui doit comporter plusieurs étapes : identification et pondération des critères d'évaluation, compilation des paramètres, évaluation des valeurs, détermination des valeurs globales, comparaison des variantes de concepts et recherche des points bloquants.

Afin d'élaborer un modèle d'outil d'évaluation qualitatif, nous avons tout d'abord établi la liste des critères qualitatifs qui permettent d'évaluer l'aptitude à la valorisation des éléments qui devront être étudiés. Nous avons ensuite choisi la forme de questionnaire la plus appropriée pour renseigner ces critères et pour pouvoir en extraire les résultats voulus. Une fois l'architecture définie, nous avons élaboré un mode de pondération pour ces critères.

Les critères d'évaluation extraits de l'état de l'art peuvent être regroupés en deux parties : les critères liés aux matériaux et ceux liés au démontage [BRUGDAM 94], [BROWN et al. 93], [ZUMBROICH 94], [FORD 96].

Les critères liés aux matériaux prennent en compte l'existence d'une filière de valorisation, la pollution du matériau par un contaminant quelconque (peinture, inserts), le nombre de matériaux constitutifs de l'élément, leur compatibilité et leur séparabilité.

Les critères liés au démontage prennent en compte l'accessibilité et la compatibilité des composants et des fixations, l'orientation, l'intégration et la standardisation des fixations, l'optimisation du nombre de fixations, la présence de points de rupture prédéfinis et la modularité des composants.

Si un produit répond à l'ensemble de ces critères, il sera facilement valorisable en fin de vie, donc il aura une bonne aptitude à la valorisation.

Une fois les critères d'évaluation identifiés, nous avons défini la méthode permettant de les renseigner de manière à satisfaire le cahier des charges.

L'analyse des méthodes d'évaluation qualitative [BEHRENT et al. 97], [TRAVERE-MASSUYES 97], [VENTERE 95], [ZHANG 97b], nous a permis de recenser deux types d'architecture : les questionnaires linéaires et les questionnaires en arborescence. La forme la plus adaptée à notre liste de critères et aux types de résultats souhaités est une synthèse entre les questionnaires linéaires et les questionnaires en arborescence. Cette solution permet d'une part d'imposer un certain nombre de questions tout en limitant les questions inutiles, et d'autre part de regrouper les questions par thèmes, ce qui favorise l'identification des points bloquants. Ce choix permet d'assurer une bonne acceptabilité de l'outil d'évaluation qualitatif par les utilisateurs, qui n'auront à répondre qu'à des questions concernant le cas qu'ils traitent.

L'outil d'évaluation qualitatif se présente donc sous forme d'arborescences. Chacune d'elles regroupe un ensemble de questions avec leurs réponses associées, celles-ci étant soit des réponses terminales, soit des réponses amenant à une ou plusieurs autres questions. La représentation graphique de cet outil est la suivante (Figure 40) :

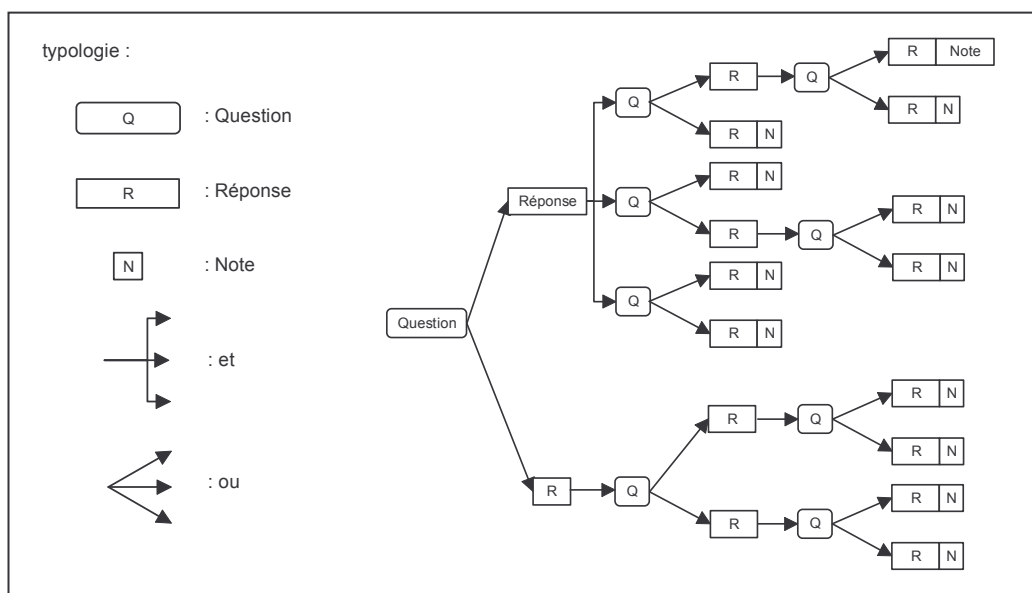


Figure 40 : Architecture du questionnaire

Une fois les critères d'évaluation et la forme du questionnaire choisis, il convient de faire le lien entre eux et de définir la forme de résultats souhaitée. Il faut ensuite pondérer ces critères et élaborer une méthode de calcul.

Les thèmes des différentes arborescences concernent les matériaux et le démontage.

Le thème lié aux matériaux est formalisé par un questionnaire qui a plusieurs fonctions : identifier les matériaux utilisés dans l'élément étudié, renvoyer au questionnaire extraction si le ou les matériaux sont à extraire, et savoir si les matériaux sont contaminés par des substances indésirables ou réglementées (Figure 41).

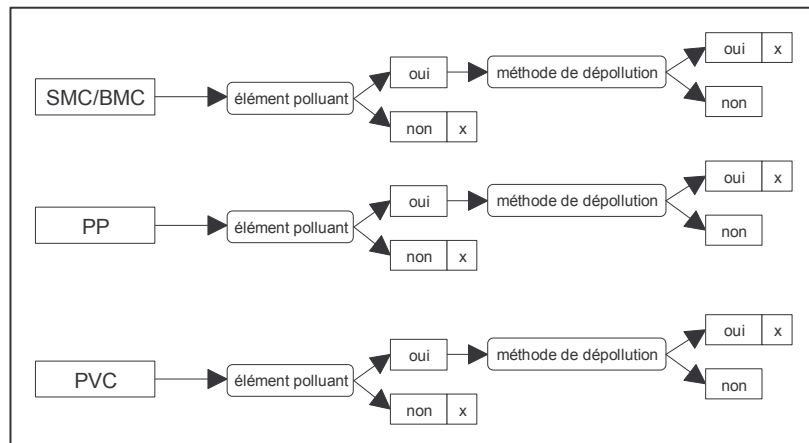


Figure 41 : Extrait du questionnaire matériaux

Le thème lié au démontage est formalisé par trois questionnaires : extraction de l'élément hors du véhicule, désassemblage de l'élément hors du véhicule (s'il s'agit d'un assemblage) et modularité de l'élément (si l'élément est suffisamment complexe pour être potentiellement modulaire) (Figure 42).

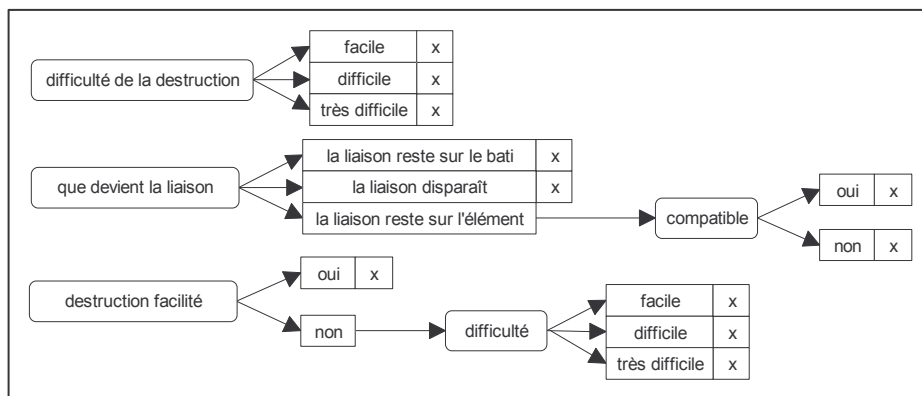


Figure 42 : Extrait du questionnaire extraction

Un cinquième questionnaire de liaison vient s'ajouter aux quatre précédemment cités. Cette arborescence principale prend en compte le type d'éléments étudiés et optimise le choix des questionnaires (Figure 43).

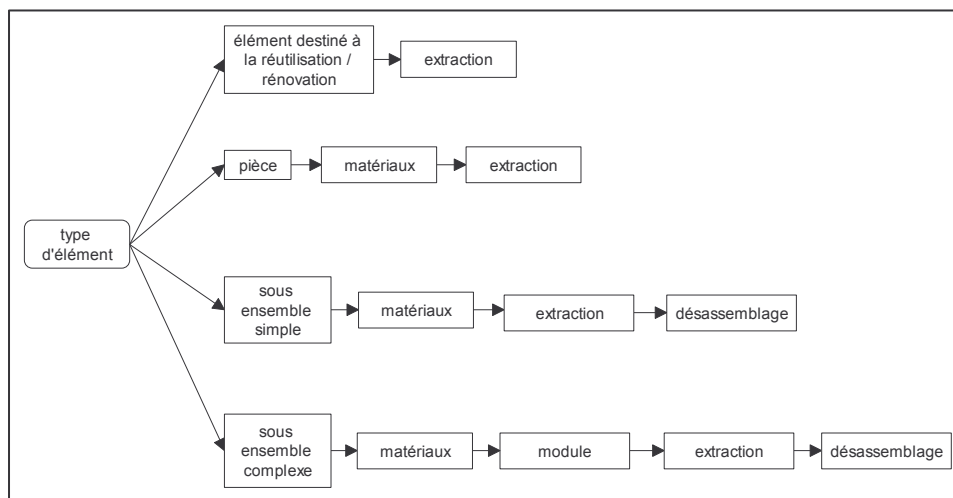


Figure 43 : Arborescence principale

Pour réduire la subjectivité des réponses [MUCCHIELLI 94] et assurer une bonne reproductibilité des résultats, deux solutions ont été mises en place. La première est l'illustration de chaque question par des exemples concrets. La seconde est de proposer un système de modélisation des éléments étudiés. En effet, pour synthétiser les termes utilisés dans les préconisations et pour pouvoir modéliser tous les cas à traiter, le questionnaire utilise des termes spécifiques qu'il convient de définir clairement pour s'assurer de la bonne compréhension par les utilisateurs. L'utilisation de ces termes permet de modéliser la fonction étudiée de manière synthétique. Cette modélisation permet de lister et de catégoriser les différents éléments constituant la fonction étudiée et leurs liaisons. Des modélisations de fonctions types seront fournies aux utilisateurs pour s'assurer de la bonne compréhension de la démarche (exemple Figure 44).



Figure 44 : Modélisation du pare-chocs avant de la Citroën Xsara Picasso

Le choix de la pondération des critères est une étape très importante, car elle conditionne entièrement les résultats de l'évaluation qualitative [LANGE 95], [ROY 85], [VENTERE 95]. Il s'agit de choisir un mode de pondération global (note de 0 à 20), puis de pondérer les critères par thèmes, ceux-ci répondant à une problématique propre.

Le principe de base de la pondération par thèmes est de pénaliser fortement les solutions ne répondant pas aux préconisations. Cela permet d'identifier rapidement les points bloquants. Par exemple, pour les critères liés au démontage, chaque difficulté de démontage est sanctionnée par une mauvaise note.

La présentation des résultats permet de comparer plusieurs solutions (note globale sur vingt). De plus, elle permet de mettre en évidence les points bloquants : la note globale est décomposée par thèmes qui sont présentés sous la forme d'un diagramme radar. Chaque thème constitue un axe du radar (voir Figure 45).

Pour chaque thème posant problème, la question à l'origine de la mauvaise note est identifiée. Si le concepteur ne peut pas agir directement sur la question obtenant le plus mauvais résultat, il aura toujours la possibilité d'agir sur une autre question de l'arborescence.

Ainsi, l'évaluation renvoie trois types de résultats :

- une note sur vingt permettant de hiérarchiser différentes solutions ;
- une représentation graphique de cette note sous forme d'un diagramme radar où chaque branche représente un thème du questionnaire, ce qui permet d'identifier rapidement les points bloquants ;
- une identification des points bloquants par thèmes (réponses ayant obtenu les plus mauvais résultats).

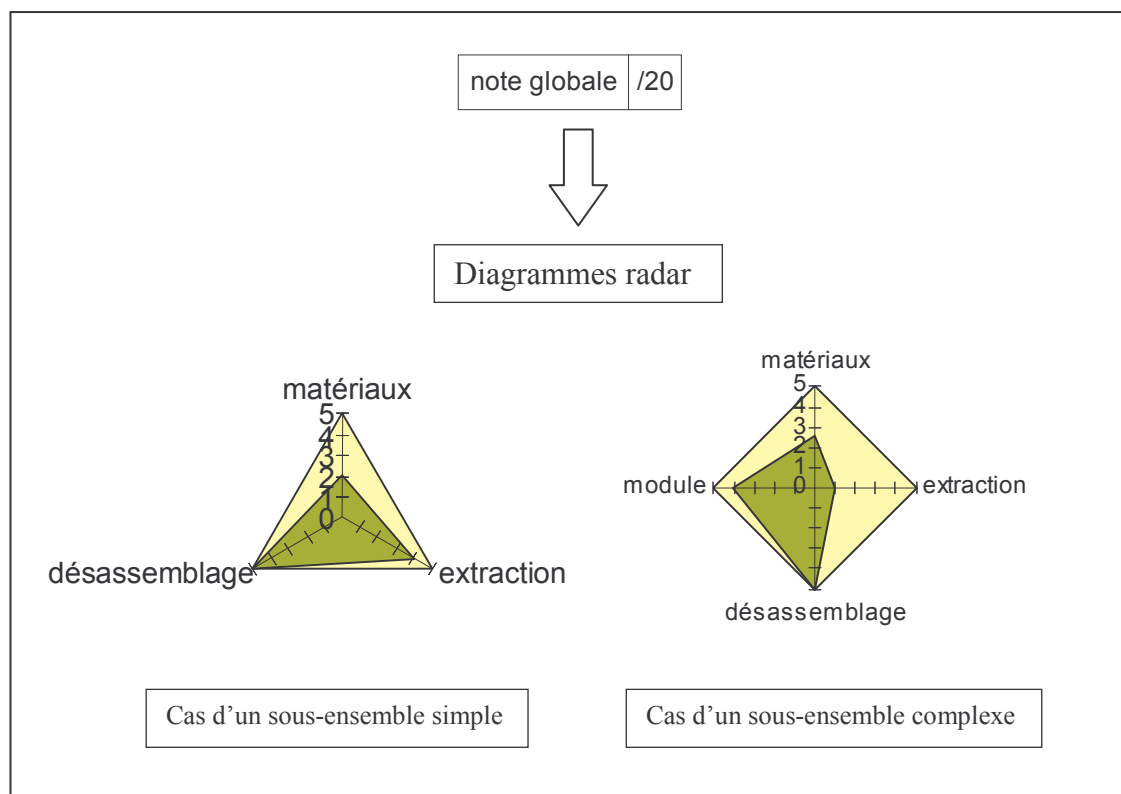


Figure 45 : Présentation des résultats

b) Expérimentations

Un protocole expérimental a permis de valider ce modèle d'outil d'évaluation qualitatif selon un certain nombre de critères définissant l'ergonomie d'utilisation du questionnaire et la cohérence des évaluations (validation de l'arborescence et de sa compréhension, validation du type de modélisation des éléments et validation des pondérations).

Les tests réalisés avec les concepteurs ont permis de valider la compréhension générale du questionnaire. Le questionnaire est très bien accepté et jugé simple d'utilisation. La durée d'évaluation a été étudiée lors de la première utilisation et lors d'utilisations ultérieures (il s'agit d'une version papier du questionnaire, qui à terme sera informatisé). Les temps d'utilisation sont en accord avec les objectifs fixés, c'est-à-dire inférieurs à 1 heure lors de la première utilisation et inférieurs à 30 minutes lors des utilisations suivantes.

Les tests pour valider la pondération des critères ont été réalisés sur des fonctions déjà évaluées par l'AVF (outil d'évaluation quantitatif de l'Aptitude à la Valorisation d'une Fonction).

Parmi l'ensemble des expérimentations réalisées, nous allons nous intéresser particulièrement à celle concernant le pare-chocs avant de la Citroën Xsara Picasso afin de vérifier la bonne corrélation avec le modèle d'outil d'évaluation quantitatif.

Le but de cette expérimentation est principalement de corréler le sens de variation des résultats. La corrélation entre le couple masse valorisée / rentabilité et la note qualitative est beaucoup plus subjective. Le test est réalisé sur cinq évolutions de conception du pare-chocs, allant de la moins favorable en termes de recyclage à une solution quasi idéale (rentabilité positive et taux de valorisation de 100 %) (voir Figure 46).

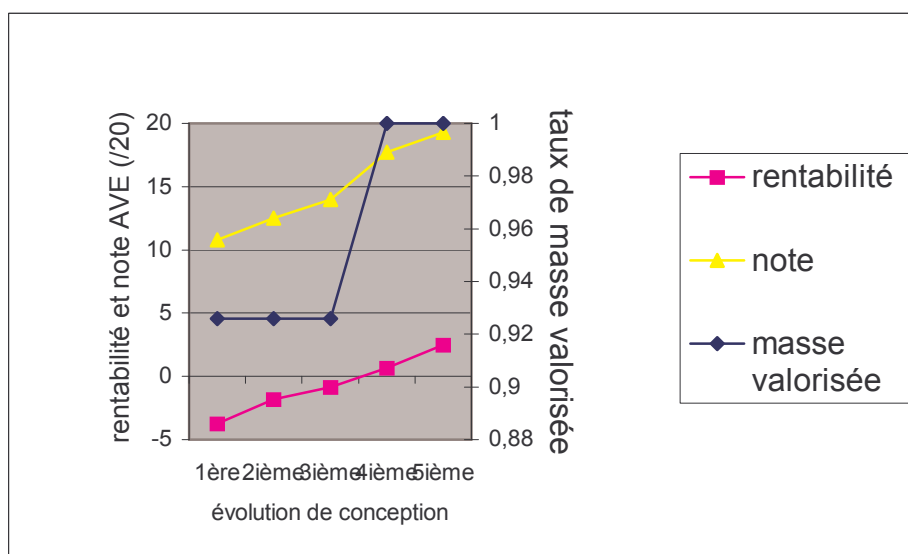


Figure 46 : Evaluation de différentes conceptions de la fonction pare-chocs de la Citroën Xsara Picasso

Les résultats obtenus lors de cette expérimentation ont montré la cohérence entre les deux types d'évaluation. Nous avons vu d'une part que les résultats d'un scénario donné indiquent un niveau similaire d'aptitude à la valorisation (une fonction valorisable à 100 % de manière rentable obtient une très bonne note, avec une rentabilité négative et un taux de valorisation moindre, la note est autour de 10/20) et d'autre part que les modifications de conception entraînent des variations dans le même sens et dans les mêmes proportions.

4.1.4.3. Mise à disposition de l'outil

Afin de faciliter son utilisation, sa diffusion et son intégration dans l'environnement du concepteur, l'outil d'évaluation qualitatif doit être informatisé.

Le premier intérêt de l'informatisation de l'outil est de pouvoir le mettre à la disposition d'un maximum d'utilisateurs. Ne nécessitant pas l'intervention d'un expert, il pourra ainsi être utilisé par les concepteurs travaillant au sein des projets véhicule, mais également par toute autre personne travaillant sur le développement de fonctions, telles que les équipes travaillant en innovation.

Le deuxième intérêt est de pouvoir stocker l'ensemble des évaluations réalisées. La base de données ainsi créée permettra d'avoir un retour d'expérience vis-à-vis des solutions développées dans l'entreprise. Cette base de données permettra également de suivre l'évolution de solutions, depuis la phase d'innovation jusqu'à sa mise en œuvre sur les véhicules.

Le troisième intérêt est de pouvoir interfacer l'outil avec la base de règles Précorec qui est également « en ligne ». L'outil d'évaluation qualitatif doit permettre d'identifier les points bloquants et d'aider à la reconception en assurant une bonne interface avec le modèle de base de règles. Or la structuration des questionnaires qui composent cet outil qualitatif fait référence au modèle de base de règles. Les notes données par le profil permettent d'identifier rapidement à quel niveau se situe le problème : matériaux, extraction ou désassemblage. Après l'identification du point bloquant dans le questionnaire concerné, le modèle de base de règles peut fournir des préconisations concrètes. Par exemple, la présence d'agrafes métalliques entre l'absorbeur et la peau du pare-chocs entraîne un problème d'incompatibilité des fixations qui sont difficiles à séparer. L'outil qualitatif devra renvoyer ainsi à des propositions concernant le mode de fixation d'éléments rapportés à la peau de pare-chocs. Le concepteur pourra ainsi rechercher dans la base de règles la solution lui permettant de lever son point bloquant selon la fonction étudiée.

