



HAL
open science

Contribution à une démarche de conception optimisée des processus de désassemblage

Sid-Ali Addouche

► **To cite this version:**

Sid-Ali Addouche. Contribution à une démarche de conception optimisée des processus de désassemblage. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2003. Français. NNT: . tel-00006870

HAL Id: tel-00006870

<https://theses.hal.science/tel-00006870>

Submitted on 12 Sep 2004

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.

Année : **2003**

N° ordre : **1002**

THESE

présentée à

**L'UFR des Sciences et Techniques
de l'Université de Franche-Comté**

pour obtenir le

**GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE
DE FRANCHE-COMTE**

en Automatique et Informatique

(Ecole Doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques)

**Contribution à une démarche de conception optimisée des
processus de désassemblage**

par

Sid-ali ADDOUCHE

Soutenue le **16 décembre 2003** devant la Commission d'examen :

Rapporteurs :	A. DELCHAMBRE	Professeur, ULB Belgique
	A. DOLGUI	Professeur, Ecole des Mines de Saint Etienne
Examineurs :	A. BOURJAULT	Professeur, Université de Franche-Comté
	S. KOELEMIEJER	Dr. 1er assistant, EPFL, IPR, LPM, Lausanne
	P. TONNELIER	Dr. ENSAM, Cadre PSA Peugeot-Citroën
Directeur de thèse :	J.M. HENRIOUD	Professeur, Université de Franche-Comté
Co-encadrant :	C. PERRARD	Maître de Conférences, Université de Franche-Comté

A mes Parents qui n'ont cessé de
me rappeler qu'on ne peut se fier
à la richesse quelle qu'elle soit.
Seule l'instruction fait exception.

REMERCIEMENTS



Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB, UMR CNRS 6596) au sein de l'équipe Conception Intégrée. Plusieurs personnes ont contribué à le rendre possible, lesquels je tiens à remercier.

La première personne est mon directeur de thèse Jean-Michel HENRIOUD, Professeur à l'Université de Franche-Comté qui, sereinement, m'a orienté, interpellé, recadré, conseillé et corrigé durant ce projet de longue haleine. Sa rigueur sur la qualité de mes résultats de recherche a été capital dans l'atteinte des mes objectifs de thèse.

Je remercie aussi mon co-directeur de thèse, Christophe PERRARD, Maître de Conférences à l'Université de Franche-Comté, pour son implication dans mon travail de thèse qui ma servi à plus d'un titre. Sa totale disponibilité, son suivi permanent et ses critiques fondées et objectives m'ont permis d'avancer correctement dans ma thèse.

Je ne peux oublier Alain BOURJAULT, Professeur à l'Université de Franche-Comté et Directeur du LAB qui a permis des conditions de travail au sein du laboratoire que beaucoup de chercheurs nous envies.

Je tiens à remercier mes rapporteurs de thèse, Alain DELCHAMBRE, Professeur, ULB Belgique, et Alexandre DOLGUI, Professeur, Ecole des Mines de Saint Etienne, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'étudier mon travail et pour avoir apporter leurs conseils afin de le rendre meilleurs. Leurs interventions ont été, en effet, plus que constructives et m'ont orienter vers des perspectives de recherche encore plus intéressantes.

Je remercie Pierre TONNELIER, Docteur ENSAM et Cadre chez PSA Peugeot-Citroën, d'avoir accepter d'examiner mon travail et donner, de ce fait, du crédit au plan industriel par sa collaboration avec le LAB sur ma thématique de recherche.

Je remercie aussi S. KOELEMIEJER pour l'intérêt qu'elle a porté pour ma thématique de recherche et l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'examiner mon travail.

Je suis aussi redevable à mes amis docteurs et doctorants du LAB qui ont instaurer un environnement d'entraide et de soutien tant au plan scientifique qu'au plan humain au LAB.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

ABREVIATIONS

INDEX DES NOTATIONS

CHAPITRE 1 : LE RECYCLAGE ET LA VALORISATION FIN DE VIE.....	1
1.1 INTRODUCTION	1
1.2 LE GESTION ENVIRONNEMENTALE	2
1.2.1 Certification environnementale.....	2
1.2.2 Les normes ISO 14000.....	3
1.3 LA FABRICATION ECO–SENSIBILISEE (FES)	4
1.3.1 Le cycle de vie du produit	4
1.3.2 La conception éco-sensibilisée (CES)	7
1.3.2.1 Analyse du cycle de vie (LCA)	8
1.3.2.2 Conception pour l’environnement (DFE).....	10
1.3.3 La production éco-sensibilisée.....	11
1.4 LA VALORISATION DES PRODUITS ET DES MATIERES	11
1.4.1 Enjeux	12
1.4.2 Filières de valorisation	13
1.4.2.1 Le verre	13
1.4.2.2 Les plastiques	14
1.4.2.3 L’acier	15
1.4.2.4 L’aluminium.....	16
1.4.3 Valorisation des VHU.....	16
1.4.4 Stratégies de valorisation.....	22
1.4.4.1 Réparation	22
1.4.4.2 Valorisation constitutive.....	22
1.4.4.3 Valorisation matière	22
1.4.4.4 Valorisation énergétique.....	23
1.5 CONCLUSION	23
CHAPITRE 2 : ANALYSE DES SYSTEMES DE DESASSEMBLAGE.....	24
2.1 INTRODUCTION	24
2.2 CONTEXTE ACTUEL DU DESASSEMBLAGE	24
2.2.1 Qu’est ce que le désassemblage ?.....	24
2.2.2 Pourquoi le désassemblage ?.....	25
2.2.3 Assemblage/désassemblage : comparaison	25
2.3 VISION SYSTEMIQUE DU DESASSEMBLAGE.....	26
2.3.1 Définitions.....	26
2.3.2 Degré d’automatisation	28
2.3.3 Automatisation : de l’assemblage au désassemblage	29
2.3.3.1 Systèmes manuels.....	29
2.3.3.2 Systèmes semi-automatisés.....	30
2.3.3.3 Systèmes automatisés	31
2.3.3.4 Systèmes de désassemblage actuels.....	34
2.3.4 Organisation d’un atelier de désassemblage.....	40
2.3.4.1 Organisation hiérarchisée d’un système de désassemblage	40
2.3.4.2 Organisation fonctionnelle d’un système de désassemblage	42
2.3.5 Critères de classification du désassemblage.....	43
2.3.5.1 Désassemblage total, sélectif ou ciblé	44
2.3.5.2 Désassemblage destructif	45
2.3.5.3 Désassemblage linéaire et désassemblage parallèle.....	46
2.3.5.4 Désassemblage monotone	47
2.3.6 La flexibilité d’un système de désassemblage.....	48
2.4 CONCLUSION	52

CHAPITRE 3 : CONCEPTION DES SYSTEMES DE DESASSEMBLAGE ETAT DE L'ART	53
3.1 INTRODUCTION	53
3.2 GENERATION DES GAMMES DE DESASSEMBLAGE	53
3.2.1 <i>Les gammes de désassemblage</i>	54
3.2.2 <i>État de l'art</i>	54
3.2.3 <i>Bilan</i>	66
3.3 ÉVALUATION DES PROCESSUS DE DESASSEMBLAGE	66
3.3.1 <i>État de l'art</i>	66
3.3.2 <i>Bilan</i>	75
3.4 PILOTAGE DES SYSTEMES D'ASSEMBLAGE	75
3.4.1 <i>Notions de pilotage</i>	75
3.4.2 <i>État de l'art</i>	76
3.4.3 <i>Bilan</i>	80
3.5 CONCLUSION	80
CHAPITRE 4 : DEMARCHE ORGANISEE DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE DESASSEMBLAGE POUR LA VALORISATION DES VHU (CYD-VHU).....	82
4.1 INTRODUCTION	82
4.2 ANALYSE ET CHOIX DE CONCEPTION (<i>ETAPES 2 ET 3</i>)	84
4.2.1 <i>Au niveau du produit</i>	84
4.2.1.1 Rappel du modèle opératoire de J.-M. HENRIOUD	85
4.2.1.2 Liaisons morphologiques et de contact	87
4.2.1.3 La monotonie du désassemblage dans les liaisons morphologiques	88
4.2.1.4 Classification des désolidarisations	89
4.2.1.5 Caractères complémentaires	93
4.2.1.6 Irréversibilité de certains caractères de désolidarisation et complémentaires	94
4.2.2 <i>Au niveau du système</i>	95
4.2.2.1 Temps de reconfiguration et de déploiement des opérateurs	96
4.2.2.2 La charge opératoire des opérateurs de désassemblage	96
4.2.2.3 Capabilité opératoire des stations	97
4.2.2.4 Détermination des ressources humaines et matérielles	97
4.2.3 <i>Au niveau du contexte</i>	98
4.2.3.1 Analyse de la valorisation	98
4.2.3.2 Pièces spéciales et substances dangereuses	100
4.2.3.3 La demande en pièces et en matières	100
4.2.3.4 Politique de sous-traitance	100
4.2.3.5 Coûts des équipements et Rémunération des opérateurs	100
4.2.4 <i>Conclusion</i>	101
4.3 MODELISATION DU SYSTEME DE DESASSEMBLAGE – NIVEAU 1 (<i>ETAPES 4 ET 5</i>)	101
4.3.1 <i>Modélisation du produit</i>	102
4.3.1.1 Les fractions cibles	102
4.3.1.2 Les liaisons	103
4.3.1.3 Les solidarités	103
4.3.1.4 Les caractères complémentaires	104
4.3.1.5 Les caractères de valorisation	104
4.3.2 <i>Elaboration des gammes de désassemblage</i>	109
4.3.2.1 Définition d'une stratégie de désassemblage	109
4.3.2.2 Modélisation des gammes de désassemblage	110
4.3.2.3 Gammes totales ou partielles	112
4.3.3 <i>Propagation des descripteurs de valorisation</i>	112
4.3.3.1 Notations	112
4.3.3.2 Descripteur de destination fin de vie	112
4.3.3.3 Descripteur de masse	113
4.3.3.4 Descripteur de taux de valorisation	113
4.3.3.5 Descripteur d'indicateur de revenu	114
4.3.3.6 Descripteur de matière	114
4.3.4 <i>Modélisation des Processus de Désassemblage</i>	115
4.3.4.1 Intégration des temps opératoires	115
4.3.4.2 Intégration des données système	115
4.3.4.3 Intégration des données contextuelles	116
4.4 CONCLUSION	117

CHAPITRE 5 : OPTIMISATION DU DESASSEMBLAGE SOUS PROGRAMMATION LINEAIRE ET EXTENSION DE LA DEMARCHE CYD-VHU 118

5.1 INTRODUCTION	118
5.2 STRATEGIE D'OPTIMISATION – NIVEAU 2 (ETAPE 6 ET 7)	118
5.2.1 <i>Optimisation et Fonction Objectif</i>	120
5.2.2 <i>Contraintes Produit</i>	121
5.2.2.1 Contrainte d'antériorité (CAN)	121
5.2.2.2 Contrainte d'exclusion (CEX)	122
5.2.3 <i>Contraintes Système</i>	123
5.2.3.1 Contraintes d'affectation opératoire (CAF).....	123
5.2.3.2 Contrainte d'horizon (CHO).....	126
5.2.3.3 Contraintes précédence (CPR).....	129
5.2.3.4 Contraintes de disjonction (CDJ)	131
5.2.4 <i>Contraintes contextuelles</i>	132
5.2.4.1 Contrainte de poursuite (CPS).....	133
5.2.4.2 Contrainte de sous-assemblage imposé (CSI).....	134
5.2.4.3 Contrainte d'évacuation (CEV).....	135
5.2.4.4 Contrainte de désassemblage total (CDT).....	135
5.2.4.5 Contrainte de valorisation (CVA).....	136
5.2.4.6 Contrainte de suspension (CSS).....	138
5.2.4.7 Contrainte de suspension partielle (CSP).....	138
5.2.4.8 Contrainte de disponibilité–opérateurs (CDO).....	139
5.2.5 <i>Fonction objectif et Sélection du processus de désassemblage optimal</i>	140
5.3 REGLES DE PILOTAGE DU SYSTEME DE DESASSEMBLAGE EN MODE INCERTAIN.....	142
5.3.1 <i>De quelle incertitude s'agit-il ?</i>	142
5.3.2 <i>Démarche préventive et corrective</i>	142
5.3.3 <i>Règles de pilotage dans une démarche préventive</i>	143
5.3.3.1 Démarche préventive – constituant dégradé	144
5.3.3.2 Démarche préventive – opération difficile	144
5.3.4 <i>Règles de pilotage dans une démarche corrective</i>	145
5.3.4.1 Démarche corrective – opération échouée & constituant dégradé.....	145
5.3.4.2 Démarche corrective – opération échouée sans alternative & constituant non-dégradé.....	145
5.3.4.3 Démarche corrective – opération échouée avec alternative & constituant non-dégradé.....	146
5.4 CAS DU DESASSEMBLAGE MULTI-PRODUITS (EXTENSION)	146
5.4.1 <i>Reformulation du modèle pour le Désassemblage Multi-Produits (DMP)</i>	147
5.4.2 <i>Génération des contraintes de niveau 2 pour le DMP</i>	148
5.4.2.1 Contrainte d'antériorité pour DMP (CANx).....	148
5.4.2.2 Contrainte d'exclusion pour DMP (CEXx)	150
5.4.2.3 Contraintes système pour le DMP	150
5.4.2.4 Contrainte de poursuite pour DMP (CPSx).....	151
5.4.2.5 Contrainte de sous-assemblage imposé (CSIx).....	151
5.4.2.6 Contrainte d'évacuation pour le DMP (CEVx)	151
5.4.2.7 Contrainte de désassemblage total pour le DMP (CDTx).....	152
5.4.2.8 Contrainte de valorisation pour le DMP (CVAx).....	152
5.4.3 <i>La fonction objectif pour le DMP</i>	152
5.5 CONCLUSION	155