L'informatisation de l'AVE a fait l'objet d'une étude par la Direction des Systèmes d'INformation (DSIN) de PSA Peugeot Citroën. Cette étude a permis de valider la faisabilité de cet outil et de choisir une technologie pour sa réalisation. Cela a conduit au développement

d'une maquette logiciel dont la structure fonctionnelle est décrite dans le schéma suivant (Figure 47) :

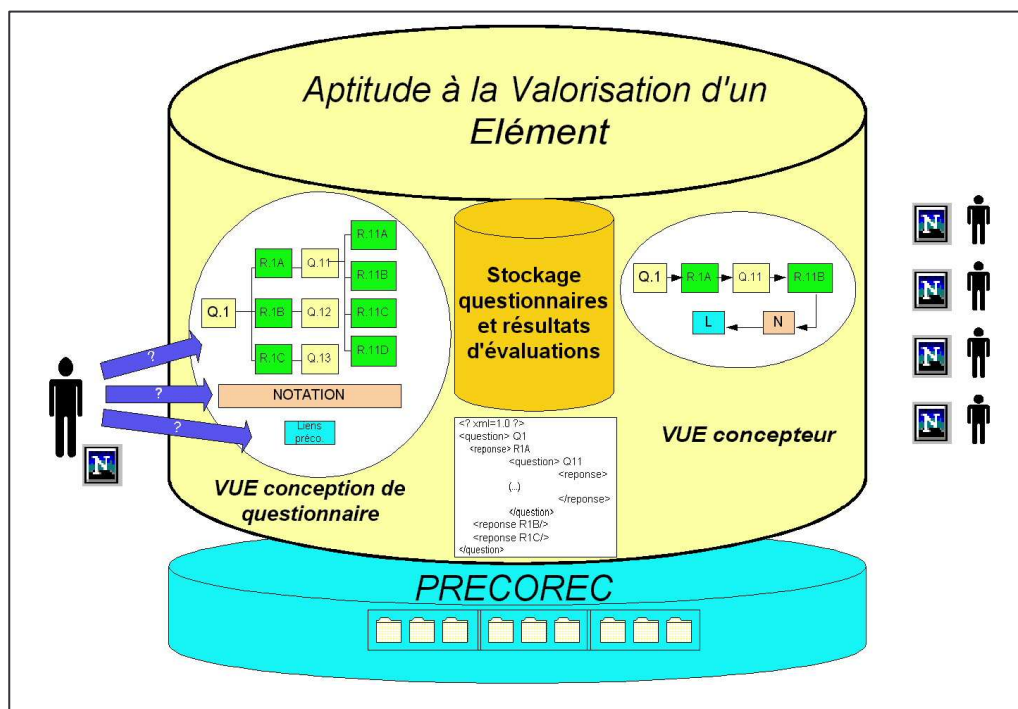


Figure 47 : Structure fonctionnelle du logiciel AVE

L'AVE est l'outil le plus facile à mettre en œuvre. Même s'il n'est pas utilisé de manière systématique, il est complémentaire à la base de règles. Son développement et sa maintenance nécessitent dans tous les cas la présence d'un expert.

4.1.4.4. Gains de connaissances

Cette étude nous a permis d'acquérir un certain nombre de connaissances. Tout d'abord en définissant de manière qualitative l'aptitude à la valorisation, ensuite en constatant l'apport d'un tel outil pour le concepteur.

Dans un premier temps, l'expérimentation des deux outils d'évaluation réalisée sur la même fonction a permis de montrer que leurs résultats sont cohérents. Nous avons vu d'une part que les résultats d'un scénario donné indiquent un niveau similaire d'aptitude à la valorisation, et d'autre part que les modifications de conception entraînent des variations dans les mêmes proportions.

Ensuite, l'outil permet au concepteur de se faire une meilleure idée de l'aptitude à la valorisation de l'élément en cours de conception, et ce par rapport au contexte du recyclage qu'il n'est pas en mesure d'appréhender. Ainsi, il peut avoir conscience de ce qu'entraînent ses choix pour les valider ou les modifier, très tôt dans le processus de conception. Cette évaluation est primordiale, car des étapes de reconception sur des produits quasi-finalisés sont ainsi évitées.

Les différentes expérimentations réalisées auprès des concepteurs ont permis de montrer la bonne acceptabilité du questionnaire. Sa cohérence avec le modèle d'évaluation quantitatif et son interface avec la base de règles ont été vérifiées. D'autre part, il peut s'appliquer à différents éléments, c'est-à-dire aussi bien sur des pièces simples, des sous-ensembles simples ou complexes. De plus, cet outil destiné au concepteur pourra être utilisé de manière complètement autonome.

Un résultat indirect de l'utilisation de cet outil est qu'il permet au concepteur, au-delà de l'évaluation proprement dite, de stimuler sa réflexion lors de la recherche de solutions. Lorsque, par exemple, il hésite entre plusieurs matériaux, cet outil peut le guider vers un matériau compatible ou recyclable.

4.1.5. Synthèse

Les expérimentations devaient nous permettre d'accroître notre niveau de connaissances sur l'aptitude à la valorisation d'un véhicule, de juger de la faisabilité du calcul de cette aptitude et des contraintes qui y sont liées.

Ces différents objectifs ont été atteints. Le développement des outils (AVF, travaux avec le LAB) ont conduit à structurer et à enrichir la base de connaissances du métier recyclage. Par exemple, nous avons maintenant à notre disposition des données concrètes nous permettant de hiérarchiser les différentes fonctions cibles pour le démontage. Nous avons également pu constater, l'impact du démontage sur le taux de valorisation et sur le coût de traitement d'un véhicule.

Nous avons également évalué la faisabilité de l'évaluation de l'aptitude à la valorisation du véhicule. Ce calcul nécessite la gestion d'une quantité importante de données et l'utilisation d'outils de simulation pour être mis en place (traitement informatique de données, génération automatiques de gammes).

Entre autres, il est essentiel de disposer d'un bilan masses/matières exhaustif et structuré du véhicule. Il faut signaler que ce type de données n'est pas disponible à l'heure actuelle et nécessite donc d'attendre la mise en place des nouveaux systèmes d'information pour rendre ce calcul efficient. Nous avons également vu que la prise en compte des données liées à la dépollution et au démontage est envisageable. Ces calculs, qui sont intéressants dans l'optique d'une évaluation économique du traitement du VHU, nécessitent le développement d'outils de simulation. La simulation requiert de faire beaucoup d'hypothèses sur les filières, principalement sur les démolisseurs. En effet, la simulation du traitement d'un VHU permet d'identifier et d'améliorer les paramètres qui peuvent être optimisés. Des gains sont possibles grâce à l'optimisation du produit par rapport au processus des filières de valorisation envisagées. Or, actuellement, ces filières de valorisation ne sont pas à un stade industriel optimal.

Le développement de la méthode de répartition a mis en avant la nécessité de faire une analyse préalable des véhicules en début de développement. Cette analyse se base sur une connaissance approfondie des véhicules PSA Peugeot Citroën et des véhicules concurrents,

mais également des éléments en développement hors projet véhicule, tels que certains organes mécaniques ou les produits développés pendant des études d'innovations. Ces travaux ont montré qu'il est impératif d'avoir une vision globale du véhicule pour pouvoir prioriser les interventions sur le produit.

Ces études nous ont amené à développer différents outils et méthodes complémentaires à ceux développés lors des études précédentes et des travaux du Service Recyclage de PSA Peugeot Citroën. Cela nous permet d'avoir à notre disposition un « panier » d'outils et de méthodes.

Ces outils et méthodes sont les suivants :

- Outil d'évaluation qualitatif de l'Aptitude à la Valorisation d'un Élément (AVE) ;
- Outil d'évaluation qualitatif de l'Aptitude à la Dépollution d'un Véhicule (ADV) ;
- Base de règles de conception pour le recyclage (Précorec) ;
- Base de données VHU ;
- Outil de calcul du taux d'homologation ;
- Outil d'évaluation quantitatif de l'Aptitude à la Valorisation d'une Fonction (AVF) ;
- Outil d'évaluation de l'Aptitude à la Valorisation d'un Véhicule (AVV) :
 - Méthode de calcul de l'AVV
 - Méthode de répartition
 - Bilan AVV
 - Tableau de bord Recyclage

L'étude du processus de conception nous a permis d'identifier plusieurs leviers possibles pour intégrer ces outils, ce qui multiplie les possibilités d'actions vis-à-vis de la conception.

Il est important de pouvoir apporter des réponses à court et moyen termes, sans pour autant négliger la vision à long terme, surtout vis-à-vis des systèmes d'information qui sont en cours d'implémentation, et qui pourraient simplifier grandement certaines tâches, même dans le cas de méthodes et d'outils relativement lourds.

4.2. Développement d'une stratégie d'intégration consciente

Nous avons fait l'hypothèse que l'intégration de la notion de valorisation des véhicules en fin de vie chez PSA Peugeot Citroën passe par le développement d'une Stratégie d'Intégration Consciente (SIC). Cette stratégie s'appuie sur des scénarios d'évolution interne permettant de prendre en compte la complexité du processus de conception, mais également sur la vision que peut avoir l'entreprise de l'ensemble du contexte. Pour pouvoir apporter des réponses à court, moyen et long termes à cette problématique, nous allons développer différents Scénarios d'Evolution Interne (SEI) correspondant aux différentes interprétations possibles de l'évolution du contexte de la valorisation.

Nous allons décrire la structure générique d'un scénario d'évolution interne, puis nous allons décliner cette structure pour qu'elle réponde aux différents scénarios d'évolution externe (SEE) issus de l'analyse du contexte.

4.2.1. Détermination de quatre scénarios d'évolution externe

Les éléments qui définissent la notion de valorisation sont le produit, le process et la réglementation (voir paragraphe 2.1). La complexité de cette notion vient de l'évolution dans le temps de ces différents éléments et par là même, de l'incertitude liée à ces évolutions.

Prenons l'exemple de la corrélation entre la composition en matière du véhicule et les technologies des filières de valorisation. Si ces deux paramètres convergent, c'est-à-dire si la composition du véhicule s'adapte aux technologies de valorisation et si les filières améliorent leur capacité à traiter les matériaux qui composent le véhicule, les risques liés à la réglementation seront moindres. Mais, dans le cas d'une divergence, ou si la situation n'évolue pas, ces risques peuvent devenir très importants pour l'entreprise (risques économiques et réglementaires).

Le tableau ci-dessous (Tableau 16) présente les différents cas envisageables et les risques associés. Ce tableau a été établi en prenant l'hypothèse qu'il n'y aurait pas d'évolution de la réglementation. On peut imaginer le même tableau avec une réglementation plus sévère ou plus permissive. La seconde hypothèse retenue a été de considérer qu'il n'y aurait pas de dégradation des capacités de traitement des filières de valorisation par rapport à la situation actuelle. Enfin, pour la composition du véhicule, nous avons retenu tous les cas de figure

possibles, c'est-à-dire une évolution favorable de la valorisation, une évolution défavorable et le cas où la composition du véhicule n'évolue pas dans le temps.

	Evolutions produit*	Evolutions process**	Risques
Cas 1	=	↗	FAIBLE
Cas 2	↗	=	FAIBLE
Cas 3	↗	↗	FAIBLE
Cas 4	=	=	FORT
Cas 5	↘	↗	FORT (?)
Cas 6	↘	=	TRES FORT

*: Evolutions de l'aptitude à la valorisation du produit à process égal

** : Evolutions de l'aptitude du process à valoriser à produit égal

Tableau 16 : Risques liés aux évolutions du produit et du process de valorisation

Ce tableau permet d'identifier quatre scénarios d'évolution externe (SEE) possibles :

- Le premier SEE est un scénario où l'évolution des différentes composantes de la valorisation est favorable. Si les filières améliorent les performances de leurs process de recyclage et de valorisation, aussi bien du point de vue technique qu'économique, ou si les propriétés du véhicule évoluent favorablement, les risques liés à la réglementation seront relativement faibles. Ces différentes possibilités correspondent aux cas n° 1, 2 et 3.
- Le deuxième SEE correspond au cas n° 4 du tableau, c'est-à-dire le cas où les filières et la composition du véhicule n'évoluent pas par rapport à la situation actuelle. Dans ce cas, les risques de non atteinte des objectifs sont plus importants, essentiellement pour les objectifs de valorisation sur le terrain (objectifs 2007 et surtout 2015).
- Le troisième SEE est une aggravation du cas précédant et correspond au cas n° 6 du tableau. La composition du véhicule se dégrade par rapport à son aptitude à être valorisé, sans évolution favorable des filières de valorisation. Ce cas de figure est le plus problématique, car les objectifs réglementaires ne pourraient être atteints sans un investissement financier important (subvention des filières déficitaires, par exemple).
- Enfin, un des SEE le plus probable est le cas n° 5 du tableau, c'est-à-dire une amélioration favorable des process de valorisation, mais une évolution défavorable de

la composition du véhicule (paragraphe 2.1.3 et 2.1.4). Cette configuration est celle qui génère le plus d'incertitudes, ce qui rend les risques potentiels très difficiles à appréhender.

4.2.2. Définition de la structure d'un scénario d'évolution interne générique

L'étude que nous avons faite du processus de conception dans le chapitre 2.2 nous a permis d'analyser la complexité de ce processus. Nous en avons appréhendé les différentes dimensions et nous avons pu constater que ces dimensions sont fortement interdépendantes. Or, pour être pertinent, tout modèle supportant un processus d'intégration doit prendre en compte les différentes dimensions du processus de conception. Ainsi, tout modèle devra posséder trois dimensions correspondant aux dimensions du processus de conception :

- Une dimension fonctionnelle

La dimension fonctionnelle regroupe l'ensemble des méthodes et outils spécifiques au métier recyclage. Les outils définissent les données devant être gérées par le scénario.

- Une dimension organisationnelle

Cette dimension doit permettre d'identifier les différents acteurs de la conception impliqués et spécifier leurs tâches. Les acteurs impliqués dans la structure générique peuvent être classés en trois catégories :

- ↳ Les décideurs, à qui l'information est destinée. Ils s'inscrivent le plus souvent dans une structure décisionnelle (stratégie, direction de projet).
- ↳ Les fournisseurs, qui sont détenteurs de l'information devant être traitée par les outils mis en place. Il s'agit essentiellement d'opérationnels.
- ↳ Les administrateurs, qui effectuent les calculs ou sont experts des outils. Il s'agit généralement de la cellule environnement de la société (le Service Recyclage dans le cas de PSA Peugeot Citroën).

Le scénario d'évolution interne doit permettre de définir le circuit d'information (définition des tâches, circulation des documents, etc.) et le circuit décisionnel.

- Une dimension informationnelle

Cette dimension est liée au flux de données engendré entre les différents acteurs et par rapport aux outils. Elle doit être en concordance avec l'architecture des systèmes d'information de l'entreprise et plus particulièrement celui du processus de conception.

Ainsi, quels que soient les choix faits dans la définition des scénarios, ils devront tous être basés sur cette structure.

4.2.3. Proposition de quatre scénarios d'évolution interne

Lors de notre analyse de la notion de valorisation, nous avons envisagé six cas de figure d'évolutions possibles de cette notion dans le temps et nous en avons tiré quatre scénarios d'évolution externe (paragraphe 4.2.1). Nous avons gradué ces différents cas en termes de risques pour l'entreprise (risques allant de faible à très fort). Nous avons choisi de développer quatre scénarios d'évolution interne (SEI) correspondant à ces quatre niveaux de risques (voir Figure 48). Ils nous permettront d'illustrer l'utilisation possible des différents outils que nous avons développés et mis en œuvre dans les expérimentations.

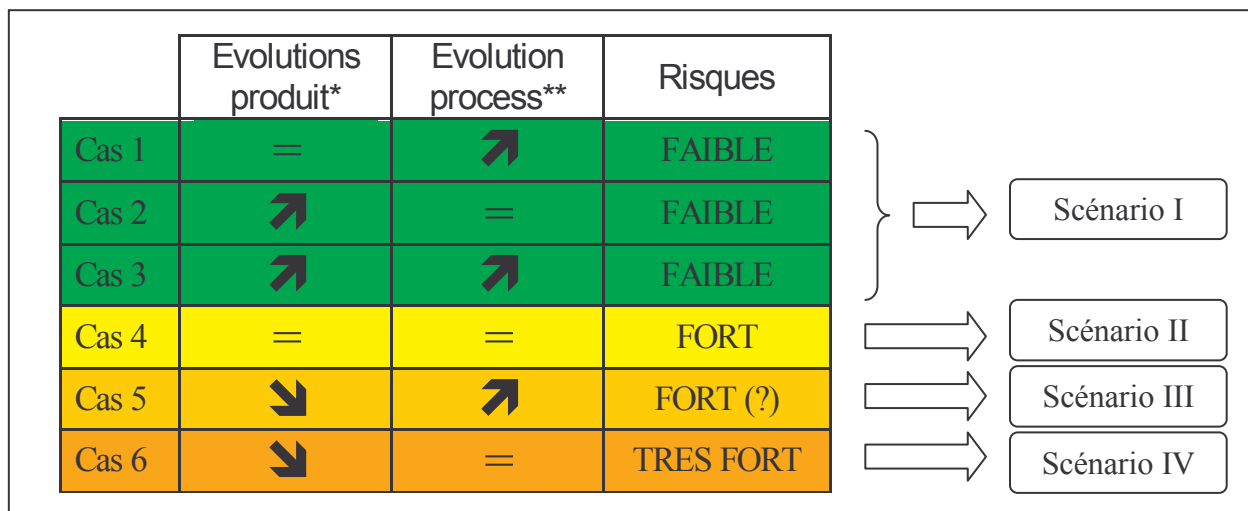


Figure 48 : Choix du scénario d'évolution interne au regard des risques identifiés

Pour chaque SEI, nous allons développer l'analyse du risque du point de vue de l'entreprise et définir les objectifs du scénario permettant de maîtriser ces risques.

- Scénario I :

- Analyse du risque

L'analyse du contexte nous permet d'envisager une évolution favorable des filières de valorisation et / ou de la composition des véhicules. Ces évolutions limiteraient de manière très importante les risques réglementaires liés à la valorisation. En effet, dans ce cas de figure, les filières seraient aptes à traiter les véhicules aux quotas requis par la législation tout en conservant leur équilibre économique. Les risques économiques pour les constructeurs sont alors très faibles.

- Objectifs du scénario

L'objectif du SEI est de permettre au constructeur de respecter la réglementation le concernant directement, c'est-à-dire d'homologuer les véhicules en calculant le taux de valorisation et en atteignant les taux requis.

- Scénario II :

- Analyse du risque

La deuxième possibilité suppose qu'il n'y aura pas d'amélioration des filières de valorisation, ni d'évolution favorable de la conception des véhicules. Si le contexte n'évolue pas par rapport à la situation actuelle, les risques à court terme, c'est-à-dire pour l'homologation des véhicules et pour les objectifs de valorisation de 2006, existent mais sont relativement faibles. Dans ces conditions, les risques économiques sont faibles. En revanche, les risques à plus long terme, pour les objectifs de valorisation de 2015 et d'un point de vue économique, sont forts.

- Objectifs du scénario

Dans ces conditions, les objectifs du SEI sont de permettre au constructeur de savoir calculer le taux de valorisation d'un véhicule pour l'homologation, mais également de savoir détecter les problèmes potentiels pour l'homologation du fait de la dérive de la composition en masses et en matières du véhicule. Ce dernier aspect suppose la capacité de l'entreprise d'anticiper de futures évolutions réglementaires et ainsi de se donner les moyens de mettre en place des actions correctrices en cas de risques avérés.

- Scénario III :

- Analyse du risque

La troisième possibilité d'évolution de la notion de valorisation consiste en une amélioration des capacités de traitement des filières de valorisation, associée à une

détérioration de la capacité des véhicules à être traités du fait d'une évolution des matériaux qui les constituent.

- Objectifs du scénario

Dans cette situation, le SEI devra toujours permettre au constructeur de savoir calculer le taux de valorisation d'un véhicule pour l'homologation, mais il devra également lui permettre de savoir détecter et résoudre les problèmes liés à l'aptitude à la valorisation du véhicule en cours de projet, aussi bien en termes de taux de valorisation que de coût de traitement.

- Scénario IV :

- Analyse du risque

L'évolution la plus défavorable serait que les filières de valorisation ne s'améliorent pas pendant que la composition des véhicules évolue défavorablement par rapport à leur traitement en fin de vie. Dans ce cas de figure, les risques réglementaires et économiques sont maximaux pour l'entreprise.

- Objectifs du scénario

Dans une telle situation, le SEI devra toujours permettre à l'entreprise de savoir calculer le taux de valorisation d'un véhicule pour l'homologation, mais il deviendra également nécessaire de pouvoir maîtriser, dès la conception, le taux de valorisation réel (correspondant aux objectifs atteints par la filière) du véhicule et son coût de traitement. Pour ce faire, il faut une prise en compte « complète » de la notion d'aptitude à la valorisation dans les projets.

Nous allons maintenant développer ces différents scénarios d'évolution interne à partir des objectifs auxquels ils doivent répondre, de la structure générique d'un scénario et du panier d'outils que nous avons à notre disposition. Pour chaque SEI, nous présenterons :

- ↳ Les objectifs du scénario.

- ↳ Son processus :

Le processus regroupe les différentes actions devant être réalisées une fois que tous les éléments du SEI sont en place. Nous décrirons ce processus selon le formalisme du PCPP (paragraphe 2.2.2.2).

- ↳ La liste des outils utilisés dans le scénario (dimension fonctionnelle) :

- ↳ Son organisation (dimension organisationnelle) :

L'organisation du scénario permet de définir l'ensemble des acteurs intervenant dans le scénario, ainsi que le flux d'informations entre ces acteurs.

↳ Les systèmes d'information liés au scénario (dimension informationnelle) :

4.2.3.1. Scénario d'évolution interne I

Ce scénario permet de répondre aux exigences d'un contexte ne représentant pas de risques majeurs pour le constructeur. Dans cette situation, la seule contrainte que doit respecter l'entreprise est liée à son obligation d'homologuer ses véhicules sur un critère de valorisabilité. Pour répondre à cette contrainte, nous allons définir les objectifs du scénario, puis nous décrirons son processus, c'est-à-dire les différentes tâches qui doivent être mises en place. Enfin, nous détaillerons les trois dimensions du scénario.

a) Objectifs

L'objectif de ce scénario est de répondre à l'exigence réglementaire concernant l'homologation des véhicules, c'est-à-dire de savoir calculer le taux de valorisation d'un véhicule. Pour répondre à cet objectif, le scénario doit permettre de mettre en place une procédure d'homologation.

Différentes hypothèses ont été retenues :

- Calculer le taux de valorisation pour un véhicule de référence représentatif d'un type de véhicule. Dans le cadre de l'homologation, les pouvoirs publics doivent fournir le mode de calcul du taux de valorisation.
- Etre en mesure de prouver que l'on a une procédure mise en place assurant la maîtrise du taux de valorisation au cours de la conception et de la fabrication des véhicules. Cette action passe par la maîtrise du taux de renseignement de la composition masses / matières du véhicule.

b) Processus

Pour répondre à ce besoin, le processus suivant est proposé (voir Figure 49).

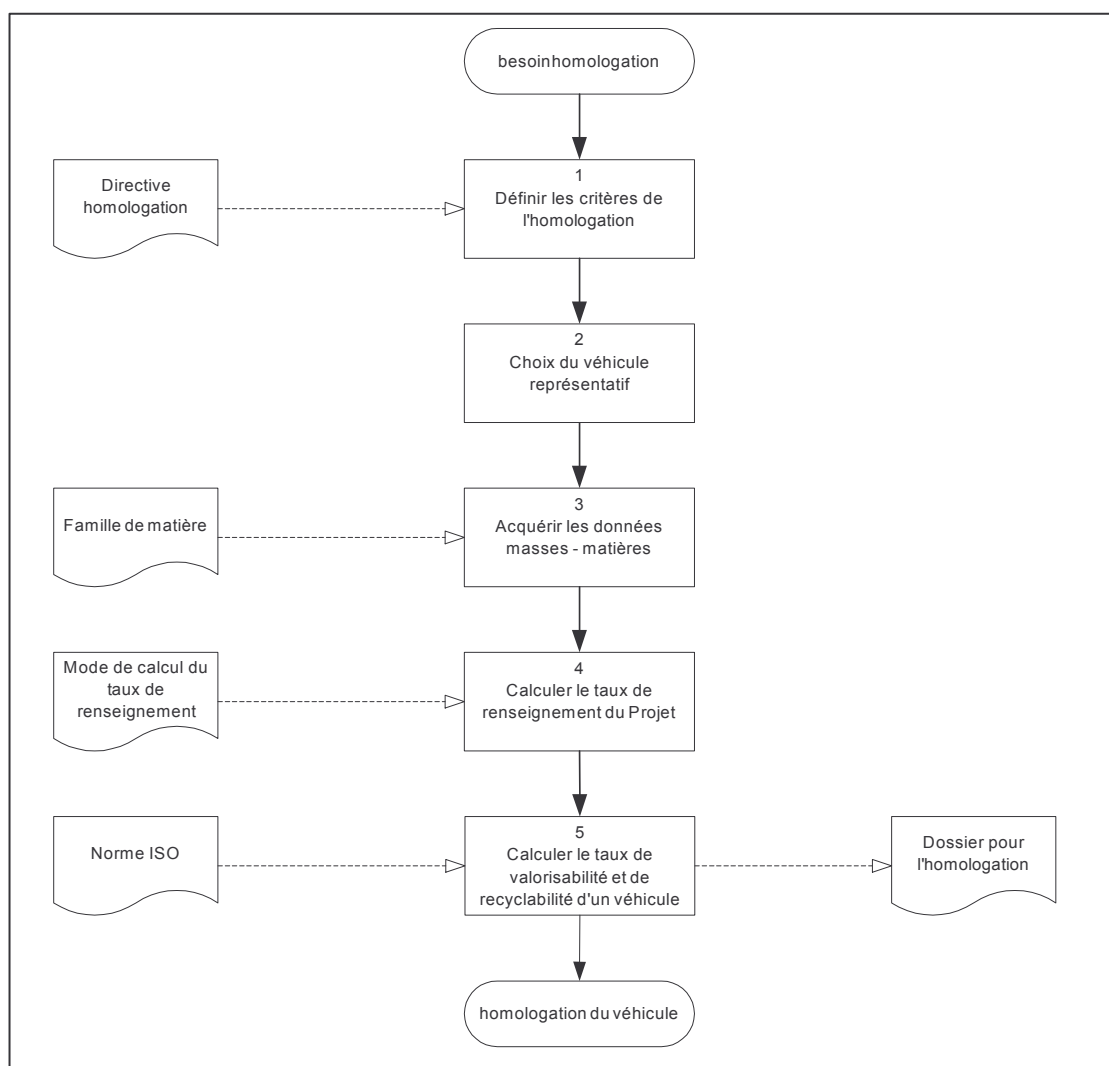


Figure 49 : Processus du scénario I

Les différentes étapes du processus ainsi que les acteurs intervenant à chaque étape sont décrits dans le Tableau 17 :

	Description	Intervenants	Jalons
1	Définir les objectifs du projet en termes de taux de valorisation et de taux de renseignement.	Service recyclage Service homologation	J0 à J1
2	Choix du véhicule de référence parmi les variantes véhicule.	Service recyclage Projet véhicule	J0
3	Renseigner la masse du produit. Choisir parmi les listes proposées les matières qui entrent dans la composition du produit. Renseigner la masse correspondante à chaque matière choisie.	Les concepteurs Les acteurs des réceptions des EI (en usine)	Au plus tard aux RO Consolidations aux réceptions des EI
4	Calcul du taux de masses renseignées sur la masse totale.	Le Projet véhicule	A partir de J3
5	Choisir la définition complète du véhicule. Calculer le taux de valorisabilité et de recyclabilité du véhicule.	Le responsable homologation recyclage sur le Projet véhicule	Aux RO A la période des homologations

Tableau 17 : Etapes du processus du scénario I

Ces différentes actions peuvent être positionnées sur le schéma de développement (SOD) d'un véhicule (voir Figure 50) :

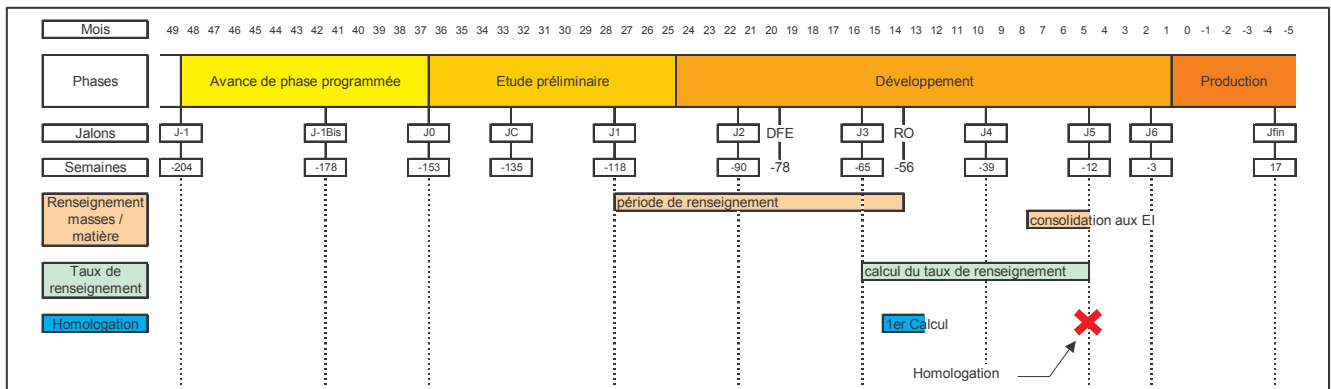


Figure 50 : Positionnement des actions du processus du scénario I sur le SOD

c) Outils

La mise en place de ce processus nécessite deux outils principaux :

- Un outil de calcul du taux de valorisation

Cette méthode est imposée par les pouvoirs publics. Elle sera sans doute proche de la méthode de calcul proposée dans la norme ISO 22628.

- Un outil de calcul du taux de renseignement

Ces outils sont intrinsèquement simples. La difficulté de leur déploiement réside dans la mise à disposition des données nécessaires à ces calculs, comme nous le verrons par la suite.

d) Organisation

La description de l'organisation permet de positionner les différentes actions à mener par rapport aux acteurs. De plus, elle définit le circuit d'informations entre les acteurs.

Les différents acteurs impliqués sont :

- ↳ Le projet véhicule
 - La direction de projet
 - Les concepteurs
- ↳ Le responsable homologation recyclage

Le responsable homologation est un acteur projet et pas nécessairement un expert recyclage.

- ↳ Les acteurs de réception des EI
- ↳ Service recyclage
- ↳ Service homologation
- ↳ Projet vie série

Le flux d'information entre les acteurs est présenté dans le schéma suivant (voir Figure 51) :

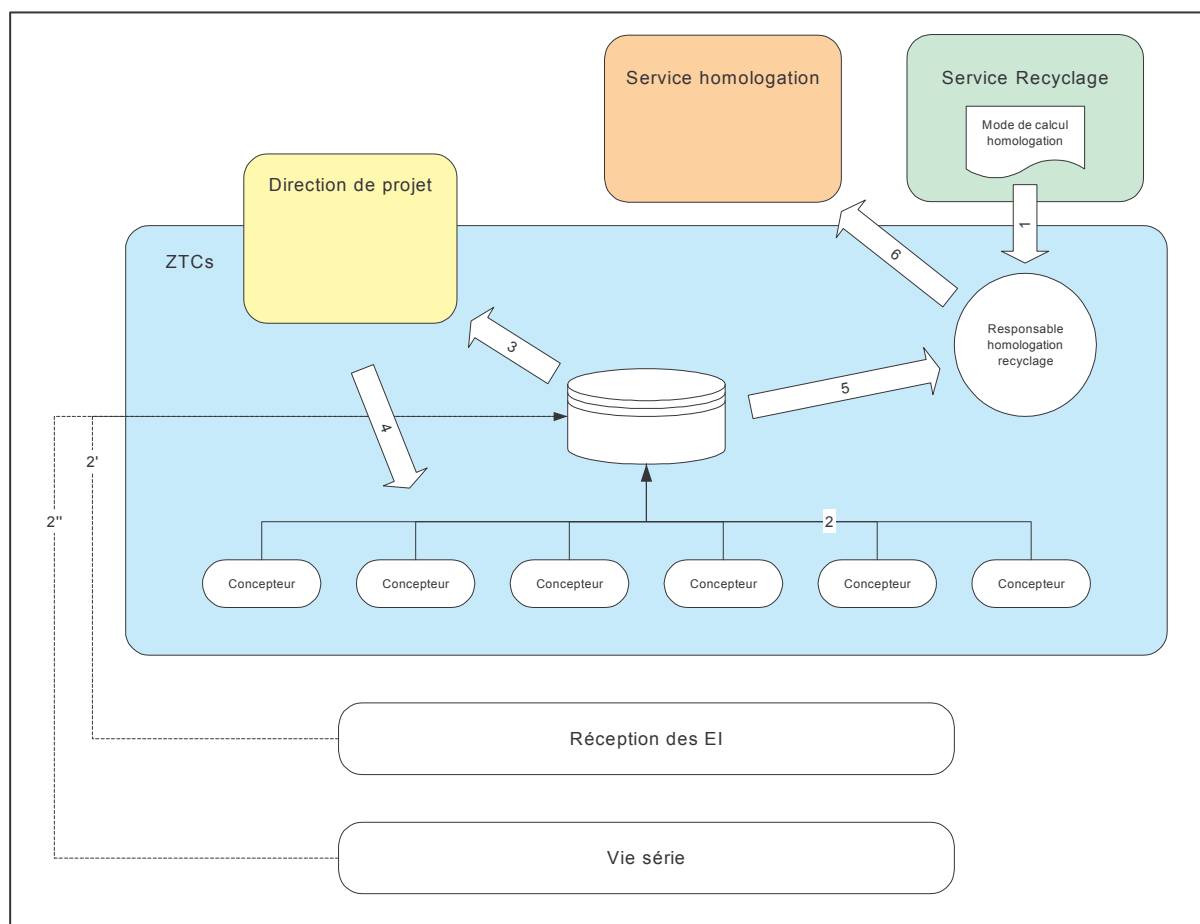


Figure 51 : Circuit d'informations entre les acteurs du scénario I

Description des différentes étapes :

1. Mode de calcul
Le service recyclage assure la validité du mode de calcul.
2. Renseignement masses/matières par produit
Les concepteurs doivent fournir la masse et la matière des pièces qu'ils développent.

2'. Consolidation des données

Les données renseignées sont vérifiées lors de la réception des Echantillons Initiaux en usine.

2''. Modification des données en vie série

Les données masses-matières doivent être renseignées lors des modifications du véhicule en vie série pour une homologation du véhicule modifié.

3. Calcul du taux de renseignement

Le taux de renseignement doit atteindre un minimum pour permettre l'homologation (objectif fixé en début de projet).

4. Actions correctrices

La direction de projet est responsable de l'atteinte du taux de renseignement et doit engager les actions appropriées pour que celui-ci soit atteint.

5. Récupération des données

Une fois le taux de renseignement atteint, les données sont récupérées par le responsable homologation recyclage pour le calcul du taux de valorisation.

6. Taux de valorisation pour homologation

Les données sont transmises au service concerné pour l' homologation du véhicule.

Le bon fonctionnement de ce scénario (et donc de l'homologation du véhicule) repose sur la qualité du renseignement fourni par les concepteurs. Le taux de renseignement en masses et en matières du véhicule nécessite donc un suivi régulier au cours du projet. Une fois les données sur la composition réunies, le calcul est simple et ne nécessite pas la présence d'un expert.

e) Le système d'information

Les impacts de ce scénario sur les systèmes d'information sont les suivants :

- Mise en place de l'interface pour renseigner les informations matières

Les concepteurs sont en charge du renseignement de cette information. Il faut donc mettre à leur disposition l'interface de renseignement de cette information.

- Mise en place dans les processus de gestion de la conception d'un indicateur du taux de renseignement.

Pour cet indicateur nous pouvons nous appuyer sur le processus d'officialisation qui comporte des informations sur la maturité des pièces en conception.

- Mise en place de l'outil de calcul de taux de valorisabilité.

Les traitements à réaliser avec cet outil sont relativement simples, mais les difficultés proviennent plutôt de la quantité de données et de la structuration de ces données pour le traitement. Il faut en effet savoir extraire la nomenclature d'un véhicule, les données masse et matière qui y sont associées, gérer les dérogations associées à certains produits.

Le flux de données à extraire des systèmes est donc le suivant :

A partir de la désignation LCDV d'un ensemble fonctionnel (lot de conception) ou d'un véhicule (description du niveau commerciale), extraire la nomenclature concernée pour obtenir une liste d'articles pour lesquels on peut faire un bilan masse – matière. Associer les matériaux restant à leur destination de fin de vie par défaut. On peut alors calculer les taux de recyclage et de valorisation énergétique.

Enfin les résultats de ces calculs doivent être archivés pour être ré exploitables lors de futurs projets véhicule.

Les étapes du scénario I liées aux systèmes d'informations sont les suivantes (Figure 52) :

- 1) Diffusion des spécifications techniques de besoin et spécifications techniques générales sur DOORS, outil support de l'ingénierie système.
- 2) Conception des éléments du véhicule au sein des systèmes d'information, intégration des données masse et matière à ces systèmes.
- 3) Calcul des taux de valorisabilité
 - a) Extraction des nomenclatures voulues à partir des définitions LCDV de véhicule ou ensemble technique.
 - b) Extraction des données masses et matières correspondant à la nomenclature
 - c) Répartition des produits et matières dans les familles de destination de fin de vie.
 - d) Calcul des taux de valorisabilité.
- 4) Diffusion des résultats auprès du service homologation et rédaction du dossier homologation.

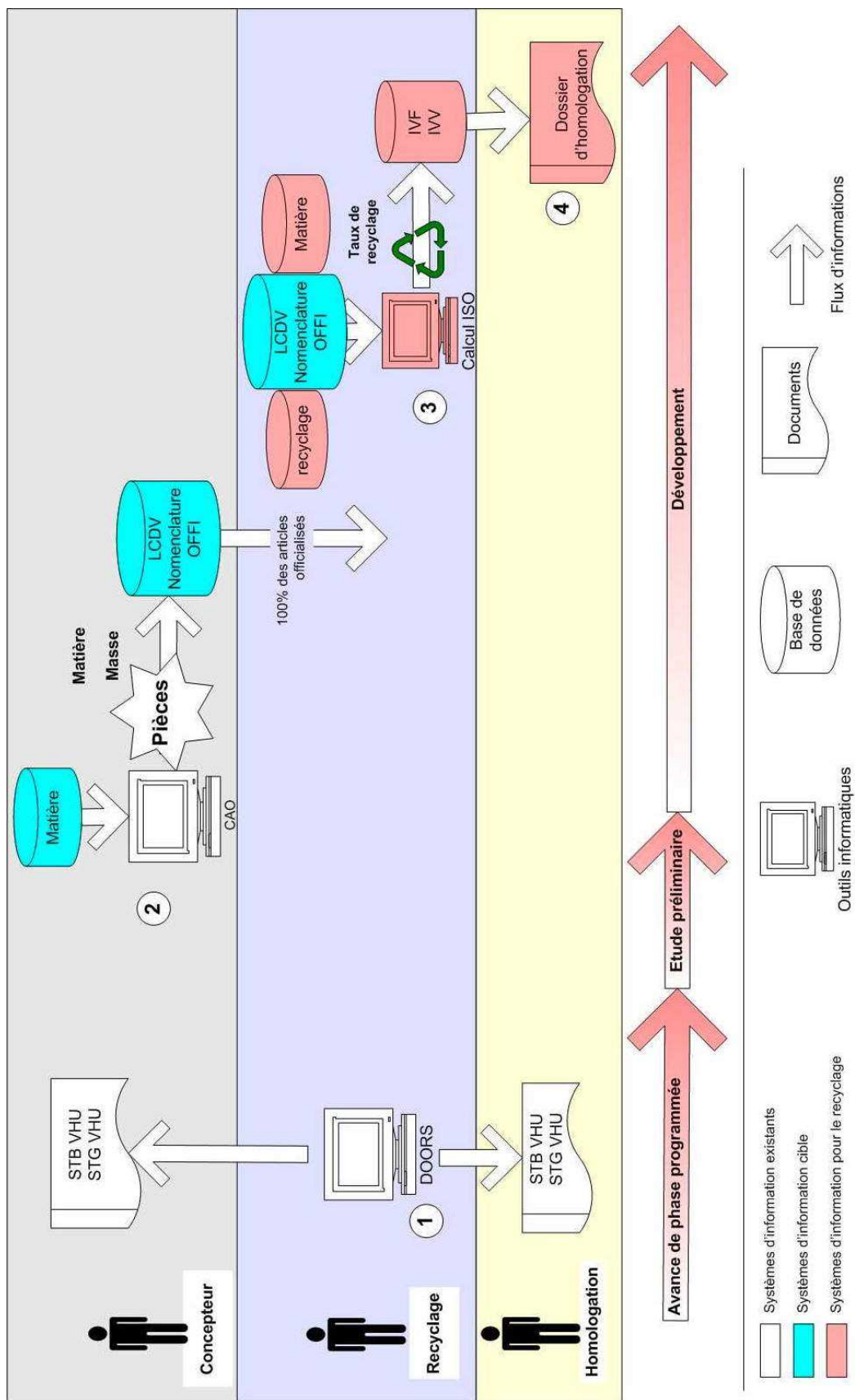


Figure 52 : Système d'information lié au scénario I

4.2.3.2. Scénario d'évolution interne II

Ce scénario permet de répondre aux exigences d'un contexte pouvant représenter certains risques réglementaires à moyen et long termes. A court terme, les risques économiques sont jugés comme étant très faibles, ce qui implique qu'aucun calcul lié au coût de traitement du VHU n'est nécessaire. En revanche, il convient d'assurer une veille au niveau de l'évolution du taux de valorisation du véhicule pour anticiper toute dérive de la composition du véhicule, afin de prévenir d'éventuels risques de non-homologation.

Pour répondre à cette analyse du contexte, nous allons présenter les objectifs du scénario, son processus et les différentes composantes qui le structurent.

a) Objectifs

Les objectifs du scénario sont de permettre au constructeur de savoir calculer le taux de valorisation d'un véhicule pour l'homologation, mais également de savoir détecter les problèmes potentiels pour l'homologation du fait de la dérive de la composition en masses et en matières du véhicule. Ce dernier indicateur doit permettre d'anticiper une non conformité réglementaire potentielle et ainsi de se donner les moyens de mettre en place des actions correctrices en cas de risques avérés.

L'objectif spécifique de ce scénario est donc de réaliser une analyse continue durant le projet afin d'identifier les risques de non-conformité en termes d'homologation. Pour ce faire, des évaluations sont réalisées en avance de phase générique, pour identifier les innovations pouvant être pénalisantes en termes de valorisation, et en début de projet, un bilan recyclage est réalisé pour simuler le futur véhicule au regard des critères d'homologation.

Les objectifs de ce scénario sont :

- savoir calculer le taux de valorisation d'un véhicule en vue de son homologation ;
- être en mesure de prouver la maîtrise de ce taux ;
- savoir détecter les problèmes potentiels pour l'homologation dus à l'évolution de la composition matière du véhicule au regard des filières de valorisation existantes.

Les deux premiers points sont traités par le scénario I. Lors de la description de ce deuxième scénario, les éléments décrits dans le scénario I sont considérés comme étant acquis.

Les hypothèses retenues pour mettre en œuvre le dernier point sont les suivantes :

- Réalisation d'analyses qualitatives de l'aptitude à la valorisation des nouveaux concepts développés en innovation (hors projet : avance de phase générique). Cela afin de détecter les fonctions pouvant éventuellement poser problème (présence de substances imposant un démontage pendant la phase de dépollution, etc.) ou entraînant des évolutions importantes de la composition matières du véhicule (les caisses en aluminium ou les éléments de carrosserie en plastique, par exemple).
- La mise en place d'un indicateur de suivi de la composition masses/matières du véhicule pendant les projets, afin de s'assurer de la faisabilité de l'homologation dès le début du projet.

b) Processus

Pour répondre à ce besoin, le processus suivant est proposé (Figure 53).