CONCLUSION GENERALE
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
LEXIQUE
ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : La stratégie de FDV, une partie intégrante dans le ME	4
Figure 1.2 : Cycle de vie des produits blancs [61].....	5
Figure 1.3 : Interactions des activités dans le cycle de vie d'un produit [23].....	5
Figure 1.4 : Cycle de vie des matériaux et des produits [10].....	6
Figure 1.5 : Flux polymorphes dans un cycle de vie d'un produit	6
Figure 1.6 : Modèle de flux de biens dans la reprise de ressources (Resource Recovery)	7
Figure 1.7 : Organisation Systémique de l'Inventaire du Cycle de Vie [58].....	9
Figure 1.8 : Relation entre le Cycle de Vie et le LCA–Scoping [72]	9
Figure 1.9 : Evolution de la collecte du verre de 1985 à 1996 en France.....	14
Figure 1.10 : Cycle de vie automobile.....	17
Figure 1.11 : Processus de traitement des VHU [60]	17
Figure 1.12 : Principaux éléments de dépollution des véhicules hors d'usage	19
Figure 1.13 : (a) et (b) Bacs étanches pour huiles, batteries, ... ; (c) Intervention sur un véhicule hors d'usage lors de la dépollution.....	20
Figure 1.14 : Vidage d'un réservoir GPL	20
Figure 2.1 : Représentation systémique du désassemblage	27
Figure 2.2 : Niveau de désassemblage : un compromis entre le taux de valorisation et les coûts de désassemblage	28
Figure 2.3 : Evolution du degré d'automatisation [60].....	29
Figure 2.4 : Poste d'assemblage manuel pour rasoirs électriques	30
Figure 2.5 : Machine semi-automatisée avec un dispositif de transfert pour le montage des culasses chez KLOTZ®	31
Figure 2.6 : Unité d'assemblage automatisée avec transfert libre et une alimentation dédiée, chez KLOTZ®	32
Figure 2.7 : Lignes d'assemblage (Ilots robotisés, soudure SR/MAG) pour unité arrière T16 (Peugeot® Cabriolet 206).....	33
Figure 2.8 : Cellule de désassemblage automatique d'écrans de visualisation (TV/moniteurs).....	35
Figure 2.9 : Poste de démontage automatique de roues automobiles	36
Figure 2.10 : Recherches sur la préhension et les situations de blocage en désassemblage. Dép. de Robotique et de Théorie des Systèmes de Contrôle, Darmstadt Allemagne	37
Figure 2.11 : Implantation d'une cellule de désassemblage à Darmstadt.....	37
Figure 2.12 : Système de désassemblage flexible hybride (manuel/robotisé)	38
Figure 2.13 : Opérations destructives pour le désassemblage d'une machine à laver	38
Figure 2.14 : Système de dessoudage des circuits électroniques.....	39
Figure 2.15 : Organisation hiérarchisée d'un système de production.....	40
Figure 2.16 : Organisation fonctionnelle du système de désassemblage.....	42
Figure 2.17 : Classification opératoire du désassemblage.....	43
Figure 2.18 : Démontage d'un Concorde en vue de sa maintenance	44
Figure 2.19 : Désassemblage d'une pack-batterie dans une cellule de désassemblage formée d'un unique robot à six axes.....	46
Figure 2.20 : Désassemblage linéaire ou parallèle	47
Figure 2.21 : Désassemblage non-monotone.....	47
Figure 2.22 : Analyse de la flexibilité en désassemblage	50
Figure 3.1 : Élaboration de gammes d'assemblage selon J.-M. Henrioud.....	55
Figure 3.2 : Exemple X pour l'étude de la méthode de Y.Q. Lee	56
Figure 3.3 : Bipartition du graphe des liaisons selon L. Laperrière.....	58
Figure 3.4 : Problème d'accessibilité typique en assemblage/désassemblage.....	59
Figure 3.5 : Graphe des liaisons et graphe des adjacences selon D. Dutta	60
Figure 3.6 : Exemple de graphe des contacts selon S. Chen.....	61
Figure 3.7 : Exemple de modèle composant–liaison de P. Borst.....	62
Figure 3.8 : Exemple de matrice de précedence selon K. Moore	64
Figure 3.9 : Diagramme de séquences - REX.....	64
Figure 3.10 : Etablissement des contraintes de précedence par simulation de déplacement sur ROBCAD.....	65
Figure 3.11 : Modèle de désassemblage selon H. C. Zhang	67
Figure 3.12 : Planification du désassemblage selon M. Johnson et M. Wang	68
Figure 3.13 : Modification d'une gamme en exécution selon A. Gungor	68
Figure 3.14 : Flux de matières et d'informations du système adaptatif de désassemblage selon A. Zussman.....	70

Figure 3.15 : Etude de désassemblage d'un poste de radio et simulation dans une cellule prototype de désassemblage.....	71
Figure 3.16 : Exemple de deux bipartitions pour retirer un composant élémentaire selon T. Murayama	72
Figure 3.17 : Graphe d'état orienté de désassemblage utilisé par J.-G. Kang	73
Figure 3.18 : Exemple d'un produit (α), de son diagramme de liaisons (β) et de son graphe de désassemblage (γ)	74
Figure 3.19 : Structure d'un système de pilotage de production selon B. Yin	76
Figure 3.20 : Un exemple de pilotage selon les trois modèles de C. Briand	78
Figure 3.21 : Les phases de pilotage d'un système de production selon C. Berchet	79
Figure 3.22 : Pilotage : une structure coordonnée et hiérarchisée selon C. Berchet.....	80
Figure 4.1 : Démarche générale de conception de systèmes de désassemblage pour la valorisation des VHU	83
Figure 4.2 : Phase d'analyse et de prise de choix en vue de la conception de systèmes de désassemblage	84
Figure 4.3 : Typologie des opérations de désassemblage [60]	86
Figure 4.4 : Exemple d'un graphe ET/OU de désassemblage	86
Figure 4.5 : Stabilité des liaisons.....	88
Figure 4.6 : Cas d'opérations non-monotones	89
Figure 4.7 : classification des solidarisation	90
Figure 4.8 : Exemple d'une solidarisation associée.....	90
Figure 4.9 : Exemple d'une solidarisation indépendante.....	90
Figure 4.10 : Exemple d'une solidarisation intégrée	91
Figure 4.11 : Exemple d'une solidarisation multiple associée	91
Figure 4.12 : Exemple d'une solidarisation multiple indépendante.....	92
Figure 4.13 : Décomposition d'une solidarisation multiple.....	93
Figure 4.14 : Exemple d'une solidarisation multiple intégrée.....	93
Figure 4.15 : Exemple d'intégration d'une opération complémentaire	94
Figure 4.16 : Analyse du système à modéliser	95
Figure 4.17 : Cellule de désassemblage modélisée.....	98
Figure 4.18 : Phase d'analyse et de choix en vue de la conception de systèmes de désassemblage.....	101
Figure 4.19 : Exemple d'un produit VHU pour la valorisation	107
Figure 4.20 : Stratégie de génération de gammes par les filtres	110
Figure 4.21 : Exemple d'un RPD regroupant deux gammes totales de désassemblage.....	111
Figure 4.22 : Représentation des propriétés du RPD mono-gamme	111
Figure 5.1 : Phase de définition et d'intégration de la stratégie d'optimisation en vue de la conception du système de désassemblage	119
Figure 5.2 : Sélection de la gamme optimale depuis le RPD2 d'un tableau de bord d'un VHU	119
Figure 5.3 : Exemple d'un RPD2 pour le calcul des revenus totaux des RPD1	121
Figure 5.4 : Exemple de cellule de désassemblage.....	125
Figure 5.5 : Réduction de l'espace de recherche par la contrainte d'horizon	127
Figure 5.6 : Déploiements possibles des trois opérateurs considérés	129
Figure 5.7 : Déploiements possibles des quatre opérateurs considérés	130
Figure 5.8 : Interprétation graphique des contraintes de précédence.....	131
Figure 5.9 : Notion de disjonction opératoire pour un opérateur.....	131
Figure 5.10 : Exemple du calcul du taux global de valorisation.....	137
Figure 5.11 : Stratégie d'optimisation par les contraintes	140
Figure 5.12 : Démarche préventive et corrective pour le pilotage du désassemblage en mode incertain.....	143
Figure 5.13 : Optimisation du processus de désassemblage pour le traitement d'un lot de trois produits.....	147
Figure 5.14 : Vue aérienne du parc VHU de R.A.S-Rouen	153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : La composition des Résidus de Broyage Automobile (RBA)	18
Tableau 1.2 : Principaux éléments de la directive européenne sur les VHU	21
Tableau 2.1 : Comparaison entre l'assemblage et le désassemblage	26
Tableau 2.2 : Besoins en flexibilité dans un système de désassemblage	51
Tableau 3.1 : Matrice d'interférence ITM de produit X	57
Tableau 3.2 : Table de balayage résiduelle du produit X	57
Tableau 4.1 : Descripteurs de valorisation et leurs attributs	106
Tableau 4.2 : Sous-ensembles des données du contexte	116
Tableau 5.1 : Contraintes et critères d'optimisation du désassemblage en mode de sous-charge et de surcharge	154

INTRODUCTION GENERALE

A l'heure où on parle de gestion environnementale, de responsabilité écologique sur le devenir des produits manufacturés en fin de vie, de certification environnementale, et enfin à l'heure où de nombreuses entreprises communiquent sur le respect de la nature, qu'en est-il réellement pour les techniques et processus de revalorisation de produits en fin de vie ? Ces derniers sont en train de devenir l'une des préoccupations importantes pour les industriels. Depuis quelques années en effet, de plus en plus de travaux de recherche sont menés en collaboration étroite avec des entreprises. Leur but est de concevoir des systèmes de démantèlement robustes et – si possible – rentables de produits manufacturés comme les véhicules hors d'usage et les produits blancs (réfrigérateurs, lave-linge, etc.). Il s'agit de systèmes de désassemblage complexes puisque ces derniers doivent prendre en compte la réglementation en vigueur en termes de valorisation et le nombre croissant de modèles et de variantes de ces produits en fin de vie. De plus, ces systèmes de désassemblage doivent avoir une flexibilité suffisante pour faire face aux incertitudes sur l'état des produits arrivés en fin de vie et aux fluctuations fréquentes du marché du recyclage. Car, ne l'oublions pas, la rentabilité des activités de recyclage et de valorisation des produits en fin de vie reste un argument incontournable pour intéresser les acteurs industriels en plus de l'argument législatif.

Après avoir été longtemps abordé dans le cadre des recherches sur la conception des systèmes flexibles d'assemblage, le désassemblage n'a été proprement traité avec ses spécificités de valorisation que depuis les années 90. De nombreux travaux dans ce domaine transposent au désassemblage les méthodes maintenant éprouvées de conception de systèmes d'assemblage. En particulier, les techniques de génération des gammes de désassemblage ont été profondément inspirées de celles développées pour l'assemblage. Le plus difficile reste la phase d'évaluation et de sélection des processus de désassemblage pour l'implantation des systèmes de désassemblage. C'est à ce problème que nous avons consacré une grande partie de notre contribution à la conception des processus de désassemblage. Il s'agit d'une démarche globale de conception de ces processus qui se décompose, de manière générique, en trois phases : une phase d'analyse et de choix de conception, une phase de génération de gammes de désassemblage et enfin une phase d'optimisation à l'issue de laquelle un processus de désassemblage optimal est proposé.

Le premier chapitre est une introduction au domaine du recyclage et de la valorisation en fin de vie. Bien qu'il ne comporte pas de méthodes ou de formalismes liés directement au désassemblage, ce chapitre traite d'une partie indissociable du problème de conception des systèmes de désassemblage pour la valorisation. Il s'agit de l'existant sur le plan de la gestion environnementale et de la fabrication éco-sensible. Deux domaines dont la connaissance approfondie préalable est nécessaire. Il sera aussi question, dans ce chapitre, des filières de recyclage et des notions de compatibilité entre les matières. Les choix de conception que nous prendrons dans notre contribution dépendront évidemment de ces notions de compatibilité.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'analyse du contexte actuel du désassemblage puis à la problématique du choix sur le degré d'automatisation et de l'organisation hiérarchique et fonctionnelle des systèmes de désassemblage. Cela permettra à la fin du chapitre d'aborder le problème des critères de classification du désassemblage et le problème de flexibilité dans un système de désassemblage. Une figure synoptique et un tableau présenteront une synthèse sur ce problème.