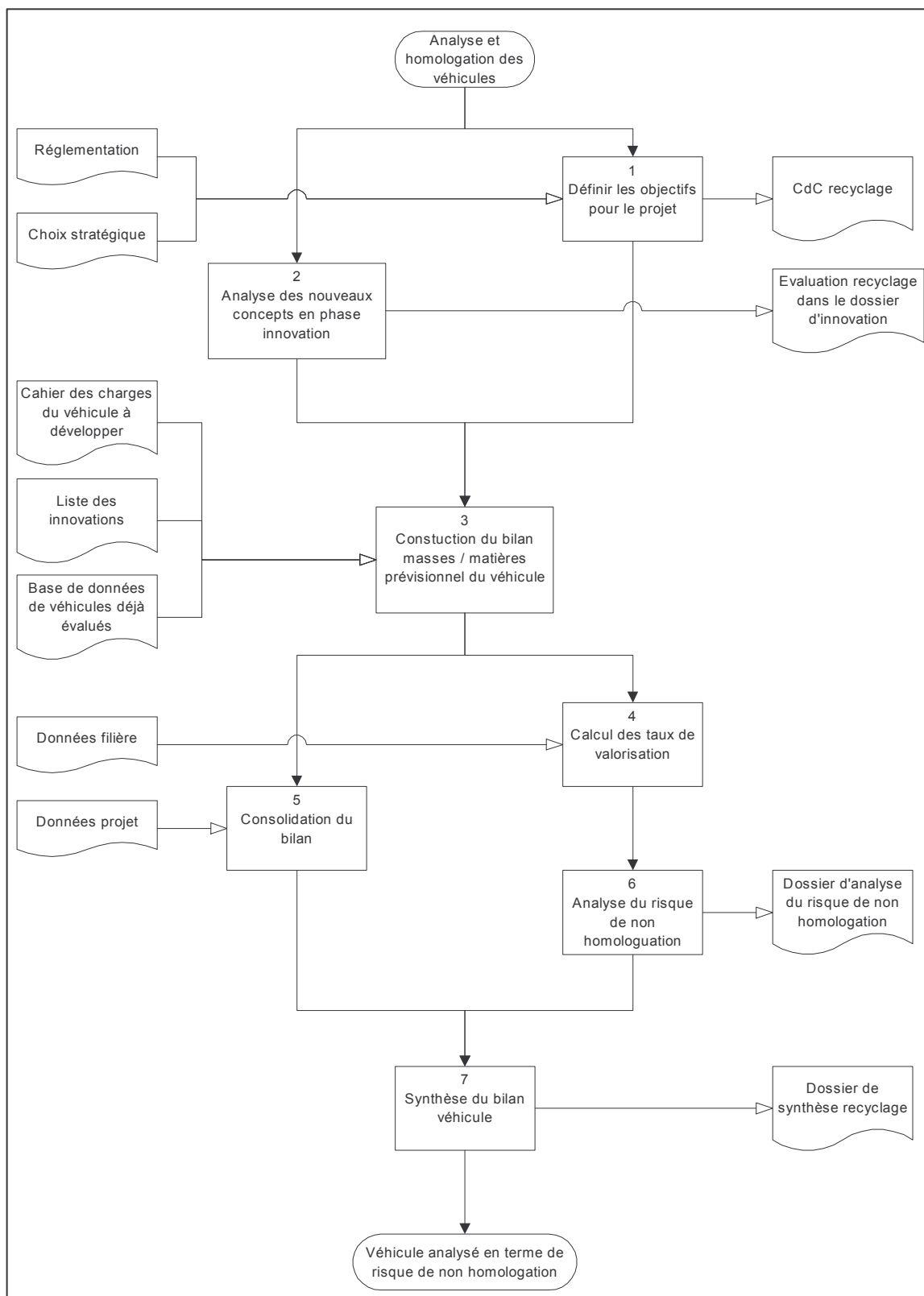


Figure 53 : Processus du scénario II

Les différentes étapes du processus, ainsi que les acteurs intervenant à chacune de ces étapes sont décrits dans le Tableau 18 :

	Description	Intervenants	SOD
1	Définir l'ensemble des objectifs Recyclage que doit atteindre le projet, en termes de respect de la réglementation, d'objectifs de performance en dépollution et de politique matière.	Service recyclage Réglementation Stratégie	J-1 à J0
2	Evaluation des nouveaux concepts susceptibles d'impacter l'aptitude à la valorisation et/ou le respect de la réglementation VHU.	Service recyclage Equipe innovation	Avance de phase générique
3	Construction d'un bilan masses-matières prévisionnel à partir du cahier des charges du véhicule à développer.	Expert recyclage	J0 et J1
4	Calcul des taux de valorisation à partir des données issues des filières de valorisation retenues et/ou du mode de calcul ISO pour l'homologation.	Expert recyclage	De J1 aux RO
5	Les données extrapolées lors de la construction du bilan prévisionnel sont remplacées par les données projet.	Expert recyclage	De J1 aux RO
6	Analyse du risque de non-homologation du véhicule.	Expert recyclage	A chaque jalon de J0 à J4
7	Bilan recyclage du véhicule pour retour d'expérience.	Expert recyclage	J5 à J6

Tableau 18 : Etapes du processus du scénario II

Ces différentes actions peuvent être positionnées sur le schéma de développement (SOD) d'un véhicule (Figure 54) :

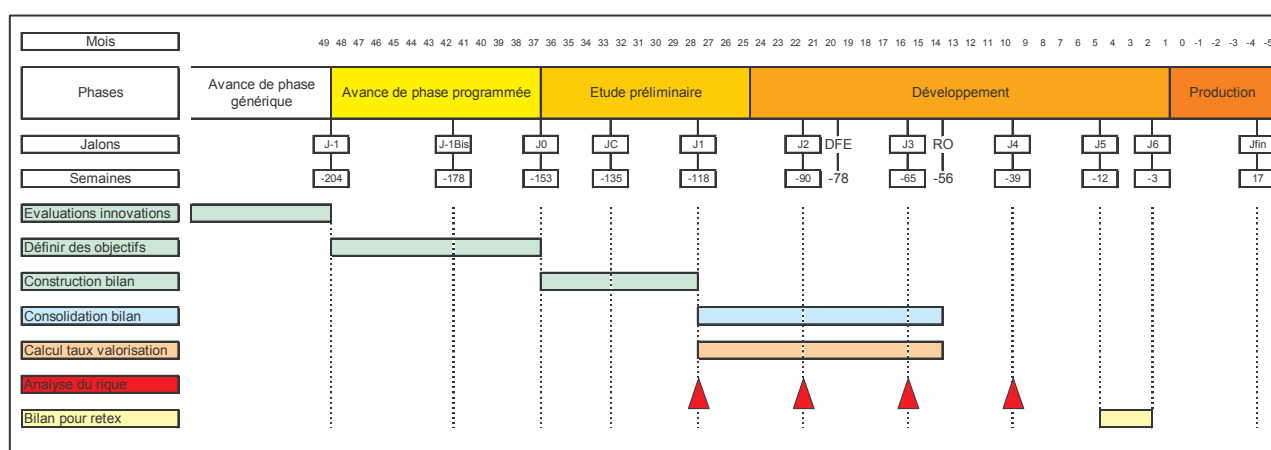


Figure 54 : Positionnement des actions du processus du scénario II sur le SOD

c) Outils

La mise en place de ce processus nécessite certains outils en complément des outils présents dans le scénario I.

- Une méthode d'évaluation qualitative pour les travaux d'innovation
Les deux outils disponibles pour ce type d'évaluation sont l'AVE pour les fonctions génériques et l'ADE pour les éléments soumis à la dépollution.
- Un bilan véhicule
Le bilan véhicule (de type AVV) doit permettre de gérer les données masses/matières du véhicule en vue d'un calcul d'homologation ou de taux de valorisation (si l'on souhaite prendre des hypothèses sur les filières de valorisation différentes des hypothèses de calcul de l'homologation).
- Une base de données recyclage
Cette base de données est constituée de bilans masses/matières de véhicules déjà évalués. Elle doit également contenir les évaluations réalisées sur des fonctions en innovation.

Ces outils sont relativement simples à mettre en place, comme pour le scénario précédent, la principale difficulté vient de la récupération et de l'exhaustivité des données liées au véhicule.

d) Organisation

La description de l'organisation permet de positionner les différentes actions à mener par rapport aux acteurs et de définir le circuit d'information entre ces acteurs (Figure 55). Le schéma ne présente que les interactions entre les acteurs hors processus d'homologation (scénario I).

Les différents acteurs impliqués sont :

- ↳ Le projet véhicule
 - La direction de projet
 - Les concepteurs
- ↳ Le service innovation
- ↳ Le service recyclage
- ↳ L'expert recyclage

Dans ce scénario, l'expert recyclage joue aussi le rôle du responsable homologation recyclage tel qu'il est décrit dans le scénario précédent (scénario I).

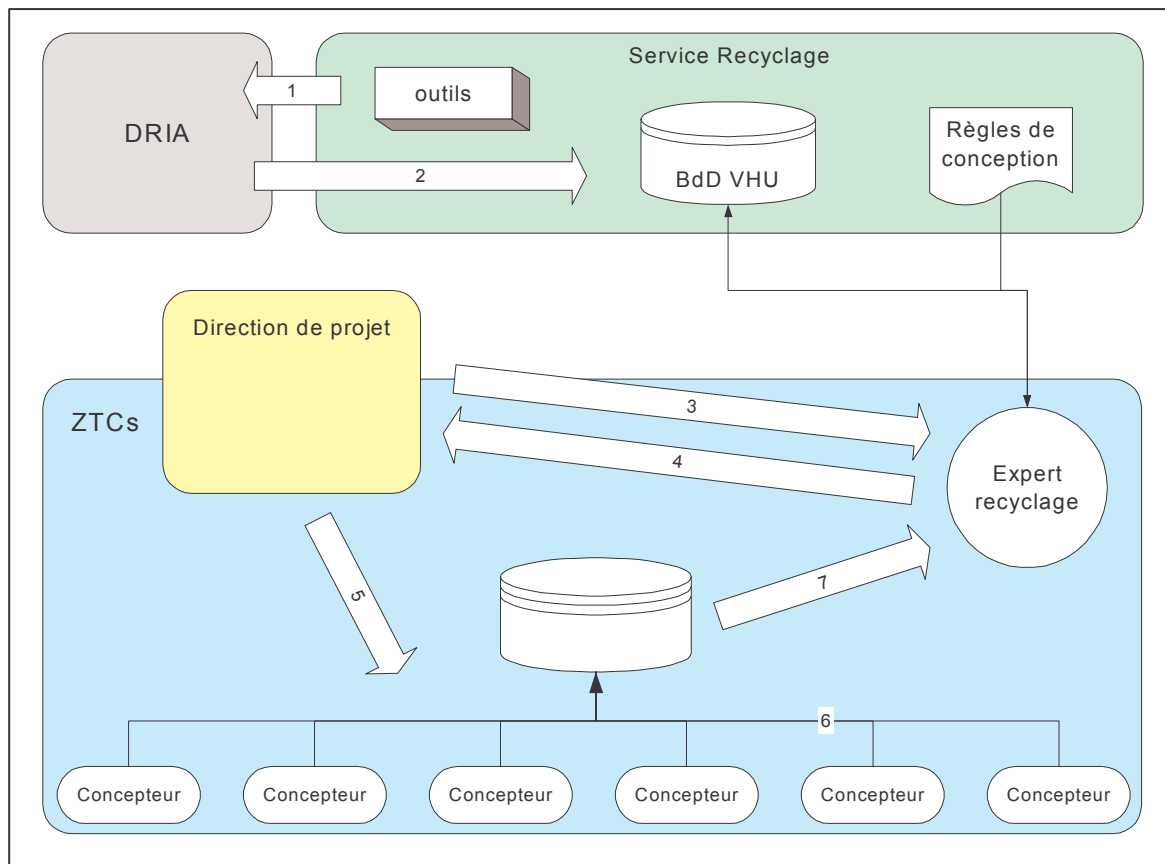


Figure 55 : Circuit d'informations entre les acteurs du scénario II

Description des différentes étapes :

1. Analyse des concepts innovants

Le service recyclage met à disposition des projets d'innovation les outils d'évaluation qualitatifs et est support d'expertise.

2. Stockage des évaluations dans la base de données VHU

Toutes les évaluations sont analysées et archivées par le service recyclage.

3. Construire le bilan masses-matières prévisionnel

La direction de projet fournit le cahier des charges du véhicule, ainsi que le panier d'innovations et les éléments reconduits. A partir de ces éléments, l'expert recyclage doit être en mesure, à l'aide des éléments contenus dans la base de données VHU, d'établir un bilan prévisionnel du véhicule à développer.

4. Fournir une analyse du bilan à la direction de projet

A partir du bilan véhicule, l'expert recyclage fournit une analyse de risque de non-conformité du véhicule.

5. Demande d'actions aux concepteurs

Si le véhicule est susceptible de ne pas passer l'homologation, la direction de projet peut demander des modifications à la conception sur les propositions de l'expert recyclage.

6. Renseignement masses / matières par produit

Les concepteurs renseignent la masse et la matière des pièces en développement.

7. Consolidation du bilan véhicule

L'expert recyclage remplace les données qu'il a extrapolées lors de la construction du bilan prévisionnel par les données renseignées par les concepteurs.

Dans ce scénario, l'expert recyclage a un rôle prépondérant. Il suit le véhicule du début à la fin du projet et est le garant de l'homologation de celui-ci. Pour réaliser les premières évaluations, l'expert doit avoir à sa disposition une base de données recyclage la plus complète possible. Cette base devra donc être alimentée de manière régulière.

e) Le système d'information

Les impacts sur les systèmes d'information identifiés dans le cadre du scénario I sont inclus dans les impacts du scénario II. Il faut cependant noter que le renseignement de l'information matière doit être accéléré par rapport au scénario I pour pouvoir faire des calculs de recyclabilité en cours de projet, mais cet impact porte sur l'organisation plutôt que sur les systèmes d'information.

Les impacts supplémentaires sont les suivants :

- Mise en place de l'outil AVE

Cet outil dont une maquette informatique existe déjà doit être achevé et déployé au sein des services innovation et recyclage.

- Outil de consultation des données archivées pour établir un bilan prévisionnel

L'outil de calcul des taux de valorisation du scénario I doit être complété d'un outil de consultation des données des anciens projets et permettre d'établir un bilan prévisionnel à partir de ces données ainsi que des résultats des questionnaires AVE. Ces bilans prévisionnels se présenteront comme les bilans de fin de projet et permettront de répartir les objectifs entre les différents lots de conception.

Les étapes du scénario II liées aux systèmes d'informations sont les suivantes (Figure 56) :

- 1) Conception en phase d'innovation de nouvelles solutions pour réaliser une fonction.
- 2) Réponse au questionnaire AVE à propos de cette nouvelle solution.
- 3) Evaluation d'un éventuel risque qui pourrait être du à l'intégration de cette innovation dans un projet véhicule.
- 4) Diffusion des spécifications techniques de besoin et spécifications techniques générales sur DOORS, outil support de l'ingénierie système.
- 5) Exploitation des bilans de projets antérieurs pour établir un bilan cible par analogie et intégration des données concernant les éléments réutilisés.
- 6) Diffusion des spécifications techniques détaillées sur DOORS : répartition des objectifs par lots de conception ou ensembles techniques.
- 7) Conception des éléments du véhicule au sein des systèmes d'information, intégration des données masses et matière à ces systèmes.
- 8) Calcul des taux de valorisabilité des premiers éléments conçus.
 - a) Extraction des nomenclatures voulues à partir des définitions LCDV de véhicule ou ensemble technique.
 - b) Extraction des données masses et matières correspondant à la nomenclature
 - c) Répartition des produits et matières dans les familles de destination de fin de vie.
 - d) Calcul des taux de valorisabilité.
- 9) Suivit des indicateurs « recyclage » et demande de re-conception si nécessaire.
- 10) Conception des éléments du véhicule au sein des systèmes d'information, intégration des données masses et matières à ces systèmes.
- 11) Calcul des taux de valorisabilité des éléments conçus.
- 12) Diffusion des résultats auprès du service homologation et rédaction du dossier homologation lorsque le taux de renseignement atteint 100 %.

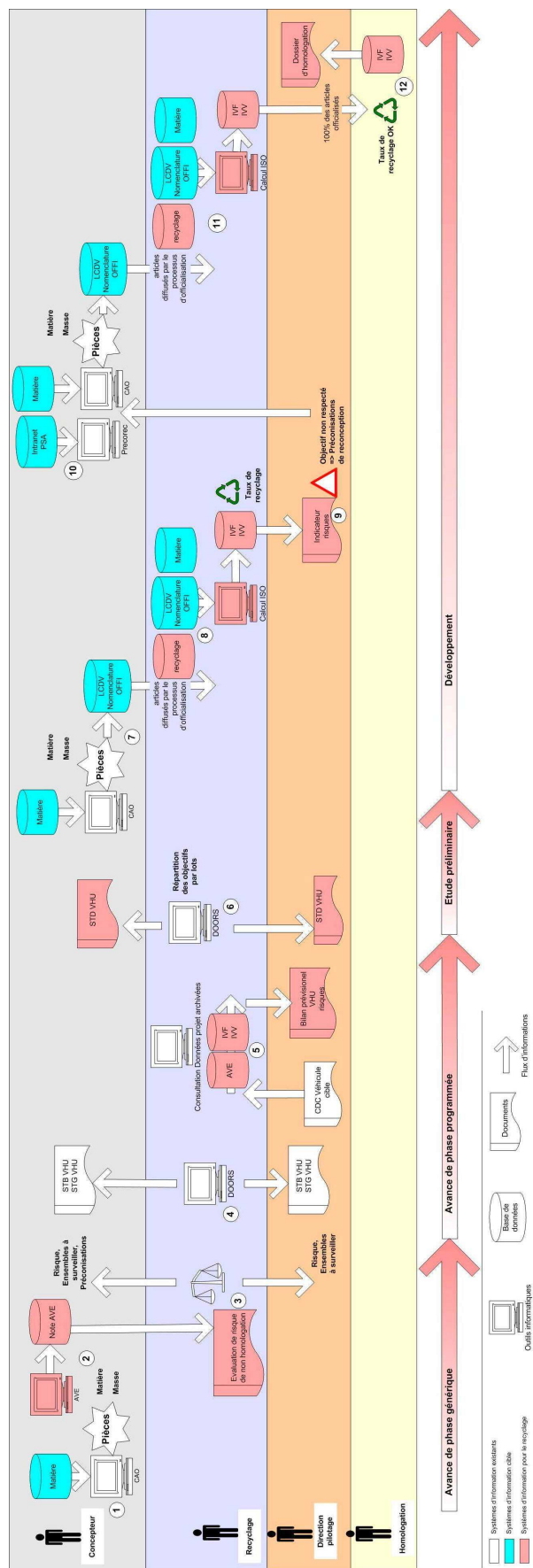


Figure 56 : Système d'information lié au scénario II

4.2.3.3. Scénario d'évolution interne III

Ce scénario permet de répondre aux exigences d'un contexte présentant des risques aussi bien réglementaires qu'économiques. Pour limiter ces risques, ce scénario doit nous permettre d'introduire une dimension économique dans l'analyse du véhicule tout en assurant sa capacité à être homologué tout au long du projet. Pour répondre à cette analyse du contexte, nous allons présenter les objectifs du scénario, son processus et les différentes composantes qui le structurent.

Dans la description de ce scénario, nous ne prendrons pas en compte les éléments liés au processus d'homologation décrit dans le scénario I, celui-ci étant considéré comme acquis.

a) Objectifs

L'objectif de ce scénario est d'évaluer la notion de coût de traitement associé au taux de valorisation comme critère d'aptitude à la valorisation du véhicule. La démarche globale reste relativement similaire à celle du scénario II. La différence majeure est liée à l'apparition d'outils nécessaires à l'évaluation de l'aptitude à la valorisation en termes de taux de valorisation et de coût de traitement et à la gestion d'une grande quantité de données. De plus, ce scénario ne s'inscrit plus dans une démarche attentiste, où la seule action est une veille permettant de s'assurer de l'homologation du véhicule, mais dans une démarche active de recherche d'amélioration des performances en termes d'aptitude à la valorisation du véhicule.

Dans cette situation, le scénario devra toujours permettre au constructeur de savoir calculer le taux de valorisation d'un véhicule pour l'homologation, mais il devra également permettre de savoir détecter et résoudre les problèmes liés à l'aptitude à la valorisation du véhicule en cours de projet, aussi bien en termes de taux de valorisation que de coût de traitement.

Les objectifs de ce scénario sont donc :

- pouvoir spécifier des objectifs de valorisation et identifier des points durs dès le début du projet ;
- s'assurer tout au long du projet qu'il n'y a pas de dérive par rapport aux objectifs fixés.

Pour ce faire, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Réaliser des analyses qualitatives de l'aptitude à la valorisation des nouveaux concepts développés en phase d'innovation.
- Définir des objectifs de valorisation au projet.
- Réaliser des évaluations quantitatives à partir des données fournies par les concepteurs.

b) Processus

Pour répondre à ce besoin, le processus suivant est proposé (Figure 57).

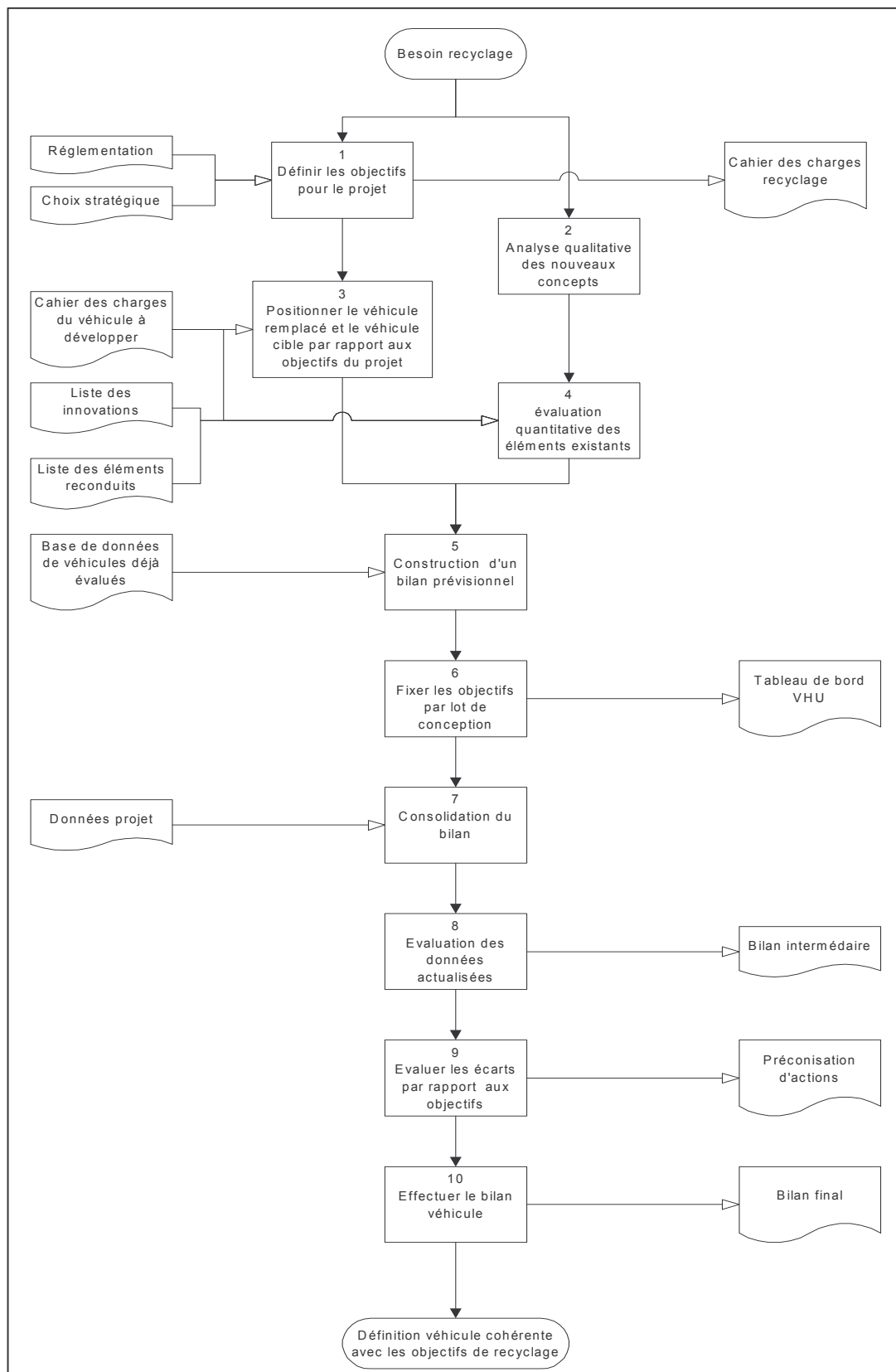


Figure 57 : Processus du scénario III

Les différentes étapes du processus, ainsi que les acteurs intervenant à chacune de ces étapes sont décrits dans le Tableau 19 :

	Description	Intervenants	SOD
1	Définir l'ensemble des objectifs Recyclage que doit atteindre le projet, en termes de respect d'aptitude à la valorisation.	Service recyclage Réglementation Stratégie	J-1 à J0
2	Evaluation des nouveaux concepts susceptibles d'impacter l'aptitude à la valorisation.	Service recyclage Equipes innovation	Avance de phase générique
3	Positionner le projet par rapport aux véhicules référents (véhicule cible et véhicule remplacé), afin de fixer les premiers objectifs et d'identifier les points durs.	Service recyclage architecte	J-1 à J0
4	Evaluation quantitative des éléments existants (base véhicule, groupe motopropulseur, nouveaux concepts, etc.).	Service recyclage Equipes innovation Equipes projet véhicule Métier organes Métier achat	J-1 bis à J1
5	Construction d'un bilan masses-matières prévisionnel à partir du cahier des charges du véhicule à développer et des évaluations des éléments existants.	Service recyclage	J-1 bis et J0
6	A partir des objectifs véhicule, fixer des objectifs par lot de conception.	Service recyclage	J0 à J1
7	Les données extrapolées lors de la construction du bilan prévisionnel sont remplacées par les données projet.	Service recyclage	De J1 à J4
8	Faire les évaluations du bilan avec les données actualisées.	Service recyclage	De J1 à J4
9	Evaluer les écarts par rapport aux objectifs.	Service recyclage	De J2 à J4
10	Bilan recyclage du véhicule pour retour d'expérience.	Service recyclage	J5 à J6

Tableau 19 : Etapes du processus du scénario III

Ces différentes actions peuvent être positionnées sur le schéma de développement (SOD) d'un véhicule (Figure 58) :

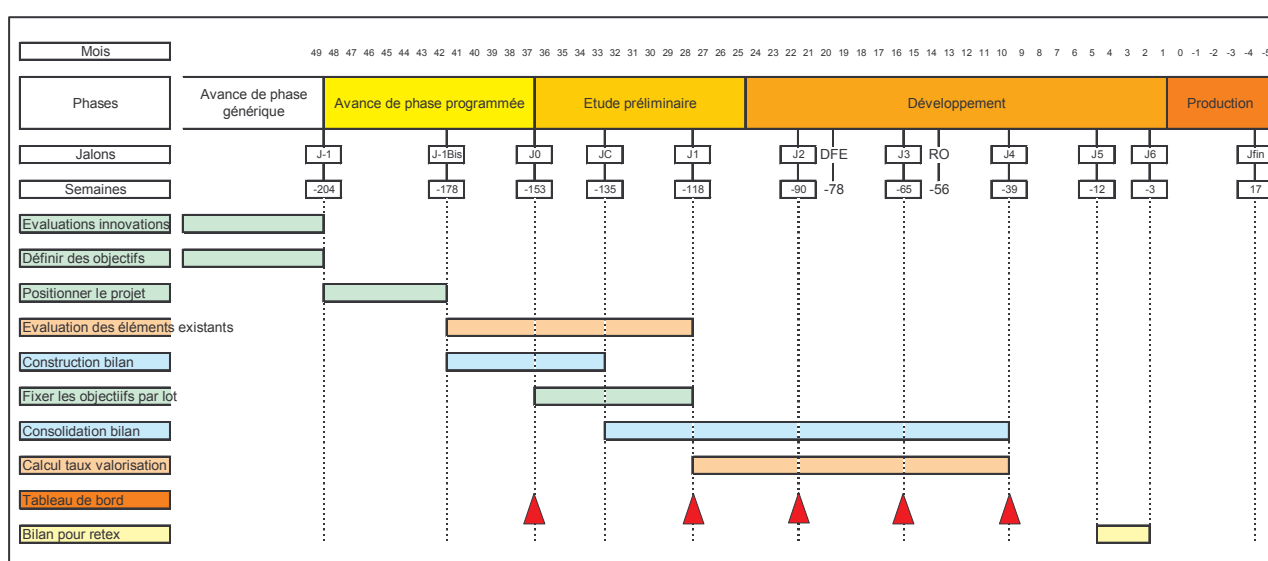


Figure 58 : Positionnement des actions du processus du scénario III sur le SOD

c) Outils

La mise en place de ce processus nécessite certains outils en complément des outils présents dans le scénario I.

- Une méthode d'évaluation qualitative pour les travaux d'innovation :
Les deux outils disponibles pour ce type d'évaluation sont l'AVE pour les fonctions génériques et l'ADE pour les éléments soumis à la dépollution.
- Une méthode d'évaluation quantitative des éléments développés et existants :
La méthode AVF devra permettre d'évaluer les éléments soumis à un démontage.
- Méthode AVV :
La méthode AVV regroupe trois outils :
 - Méthode de répartition
Cette méthode permet de définir les objectifs au projet.
 - Méthode de calcul de l'AVV
Cette méthode permet d'obtenir le bilan véhicule.
 - Tableau de bord Recyclage
Cet outil permet de synthétiser l'information pour la direction du projet.
- Base de données véhicules :
Cette base doit comporter les évaluations des véhicules déjà fabriqués ou des véhicules concurrents en termes d'aptitude à la valorisation.

La principale difficulté de l'utilisation de ces outils, et plus particulièrement de l'AVF, est de pouvoir récupérer les données structurelles (architecture, types de liaisons, etc.) du produit, l'ensemble de ces données n'étant souvent disponible que très tardivement lors du développement du véhicule. D'où l'importance de la base de données Recyclage, qui devra nous permettre de travailler par similitude afin de construire des bilans prévisionnels. Dans ce scénario, l'AVF n'est utilisé que par l'expert recyclage.

d) Organisation

La description de l'organisation permet de positionner les différentes actions à mener par rapport aux acteurs et de définir le circuit d'informations entre ces acteurs (Figure 59). Le schéma ne présente que les interactions entre les acteurs hors processus d'homologation (scénario I).

Les différents acteurs impliqués sont :

- ↳ Le projet véhicule
 - La direction de projet
 - Les concepteurs
- ↳ Le service innovation
- ↳ Le service recyclage
- ↳ L'expert recyclage
- ↳ Les métiers achat, organe, architecture.

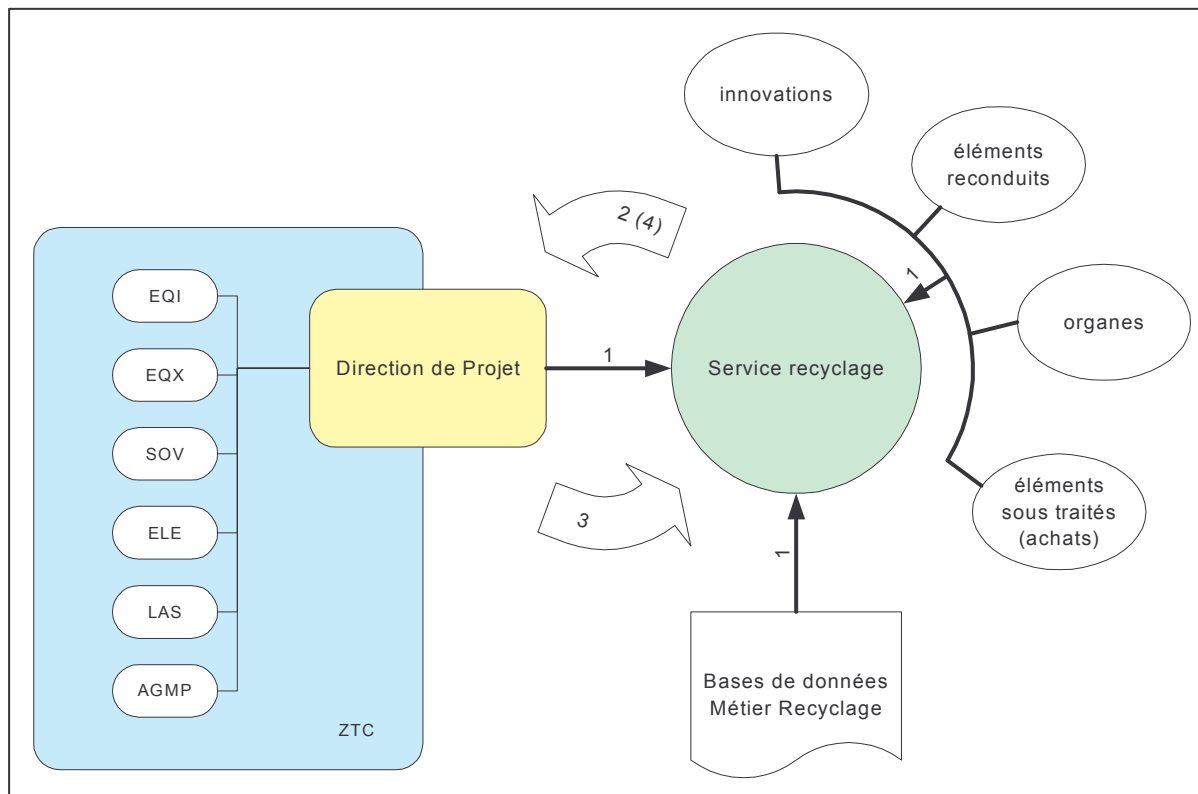


Figure 59 : Circuit d'information entre les acteurs du scénario III

Les actions du processus peuvent être positionnées par rapport aux acteurs impliqués.

1. Construction du bilan prévisionnel d'aptitude à la valorisation
Collecte, par le service recyclage, des informations nécessaires à la construction d'un bilan véhicule prévisionnel auprès des différents métiers (métiers véhicule, métiers organes, service achats, équipes d'innovation) et dans la base de données recyclage. Ce bilan est ensuite analysé par un expert recyclage qui fixe les objectifs du projet.
2. Fournir au projet les objectifs à atteindre et les points durs à surveiller

Ces données sont fournies à la direction de projet par le service recyclage via le tableau de bord recyclage.

3. Consolidation du bilan

Collecte des informations du nouveau véhicule nécessaires à la consolidation du bilan prévisionnel auprès du projet.

4. Bilan et préconisation d'actions à la direction de projet

L'expert recyclage doit prévenir les dérives par rapport aux objectifs et être en mesure de faire des propositions d'amélioration. Il peut intervenir en tant que soutien technique auprès des concepteurs.

Dans ce mode de fonctionnement, les actions en conception sont ciblées en fonction des risques identifiés en début de projet. La direction de projet est très impliquée dans ce scénario. Elle a à sa disposition des outils et des indicateurs qui doivent lui permettre d'avoir une bonne visibilité de l'aspect recyclage du projet et d'être une aide à la décision. Le rôle de l'expert est accru, car il est le correspondant unique du projet et doit assurer la collecte des informations, les calculs et le suivi des évaluations ponctuelles (type AVF et dépollution).

e) Le système d'information

De même que dans le cas du scénario II les impacts sur les systèmes d'information décrits précédemment reste valable dans le cas du scénario III.

Le seul impact supplémentaire consiste à compléter l'outil de calcul de taux de valorisation par un outil d'estimation du bilan économique des opérations de recyclage. Pour cela on doit ajouter un module remplissant les fonctions de l'AVF. La maquette GADESA (paragraphe 4.1.2.3) a montré la faisabilité d'un outil générant des gammes de démontage optimisé par rapport au temps de travail et donc aux coûts des opérations de démontage. De plus cet outil fournit une estimation de ces coûts et une estimation de la valeur marchande des matériaux recyclés. Il faut donc alors intégrer cette solution et aussi gérer les données nécessaires à son fonctionnement. Cet outil nécessite notamment des données relatives à l'architecture des ensembles sur lesquels on souhaite démonter des pièces comme les graphes de liaison et d'antériorité. L'état de nos connaissances actuel ne permet pas de savoir si de telles données seront présentes dans les systèmes cibles. La progression du projet INGENUM étape 3 (usine numérique), permettra de répondre à cette question dans le futur. En attendant, nous pouvons envisager de générer les données d'architecture nécessaire à partir des plans d'ensemble

concernés par le démontage. A la solution GADESA, il serrerait donc nécessaire d'ajouter une interface renseignement de ces données.

La partie bilan économique doit être ajoutée aussi dans les applications d'archivage et de bilan prévisionnel.

Les étapes du scénario III liées aux systèmes d'informations sont les suivantes (Figure 60) :

- 1) Conception en innovation de nouvelles solutions pour réaliser une fonction.
- 2) Réponse au questionnaire AVE à propos de cette nouvelle solution.
- 3) Evaluation d'un éventuel risque qui pourrait être du à l'intégration de cette innovation dans un projet véhicule.
- 4) Diffusion des spécifications techniques de besoin et spécifications techniques générales sur DOORS.
- 5) Exploitation des bilans de projets antérieurs pour établir un bilan cible par analogie et intégration des données concernant les éléments réutilisés.
- 6) Diffusion des spécifications techniques détaillées sur DOORS : répartition des objectifs par lots de conception ou ensembles techniques.
- 7) Conception des éléments du véhicule au sein des systèmes d'information, intégration des données masse et matière à ces systèmes.
- 8) Calcul des taux de valorisabilité et des coûts de démontage des premiers éléments conçus.
 - a) Extraction des nomenclatures voulues à partir des définitions LCDV de véhicule ou ensemble technique.
 - b) Extraction des données masses et matières correspondant à la nomenclature.
 - c) Répartition des produits et matières dans les familles de destination de fin de vie.
 - d) Calcul des taux de valorisabilité et des coûts de démontage.
- 9) Suivi des indicateurs « recyclage » et demande de re-conception si nécessaire.
- 10) Conception des éléments du véhicule au sein des systèmes d'information, intégration des données masses et matières à ces systèmes.
- 11) Calcul des taux de valorisabilité des éléments conçus.
- 12) Diffusion des résultats auprès du service homologation et rédaction du dossier homologation lorsque le taux de renseignement atteint 100 %.

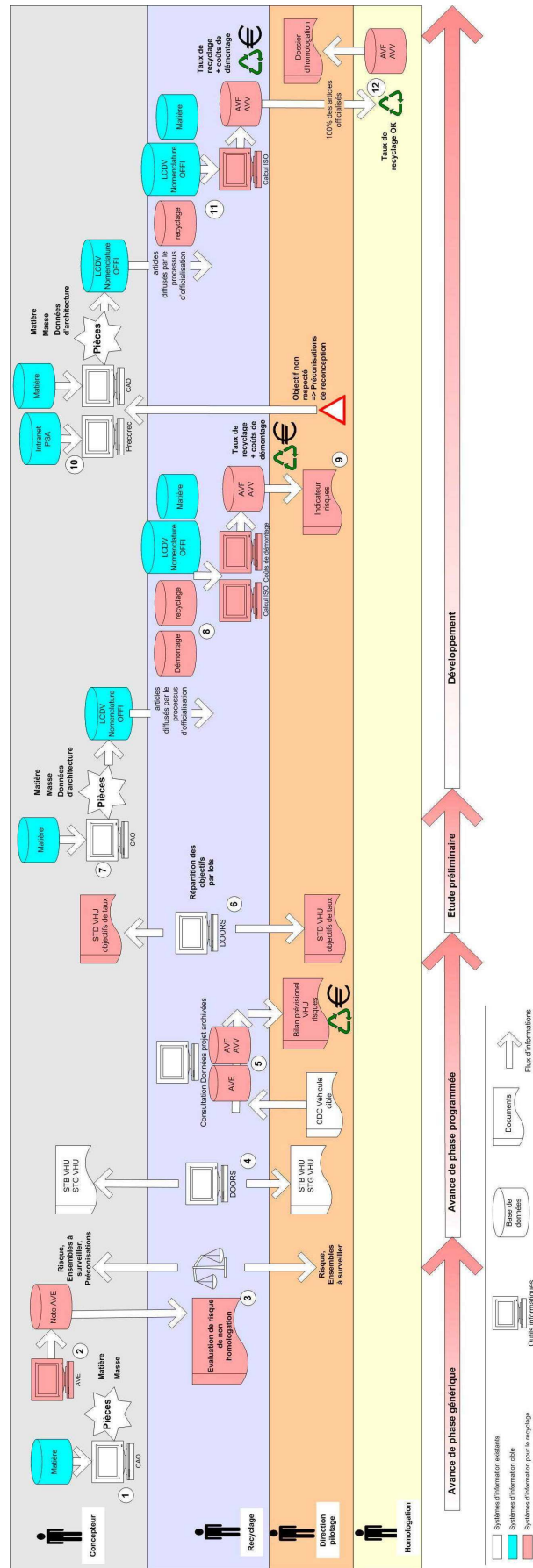


Figure 60 : Systèmes d'information liés au scénario III

4.2.3.4. Scénario d'évolution interne IV

Ce scénario doit permettre de répondre aux exigences d'un contexte présentant des risques importants aux niveaux réglementaire et économique. Afin de maîtriser ces risques, le scénario prévoit une intégration complète de la notion de valorisation en conception, en impliquant l'ensemble des acteurs du projet. Pour répondre à cette analyse du contexte, nous allons présenter les objectifs du scénario, son processus et les différentes composantes qui le structurent.

Dans la description de ce scénario, nous ne prendrons pas en compte les éléments liés au processus d'homologation décrit dans le scénario I, celui-ci étant considéré comme acquis.

a) Objectifs

L'objectif de ce scénario est de permettre à l'entreprise de calculer le taux de valorisation d'un véhicule pour l'homologation tout en maîtrisant dès la conception le taux de valorisation réel du véhicule et son coût de traitement. Pour ce faire, il faut une intégration complète de la notion d'aptitude à la valorisation dans les projets, c'est-à-dire que le scénario doit faire prendre en compte la notion d'aptitude à la valorisation au projet et aux concepteurs. Pour ce faire, les concepteurs feront eux-mêmes les évaluations, ce qui leur permettra de faire directement des modifications sur leur conception s'il y a lieu. Ils auront à leur disposition différents outils tels que L'AVF, L'AVE et la base de règles Précorec. En contrepartie, ils devront renseigner, en plus de la composition masses/matières, le taux de valorisation et le coût de traitement de leurs pièces.

Les objectifs de ce scénario sont donc :

- Savoir calculer le taux de valorisation et le coût de traitement des véhicules en développement.
- Faire prendre en compte ces paramètres par le projet et les concepteurs.

Les hypothèses retenues pour répondre à ces objectifs sont les suivantes :

- Définir en début de projet un véhicule cible en termes de bilan AVV et faire évoluer ce bilan tout au long du projet en remplaçant les données du véhicule cible par les données du véhicule projet.
- Les résultats issus du bilan AVV et de ses évolutions seront présentés aux responsables du projet par l'intermédiaire du tableau de bord Recyclage.

b) Processus

Pour répondre à ce besoin, le processus suivant est proposé (Figure 61).