Au troisième chapitre, un état de l'art sera présenté sur les trois points fondateurs de notre démarche de conception des processus de désassemblage. Le premier point traite des techniques et méthodes de génération de gammes de désassemblage. Nous verrons qu'une partie d'entre elles est issue du savoir-faire en matière d'assemblage. L'adaptation au désassemblage est souvent cohérente mais rarement suffisante. Une autre méthode, plus récente, a l'avantage d'être plus dédiée et donc plus à même de considérer les spécificités du désassemblage. Nous présenterons, pour chacune d'elles, les avantages et les inconvénients que nous lui avons trouvés. Le deuxième point aborde l'existant sur les méthodes d'évaluation des gammes d'assemblage et de désassemblage. Le même constat sera fait pour ce qui est des méthodes adaptées et celles qui sont dédiées. Enfin, le dernier point concerne le pilotage des systèmes d'assemblage. Il sera conclu par un bilan où sera montré ce qui peut être transposé pour le désassemblage.

Notre démarche organisée de conception des systèmes de désassemblage pour la valorisation sera présentée dans le quatrième chapitre. Compte tenu de l'ampleur des démarches écologiques et industrielles pour le traitement des véhicules en fin de vie et en raison de nos collaborations avec le constructeur automobile PSA Peugeot-Citroën, la majeure partie des considérations présentées dans cette démarche est liée aux caractéristiques des véhicules hors d'usage. Nous avons baptisé cette démarche « Conception de sYstèmes de Désassemblage pour la valorisation des Véhicules Hors d'Usage » (CYD-VHU). La première section de ce chapitre traite de l'analyse et des choix de conception à faire lors de la modélisation du produit, du système physique et des aspects économiques, environnementaux et plus généralement contextuels dont est caractérisé le désassemblage. La deuxième section aborde justement cette modélisation des systèmes de désassemblage. Il sera question, notamment, des descripteurs de valorisation et de la représentation des processus de désassemblage.

Le dernier chapitre sera consacré à l'intégration des processus de désassemblage dans un problème classique d'optimisation. Le formalisme utilisé est la programmation linéaire (PL). La première partie de ce chapitre présente le passage d'une représentation analytique par réseaux de Petri des processus de désassemblage au formalisme de programmation linéaire. La deuxième partie est consacrée au pilotage du système de désassemblage en mode incertain. Il y sera question d'un ensemble de règles pour le pilotage préventif ou correctif. La dernière partie est une extension de la démarche CYD-VHU pour le désassemblage multi-produits. Tout en abordant la difficulté de l'évaluation des coûts et les choix des objectifs, deux politiques d'optimisation seront présentées.

ABREVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
CAN	Contrainte d'ANtériorité
CDJ	Contrainte de DisJonction
CDO	Contrainte de Disponibilité–Opérateurs
CDT	Contrainte de Désassemblage Total
CEV	Contrainte d'EVacuation
CEX	Conrainte d'EXclusion
CHO	Contrainte d'HOziron temporel
CPS	Contrainte de PourSuite
CSI	Contrainte de Sous–assemblage Imposé
CSP	Contrainte de Suspension Partielle
CSS	Contrainte de Suspension Station
CVA	Contrainte de VAlorisation
DFV-P	Destination Fin de Vie Préconisée
FDV (DFDV)	Fin de vie (Destination fin de vie)
GD	Gamme de Désassemblage
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
HTO	Horizon de temps d'Optimisation
ISO	Organisation Internationale de Normalisation
MD	Mise en Décharge
ME	Management Environnemental
OD	Opération Destructive
PM	Produit Manufacturé
RP	Réseau(x) de Petri
RPD	Réseau(x) de Petri de Désassemblage
RU	Réutilisation
RVFDV	Recyclage et Valorisation Fin de Vie
SAD	Système d'Aide à la Décision
SME	Système de Management Environnemental
UE	Union Européenne
VE	Valorisation Energétique
VHU	Véhicule Hors d'Usage
VM	Valorisation Matière

INDEX DES NOTATIONS

<i>Notations</i>	<i>Désignations</i>
P_r	Un produit défini par un 7-uplet
C	Ensemble des fractions cibles du produit P_r
Γ	Ensemble des liaisons entre fractions cibles de P_r
Σ	Ensemble des solidarisations dans P_r
Π	Ensemble des caractères complémentaires de P_r
\mathcal{D}	Ensemble des descripteurs de valorisation de P_r
u_i	Élément de C d'indice i
γ_k	Élément de Γ d'indice k
σ_k	Élément de Σ d'indice k
π_k	Élément de Π d'indice k
l	Application définissant l'ensemble des liaisons géométriques
\hat{s}	Application définissant l'ensemble des solidarisations
\tilde{p}	Application définissant l'ensemble des caractères complémentaires
z	Le nombre des fractions cibles dans P_r
z'	Le nombre des fractions cibles additionné de tous les caractères de solidarisation et complémentaires considérés dans P_r
d_{DFV}	Descripteur de destination fin de vie
d_{Masse}	Descripteur de masse
d_{Valo}	Descripteur de taux de valorisation
d_{Ir}	Descripteur d'indice de revenu
d_{Mat}	Descripteur de matière
A_{DFV}	Ensemble des attributs du descripteur de destination fin de vie
A_{Masse}	Ensemble des attributs du descripteur de masse
A_{Valo}	Ensemble des attributs du descripteur de taux de valorisation
A_{Ir}	Ensemble des attributs du descripteur d'indice de revenu
A_{Mat}	Ensemble des attributs du descripteur de matière
a_i^{DFV}	Vecteur de destination fin de vie du constituant i
s_i	Masse du constituant i
a_i^{valo}	Vecteur de valorisation du constituant i
a_i^{Ir}	Indice de revenu du constituant i
a_i^{Mat}	Vecteur des matières dont est composé le constituant i
$a_{i/\max}^{Ir}$	Indice de revenu correspondant à la destination fin de vie la plus favorable
nf	Nombre de familles de matières considérées
Z	Quadruplet représentant du réseau de Petri de désassemblage
P	Ensemble des places du réseau de Petri de désassemblage
T	Ensemble des transitions (d'opérations) du réseau de Petri de désassemblage
W^+	Matrice d'incidence arrière (POST) du réseau de Petri de désassemblage
W^-	Matrice d'incidence avant (PRE) du réseau de Petri de désassemblage
p_i	Place d'indice i de P

tt_i	Transition d'indice j de T
n	Nombre des places (de constituants) du réseau de Petri de désassemblage
m	Nombre des transitions
$\beta_{ii'}$	Constante binaire indiquant l'antériorité entre deux constituants i et i' dans une opération de désassemblage
j, j'	Indices utilisés pour l'indexation des transitions (opérations)
i, i'	Indices utilisés pour l'indexation des places (constituants)
T_j	Date d'exécution de l'opération d'indice j
c_j	Coût associé à l'opération d'indice j
r_i	Revenu associé au constituant d'indice i
$\alpha_{jj'}$	Constante binaire indiquant l'antériorité entre deux opérations j et j'
a_{jg}	Variable de décision indiquant l'affectation de l'opération j à la station g
a'_{jk}	Variable de décision indiquant l'affectation de l'opération j à l'opérateur k
t_j	Variable de décision indiquant l'exécution effective de l'opération j
δ_{jk}	Temps d'exécution de l'opération j par l'opérateur k
F_{obj}	Fonction objectif
w_{ij}	Élément de la matrice d'incidence du RPD2
ns	Nombre de stations
no	Nombre d'opérateurs
$\theta_{jj'}$	Variable binaire aléatoire
\mathcal{G}_i	Variable binaire aléatoire utilisée pour l'intégration des contraintes de poursuite (CPS)
d'_{gh}	Durée de déplacement d'un opérateur de la station g à la station h
τ_i	Taux de valorisation du constituant d'indice i
τ_{Th}	Taux de valorisation minimum
S	Masse totale du produit
P_{SAE}	L'ensemble des places du RPD2 correspondants aux sous-assemblages évacuables
S_{CSS}	Ensemble des stations mises hors service
$T_{CSP}(g)$	Sous-ensemble des opérations provisoirement suspendues dans la station g
O_{CDO}	Ensemble des opérateurs déclarés indisponibles sur l'horizon considéré
γ	Coût horaire
λ	Coefficient d'équilibrage
np	Nombre de produits à traiter sur un horizon temporelle donné
T_{HTO}	Horizon temporel d'optimisation des processus de désassemblage
q	Variable utilisée pour indexer les produits
$x(q)$	Indique le plus petit indice des constituants du produit q
$y(q)$	Indique le plus grand indice des constituants du produit q
$x'(q)$	Indique le plus petit indice des opérations considérées pour le produit q
$y'(q)$	Indique le plus grand indice des opérations considérées pour le produit q
$n(q)$	Nombre de places du RPD2 du produit q
$m(q)$	Nombre de transition du RPD2 du produit q
$S(q)$	Masse totale du produit q
V_q	Variable de décision pour identifier les produits traités
$VAD2D_{Min}$	Valeur ajoutée directe minimale de désassemblage
NVD_{Min}	Nombre de VHU minimum à traiter

Chapitre 1 :

LE RECYCLAGE ET LA VALORISATION FIN DE VIE

1.1 Introduction

La fabrication, l'utilisation et l'élimination des produits doivent être prises en compte dans une approche globale afin de réduire leur impact environnemental en réduisant évidemment la quantité de déchets produits et d'énergie consommée. L'insertion de circuits de récupération et l'organisation de filières dédiées de retraitement constituent un enjeu économique et environnemental de premier ordre. En effet, une telle démarche répond, non seulement, au souci d'une protection plus efficace de l'environnement mais conditionne aussi la rentabilité des activités de recyclage et de valorisation des produits en fin de vie. Rentabilité qui est un argument incontournable pour intéresser les acteurs industriels en plus de l'argument législatif.

La législation écologique actuelle vise fondamentalement à réduire les déchets liés à la production, mais aussi à diminuer le plus possible l'impact environnemental des produits en fin de vie. La loi du 13 juillet 1992 en est d'ailleurs un exemple [17]. Elle a permis, en effet, d'engager une refonte en profondeur de la politique en matière de déchets en prenant d'importantes dispositions. L'une d'elles est une nouvelle réglementation sur la mise en décharge des produits en fin de vie. Concrètement, la loi prévoit la mise en décharge des seuls « déchets ultimes » dès le 1er juillet 2002. Environ une année plus tard, plus exactement le 10 mars 1993, un accord-cadre sur le recyclage des véhicules en fin de vie a été signé par deux grands constructeurs automobiles : PSA Peugeot Citroën et Renault ainsi que des industriels de la récupération et du recyclage, des producteurs de matériaux, des équipementiers et les pouvoirs publics français. Cet accord avait prévu que le poids des déchets ultimes générés par les véhicules hors d'usage¹ (VHU) devra être égal au plus à 15% du poids total des VHUs en 2002, avec un plafond de 200 kg et ramené à terme à 5%. Ce fût le premier engagement important dans le secteur automobile en France.

D'autres dispositions ont été prises pour ce qui est des déchets ménagers, ceux du secteur de l'électroménager (produits blancs), du secteur de l'électronique (produits bruns), etc. Mais vu l'importance et l'ampleur de l'impact sur l'environnement dont est responsable le secteur du VHU, nous avons proposé un paragraphe complet autour du recyclage et de la valorisation FDV orienté VHU. En effet, les VHUs représentent une source non négligeable de déchets et contribuent directement à la pollution. Entre 8 et 9 millions de tonnes de déchets sont ainsi dus à la mise au rebut de véhicules chaque année dans l'union européenne. Plus de 25% du poids des VHUs constituent des déchets dangereux équivalents à 10% du volume total des déchets dangereux produits chaque année dans l'Union Européenne.

Bien que ce chapitre semble loin de la problématique de la conception des systèmes de désassemblage, en réalité, la méthode de conception que nous allons exposer se base sur un formalisme qui demande une connaissance préalable approfondie du domaine de la valorisation et nécessite notamment la connaissance des filières de recyclage et des notions de compatibilité entre les matières. Ce chapitre se présente en trois parties bien distinctes.

¹ Un véhicule hors d'usage (ou en fin de vie) est un véhicule hors d'état de circuler dans des conditions normales de sécurité ou qui ne répond plus aux règles de circulation en vigueur.

La première traite de la gestion environnementale qui s'impose avec la mise aux normes ISO14000 des PME-PMI. Un certain nombre de références législatives y seront évoquées. La deuxième partie est une étude exhaustive du « *Environmental Conscious Manufacturing* » que nous avons traduit par « Fabrication Eco-sensibilisée ». Cette partie montre comment l'on peut mettre en place une véritable stratégie globale d'analyse, de conception et d'évaluation des produits pour leur phase de fin de vie. La troisième partie fait un tour d'horizon sur les diverses analyses et modélisations du cycle de vie des produits manufacturés et des différentes approches et techniques de valorisation du produit en fin de vie.

1.2 Le gestion environnementale

La gestion environnementale (dit aussi management environnemental) consiste à développer un système permettant de mieux gérer son environnement et à intégrer la dimension environnementale dans les préoccupations des entreprises, des collectivités locales, des associations, etc. Cela doit permettre de réduire les coûts de consommation d'énergie, d'eau ou de matières premières, de réduire la production de déchets et de rejets dans l'air et dans l'eau, mais aussi d'acquérir grâce à la prise en compte des préoccupations environnementales un avantage concurrentiel et une image améliorée. Le management environnemental permet aussi de maîtriser les risques à l'égard de l'environnement, d'anticiper l'évolution réglementaire, ce qui évite les coûts d'une mise en conformité en urgence, et améliorer l'intégration de l'entreprise dans la vie locale. Il permet aussi de développer dans l'entreprise une démarche citoyenne.