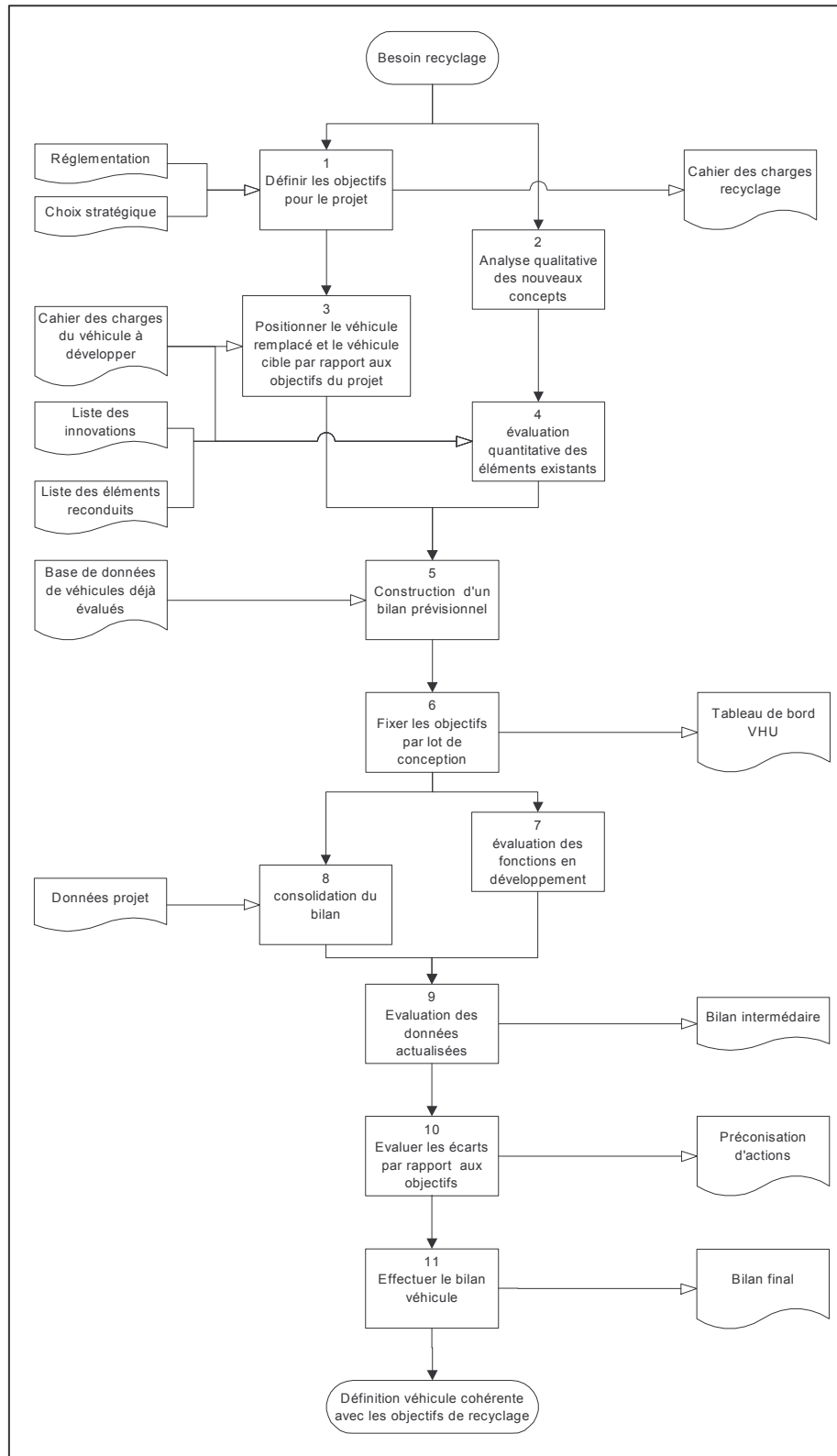


Figure 61 : Processus du scénario IV

Les différentes étapes du processus ainsi que les acteurs intervenant à chaque étape sont décrits dans le Tableau 20 :

	Description	Intervenants	SOD
1	Définir l'ensemble des objectifs Recyclage que doit atteindre le projet, en termes d'aptitude à la valorisation.	Service recyclage Réglementation Stratégie	J-1 à J0
2	Evaluation des nouveaux concepts susceptibles d'impacter l'aptitude à la valorisation.	Service recyclage Equipe innovation	Avance de phase générique
3	Positionner le projet par rapport aux véhicules référents (véhicule cible et véhicule remplacé), afin de fixer les premiers objectifs et d'identifier les points durs.	Service recyclage architecte	J-1 à J0
4	Evaluation quantitative des éléments existants (base véhicule, groupe motopropulseur, nouveaux concepts...).	Service recyclage Equipes innovation Equipes projet véhicule Métier organes Métier achats	J-1 bis à J1
5	Construction d'un bilan AVV prévisionnel à partir du cahier des charges du véhicule à développer et des évaluations des éléments existants.	Expert recyclage	J-1 bis et J0
6	A partir de données plus détaillées sur le projet (choix de solutions technologiques, reconduction de certains éléments), on affine le véhicule de référence et les objectifs (définitions du véhicule cible et des objectifs par rapport aux ZTC, aux lots).	Expert recyclage	J0 à J1
7	Evaluations quantitatives des fonctions ciblées.	Concepteurs	J1 à J4
8	Dès les premières AVF disponibles, ces données sont intégrées dans le modèle du véhicule de référence. A partir de là, on redéfinit les objectifs locaux. Cette procédure se répète tout au long du projet, jusqu'à ce que le bilan AVV ne soit plus composé que de données issues du projet.	Expert recyclage	De J1 à J4
9	Faire les évaluations du bilan avec les données actualisées.	Expert recyclage	De J1 à J4
10	Evaluer les écarts par rapport aux objectifs, décider des actions en conséquences.	Expert recyclage Direction de projet	De J2 à J4
11	Bilan recyclage du véhicule pour retour d'expérience.	Expert recyclage	J5 à J6

Tableau 20 : Etapes du processus du scénario IV

Ces différentes actions peuvent être positionnées sur le schéma de développement d'un véhicule (Figure 62) :

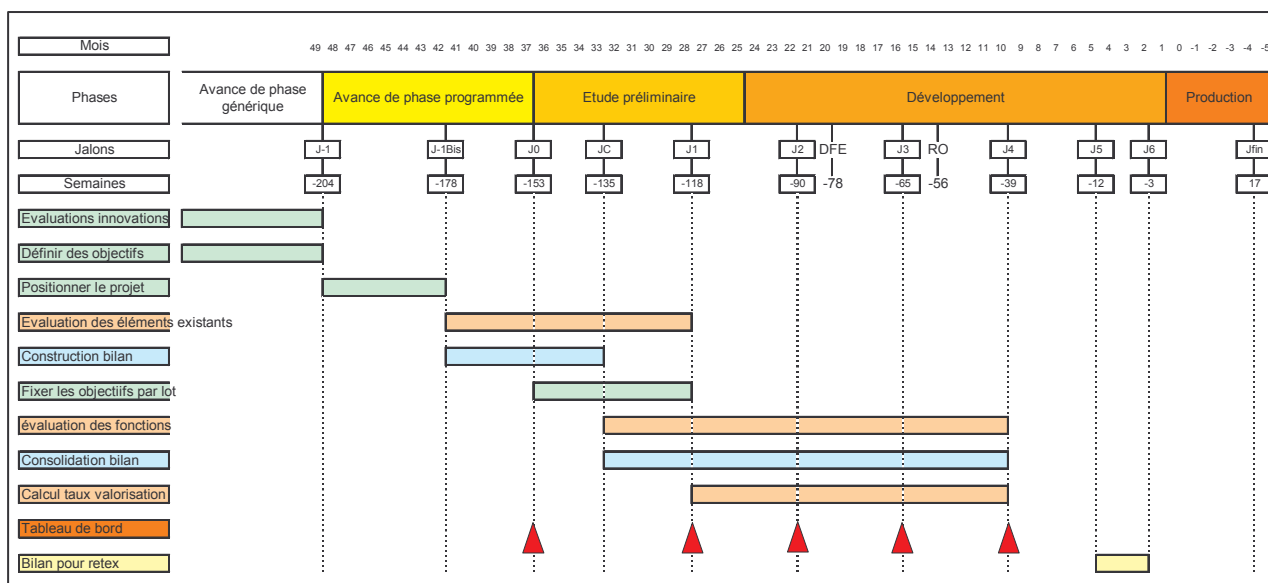


Figure 62 : Positionnement des actions du processus du scénario IV sur le SOD

Ce processus est très similaire au processus du scénario III (Figure 58), la principale différence tient aux rôles des différents acteurs.

c) Outils

La mise en place de ce processus nécessite de la mise en œuvre de certains outils en complément des outils présents dans le scénario I.

- Une méthode d'évaluation qualitative pour les travaux d'innovation
Les deux outils disponibles pour ce type d'évaluation sont l'AVE et l'ADE.
- Une méthode d'évaluation quantitative des éléments développés et existants
La méthode AVF nous permettra d'évaluer les éléments soumis à un démontage.
- Méthode AVV

La méthode AVV regroupe trois outils :

- Méthode de répartition
Cette méthode permet de définir les objectifs du projet.
- Méthode de calcul de l'AVV
Cette méthode permet d'obtenir le bilan véhicule.
- Tableau de bord Recyclage
Cet outil permet de synthétiser l'information pour la direction du projet.
- Base de données véhicules

Cette base doit comporter les évaluations des véhicules déjà fabriqués ou des véhicules concurrents en terme d'aptitude à la valorisation.

- Une base de règles recyclage (Précorec)
Liste de préconisations de conception pour le recyclage.

Dans ce scénario, la plupart des outils sont mis à la disposition des concepteurs. En effet, ils doivent réaliser eux-mêmes les évaluations des fonctions qu'ils développent. L'expert recyclage ayant un rôle de synthèse, il gère des données au niveau véhicule.

d) Organisation

La description de l'organisation permet de positionner les différentes actions à mener par rapport aux acteurs et de définir le circuit d'information entre ces acteurs (Figure 63). Le schéma ne présente que les interactions entre les acteurs hors processus d'homologation (scénario I).

Les principaux acteurs impliqués sont :

↳ Le service recyclage

Le service recyclage a plusieurs rôles. Il fournit les outils d'évaluation aux ZTC et aux différents autres acteurs impliqués, comme les services innovations, les métiers développant les organes ou certains équipementiers.

Le principal acteur de la méthode est l'expert recyclage. Il a un rôle de support technique pour les utilisateurs des outils, mais il est surtout le responsable de la synthèse des données issues des projets et il rédige le tableau de bord recyclage à destination de la direction de projet.

↳ Le projet véhicule

○ La direction de projet

La direction de projet est le client de ce scénario. Les principaux destinataires des informations sont le directeur de projet, le responsable technique et le responsable conception (voire les architectes).

Le tableau de bord Recyclage leur est destiné. Il doit leur permettre d'avoir une vision globale du véhicule en terme d'aptitude à la valorisation à tout instant du projet (plus certainement à chaque jalon). A partir de ces informations, ils doivent être en mesure de faire des choix quant aux actions à mener pour atteindre les

objectifs de taux de valorisation et de coût de traitement en fin de vie imposés par le cahier des charges véhicule.

- Les ZTC

Les ZTC (par l'intermédiaire des PPP) auront des objectifs d'aptitude à la valorisation par lot de conception, voire par fonction, à atteindre. Ces objectifs seront fixés par la direction du projet à partir des premiers tableaux de bord fournis. Ces objectifs passeront par les STx.

Elles devront également fournir aux experts recyclage l'ensemble des informations nécessaires aux évaluations AVV, c'est-à-dire les évaluations AVF de leurs fonctions cibles, les évaluations des éléments à dépolluer et le bilan masse/matière de leur(s) lot(s).

Le processus se base sur la circulation d'un certain nombre d'informations entre les différents acteurs décrits ci-dessus. Au cours du développement du projet, on peut décomposer ce flux d'informations en six étapes. Les étapes 1 à 3 ont lieu en début de projet (avance de phase programmée), les étapes 4 à 6 à chaque jalon, jusqu'à la fin du projet.

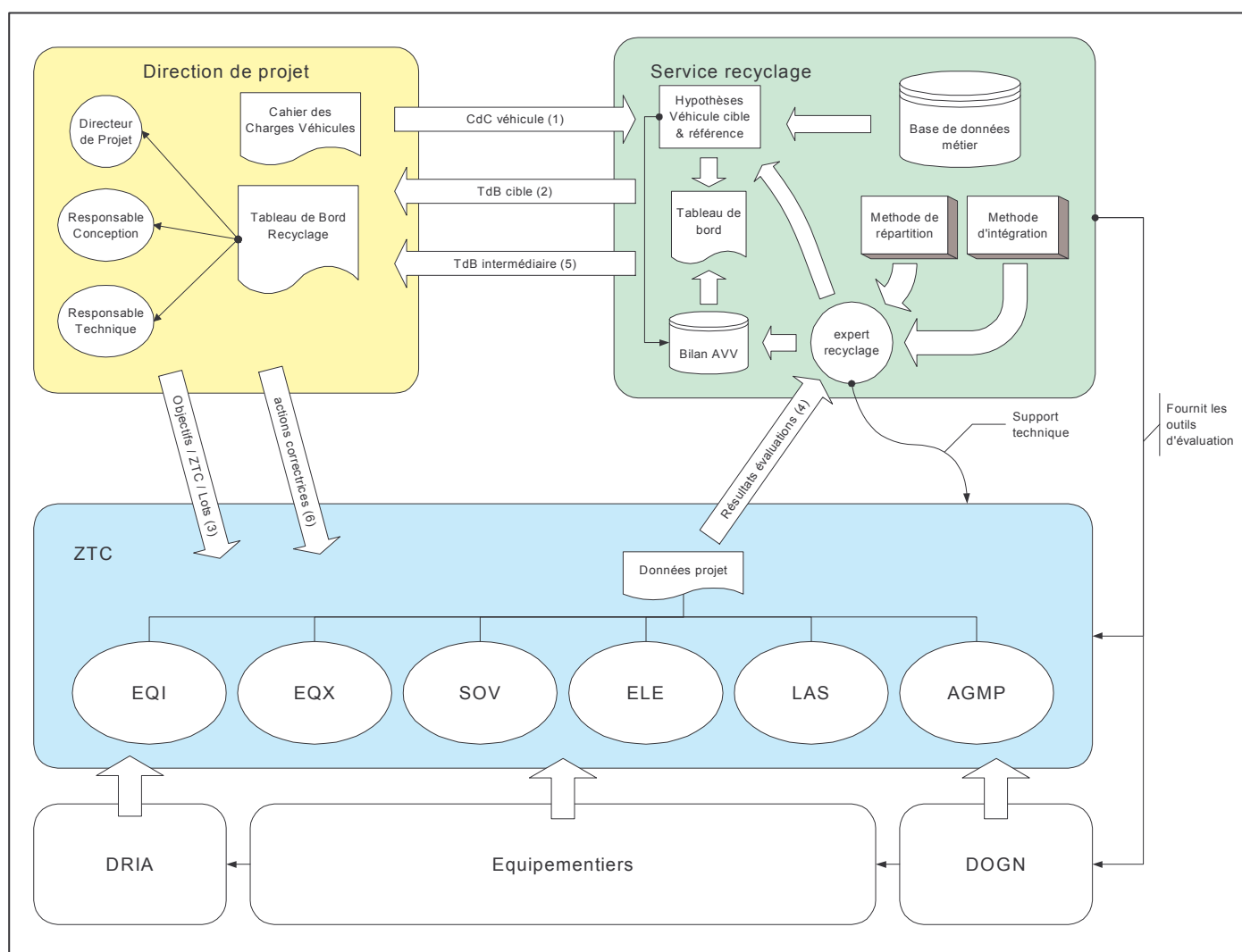


Figure 63 : Circuit d'informations entre les acteurs du scénario IV

Les six étapes sont représentées par les six flèches reliant les trois acteurs principaux.

1. Cahier des charges véhicule

Le cahier des charges véhicule est fourni à l'expert recyclage. Celui-ci définit, à partir d'une base de données de véhicules déjà évalués et des premières informations sur le véhicule à développer, un véhicule de référence qui servira de base au bilan AVV, et un véhicule cible qui permettra de fixer les objectifs à atteindre.

2. Tableaux de bord cible et de référence

Le tableau de bord Recyclage du véhicule cible permettra de fixer les objectifs par ZTC et par lots. Le tableau de bord Recyclage du véhicule de référence devra permettre de mettre en avant les points durs dès le début du projet.

3. Objectifs par ZTC et par lots

A partir du tableau de bord et sur proposition du service recyclage, la direction du projet affecte les objectifs recyclage aux ZTC (les vecteurs de ces informations peuvent être les STx).

4. Résultats des évaluations

Dès que les informations sont disponibles, les ZTC doivent mettre à disposition à l'expert recyclage les résultats de leurs évaluations d'aptitude à la valorisation et à la dépollution.

5. Tableau de bord intermédiaire

Le tableau de bord est mis à jour à chaque jalon par les nouvelles données issues des ZTC. Il permet d'évaluer les écarts par rapport au véhicule cible.

6. Actions correctrices

Si certaines actions doivent être envisagées pour assurer la tenue des objectifs recyclage, la direction de projet transmet les informations nécessaires aux ZTC.

e) Le système d'information

Dans le cas du scénario IV, il n'y a pas d'impact supplémentaire en ce qui concerne les systèmes d'information, mais des impacts organisationnels. La mise en place d'un tel processus nécessite le déploiement du logiciel AVF auprès des concepteurs en plus des différents éléments déjà décrits dans les scénarios précédents.

Les étapes du scénario IV liées aux systèmes d'informations sont les suivantes (Figure 64) :

- 1) Conception en innovation de nouvelles solutions pour réaliser une fonction.
- 2) Réponse au questionnaire AVE à propos de cette nouvelle solution.
- 3) Evaluation d'un éventuel risque qui pourrait être du à l'intégration de cette innovation dans un projet véhicule.
- 4) Diffusion des spécifications techniques de besoin et spécifications techniques générales sur DOORS.
- 5) Exploitation des bilans de projets antérieurs pour établir un bilan cible par analogie et intégration des données concernant les éléments réutilisés.
- 6) Diffusion des spécifications techniques détaillées sur DOORS : répartition des objectifs par lots de conception ou ensembles techniques.
- 7) Conception des éléments du véhicule au sein des systèmes d'information cible, intégration des données masse et matière à ces systèmes.

- 8) Calcul des taux de valorisabilité et des coûts de démontage des premiers éléments conçus.
 - a) Extraction des nomenclatures voulues à partir des définitions LCDV de véhicule ou ensemble technique.
 - b) Extraction des données masse et matières correspondant à la nomenclature.
 - c) Répartition des produits et matières dans les familles de destination de fin de vie.
 - d) Calcul des taux de valorisabilité et des coûts de démontage.
- 9) Suivi des indicateurs « recyclage ».
- 10) Demande de re-conception si nécessaire.
- 11) Conception des éléments du véhicule au sein des systèmes d'information cible, intégration des données masse et matière à ces systèmes.
- 12) Calcul des taux de valorisabilité des éléments conçus.
- 13) Diffusion des résultats auprès du service homologation.
- 14) Rédaction du dossier homologation lorsque le taux de renseignement atteint 100 %.

4.2.4. Choix d'une stratégie d'intégration consciente

L'élaboration simultanée des scénarios d'évolution externe et des scénarios d'évolution interne nous conduit à mettre à la disposition de l'entreprise un ensemble de solutions pour prendre en compte la notion de valorisation des véhicules en fin de vie. L'existence de cet ensemble de solutions, cautionnée par les connaissances acquises grâce à la mise à l'épreuve des outils d'investigation, permet à l'entreprise d'élaborer une stratégie d'intégration consciente de la notion de valorisation, les choix du SEI à courts termes comme ceux à longs termes restant du domaine de la direction de l'entreprise.

La définition de scénarios d'évolution interne nous permet d'assurer l'exhaustivité de l'intégration en prenant en compte toutes les dimensions du processus de conception et d'être en accord avec la vision que peut avoir l'entreprise du contexte de la valorisation. Mais nous avons souligné dans la problématique que l'une des caractéristiques de la notion de valorisation était son évolutivité dans le temps. Pour prendre en compte cette caractéristique, l'utilisation des SEI doit être dynamique afin de pouvoir s'adapter aux évolutions du contexte. Il devient alors nécessaire de dresser une stratégie permettant de planifier de manière consciente l'utilisation et les évolutions possibles des scénarios.

Suite à l'analyse du contexte, l'entreprise va développer un scénario d'évolution interne répondant aux critères issus de cette analyse. Si celui-ci est simple, la stratégie de l'entreprise consiste à implémenter cet unique scénario. Si le scénario est plus complexe, il devient intéressant d'établir une stratégie permettant une mise en œuvre progressive de ce scénario via des scénarios intermédiaires plus simples.

Le développement d'une stratégie d'intégration consciente est d'autant plus pertinent et efficace si l'entreprise ne se contente pas du développement d'un seul scénario, mais en développe plusieurs, se donnant ainsi les moyens de répondre à différentes évolutions possibles du contexte. Ce qui, au regard du peu de lisibilité du contexte à moyen et long termes, est la démarche la plus pertinente. Ayant plusieurs scénarios à sa disposition, l'entreprise est alors en mesure de dresser une stratégie d'intégration consciente.

Les stratégies possibles par rapport à l'intégration d'un ou plusieurs scénarios d'évolution interne peuvent être diverses. Nous avons identifié quatre approches possibles, elles sont ici

caractérisées par un qualificatif rendant compte du niveau de leadership souhaité par l'entreprise en matière d'environnement.

- **Attentiste**
Mise en place d'un scénario simple permettant de répondre à minima à l'analyse qui est faite du contexte (cas du développement d'un seul scénario).
- **Réactive**
Mise en place d'un scénario permettant de répondre à l'analyse du contexte et en ne mettant en place un nouveau scénario qu'en cas d'évolution de celui-ci.
- **Active**
Mise en place d'un scénario répondant à l'analyse du contexte et préparation de la mise en place progressive du nouveau scénario.
- **Proactive**
Mise en place d'un scénario plus complexe que ne l'exige l'analyse du contexte, afin d'anticiper ses évolutions et de s'assurer une place de leader sur l'aspect fin de vie des véhicules.