L'ADEME² justifie le « management environnemental » par la possibilité de :

- faire face aux contraintes réglementaires,
- répondre aux exigences des donneurs d'ordres,
- construire une relation de confiance avec l'ensemble des partenaires,
- maîtriser les coûts de non qualité environnementale,
- mobiliser l'ensemble du personnel sur un sujet fédérateur.

Le management environnemental est, au même titre que l'organisation de la production et la qualité, un défi industriel que les entreprises doivent relever; il en va de leur développement, voire de leur pérennité face aux exigences du marché. En effet, dans un souci de « reconnaissance environnementale » mais surtout de maîtrise des coûts de non qualité environnementale, le management environnemental devient désormais une composante essentielle pour les entreprises. Il doit reposer sur des normes sans cesse mises à jour, ce qui requiert évidemment une certification pour ces entreprises désireuses de reconnaissance.

1.2.1 Certification environnementale

La certification environnementale est une procédure d'authentification et de vérification d'un système de management pour son aptitude à intégrer (voire à anticiper) la réglementation environnementale dans le choix des processus de production (de services ou de produits manufacturés) dans l'entreprise, à assurer la qualité environnementale de ces processus et enfin à maintenir une action réactive quant aux changements des indicateurs économiques et écologiques. Pour une entreprise, cette certification environnementale se veut :

- garante de son engagement en matière de management environnemental envers ses clients,
- encourageante pour les investisseurs (améliorant ainsi l'accès au capital),
- réductrice d'incidents ayant pour conséquence l'obligation de réparer,

² Agence de l'Environnement et la Maîtrise de l'Energie (<http://www.ademe.fr/>).

- réductrice aussi de consommation de matériaux et d'énergie (par le recyclage),
- un outil de résolution et de communication de problèmes écologiques.

La certification d'un système de management de l'environnement est obtenue après vérification par un organisme accrédité de l'existence et du fonctionnement satisfaisant d'un tel système d'organisation. Il comporte souvent un ensemble de documents et de procédures à fournir. Cela demande aussi une évaluation préalable de la situation existante ainsi qu'un engagement d'amélioration continue. Après quoi, la phase de mise en norme est appliquée selon une série de normes baptisées ISO 14000.

1.2.2 Les normes ISO 14000

La série ISO 14000 est un ensemble de guides et de normes qui traitent des exigences applicables à un système de management environnemental. Ces normes ne spécifient pas de critères environnementaux, mais requièrent qu'une organisation formule une politique et des objectifs clairs en se basant sur les informations provenant des impacts réels environnementaux.

L'ISO a veillé à ce que ces normes aient assez de flexibilité pour qu'elles puissent être appliquées par toutes les organisations, quelles qu'en soient la taille et le domaine d'activité. La norme ISO 14001 en particulier traite du système de management environnemental (SME) en donnant les spécifications et les lignes directrices pour son utilisation. Le SME est l'aspect gestion de la structure qui permet à un organisme d'évaluer et de maîtriser l'impact environnemental de ses activités, produits et services. Une SME comporte, selon l'ISO 14001, six points principaux [52]:

- une politique environnementale par la déclaration d'intention et d'engagement d'un organisme quant à sa performance environnementale ;
- une planification par laquelle l'organisme analyse l'impact environnemental de ses opérations ;
- une mise en œuvre de processus concourant à atteindre des buts et des objectifs liés à l'environnement ;
- une activité de surveillance et de mesure des indicateurs environnementaux axée sur la réalisation des buts et objectifs de l'organisme ;
- un examen du SME réalisé par la haute direction de l'organisme pour vérifier la stabilité et l'efficacité du système ;
- des actions d'amélioration continues.

Outre les organisations industrielles, dont le secteur automobile qui est sensible aux normes environnementales, les administrations territoriales commencent de plus en plus à s'impliquer et entreprennent de véritables projets de mise aux normes. Notamment, la commune de Villers-Cotterêts, commune de l'Aisne d'environ 10.000 habitants, qui est la première collectivité locale française certifiée ISO 14000, et ce dès 2001. La démarche est d'autant plus méritoire que, même à l'étranger, peu de communes (ou équivalents) se sont engagées dans une certification environnementale (une au Japon, quelques unes en Espagne, en Italie et en Grande-Bretagne).

1.3 La fabrication éco-sensibilisée (FES)

La Fabrication Eco-Sensibilisée (*Environmentally Conscious Manufacturing – ECM*) est une approche globale pour la conception de produits et de processus de fabrication qui vise à réduire les impacts potentiellement dangereux sur l'environnement durant la fabrication d'un produit. C'est une approche qui repose sur l'étude du cycle de vie du produit et son exploitation pour la conception éco-sensibilisée (*Environmental Conscious Design*) et la production éco-sensibilisée (*Environmental Conscious Production*).

1.3.1 Le cycle de vie du produit

Depuis la production des matériaux qui le constituent jusqu'à sa mise au rebut, un produit traverse de nombreuses étapes. Représenté sous forme de boucle, le "cycle de vie" montre l'enchaînement et l'interconnexion entre ces étapes. Cependant, il n'est pas facile de faire une représentation du cycle de vie à la fois précise et s'appliquant sur tous les produits possibles. Krikke H.R. [39] a proposé, dans son étude économique pour ROTEB³, une représentation du cycle de vie générique mais suffisamment exhaustive (cf. Figure 1.1). Il y a mis en évidence, l'importance d'une stratégie de fin de vie pour boucler le cycle de vie et de réduire ainsi la quantité de déchets produite. Il est vrai que son étude s'est faite principalement autour du problème de recyclage des écrans (informatique, moniteurs ou autres) mais cela reste fondamentalement comparable pour tous les produits manufacturés.

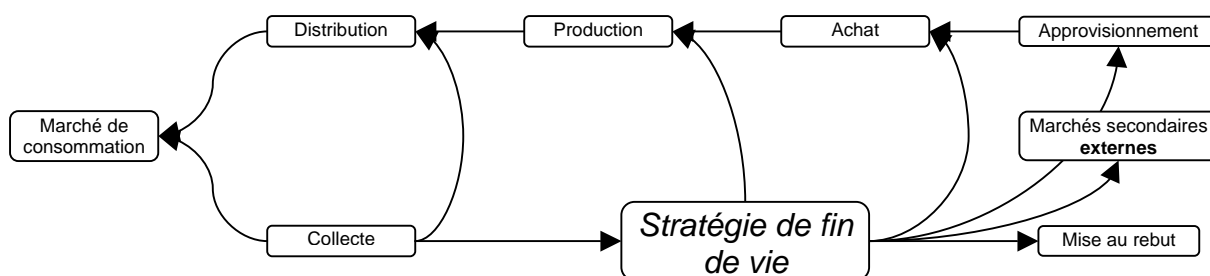


Figure 1.1 : La stratégie de FDV, une partie intégrante dans le ME

Uhlmann E. et al. [61] firent leur étude sur les produits blancs (lave-linge, réfrigérateur, micro-onde, ...) et résumèrent le cycle de vie par la Figure 1.2. Les auteurs y ont décrit les différentes phases du cycle de vie depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la mise en décharge. Ils définirent la phase de retraitement (phase 7) en 5 étapes : le désassemblage, le nettoyage, le test, le retraitement et le réassemblage.

Dans leurs travaux de conception d'unités de désassemblage automatisées de produits blancs, les auteurs proposent et expérimentent un désassemblage partiellement destructif et dit « automatique et flexible ». L'expérience de mise en place d'un tel système a fait preuve d'une incontestable prouesse technique et technologique en termes de découpe et de nettoyage du produit (*Plasma Arc Cutting & Dry Ice Blasting*) mais ne présente pas une avancée significative du point de vue méthodologie dans le processus de désassemblage. En effet, la méthode consiste à choisir *a priori* une séquence sur la base d'un démontage manuel. Ensuite, à simuler la séquence sur RobCad⁴ avant de l'exécuter effectivement en atelier. Comme évoqué précédemment, deux techniques pour la découpe et le nettoyage sont effectuées grâce à des ressources dédiées, le reste des opérations de démontage sont exécutées manuellement.

³ ROTEB : Compagnie municipale de gestion des déchets de la ville de Rotterdam, Pays-Bas.

⁴ Robcad est le leader Européen en Ingénierie de Process Assistée par Ordinateur (IPAO) développé par Tecnomatix Technologies Ltd.

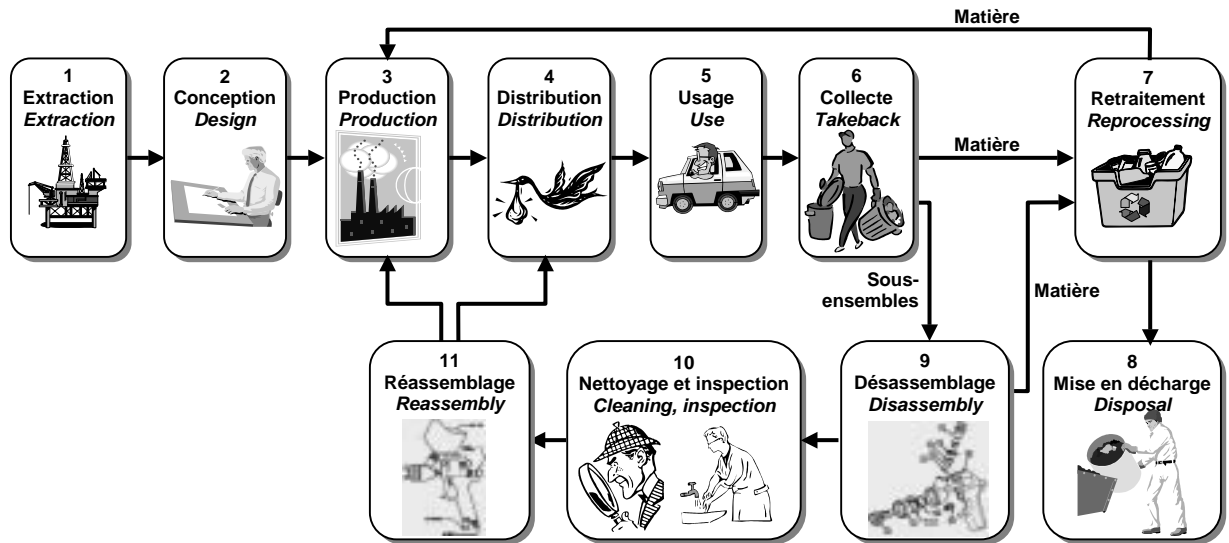


Figure 1.2 : Cycle de vie des produits blancs [61].

Gungor A. et Gupta S.M. [23] ont présenté un synoptique du cycle de vie d'un produit à la fois synthétique et exhaustif (cf. Figure 1.3). Ils y décrivent les différentes phases du cycle de vie par des activités et mettent en évidence le retour d'informations des activités d'Analyse du Cycle de Vie et de la Conception pour l'Environnement⁵ durant le cycle de vie. Les activités représentées dans des rectangles à angles arrondis sont considérées « secondaires ». Dans la phase de conception du produit, l'activité d'analyse du cycle de vie est secondaire au sens où elle vient renforcer et compléter les choix et re-conceptions qui interviendraient lors de la conception pour l'environnement.

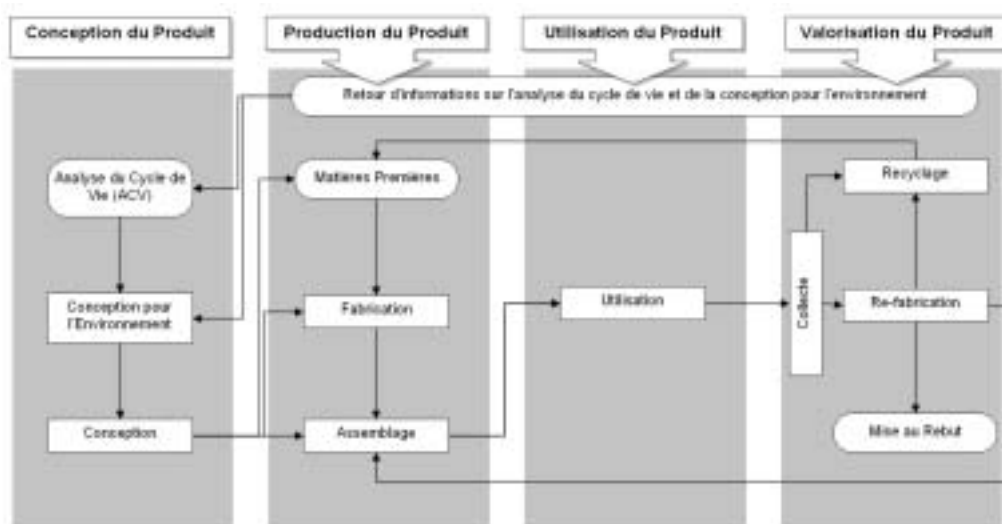


Figure 1.3 : Interactions des activités dans le cycle de vie d'un produit [23]

Dans la phase de fabrication du produit, l'activité de détermination des matières premières en fonction des choix de recyclage et parfois de la conception même du produit est secondaire dans le sens où elle peut être omise. Dans la phase de valorisation du produit en fin de vie, la

⁵ L'analyse du Cycle de Vie et la Conception pour l'Environnement sont traitées au §1.3.2.

mise au rebut est considérée secondaire au sens où en terme de valorisation, la mise en décharge reste la dernière alternative. Une alternative pourtant obligatoire pour les déchets ultimes.

L'une des illustrations du cycle de vie d'un produit la plus précise est sans doute celle de D. Chevron [10] montrée dans la Figure 1.4. Les boucles internes permettent de regagner de la valeur fonctionnelle du produit ou de chacun des constituants récupérés. Cela suppose évidemment le reconditionnement de tout le produit ou des constituants avant de les réinjecter dans la phase de production et d'utilisation.

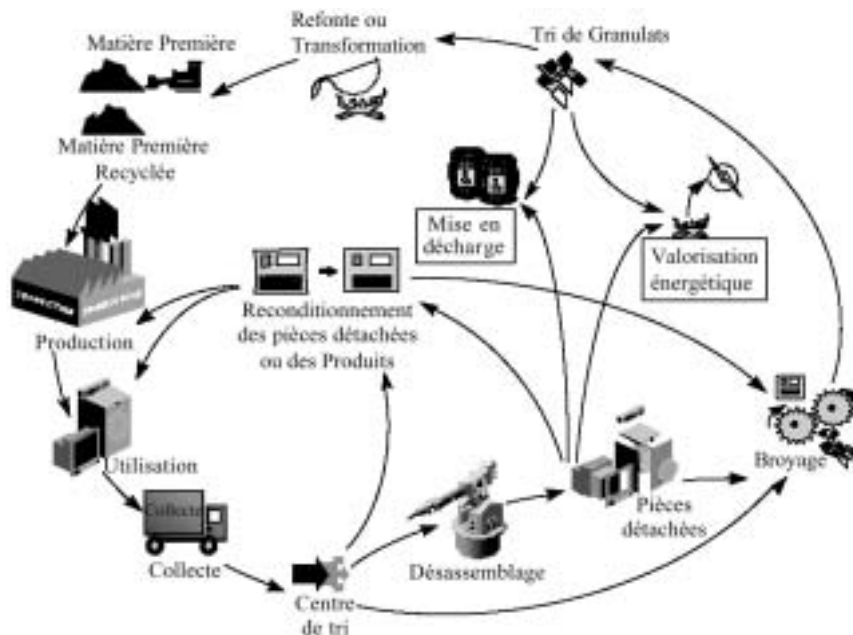


Figure 1.4 : Cycle de vie des matériaux et des produits [10]

L'une des difficultés du recyclage et de la valorisation FDV est la gestion des flux de matière et d'énergie dans le cycle de vie du produit. Plusieurs flux de déchets ont déjà fait l'objet d'une réglementation au niveau communautaire, c'est le cas des déchets d'emballage, des PCB, des accumulateurs hors d'usage, des piles et des huiles usagées (cf. Figure 1.5).



Figure 1.5 : Flux polymorphes dans un cycle de vie d'un produit

Une autre vue intéressante du cycle de vie est celle où sont mis en exergue non pas les flux de matières mais plutôt les flux d'informations. C'est une représentation déterminante dans la logistique inverse (*Reverse Logistic*) de valorisation des produits en fin de vie [74]. L'exemple le plus intéressant est celui présenté dans les travaux de Neil FERGUSON et Jim BROWN montré dans la Figure 1.6.

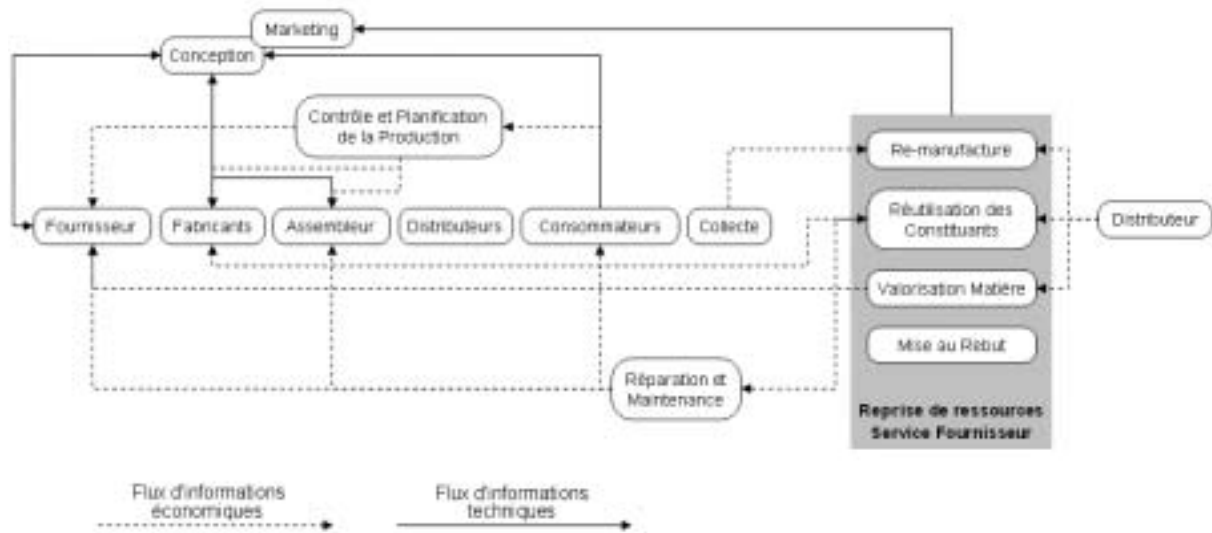


Figure 1.6 : Modèle de flux de biens dans la reprise de ressources (Resource Recovery)

Rappelons-le, les objectifs de l'analyse du cycle de vie sont de prévoir et d'évaluer les impacts du produit sur l'environnement et la santé pendant les phases de sa vie à savoir la production de matières premières, la fabrication, la distribution, l'utilisation, la maintenance, la valorisation et la mise au rebut [60]. La réalisation de ces objectifs implique un suivi rigoureux, non seulement, des flux de matières et d'énergie, mais aussi des flux d'informations. Comme le montre la Figure 1.6, l'importance du flux d'informations économiques laisse pressentir la nécessité d'une organisation de la « logistique inverse » intégrée mettant en collaboration tous les services du cycle de vie du produit. C'est à cette collaboration que se voue la fabrication éco-sensibilisée en général et la conception éco-sensibilisée en particulier.

1.3.2 La conception éco-sensibilisée (CES)

La Conception Eco-Sensibilisée implique la production de produits dont la totalité des effets environnementaux négatifs est minimisée [24]. La CES se base sur les deux points clés :

1. maîtriser le cycle de vie du produit et son impact sur l'environnement à chaque phase de sa vie,
2. prendre les meilleures décisions durant la conception et la production du produit de sorte que les attributs environnementaux du produit et du processus de fabrication soient maintenus au niveau désiré.

Ces deux points correspondent respectivement aux activités d'analyse du cycle de vie (LCA) et de conception pour l'environnement (DFE). Le LCA doit permettre d'étudier l'impact du produit sur l'environnement pendant les différentes étapes du cycle de vie d'un produit. Les connaissances acquises par le LCA doivent ensuite être répercutées sur la conception de produits nouveaux. Il s'agit alors de conception pour l'environnement (*Design For Environment, DFE*) [60].

1.3.2.1 Analyse du cycle de vie (LCA)

L'évaluation du cycle de vie (*Life-Cycle Assessment LCA*) d'un produit est une technique déterminante dans le management environnemental et dans la sécurité du produit. Elle permet l'évaluation de l'impact d'un produit sur l'environnement et par conséquent une prévention de la pollution et une responsabilité environnementale plus efficace [31]. Il est souvent fait distinction, dans la littérature, entre l'analyse du cycle de vie et l'évaluation du cycle de vie (*Life-Cycle Analysis/Assessment*). En effet, l'analyse du cycle de vie paraît être une collection de données donnant suite à un inventaire alors que l'évaluation est à un niveau supérieur dans le sens où elle apporte une appréciation (qualitative ou quantitative) sur cet inventaire. L'analyse du cycle de vie est aussi appelée éco-équilibre (*Eco-Balance*), analyse des ressources (*Resource Analysis*), analyse de l'impact environnemental (*Environmental Impact Analysis*) ou encore analyse du berceau à la tombe (*Cradle-to-Grave Analysis*).

Nous avons, tout de même, trouvé une définition très précise et une étude très exhaustive du LCA. Il s'agit des travaux de Susan SVOBODA de l'Université de Michigan (USA) qui préfère parler d'« Analyse du Cycle de Vie » plutôt que d'« Evaluation du Cycle de Vie ». Elle définit le LCA comme étant une approche systématisée pour l'évaluation des conséquences d'un produit sur l'environnement du berceau à la tombe [58]. Aussi, elle ajoute qu'une analyse du cycle de vie complète doit inclure trois composantes séparées mais étroitement liées :

L'inventaire dans le cycle de vie (Life Cycle Inventory) : il s'agit de la phase de construction d'une base de données où sont quantifiés l'énergie, les matières premières, les émissions dans l'air et dans l'eau, les déchets solides, etc. tout au long du cycle de vie du produit en étude (cf. Figure 1.7).

Evaluation de l'impact dans le cycle de vie (Life Cycle Impact Assessment) : C'est un processus d'évaluation des effets environnementaux liés au produit en étude. L'évaluation devrait porter, à la fois, sur l'impact écologique et sanitaire mais aussi sur l'impact social, culturel et économique.

Analyse des améliorations dans le cycle de vie (Life Cycle Improvement Analysis) : Il s'agit d'une étude des opportunités de réduire ou d'atténuer l'impact environnemental tout au long du cycle de vie du produit. C'est une analyse qui doit apporter des éléments quantitatifs et qualitatifs sur les éventuelles améliorations.

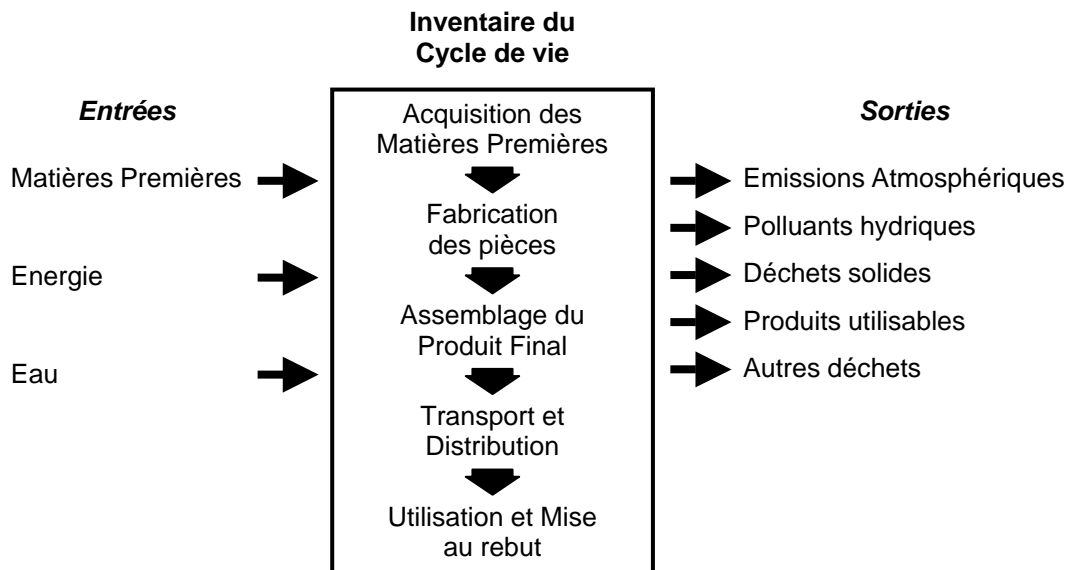


Figure 1.7 : Organisation Systémique de l’Inventaire du Cycle de Vie [58]

L’un des indicateurs clés de l’analyse du cycle de vie est, bien entendu, le « coût du cycle de vie (*Life-Cycle Cost*). Navinchandra et al. le présentent comme le coût total induit tout au long du cycle de vie du produit [49]. Ce coût comprend l’achat, la maintenance et le retraitement en fin de vie du produit. D’autres indicateurs comme les quantités d’émissions de polluants, la variété des différentes alternatives de recyclage, ou plus qualitatifs comme la satisfaction du public restent des données importantes pour l’évaluation du cycle de vie [27].

Les travaux de Bates E. et al. ont mis en évidence : le lien entre les trois composantes de l’analyse du cycle de vie, et le but (ou le contexte) de l’analyse (ce qu’ils désignent par « *SCOPING* ») [72]. En effet, durant l’analyse, le produit est défini selon le contexte le plus important. Ce lien peut se résumer par la Figure 1.8 très générique donnée par Bates E. et al.