Selon la stratégie retenue, la mise en place du scénario défini précédemment peut être plus ou moins étalée dans le temps. Les scénarios peuvent être mis en œuvre directement, pour répondre à court terme à une situation spécifique, ou peuvent servir de scénarios intermédiaires dans le cas de l'implémentation d'un scénario complexe, permettant ainsi aux différents acteurs impliqués de bénéficier d'une phase d'apprentissage (Figure 65).

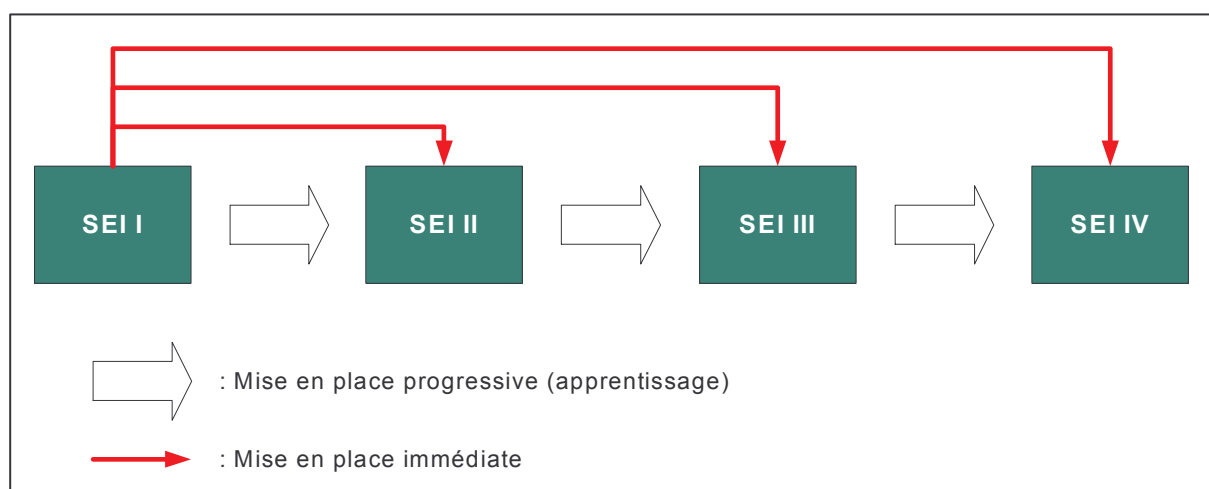


Figure 65 : Mise en place possible des SEI

Cette approche permet, une fois un des scénarios mis en place, de faire une nouvelle analyse du contexte. Si cette analyse confirme la stratégie choisie, la mise en place progressive des scénarios peut être poursuivie, la stratégie évolue en choisissant la mise en place d'un autre scénario mieux adapté à la nouvelle situation.

Ainsi, une stratégie d'intégration consciente devra permettre de limiter les risques liés aux évolutions futures de la notion de valorisation, en accord avec les choix politiques de l'entreprise, tant au niveau de sa vision du contexte de la valorisation que de sa volonté à prendre en compte ce paramètre.

4.2.5. Conclusion

A partir de différents scénarios d'évolution interne et externe, nous avons présenté différentes stratégies d'intégration. La description de ces stratégies nous a permis de définir différentes utilisations possibles des méthodes et des outils développés dans le chapitre « expérimentation » (chapitre 4.1). Ces différents scénarios nous ont permis de souligner l'intérêt de dresser une stratégie d'intégration consciente. D'autres scénarios pourraient être développés pour répondre à des besoins différents. La plupart de ces éléments sont en effet complémentaires ou peuvent également se suffire à eux-mêmes.

Pour faciliter le choix entre les différents scénarios, nous avons évalué leurs coûts de mise en œuvre. Cette évaluation a été réalisée dans le cadre d'une étude sur l'impact des scénarios sur les systèmes d'informations et prend principalement en compte l'aspect informatique de cette mise en œuvre [ROY 02].

Les coûts de mise en œuvre des différents scénarios sont synthétisés dans le tableau suivant (Tableau 21).

	Scénario I	Scénario II	Scénario III	Scénario IV
Coût d'intégration	280 HJ	650 HJ	1000 HJ	1000 HJ
Coût de 1^{ière} exploitation	166 HJ	196 HJ	266 HJ	266 HJ
Coût de formation	153 HJ	160 HJ	167,5 HJ	357,5 HJ
Total initialisation	589 HJ	1006 HJ	1433,5 HJ	1623,5 HJ
Coût d'exploitation après intégration	73 HJ	103 HJ	173 HJ	173 HJ

HJ : homme jour

Tableau 21 : Coût de mise en œuvre des scénarios

L'objectif de ces évaluations est de pouvoir mettre en regard les gains attendus par l'utilisation des scénarios et leurs coûts d'implémentation et d'utilisation. Il s'agit là d'un facteur essentiel dans le choix du scénario par l'entreprise.

5. Conclusions et perspectives

L'ensemble des travaux que nous avons présentés nous a permis de mettre à l'épreuve nos hypothèses et d'apporter une réponse concrète à la question qui nous a été posée par PSA Peugeot Citroën, à savoir : comment prendre en compte la valorisation des véhicules en conception afin de répondre aux exigences réglementaires ?

Dans un premier temps, nous allons présenter les conclusions de notre étude sur l'intégration de la valorisation des véhicules en fin de vie chez PSA Peugeot Citroën, puis nous généraliserons la démarche que nous avons adoptée afin de proposer une démarche générique d'intégration d'une nouvelle contrainte dans un processus de conception.

5.1. *Conclusions de l'étude*

Au regard des nouvelles obligations réglementaires liées à la Directive européenne sur les véhicules hors d'usage, PSA Peugeot Citroën a souhaité développer une démarche d'intégration de l'aspect fin de vie des véhicules dans son processus de conception.

Pour répondre à cette question, nous avons analysé les différents éléments liés à cette problématique. Cette analyse nous a permis de souligner la complexité de la notion de valorisation et du processus de conception.

La complexité de la notion de valorisation est essentiellement due au décalage temporel entre la conception d'un véhicule et son traitement en fin de vie. Ce décalage rend la notion de valorisation et les risques réglementaires et économiques qui y sont liés difficiles à appréhender. La seconde complexité est liée au processus de conception. Celui-ci est en effet constitué de plusieurs dimensions interdépendantes : organisationnelle, fonctionnelle et informationnelle.

Cette analyse nous a conduit à postuler qu'une intégration pérenne résulte : d'une modification exhaustive des aspects méthodologiques et organisationnels du processus de conception (c'est-à-dire, ici, les acteurs de la conception, les outils et méthodes utilisés, le schéma de développement du véhicule et les systèmes d'information liés à la conception), d'un processus participatif de l'ensemble de l'équipe de conception au sens large (de la

direction de l'entreprise au directeur de projet, jusqu'à l'opérationnel), d'une flexibilité des vecteurs d'intégration mis en œuvre liée à l'évolution et à l'incertitude des aspects réglementaires et techniques (à savoir la mise en place de la réglementation et ses évolutions futures, ainsi que les technologies utilisées par les filières de valorisation). Pour pouvoir développer une telle démarche d'intégration, nous avons décidé dans un premier temps d'accroître notre connaissance sur l'aptitude à la valorisation des véhicules et sur la mise en place d'une méthode d'évaluation de cette aptitude à la valorisation dans le processus de conception de PSA Peugeot Citroën.

Cette démarche nous a amené à développer et à mettre en application des outils spécifiques : les outils d'investigation. A l'aide de l'outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'un véhicule, nous avons défini les éléments nécessaires au calcul de l'AVV, d'un point de vue aussi bien instrumental (outils de calcul à mettre en place) qu'organisationnel. L'évaluation de différentes fonctions soumises à un démontage sur plusieurs véhicules à l'aide de l'outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'une fonction nous a permis, entre autres, d'accroître notre connaissance du potentiel de valorisation des véhicules et de hiérarchiser les fonctions entre elles. Les travaux sur l'outil de modélisation d'un atelier de désassemblage nous ont permis de juger de la faisabilité et de l'intérêt d'une telle simulation. Enfin, le développement de l'outil d'évaluation de l'aptitude à la valorisation d'un élément nous a permis de mettre en évidence tous les avantages d'une évaluation de l'aptitude à la valorisation très en amont dans le processus de conception.

Ces outils nous ont permis ainsi d'approfondir nos connaissances de l'aptitude à la valorisation et de la manière de l'évaluer. Nous avons également pu juger des moyens nécessaires à la mise en place de ces outils dans le processus de conception.

Dans le même temps, nous avons envisagé différentes évolutions possibles de la corrélation entre la composition des véhicules et les capacités de traitement des filières de valorisation, ainsi que les risques qui y sont associés. Cette analyse nous a conduit à proposer différents scénarios d'évolution externe.

A partir des connaissances acquises grâce à la mise en œuvre des outils d'investigation et aux scénarios d'évolution externe, nous avons défini différents scénarios d'évolution interne et une stratégie d'intégration. Chaque scénario doit répondre à un risque potentiel issu de l'analyse du contexte. Il permet ainsi de contextualiser l'utilisation des outils développés par

rapport au processus de conception et au contexte. A partir des différents scénarios, l'entreprise est à même de développer une stratégie d'intégration consciente pour la mise en place d'un ou plusieurs de ces scénarios.

Cela nous a permis de proposer une démarche d'intégration adaptée à la notion de valorisation et à l'entreprise. En effet, les outils répondent à des besoins exprimés par les opérationnels de la conception (du directeur de projet au concepteur) et le scénario est défini à partir des choix stratégiques de l'entreprise, ce qui nous permet d'avoir l'appui de la direction. De plus, la démarche d'intégration est exhaustive, car le scénario d'évolution interne, quelles que soient ses variantes, prend en compte l'ensemble des composantes du processus. Enfin, la démarche d'intégration s'inscrit dans le temps, puisque le scénario d'évolution interne peut se modifier dans le temps sur la base de la stratégie d'intégration définie par l'entreprise ou selon l'évolution de l'analyse du contexte faite par celle-ci.

A l'issue de ces travaux et pour répondre aux exigences réglementaires, PSA Peugeot Citroën met actuellement en place un scénario équivalent au scénario I que nous avons décrit.

5.2. Proposition d'une démarche d'intégration d'une nouvelle contrainte en conception

La prise en compte d'un nouveau paramètre ou d'une nouvelle contrainte dans un processus de conception est toujours une tâche difficile qui doit être bien préparée pour être réussie. La démarche que nous avons développée peut, a priori, être appliquée dans d'autres domaines.

D'une manière synthétique, cette démarche peut être définie par les étapes suivantes :

- Analyse générale du contexte et identification des différents champs d'ignorance, par rapport à la contrainte à intégrer et par rapport au processus de conception.
- Développement et mise à l'épreuve d'outils d'investigation pour créer de la connaissance par rapport à ces champs d'ignorance et pour préparer les futurs outils nécessaires à la prise en compte de la nouvelle contrainte.
- Elaboration simultanée de scénarios d'évolution externe et de scénarios d'évolution interne basés sur les outils développés et les connaissances acquises lors des précédentes étapes de la démarche.
- Choix d'une stratégie d'intégration consciente.

Nous allons développer ces différentes étapes dans l'optique de définir une démarche générique applicable à l'intégration de toute nouvelle contrainte dans un processus de conception complexe.

L'analyse du contexte permet d'identifier les enjeux autour du sujet, et ainsi de définir les objectifs à atteindre et les moyens pouvant être mis en œuvre dans le cadre de la démarche d'intégration. Cette analyse doit être la plus exhaustive possible, aussi bien en dehors de l'entreprise que dans l'entreprise, et d'un point de vue aussi bien technique que stratégique. De cette analyse dépend la réussite de l'ensemble de la démarche.

Une des étapes principales de cette démarche est l'identification des champs d'ignorance autour du domaine à intégrer. Il s'agit principalement de définir les spécificités de la contrainte à intégrer et les impacts de cette intégration sur le processus de conception. Pour ce faire, il convient d'identifier les zones d'ombre qui entourent l'objet de l'intégration (par exemple, les spécificités de la nouvelle contrainte par rapport au produit développé par l'entreprise). Dans le même temps, il faut définir les axes potentiels dans le processus de conception pouvant être utilisés pour l'intégration.

Les différents champs d'ignorance identifiés sont ensuite levés par le biais d'outils d'investigation.

Le développement et la mise à l'épreuve d'outils d'investigation permettent de répondre à deux objectifs : accroître le niveau de connaissance vis-à-vis de ces champs d'ignorance et préparer les outils à mettre en œuvre pour intégrer la nouvelle contrainte dans le processus de conception.

L'acquisition de connaissances peut se faire de différentes manières. Il est possible d'utiliser des outils d'expertises déjà existants (mis en œuvre pour la première fois sur un sujet particulier), ou bien de développer et d'expérimenter de nouveaux outils. Cette acquisition de connaissances se fait naturellement par rapport au sujet traité, mais elle doit également se faire par rapport au processus de conception. En effet, la phase la plus complexe de l'intégration est la prise en compte et l'acceptation de la nouvelle contrainte par les différentes composantes de la conception. Ainsi, les outils d'investigation doivent permettre de mesurer la résistance ou le pouvoir amplificateur des différents leviers d'intégration possibles au sein du processus de conception.

A partir des connaissances acquises et sur la base d'une analyse complète du processus de conception, nous pouvons développer un ou plusieurs scénarios d'évolution interne (SEI) répondant aux différents scénarios d'évolution externe (SEE) issus de l'analyse du contexte. Ces SEI devront permettre de contextualiser, dans un ensemble cohérent, les outils développés et utilisés jusqu'à présent.

Selon les options retenues, tout ou partie des outils pourront être utilisés. De même, ils pourront être utilisés tel quel ou être modifiés.

A partir de ces SEI, l'entreprise sera à même de développer une stratégie de mise en place de ces scénarios et donc une stratégie d'intégration consciente de sa nouvelle contrainte.

Cette démarche, schématisée ci-après (Figure 66), doit permettre de prendre en compte l'intégralité des éléments du contexte afin d'assurer la réussite de l'intégration de la contrainte dans le processus de conception. En outre, l'utilisation d'outils d'investigation permet de réaliser plusieurs itérations sur un même sujet avec des approches différentes, et ainsi d'éviter de laisser des zones d'ombre qui peuvent s'avérer très pénalisantes lors du choix des outils à mettre en place. Enfin, la notion de scénario d'évolution interne impose d'avoir une vision globale de la notion d'intégration. L'intégration n'est pas une simple mise à disposition d'outils aux concepteurs, même si ces outils sont très bien pensés. L'intégration, pour être pertinente, doit prendre en compte tous les aspects d'un processus de conception.

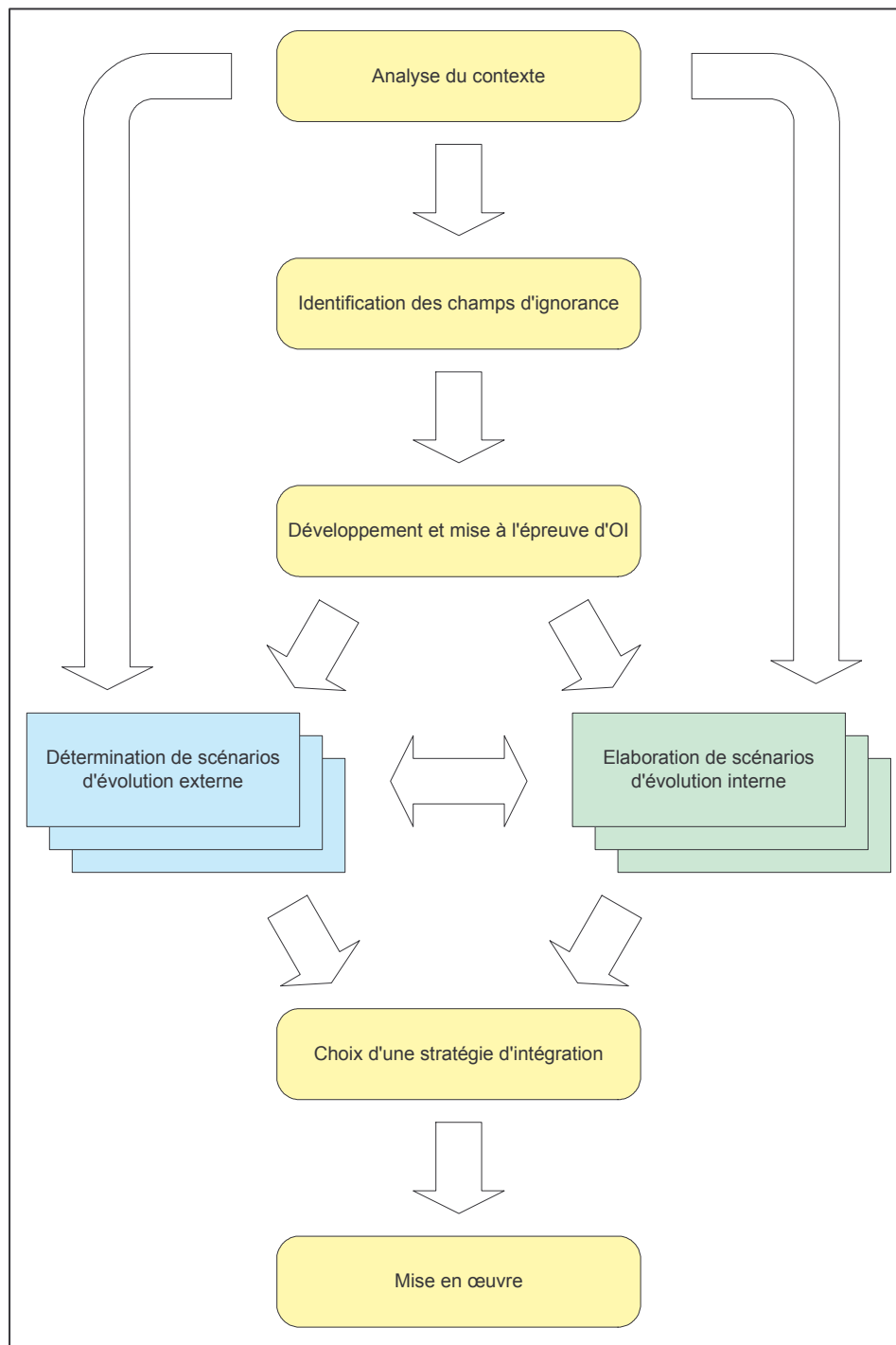


Figure 66 : Démarche d'intégration d'une nouvelle contrainte dans l'entreprise

L'ensemble de la démarche que nous avons décrite, et que nous avons synthétisée dans le chapitre 5, a pour but d'assurer la prise en compte d'une nouvelle contrainte, ou d'un nouveau métier, dans un processus de conception. Mais cette démarche a principalement pour objectif d'être un exemple de démarche d'intégration raisonnée. L'objectif est d'éviter les intégrations

« forcées », résultant d'une vision simpliste du phénomène d'intégration. Le processus de conception est un lieu complexe et largement hyper-contraint, y intégrer une nouvelle contrainte nécessite de le faire au juste nécessaire en ne négligeant aucun aspect, aussi bien humain que stratégique ou informationnel.

Bibliographie

[AAAM 98] AAAM, Vehicle recycling : Definition for Calculating Recyclability, AIAM / AAAM Meeting, 6p., 27/02/98.

[ADEME 00] ADEME, Recycler les plastiques des résidus de broyages, Véhicules hors d'usage et directive européenne, journée technique de l'ADEME, Paris, novembre 2000.

[AFNOR 98] AFNOR, FD X 30-310, Management Environnemental : Prise en compte de l'environnement dans la conception des produits – Principes généraux et application – Lignes directrices, 16p, 1998.

[AGGERI 95] AGGERI F., HATCHUEL A., LEFEBVRE P., La naissance de la voiture recyclable, intervention de l'état et apprentissages collectifs, Cahier de recherche du CGS, n°9, mars 1995.

[ASIEDU 98] ASIEDU M.Y., GU P., Product Life Cycle Cost Analysis: the State of the Art Review, International Journal of Production Research, vol. 36, n° 4, pp. 883-908, 1998.

[AUTOVINYLE 98] <http://www.autovinyle.com/html/fr/index1.html>, Mise en place d'Autovinyle : des objectifs clairs pour un meilleur environnement, 1998.

[BEHRENT et al. 97] BEHRENT S., JASCH C., PENEDA M.C., VAN WEENEN H., Life cycle design, a manual for small and medium-sized enterprises. IZT, Springer, 1997.

[BELTRAN et GOMOT 01] BELTRAN Y., GOMOT B., Evaluation et Comparaison de l'Aptitude à la Valorisation de Fonctions Automobiles, Rapport de projet de fin d'études, ENSAM, Paris, 2001.

[BISTAGNINO et al. 99] BISTAGNINO L., LANZAVECCHIA C., Concurrent Ecodesign : an environmental friendly approach, Journée conférence-débat « Management

environnemental de l'entreprise », organisé par Faurecia et laboratoire CPNI Ensam Paris 1999.

[BMW 92] BMW, Recycling of motor vehicles : Assessment of components, BMW S 113 99.0, Works Standards, 4p., August 1992.

[BONAÏTA 94] BONAÏTA J.P., Environnement : de l'adaptation à l'anticipation scientifique, Génie Industriel, les enjeux économiques, PUG, Grenoble, 1994.

[BORIES 02] BORIES M., Valorisation énergétique des résidus de broyage des véhicules hors d'usage, Rapport de stage, ENSI de Bourges, 2002.

[BRALLA 96] BRALLA J.G., Design for Excellence, Mc Graw Hill, New York, 1996.

[BROWN et al. 93] BROWN S., STEINSTRA S., LUDVIGSEN K., Closing the Loop : The Car Recycling Challenge, London : Euromotor Reports Limited, 236p., 1993.

[BRUGDAM 94] BRUGDAM S., BARRENSCHEEN J., Conception de produits aptes au démontage en construction automobile. AZT/MTZ numéro spécial / Technique de fabrication 93/94, pp. 32-42., 1994.