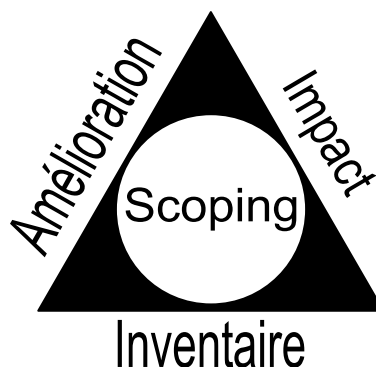


Figure 1.8 : Relation entre le Cycle de Vie et le LCA–Scoping [72]

Le contexte de l’analyse du cycle de vie peut découler de plusieurs objectifs : identifier les phases du cycle de vie où des améliorations sont possibles, établir la consommation des ressources et d’énergie et mesurer les incidences sur l’environnement, comparer les produits alternatifs et guider le développement des nouveaux produits. Plus précisément, l’analyse du cycle de vie peut servir comme base pour le développement de normes sur l’environnement et comme aide à la conception d’un produit [25]. Cela procure, ainsi, un moyen de prévoir les effets d’une mise au rebut, de prévoir les résultats d’un recyclage des matières, ... [60]. Cela rentre d’ailleurs dans les prérogatives de la conception pour l’environnement (*Design For Environment DFE*). L’exemple le plus probant est celui d’une partie des travaux de K. Ishii

[31][32] dans lesquels une analyse du cycle de vie a permis de reconsidérer la conception d'une imprimante à jet d'encre. Cela a été possible grâce au développement d'un logiciel appelé « LINKER » basé sur la planification de la valorisation du produit en phase de fin de vie et sur la détermination du niveau de désassemblage auquel le produit étudié devra être sujet. Ce logiciel permet d'évaluer la conception à chaque phase du cycle de vie et de la revoir en se basant sur les temps de désassemblage des composants et des solidarités (tout types confondus).

1.3.2.2 Conception pour l'environnement (DFE)

La conception pour l'environnement s'inscrit dans une démarche qui prend en considération tous les aspects de l'environnement dans chaque étape du processus du développement d'un produit. Elle s'efforce ainsi de réduire le plus possible l'impact sur l'environnement de ce produit durant le cycle de vie entier. Ceci, en se basant sur les résultats qui seraient obtenus de l'analyse du cycle de vie d'un produit mais aussi de l'expérience non négligeable des concepteurs. On imagine aisément l'importance d'une telle démarche de conception quand on sait que la majorité des coûts de gestion des produits en fin de vie sont provoqués dès la phase de conception [54].

Jeremy M. Yarwood et Patrick D. Aagan [67] ont fait une excellente synthèse de la conception pour l'environnement en répondant aux quatre questions clefs suivantes :

a) Qu'est ce que la DFE ?

La conception pour l'environnement est une démarche systématique d'intégration des attributs environnementaux dans la conception du produit. Elle présente trois uniques caractéristiques :

- la prise en compte entière du cycle de vie du produit,
- un niveau d'application avancé dans le processus de réalisation du produit,
- une prise de décisions sur la base d'un ensemble de valeurs consistantes autour, entre autres, d'une écologie industrielle et une approche de systèmes intégrés.

b) Pourquoi la DFE ?

Les avantages d'une conception pour l'environnement sont :

- la réduction des coûts,
- des produits améliorés,
- la réduction des pressions réglementaires,
- l'amélioration de l'image de marque,
- l'amélioration des performances environnementales.

c) Y-a-t-il des succès probants de la DFE en industrie ?

La liste ci-dessous représente une partie des entreprises reconnaissant le succès de leur démarche de DFE :

- Xerox
- BMW & Volkswagen
- Hewlett Packard
- Sun Microsystems, inc.
- IBM Corporation
- General Motors Corp.

d) Comment appliquer la DFE ?

L'intégration de la conception pour l'environnement varie selon les compagnies et se réalise sur la base de quatre points cardinaux :

- l'investigation (au sens réglementaire),
- la promotion (au sens de la politique de la compagnie),
- le suivi du processus d'intégration (rapports et gratifications),
- le retour d'informations.

F. Touzanne rappelle, dans ses travaux de thèse [60], les trois activités principales issues de la conception pour l'environnement qui se rapportent directement à la valorisation des produits en fin de vie. Il s'agit de :

- la conception pour le désassemblage (design for disassembly DFD),
- la conception pour le recyclage (design for recycling DFR),
- la conception pour la re-fabrication (design for remanufacturing DFR).

Des activités dont les objectifs sont respectivement :

- l'augmentation du taux de valorisation en facilitant la récupération de constituants ou matières,
- l'accroissement de la performance du recyclage des matières en s'intéressant aux choix des matières utilisées dès les premières phases de conception,
- l'emploi de constituants réutilisables pour réduire le gaspillage des ressources naturelles.

Le respect environnemental que vise la conception éco-sensibilisée n'a d'intérêt que s'il est aussi pris en compte en phase de production. La phase de production devient alors écologique. On peut ainsi parler de production éco-sensibilisée.

1.3.3 La production éco-sensibilisée

La production éco-sensibilisée se veut une production respectueuse de l'environnement par rapport, non seulement, aux produits fabriqués mais surtout aux processus et aux ressources choisis pour la fabrication de ces produits. En d'autres termes, la source d'énergie, les systèmes de refroidissement, les outils de préhension et d'évacuation des matières dangereuses, les systèmes de nettoyage, sont tous des éléments déterminants dans la production. Ils doivent être sélectionnés en fonction de leurs impacts respectifs directs ou indirects sur l'environnement. Cela nécessite, évidemment, l'élaboration d'outils d'aide à la décision très complexes. L'intégration d'activités concurrentes n'en diminue pas la complexité. Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce problème, notamment Srinivasan M. [57] qui présenta un modèle d'analyse du « comment » sélectionner les différents processus de fabrication en contrôlant leurs effets sur l'environnement.

1.4 La valorisation des produits et des matières

Malgré des avancées notables dans la recherche environnementale, la valorisation reste un concept ambigu. En premier lieu, il se définit souvent par opposition à la mise en décharge. En deuxième lieu, la nuance avec le « recyclage » n'est pas toujours connue. Les lois environnementales européennes ont permis de définir, dès 1989 et de plus en plus clairement, ce qu'est la valorisation.

La loi du 13 juillet 1992 introduit la valorisation comme étant :

Le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.

La valorisation d'un produit semble être de trois types :

- le réemploi d'une partie du produit (et par conséquent de sa rénovation) ,
- la valorisation matière d'une deuxième partie du produit (dont la fonction initiale ne peut être restaurée),
- la valorisation énergétique d'une autre partie.

Ce qui reste du produit est condamné à la mise en décharge.

Concernant les produits manufacturés, cette démarche de valorisation doit ainsi permettre de réutiliser les éléments constitutifs de ces produits en fin de vie. L'activité de valorisation présente de nombreux enjeux.

1.4.1 Enjeux

L'organisation des filières dédiées tend, heureusement, à s'imposer aujourd'hui sur une palette plus large, compte tenu des intérêts qu'elle présente. Ces filières représentent une importante activité économique assurée par un grand nombre de petites et moyennes entreprises. La mise en place de nouvelles filières de recyclage peut constituer un véritable incubateur d'entreprises et donc être la source de nombreuses créations d'emploi. Selon des sources allemandes (ADA - Association des recycleurs d'automobiles), 100 000 nouveaux emplois au total pourraient être créés dans l'UE. La réalisation d'un taux de recyclage plus élevé créera des emplois, principalement dans le secteur du démontage automobile. En effet cette activité nécessite une main d'œuvre importante, et le secteur comporte surtout des petites et moyennes entreprises. Les activités de transport et de recyclage associées à la gestion des véhicules hors d'usage sont également susceptibles de nécessiter la création d'emplois.

Enfin, l'identification et l'organisation de filières de retraitement dédiées vise à un management environnemental plus efficace et ce par une meilleure gestion des déchets, par une séparation précoce des matériaux les plus dangereux ou polluants, par une amélioration des techniques de traitement, par des taux de valorisation plus élevés et par un gain plus conséquent sur les plans environnementaux et économiques.

Malgré tous ces éléments qui devraient plus que jamais rentabiliser les activités de valorisation, la situation économique actuelle en matière de gestion des produits manufacturés n'est pas si satisfaisante que cela. Prenons comme exemple le cas des véhicules hors d'usage. Par le passé, l'existence de marchés d'occasion pour les pièces et la ferraille faisait du traitement des véhicules hors d'usage une activité rentable, surtout lorsque l'on arrivait à atteindre des taux élevés de valorisation de la fraction métallique. Mais l'utilisation croissante d'éléments non métalliques dans la construction automobile de nos jours a induit une telle hausse des coûts de la mise en décharge des matières non recyclables et une telle baisse des prix de l'acier (l'application de nouvelles taxes sur l'acier américain n'arrangeant pas la situation) que la rentabilité n'est plus garantie. Une des solutions qui paraît à la fois incontournable et raisonnable est de mettre en place des infrastructures et des nouveaux marchés pour la réutilisation des matériaux recyclés comprenant des filières de recyclage des

composants en matière plastique. On estime à plusieurs milliers les nouveaux emplois susceptibles d'être créés par la mise en place de telles infrastructures. Surtout que celles-ci sont nécessaires pour se conformer aux objectifs de la directive européenne [17].

1.4.2 Filières de valorisation

Plusieurs études ont démontré que le recyclage était, du point de vue économie d'énergie, plus avantageux que la mise en décharge ou l'incinération avec récupération d'énergie. Une étude réalisée par l'université de Delft [17] démontre d'ailleurs que le recyclage économise « dix fois » plus d'énergie que l'incinération avec récupération d'énergie.

Les destinations fin de vie des produits et matières dépendent évidemment de l'existence ou non des filières de valorisation. Les activités de valorisation existent depuis longtemps dans les pays industrialisés mais ne concernent qu'une variété très réduite de déchets ménagers et industriels. Les quatre matières les plus recyclées sont sans doute l'acier (métaux ferreux), l'aluminium (métaux non ferreux), le verre et les plastiques. En général, chaque filière concerne une catégorie de déchets très spécifiques, exception faite pour la valorisation énergétique (ou thermique).

1.4.2.1 Le verre

De nos jours, le verre représente, pour la masse, plus de 12 % de la masse des ordures ménagères. La collecte du verre ménager est désormais un mécanisme bien au point qui permet, en moyenne, de récupérer plus de 1,5 million de tonnes dont 1,3 million de tonnes sont recyclées. Et ce grâce à un parc de 70.000 conteneurs. La Figure 1.9 nous donne une idée sur l'évolution de la politique de collecte du verre en France entre 1985 et 1996⁶. Le verre peut être produit à partir de matière minérale vierge (silice) ou de verre broyé de récupération (calcin). Le verre récupéré, exempt de polluants, se recycle indéfiniment sans perdre ses qualités originelles. Néanmoins, les bouteilles sont souvent valorisées par réemploi comme c'est le cas en Allemagne. Il s'agit d'un réemploi direct à travers un système de consigne où les bouteilles sont récupérées, lavées et réutilisées. En France, la re-fabrication de la matière première est l'unique procédé de valorisation du verre pour le moment. Ce procédé comporte quatre phases :

- le broyage,
- le nettoyage (lavage, élimination des colles, des étiquettes, capsules...),
- la séparation du verre et des métaux ferreux (tri magnétique), non ferreux (tri par courant de Foucault), et enfin
- l'élimination des infusibles (porcelaine, cailloux...) par tri optique électronique et électrovanne.

Le calcin ainsi obtenu devient une matière première et peut alors être utilisé pour fabriquer du verre.

⁶ Source : ADEME

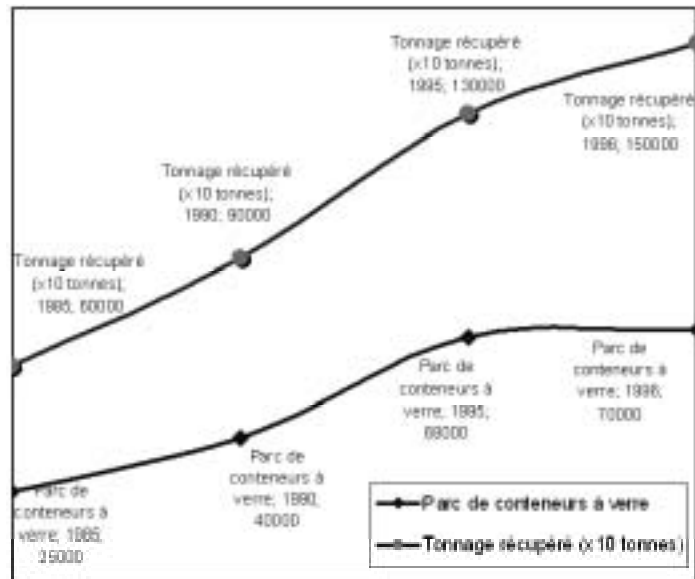


Figure 1.9 : Evolution de la collecte du verre de 1985 à 1996 en France

1.4.2.2 Les plastiques

La légèreté, la malléabilité, l'imperméabilité, l'esthétique, la résistance, la rigidité, l'inflammabilité, la modularité et l'excellent rapport propriétés/coût sont quelques-unes des qualités du plastique qui ont fait son succès au cours des dernières décennies. Succès qui a conduit aussi à la grande quantité de déchets plastique à valoriser chaque année. En effet, les déchets plastiques représentent environ 20 % du volume et 11 % du poids des déchets ménagers. Ce sont, en très grande partie, des emballages plastiques. En France, plus de 7 milliards de bouteilles et flacons en plastique sont vendus chaque année. La part des flacons recyclés est de 7% (environ 26000 tonnes recyclés en 1997).

Bien que la filière de recyclage des plastiques soit la plus récente (moins de 10 ans), il existe déjà diverses techniques efficaces de valorisation du plastique qui dépendent principalement des compatibilités chimiques des plastiques usagers.

Il existe trois types de plastiques⁷ :

- **Les thermoplastiques** qui caractérisent les plastiques malléables qui peuvent être chauffés, refroidis pour donner une forme, puis chauffés à nouveau pour une autre forme. Cette caractéristique permet le recyclage total de la matière.
- **Les thermodurcissables** qui caractérisent les plastiques qui se figent, se rigidifient dès la première transformation, et sont très difficiles à recycler (exemple, le polyuréthane, le silicone...). En conséquence, ce sont des plastiques qui ne sont pas régénérés mais réincorporés après broyage dans des résines neuves [60].
- **Les élastomères** qui caractérisent les plastiques qui se déforment. Ils sont réutilisés dans les revêtements routiers. En effet, une fois transformés en poudre, ces élastomères (comme le caoutchouc) sont mélangés directement dans le bitume qui lie les granulats.

⁷ Source : ADEME

La valorisation des plastiques peut être de type énergétique, matière et chimique :

La valorisation énergétique : le plastique a un pouvoir calorifique très élevé. Cela permet ainsi d'améliorer la combustion et donne moins d'imbrûlés dans les mâchefers⁸. La combustion du plastique dans les 80 UIOM⁹ équipées d'un système de récupération de chaleur permettrait d'économiser chaque année plus de 300.000 tonnes d'équivalent pétrole. Le plastique sert aussi comme combustible dans les chaudières industrielles et les cimenteries. Enfin, l'incinération est une solution facile pour les déchets plastiques trop souillés ou trop petits pour être récupérés (pots de yaourt et autres emballages alimentaires).

La valorisation matière : la valorisation matière du plastique permet d'utiliser la matière collectée pour fabriquer de nouveaux produits plastiques. C'est une valorisation qui passe par trois étapes : le tri par type de polymères car ces derniers sont très rarement compatibles et ne peuvent donc pas être traités ensemble ; ensuite vient la phase de régénération qui consiste à retrouver les résines plastiques ; et enfin la dernière phase qui représente le recyclage proprement dit qui consiste à utiliser les résines régénérées (granulats, paillettes ou poudre) pour fabriquer de nouveaux produits.

La valorisation chimique : c'est un procédé plutôt récent et expérimental qui est appelé aussi « recyclage matière première ». C'est une transformation physico-chimique qui permet de séparer deux constituants de base. Le but étant d'obtenir un produit chimique de synthèse intermédiaire. Ce procédé reste encore coûteux et applicable sur un très petit nombre de plastiques.

1.4.2.3 L'acier

La récupération et le recyclage de l'acier sont des activités anciennes qui génèrent des revenus non-négligeables. Dans les pays industriels, plus de 70 % de l'acier des biens de consommation arrivant en fin de vie est totalement récupéré. Rien qu'en France, plus de 18 millions de tonnes d'acier sont produites par an. En 1993, l'équivalent de 60 % de la production annuelle (10,3 millions de tonnes) a pu être collecté¹⁰.

L'avantage des aciers lors de la collecte et le tri est le caractère magnétique du matériau qui lui permet d'être attiré par aimantation. Ainsi, après compactage et broyage, les fragments et résidus obtenus sont valorisés en quasi totalité par la sidérurgie et par des fonderies de fonte et d'acier [60].

La collecte de l'acier se fait de diverses manières : le tri sélectif, la récupération à l'incinération, le compostage, ...

La récupération d'acier à l'issue de l'incinération

En sortie d'incinération, le mâchefer résultant possède environ 10% de fractions ferreuses. Il fera l'objet d'un tri magnétique qui permet de sélectionner les fractions dont la teneur en fer est supérieure à 50/60 %. Ce mode de tri fournit 87 % de l'acier récupéré.

⁸ Résidu provenant de la combustion ou de la fusion des minéraux.

⁹ Usines d'Incinération d'Ordures Ménagères

¹⁰ Source : Généralités sur les aciers, ferrailles de collecte, Bernard Gros, Traitement OPECST (<http://www.usinor.com/francais/>).

La récupération d'acier lors du compostage

Dans le compostage, l'acier est récupéré après broyage dans un dispositif de tri magnétique.

La récupération d'acier par collecte sélective

Dans la collecte sélective, les emballages sont mis en « balles » après sélection par tri magnétique.

1.4.2.4 L'aluminium

L'aluminium fait partie des métaux non ferreux dont la particularité est que son recyclage permet la fabrication d' « aluminium secondaire » qui ne présente pas de différences notables par rapport à l' « aluminium primaire » fabriqué à partir de bauxite et d'alumine.

En France, l'aluminium représente environ 0,5 % des déchets ménagers. Malgré le développement des collectes et des techniques de récupération, l'aluminium reste un matériau marginal. Cela est dû à la faible consommation d'aluminium en France en comparaison à d'autres pays. En effet, seulement 30 % des " boites de boisson " sont en aluminium (contre 50 % en Europe, 75 % au Royaume Uni et plus de 90 % aux États-Unis ou en Suède). Cependant, son recyclage présente un intérêt non négligeable dès lors que c'est un moyen de préserver les ressources naturelles comme c'est le cas pour tous les autres métaux non ferreux dont 900 000 tonnes sont recyclées chaque année et toutes les matières premières, plus généralement.

1.4.3 Valorisation des VHU

Comme la montre la Figure 1.10, le cycle de vie d'un véhicule hors d'usage se décompose en plusieurs phases (Source PSA Peugeot-Citroën) [73] :

<i>Production de matériaux</i>	rentrant dans la construction automobile.
<i>Fabrication des équipements</i>	automobiles par des sous-traitants.
<i>Constructions automobiles</i>	puis mise en circulation des véhicules.
<i>Entretien et réparation</i>	automobile durant le cycle de service des véhicules.
<i>Identification</i>	des véhicules hors d'usage.
<i>Dépollution</i>	et désassemblage des véhicules désormais hors d'usage.
<i>Broyage</i>	des VHU pour permettre la valorisation.
<i>Valorisation</i>	des résidus de broyage et mise en décharge des déchets ultimes.

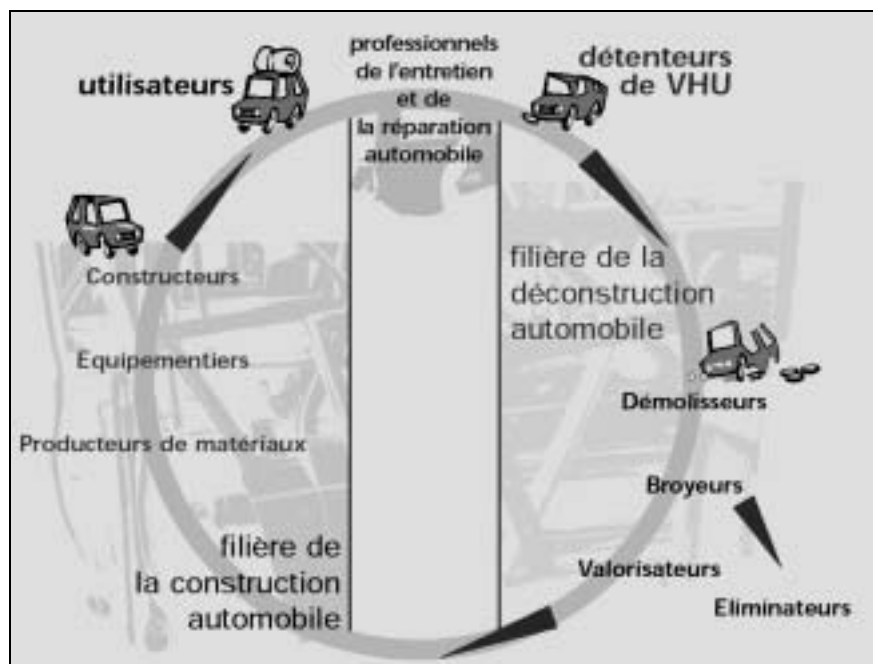


Figure 1.10 : Cycle de vie automobile

La partie droite du cycle représente les filières de la déconstruction automobile qui se fournissent en VHU de 5 sources différentes :

- garagistes 12 à 15%,
- particuliers 10 à 12%,
- concessionnaires des constructeurs 15 à 20%,
- domaines et fourrières 20 à 25% et
- assureurs 30 à 35%.

Après réception des VHU, le rôle des démolisseurs est de dépolluer les véhicules (cf. Figure 1.11, étape 1). Ils en retirent tous les éléments dangereux pour l'aval de la filière et pour l'environnement.

Ils extraient les éléments polluants (carburant, liquide de frein et de refroidissement, huiles, batterie...) ainsi que les éléments pouvant causer une explosion lors du broyage (airbag, réservoir gaz...).

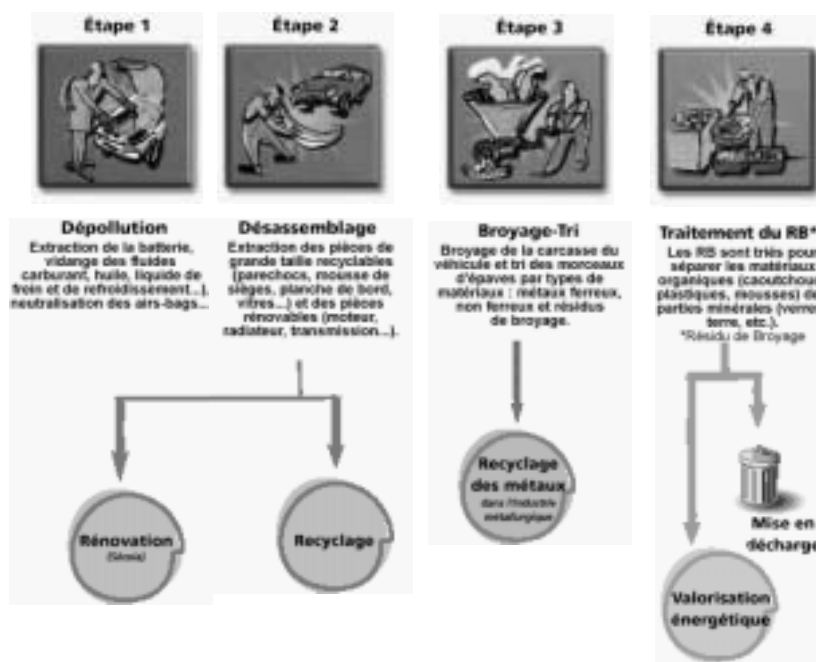


Figure 1.11 : Processus de traitement des VHU [60]

Le démolisseur prélève également des pièces qui peuvent être recyclées, rénovées ou revendues en l'état comme pièces de réemploi, ce qui fait que cette activité soit rentable (cf. Figure 1.11, étape 2).

Ce qui reste des véhicules est livré aux « unités de broyage »¹¹ qui permettent la fragmentation des carcasses en petits morceaux afin d'effectuer un tri ultérieur des différents éléments constitutifs (cf. Figure 1.11, étape 3).

En aval du broyage, les Résidus de Broyage (RB) sont triés afin de retirer la part valorisable de celle destinée à la mise en décharge (cf. Figure 1.11, étape 4). Ce tri est effectué dans des installations spécialisées qui séparent les métaux ferreux et les non ferreux du reste. A titre indicatif, le Tableau 1.1 donne la composition des Résidus de Broyage Automobile en pourcentage du poids total du véhicule.

<i>Résidus de broyage</i>	<i>Composition en % (du poids total)</i>
Caoutchouc	20,0 %
Mousses	21,0 %
Minéraux fins	39,0 %
Métaux	3,5 %
Textiles, papiers, polymères, bois	16,5 %

Tableau 1.1 : La composition des Résidus de Broyage Automobile (RBA)

Nous pouvons citer six filières de valorisation VHU reconnues :

<i>Filières des pneumatiques</i>	Une partie des pneus est rechapée et l'autre est broyée pour être transformée en combustible.
<i>Filières des plastiques</i>	Les pièces plastiques sont utilisées comme combustible en cimenterie à l'exception des pare-chocs en polypropylène (PP) qui sont broyés et recyclés (recyclage matière).
<i>Filières des batteries</i>	Le plomb est extrait, après neutralisation de l'acide, pour le recyclage. Même chose pour les parties plastiques.
<i>Filières des filtres à huile</i>	Les filtres sont broyés : l'huile est isolée et orientée vers la filière des huiles de vidange, les particules métalliques sont recyclées en aciérie, les matières non recyclables sont incinérées.
<i>Filières des huiles de vidange</i>	L'huile est régénérée ou utilisée comme combustible en cimenterie.
<i>Traitement des emballages, chiffons souillés et les résidus de produits</i>	Incinération avec récupération d'énergie.