[BUFFIER 02] BUFFIER D., Roselyne Bachelot prône la « réconciliation », Le Monde, Paris, 25 juin 2002.

[BULLINGER 99] Bullinger H.J., Elimination of end-of-life cost through a standardization simultaneous design methodology for SME supply chains, IEEE international symposium on electronics and the environment, pp. 225-231, 1999.

[CHARON et al. 96] CHARON I., GERMA A., HUDRY O., Méthodes d'optimisation combinatoires, Ed. Masson, Paris, 1996.

[CHARTER et al. 99] CHARTER M., BELMANE I., Integrated Product Policy (IPP) and eco-product development (EDP), The Journal of Sustainable Product Design, vol. 10, pp. 17-29, 1999.

[COPPENS 99] COPPENS C., Méthode de conception en vue d'optimiser la valorisation des Véhicules Hors d'Usage. Thèse de Doctorat de l'ENSAM, Paris, 1999

[COULTER 98] COULTER S.; BRAS B.; et al Designing for material separation: lessons from automotive recycling Trans ASME Jnl Mechanical Design, Sep 1998, 120(3), pp. 501-509.

[CYCLERGIE 94] CYCLERGIE, Elimination avec valorisation d'énergie des Résidus de Broyage (RB) par leur incinération dans un four oscillant et en présence d'ordures ménagères, 19/10/94, Rapport Final, 33p.

[DAVID 99] DAVID B., SAIKALI K., BOUTROS N., Conception orientée recyclage des produits manufacturiers, 3rd International Industrial Engineering Conference, Integration of Human Resources and Technologies : the Challenge, Montréal, Québec, mai 99; pp. 777-786.

[DE FERAUDY 00] DE FERAUDY H., Recycler les plastiques des résidus de broyages, Véhicules hors d'usage et directive européenne, journée technique de l'ADEME, Paris, novembre 2000.

[DELEAGE 92] DELEAGE J.P., Histoire de l'écologie, Dunod, 1992.

[DE WINTER et al. 94] DE WINTER A., KALS J.A.G., A methodic approach to the environmental effects of manufacturing, CIRP, 2nd International Seminar on Life Cycle Engineering RECY'94, Erlang, Allemagne, 1994.

[DINI 97] DINI G., FAILLI F., SANTOCHI M., A disassembly planning software system for the optimization of recycling processes, EAMRI Proceedings of the International Conference on Agile, Intelligent and Computer-Integrated Manufacturing Systems, October 7-9, Troy, N.Y, 1998.

[DINI 99] DINI G., FAILLI F., SANTOCHI M., Recycling of end-of-life goods though a proper selection of disassembly sequences International Conference on Solid Waste, ICSW 99, Rome, 7-9 April 1999, pp. 171-180.

[EBACH 97] EBACH H., DEMROP : Recycling analysis and design software, Brite Euram Project, Siemens AG, Munich, Allemagne, 1997.

[EHRENFELD et al. 97] EHRENFELD J., LENOX M.J., The development and implementation of DfE programmes, The journal of sustainable product design, vol. 1, pp. 17-27, 1997.

[ENGELBORGHS 96] ENGELBORGHS E., TOfal PROduct life-Cycle COst Estimation (TOPROCO), Intersymp'96, Baden Baden, Allemagne, 1996.

[ENGELBORGHS 97] ENGELBORGHS E., End-of-life costing in the TOPROCO project ,Proceedings of the European Conference on Integration in Manufacturing, IiM'97, Dresden, Germany, pp. 421-430, septembre 1997.

[EUCAR 96] EUCAR, Design For Recovery, EUCAR Draft 4, 27/06/96, 9p., 1996.

[FELDMANN et al. 95] FELDMANN K., MEEDT O., Recycling and Disassembly of Electronics Devices, The IFIP WG5.3 International Conference on Life Cycle Modelling for Innovative Products and Processes, Berlin, Allemagne, 1995.

[FORD 96] FORD, World-wide design requirements system : complete vehicle recycling. Environmental and Safety Engineering, 2p., September 1996.

[FOULARD 94] FOULARD C., la modélisation en entreprise, Edition Hermes, Paris, 1994.

[GAUCHERON 00] 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 de l'INPG, Grenoble, 2000.

[GROSRICHARD et al. 02] GROSRICHARD F., HOPQUIN B., Le casse-tête de l'élimination des farines animales, Le Monde, Paris, 27 mars 2002.

[GUPTA 97] Gupta SM, Isaacs J.A., Value analysis of disposal strategies for automobiles, Computers & Industrial Engineering, 1997, Vol 33, Iss 1-2, pp. 325-328.

[HARJULA 96] HARJULA T., RAPOZA B., KNIGHT W.A., BOOTHROYD G., Design for disassembly and the environment, annals of the CIRP, vol. 45/1/1996, pp. 109-114, 1996.

[HENNEBIQUE 00] HENNEBIQUE J., Évaluation du taux et du coût de valorisation d'un VHU, Rapport de stage, EISTI, Cergy, 2000.

[HENRIOUD 89] HENRIOUD J.M., Contribution à la conceptualisation de l'assemblage automatisé : nouvelle approche en vue de la détermination des processus d'assemblage, Thèse d'état, Université de Franche-Comté, 1989.

[HESSELBACH et al. 96] HESSELBACH J., KIM Y.J., Assessment of the Product and Process To Improve Disassembly and Recyclability for Design for Environment (DFE), Care Innovation'96 Proceedings, pp. 116-121, Francfort Allemagne, 1996.

[IEEE 98] IEEE, Application and management of the systems engineering process, Norme américaine IEEE 1220, 1998.

[ISA 99] Démarche d'ingénierie système automobile, CA 17314, décembre 1999, document interne PSA.

[ISAC 96] Indicateur de Conception ISAC, PSA Peugeot Citroën, Renault, GT PSA Peugeot Citroën - Renault, 1p., Juin 1996.

[ISHII 94] ISHII K., Life Cycle Engineering Design, Department of Mechanical Engineering Report, Stanford University, Santford, USA, 1994.

[ISO 02] ISO 22628, Véhicules routiers – Recyclabilité et valorisabilité – Méthode de calcul, Norme ISO, Première édition, 8p. ,15/02/02.

[ISO 93] ISO, Plastiques ; Identification générique et marquage des produits plastiques, Norme ISO, Première édition, 2p., 15/06/93.

[JACQUESON 02] JACQUESON L., Intégration de l'environnement en entreprise : Proposition d'un outil de pilotage du processus de création de connaissances environnementales, Thèse de Doctorat de l'ENSAM, Paris, 2002.

[JANIN 00] JANIN M., Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus, Thèse de doctorat de l'ENSAM, Chambéry, 2000.

[JOCE 00] Directive 2000/53/CE du Parlement Européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage, Journal Officiel des Communautés Européennes, 21 octobre 2000.

[JORF 75] Loi 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, Journal Officiel de la République Française, juillet 1975.

[KALISTVAART 96] KALISTVAART S.H., VAN DEN BROEK J.A., Design for bulk recyclingDFM-Machine & tool design, June 1996.

[KHALIFA 98] KHALIFA K., La prise en compte de l'environnement dans l'industrie, Instantanés techniques, 09/1998, pp. 37-44.

[KRIWET et al. 95] KRIWET A., ZUSSMAN E., SELIGER G., Systematic integration of design for recycling into product design, international journal of production economics, n°38, pp. 15-22, 1995.

[KROLL 98] Kroll E., Quantitative evaluation of product disassembly for recycling, Research in engineering design – Theory, application, and concurrent engineering, vol. 10, n°1, pp. 1-14, 1998.

[LAMBERT 97] LAMBERT A.J.D., Optimal disassembly of complex products, International Journal of Production Research, vol. 35, n° 9, pp : 2509-2523, 1997.

[LANGE 95] LANGE W., Method to Calculate Percent Recyclable., SAE Technical Paper 950205, 1995.

[LEHMANN et al. 00] LEHMANN O., DEVEVEY R., Création et mise au point d'un système d'élaboration et de sélection de gammes de désassemblage. Rapport de PFE ENSMM, Besançon, 2000.

[LOTZ 99] LOTZ M., Volkswagen approach to the recycling of End of Life Vehicles, Volkswagen conference, R'99, Genève, 04/02/99.

[MAEDER 98] MAEDER G., les polymères pour les fonctions mécaniques et les thermoplastiques dans l'automobile, colloque JEMA, Le Havre, France, février 1998.

[MEDINA 01] MEDINA H.V., Les nouveaux matériaux : l'innovation comme enjeu stratégique pour les constructeurs automobile : le cas de Renault, Actes du GERPISA n°32, décembre 2001.

[MIDLER 93] MIDLER C., L'auto qui n'existait pas : management des projets et transformation de l'entreprise, InterEditions, Paris, 1993.

[MILLET 95] MILLET D., Prise en compte de l'environnement en conception : proposition d'une démarche d'aide à la conception permettant de limiter les ponctions et rejets engendrés par le produit sur son cycle de vie, Thèse de doctorat de l'ENSAM, Paris, 1995.

[MINTZBERG et al. 92] MINTZBERG H., WESTLEY F., Cycles of Organizational Change, Strategies Management Journal, Vol. 13, pp. 39-59, 1992.

[MUCCHIELLI 94] MUCCHIELLI A., Les méthodes qualitatives, Que sais-je ?, PUF, Paris, 1994.

[NAVIN CHANDRA 93] NAVIN CHANDRA D., PRINZ F., Product Design For Recyclability : A Cost Benefit Analysis Model and its Application, 0-7803-0829-8/93\$03.00, IEEE, 1993, p 178 à 183.

[NONAKA 88] NONAKA I., Toward Middle-up-down management : Accelerating information creation, Sloan Management Review Vol. 29, n°3, p 9-18, spring 1988.

[PAHL et BEITZ 96] Pahl G., Beitz, W., Engineering Design: A Systematic Approach, Springer Verlag, London, 1996.

[PISTER 01] PISTER S., Démontage / démantèlement de V.H.U. et Etude d'une cellule de démontage type, mémoire de DEA, Laboratoire d'Automatique de Besançon, UFR des Sciences et Techniques de l'université de Franche-comté, Besançon, 2001.

[PRINS 94] PRINS C., Algorithmes et graphes, Ed. Eyrolles, Paris, 1994.

[PROBST et al. 1992] PROBST G., BRUGGIMANN O., MERCIER J-Y, RAKOTOBARISSON A., Gérer le changement organisationnel, Les Editions d'Organisation, Paris, 1992.

[PSA 01] PSA PEUGEOT CITROËN, Environnement & automobile, Rapport 2001, juin 2001.

[PSA 99] PSA Peugeot Citroën, Environnement & automobile, Rapport 1999, novembre 1999.

[PSA 94] PSA PEUGEOT CITROËN, Conception en vue du recyclage, norme interne (rédigée en commun avec Renault), B 20 0200, 1994.

[RECAP 1997] ENICHEM, FIAT, PSA, RECAP EU 506, POLYURETHANE Working Group, Final Report, 15p., 20/03/97.

[RENAULT 94] RENAULT, Conception en vue du recyclage, norme interne (rédigée en commun avec PSA), 00-10-0-060, 1994.

[ROY 02] ROY. J.B., Intégration de méthodes et d'outils pour la prise en compte du recyclage dans les systèmes d'informations, mémoire de DEA, Laboratoire CPNI, ENSAM, Paris, 2002.

[ROY 85] ROY B., Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Ed. Economica, Paris, 1985.

[SETAC 93] SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), Guidelines for Life Cycle Assessment : a code of practice, SETAC Workshop Sesimbra, 1993.

[SCHUMACHER 78] SCHUMACHER E., Small is beautiful : une société à la mesure de l'homme, Seuil / contretemps, Paris, 1978.

[SODHI 98] SODHI M., KNIGHT W.A., Product design for disassembly and bulk recycling, Annals of the CIRP, Vol. 47/1/1998, pp. 115-118, 1998.

[SPATH 95] SPATH D., HARTEL M., TRITSCH C., Life cycle assessment tools to support environmental product design and economical disassembly of technical consumer products International Conference on Engineering Design, ICED 95, Praha, August 95, pp. 1066-1072, 1995

[SPATH 96] SPATH D., TRITSCH C., Information management to support economical disassembly of technical products, Life Cycle Modeling for Innovative Products and Processes, Chapman & Hall, pp. 246-255, 1996.

[TONNELIER 97] TONNELIER P., Etude d'une installation de tri des matériaux chlorés présents dans les résidus de broyage, Rapport de stage, université de Metz, 1997.

[TRAVE-MASSUYES et al. 97] TRAVE-MASSUYES L., DAGUE P., GUERRIN F., Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur. Hermès, Paris, 1997.

[VALCOR 97] GPI VALCOR, Synthèse Technique (Décembre 1993 à Décembre 1997), 31/12/97, Convention MI SERIBE n 94 2 90 0062, 14p., 1997.

[VENTERE 95] VENTERE P.B., La qualité écologique des produits, AFNOR, 1995.

[WANG 94] WANG M., JOHNSON M., Design for disassembly and recyclability : a concurrent engineering approach, The 10th ISPE/IFAC International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, pp. 436-441, 1994.

[WESTKAMPER 99] WESTKÄMPER E., FELDMANN K., REINHART G., SELIGER G., Integrated development of assembly and disassembly, CIRP Annals 1999, vol. 48, n°2, pp. 557-565, 1999.

[ZHANG 97a] ZHANG H.C., YU S.Y., Environmentally conscious evaluation / design support tool for personal computers, IEEE International Symposium on Electronic & the environment, p. 131-136, 1997.

[ZHANG 97b] ZHANG H.C., KUO T.C., A Graph-Based Disassembly Sequence Planning for EOL Product Recycling, Proceedings of 1997 IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology, Austin, TX, October 1997.

[ZUMBROICH 94] ZUMBROICH P., KIEFER B., Design For Recycling. Opel, Vauxhall, GM (Technical Development Center), First edition, 6p., 1994.

[ZUSSMAN 94] ZUSSMAN E., KRIWET A., SELIGER G., Disassembly-oriented assessment methodology to support design for recycling, Annals of the CIRP, vol. 43, issue 1, pp. 9-14, 1994.

[ZUSSMAN 99] ZUSSMAN E., ZHOU M.C., A methodology for modeling and adaptative planning of disassembly processes, IEEE transactions on Robotics and Automation, vol. 15, n°1, pp. 190-194, 1999.

Table des illustrations

Figure 1 : Cycle de vie d'un produit et ses modes de valorisation.....	16
Tableau 1 : Actions environnementales communes et spécifiques des constructeurs automobiles	19
Tableau 2 : Principaux objectifs de la Directive Européenne sur les VHU	24
Figure 2 : Schéma de traitement d'un véhicule hors d'usage	26
Figure 3 : Page de garde du site de préconisations PrécoRec	37
Figure 4 : Exemple du graphe de liaisons d'un panneau de porte.....	39
Figure 5 : Exemple de graphe de décomposition d'une console centrale	39
Équation 1 : Calcul du taux de matière valorisée.....	40
Équation 2 : Calcul de la rentabilité.....	40
Figure 6 : Évolution de la réglementation et actions engagées par PSA Peugeot Citroën	42
Équation 3 : Formule du calcul de l'ERI	46
Tableau 3 : Exemples de logiciels permettant une analyse de la recyclabilité en termes de coûts	48
Figure 7 : Démarche d'évaluation de l'aspect économique de la valorisation.....	49
Figure 8 : Évolution de la réglementation sur les émissions automobiles en Europe	50
Figure 9 : La plate-forme	57
Figure 10 : Organigramme d'un projet	59
Figure 11 : Cycle en V	61
Figure 12 : Les processus d'ingénierie	62
Figure 13 : Exemples de représentation de processus métier.....	63
Figure 14 : Schéma Opérationnel de Développement.....	65
Figure 15 : Périmètre couvert par le LCDV	69
Figure 16 : Problématique.....	80
Figure 17 : Protocole expérimental.....	85
Figure 18 : Différents types d'évaluations	90
Figure 19 : Construction d'un bilan AVV	91
Figure 20 : Forme schématique d'un bilan AVV	93
Tableau 4 : Familles de matériaux	95
Tableau 5 : Taux de recyclage par matière	96
Figure 21 : Répartition en masse de chaque ZTC	96
Tableau 6 : Répartition des matériaux par ZTC.....	97
Tableau 7 : Taux de valorisation par ZTC	97
Figure 22 : Comparatif en les ZTC	98
Figure 23 : Courbes de tendances	98
Figure 24 : Méthode de répartition des objectifs de valorisation.....	100
Figure 25 : Répartition des taux de valorisation prévisionnels par ZTC.....	102
Figure 26 : Démarche d'analyse du bilan prévisionnel.....	102
Figure 27 : Feuille de synthèse	105
Figure 28 : Feuille de synthèse d'un bilan AVV.....	107
Tableau 8 : Trame d'un tableau de bord Recyclage.....	108
Tableau 9 : Liste des fonctions cibles	111
Tableau 10 : Gamme de démontage de la façade arrière d'une Peugeot 206.....	113
Figure 29 : Graphe de démontage de la façade arrière d'une Peugeot 206 pour le scénario 0.....	115
Figure 30 : Graphique de coût et de masse valorisable de l'habillage latérale d'un Ford Focus	116
Figure 31 : Taux de valorisation par fonction et par véhicule	117
Figure 32 : Coût de traitement par fonction et par véhicule.....	117
Tableau 11 : Ratio de la masse démontée par rapport à la masse totale du véhicule	118
Figure 33 : Comparatif des fonctions de la Peugeot 206	119
Figure 34 : AVF de la porte arrière d'une Peugeot 206.....	120
Figure 35 : AVF de l'habillage intérieur latéral d'une Peugeot 206.....	121
Tableau 12 : Comparaison des pare chocs des trois véhicules.....	122
Tableau 13 : Exemples de préconisations de conception.....	124
Figure 36 : Données d'entrée et résultats attendus.....	129
Figure 37 : AVF et zones de démontage.....	130
Figure 38 : Définition de l'atelier en 2D.....	131

Figure 39 : Combinatoires de l'étude.....	133
Tableau 14 : Matrice des coûts pour les enchaînements d'AVF	133
Tableau 15 : Ratio temps de démontage / temps logistiques	135
Figure 40 : Architecture du questionnaire.....	140
Figure 41 : Extrait du questionnaire matériaux.....	141
Figure 42 : Extrait du questionnaire extraction.....	141
Figure 43 : Arborescence principale	142
Figure 44 : Modélisation du pare-chocs avant de la Citroën Xsara Picasso	142
Figure 45 : Présentation des résultats.....	144
Figure 46 : Evaluation de différentes conceptions de la fonction pare-chocs de la Citroën Xsara Picasso	145
Figure 47 : Structure fonctionnelle du logiciel AVE	147
Tableau 16 : Risques liés aux évolutions du produit et du process de valorisation	152
Figure 48 : Choix du scénario d'évolution interne au regard des risques identifiés	154
Figure 49 : Processus du scénario I.....	159
Tableau 17 : Etapes du processus du scénario I.....	159
Figure 50 : Positionnement des actions du processus du scénario I sur le SOD	160
Figure 51 : Circuit d'informations entre les acteurs du scénario I	161
Figure 52 : Système d'information liés au scénario I	164
Figure 53 : Processus du scénario II	167
Tableau 18 : Etapes du processus du scénario II.....	168
Figure 54 : Positionnement des actions du processus du scénario II sur le SOD.....	168
Figure 55 : Circuit d'informations entre les acteurs du scénario II.....	170
Figure 56 : Système d'information liés au scénario II.....	173
Figure 57 : Processus du scénario III.....	176
Tableau 19 : Etapes du processus du scénario III	177
Figure 58 : Positionnement des actions du processus du scénario III sur le SOD	177
Figure 59 : Circuit d'information entre les acteurs du scénario III.....	179
Figure 60 : Systèmes d'information liés au scénario III	182
Figure 61 : Processus du scénario IV.....	184
Tableau 20 : Etapes du processus du scénario IV	185
Figure 62 : Positionnement des actions du processus du scénario IV sur le SOD	186
Figure 63 : Circuit d'informations entre les acteurs du scénario IV	189
Figure 64: Systèmes d'information liés au scénario IV	192
Figure 65 : Mise en place possible des SEI	194
Tableau 21 : Coût de mise en œuvre des scénarios.....	196
Figure 66 : Démarche d'intégration d'une nouvelle contrainte dans l'entreprise	202

RESUME :

Au regard des nouvelles réglementations européennes sur les véhicules hors d'usage, PSA PEUGEOT CITROËN a souhaité développer une démarche d'intégration de cette contrainte en conception. L'analyse du contexte automobile (processus de conception et notion de valorisation des véhicules en fin de vie) nous a conduit à élaborer des outils d'investigation (outils d'évaluation et de modélisation) permettant d'améliorer nos connaissances de la valorisation d'un véhicule et de la prise en compte de ce paramètre dans le processus de conception. Nous avons par ailleurs élaboré des scénarios d'évolution interne (processus, acteurs, méthodes et outils) satisfaisant à différents scénarios d'évolution externe (évolutions réglementaires et techniques). Cela nous amène à préconiser une démarche d'intégration permettant, à partir d'une orientation politique de l'entreprise, de définir une stratégie d'intégration reposant sur un modèle d'organisation exhaustif et des outils acceptés et validés.

ABSTRACT :

In comparison with the new European regulations on the end of life vehicles, PSA PEUGEOT CITROËN wished to develop an integration method for this constraint in design process. The analysis of the automobile context (process of design and concept of recovery of the vehicles at the end of the lifetime) led us to work out investigation tools (evaluation and modelling tools) allowing improving our knowledge of recovery of a vehicle and taking into account of this parameter in the design process. We in addition worked out scenarios of internal evolution (process, actors, methods and tools) satisfying various scenarios of external evolution (regulations and technical evolutions). That leads us to recommend an integration model allowing, starting from a policy guideline of the company, to define a strategy of integration resting on an exhaustive model of organization and accepted and validated tools.

MOTS CLEFS :

Automobile – Conception – Intégration - Valorisation – Recyclage - Environnement