Comme évoqué précédemment, la proposition de directive émise par la commission européenne à partir de 1996, vise à réglementer et donc à contrôler la collecte, le traitement et la valorisation des véhicules hors d'usage. Les véhicules hors d'usage produisent, chaque

¹¹ Ce sont des installations très puissantes qui broient également des biens de consommation (machines à laver, congélateurs...).

année, huit à neuf millions de tonnes de déchets dans l'union européenne. Une grande partie de ces déchets est classée « déchets dangereux ». En effet, les résidus de broyage représentent entre 25% et 30% du poids du véhicule et forment un mélange disparate de plastique, caoutchouc, verre, textile, peinture, huiles, carton, etc. Ils contiennent des quantités non négligeables de substances dangereuses, tels que les biphényles polychlorés (PCB), essence, huiles pour moteur et boîte de vitesse, fluides hydrauliques, liquides de frein, antigel qui sont particulièrement dangereux pour l'environnement. De plus, les véhicules d'aujourd'hui comportent de plus en plus souvent des circuits d'air conditionné qui contiennent des chlorofluorocarbones (CFC), et des airbags dont les substances explosives peuvent également présenter des risques pour l'environnement et les installations de démontage et de broyage. C'est pour cela que l'union européenne a d'ores et déjà appliqué une réglementation stricte autour de la récupération de ces substances. En pratique, les installations de démontage et de broyage doivent commencer toute procédure de démontage d'un véhicule hors d'usage par une étape de dépollution.

La dépollution se fait en principe avant la mise du véhicule en zone de stockage. Une visite chez un démolisseur se trouvant à Rouen (R.A.S¹²) nous avait permis de vérifier cela. En effet, ce démolisseur veillait à ce que les batteries, les huiles (moteur, boîte et pont), les liquides de frein, les liquides de refroidissement, les liquides lave-glace et les carburants soient bien récupérés du véhicule dès son arrivée à l'établissement. Un panneau rappelant les éléments importants de la dépollution a même été apposé à l'entrée de l'atelier de dépollution, comme le montre la Figure 1.12.



Figure 1.12 : Principaux éléments de dépollution des véhicules hors d'usage

Mais auparavant, l'intérieur du véhicule est débarrassé (papiers, extincteur, etc.) et les airbags et ceintures de sécurité sont neutralisés. Les batteries sont mises dans des bacs étanches (cf. Figure 1.13). Les liquides sont récupérés par aspiration et les plombs d'équilibrage des roues sont eux aussi retirés du VHU comme le montrent les Figure 1.13-a et Figure 1.13-b. La Figure 1.13-c montre aussi le dispositif de récupération des carburants par gravitation une fois que le réservoir est transpercé par la partie supérieure de ce même dispositif. Un entonnoir en caoutchouc assure l'étanchéité de l'opération.

¹² Rouen Automobile Service (<http://www.r-a-s.fr/>)

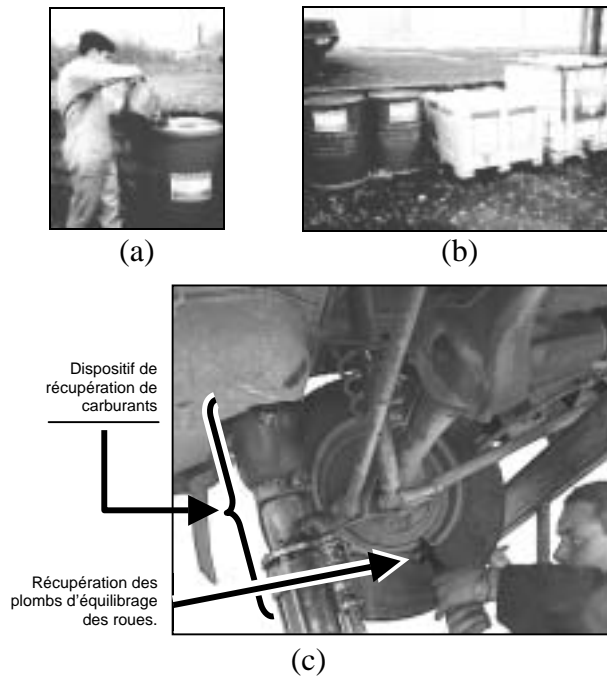


Figure 1.13 : (a) et (b) Bacs étanches pour huiles, batteries, ... ;
 (c) Intervention sur un véhicule hors d'usage lors de la dépollution

Pour ce qui est des véhicules hors d'usage de type GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié), les réservoirs GPL imposent une procédure particulièrement délicate. En effet, le réservoir doit être totalement retiré du véhicule pour être purgé (du gaz) par injection d'azote à l'entrée et par « brûlage » en sortie du réservoir prolongé par le brûleur (*cf.* Figure 1.14). Le réservoir devra être, au préalable, mis à la masse de l'immeuble pour éviter tout risque d'étincelles. La procédure peut prendre, parfois, jusqu'à 12 heures alors que la procédure de dépollution ne prend, en général, pas plus de 30 minutes pour le reste du VHU. Cela est considéré comme un manque à gagner par les démolisseurs qui se résignent quand même et avec beaucoup de raison à respecter cette étape de la dépollution. Une fois la dépollution effectuée, le véhicule sera sujet à un démontage partiel qui consiste à retirer les pièces potentiellement vendables, le reste sera broyé ou encore conservé dans la zone de stockage pour une éventuelle demande d'un client.

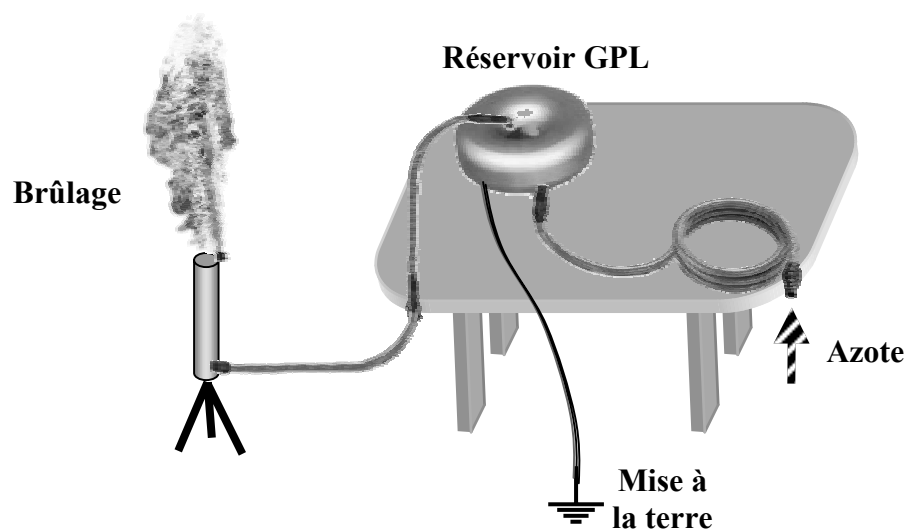


Figure 1.14 : Vidage d'un réservoir GPL

Une fois la dépollution effectuée, le véhicule sera sujet à un démontage partiel qui consiste à retirer les pièces potentiellement vendables, le reste sera broyé ou encore conservé dans la zone de stockage pour une éventuelle demande d'un client.

L'étape de broyage est tout aussi importante en terme d'impact environnemental. Elle est d'ailleurs traitée par la directive européenne sur les VHU. Le dispositif proposé prévoit :

- l'obligation pour le dernier propriétaire d'un VHU de présenter un certificat de destruction attestant que le véhicule a été remis à une installation autorisée de démontage et de traitement ;
- le remboursement, par le constructeur automobile, à partir de 2003, des frais engagés par le dernier propriétaire d'un VHU lors de sa remise à une installation de traitement, si la valeur marchande de ce véhicule ne suffit pas à couvrir les frais afférents ;
- la communication à la Commission des taux de recyclage atteints par les constructeurs, ainsi que l'homologation des nouveaux véhicules sur leur capacité d'être recyclés ;
- la priorité accordée au recyclage, les constructeurs devront donc veiller à ce que les véhicules qui seront conçus à l'avenir soient en mesure de satisfaire aux taux minimaux imposés.

Concernant justement cette responsabilité du producteur plus connue sur le continent américain sous l'appellation de "*Product Stewardship*", le parlement européen a finalement adopté le texte final de la directive sur les véhicules hors d'usage le 7 septembre 2001. Ainsi, le principe du « Pollueur-Payeur » a été finalement clairement défini. La responsabilité porte dès lors non seulement sur les taux de "recyclabilité" des véhicules mis sur le marché mais aussi sur le traitement des métaux lourds contenus dans les véhicules. Dans ce sens, il a été exigé que toutes les nouvelles voitures mises sur le marché après le 1^{er} juillet 2003 ne contiennent plus de métaux lourds, à savoir le plomb inclus dans les batteries, le chrome hexavalent utilisé pour prévenir la corrosion, le cadmium et le mercure. Il y a eu tout de même un certain nombre d'exceptions *a priori* pour des raisons technologiques. Mais auparavant, il a été interdit dès le 1^{er} juillet 2002 de broyer, de mettre en décharge ou d'incinérer du mercure ainsi que de mettre du plomb, du cadmium ou du chrome hexavalent en décharge [18]. Le Tableau 1.2 montre les dates importantes dans le planning de la directive européenne.

	Traitement des VHUs	Substances réglementées
2001		Localisation des substances
2002	Reprise gratuite du VHU à son dernier détenteur (pour les nouveaux véhicules)	
2003	Homologation des nouveaux véhicules	Interdiction / limitation du Pb, Hg, Cd, Cr ⁶⁺ pour tous les véhicules vendus
2005	Homologation des nouveaux véhicules pour 95% de valorisation dont 85% recyclage / réemploi.	
2006	Objectifs de valorisation pour les VHU fixés à 85% de valorisation dont 80% recyclage / réemploi	
2007	Reprise gratuite du VHU à son dernier détenteur pour tous les véhicules	
2015	Objectifs de valorisation pour les VHU fixés à 95% de valorisation dont 85% recyclage / réemploi	

Tableau 1.2 : Principaux éléments de la directive européenne sur les VHU

1.4.4 Stratégies de valorisation

La bonne gestion de la phase fin de vie des produits passe d'abord par l'étude et la réalisation des bons moyens de valorisation de ces produits. La partie ci-dessous représente une tentative de typologie générique des options fin de vie des produits qui déterminent les stratégies à adopter par les établissements de traitement des déchets et des produits en fin de vie. Il y sera mis en évidence les différentes nuances terminologiques retrouvées dans la littérature.

1.4.4.1 Réparation

Le but de la réparation est de ramener un produit usagé à son état fonctionnel (bouteilles) ou/et de marche normale (lave-linge, réfrigérateur,...). C'est, en quelque sorte, prolonger la durée de vie du produit avant qu'il ne devienne définitivement inutilisable dans sa fonction initiale. En général, la remise en état exige simplement le remplacement, la remise en état ou le nettoyage des pièces défectueuses ou hors service. Par exemple, la consigne des bouteilles (à nouveau remplies après leur nettoyage) est tout ce qu'il y a de plus classique comme réemploi.

Pour les gros produits manufacturés comme les VHU, les termes « **rénovation** » ou « **remise à neuf** » sont plus utilisés. Cela consiste à ramener un produit usagé à un état de marche après un processus de rénovation, en général par la décomposition en modules fonctionnels du produit et suivi par des réparations modulaires [40][41]. Cela impose un démontage et remontage du produit ponctués par des contrôles d'état et de qualité. Quand le produit usé demande un démontage quasi-total de ses constituants, on parle alors de « **re-production** ».

1.4.4.2 Valorisation constitutive

La valorisation constitutive consiste en l'extraction de constituants (pièces ou modules fonctionnels) qui peuvent à l'occasion être réutilisés dans la re-production, on parle alors de « **réemploi** », ou encore pour un usage différent de celui initialement attribué, on parle alors de « **réutilisation** ». L'exemple le plus commun est la récupération de pneus usagés de voiture pour protéger la coque des barques ou des chalutiers. On trouve souvent dans la littérature (généralement francophone) sur le recyclage et la valorisation le terme « **cannibalisation** » qui nous paraît assez opportun pour ce type de valorisation [10] [22] [38][39]. Dans tous les cas, la cannibalisation nécessite un désassemblage sélectif du produit et un diagnostic précis des constituants potentiellement réutilisables.

1.4.4.3 Valorisation matière

La valorisation matière n'a pas pour but de garder la fonctionnalité première des produits ou des composants, ni même de conserver l'identité du produit mais plutôt de réutiliser les matières constituant celui-ci. La valorisation matière repose sur des procédés qui peuvent être physiques ou chimiques, procédés dans lesquels sont démontés et séparés en diverses catégories de fractions et selon les matières employées les produits issus en général des installations de valorisation constitutives. Un exemple est donné par les carcasses de VHU issues des démolisseurs en partance des broyeurs qui se chargent de la valorisation matière. On parle aussi de « **régénération** » quand il s'agit, par exemple, de traiter les huiles usées, les solvants, ou le papier. Un autre exemple est la collecte et la refonte des bouteilles usagées pour en faire des bouteilles neuves.

1.4.4.4 Valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à utiliser les calories contenues dans les déchets (résidus de broyage, déchets ménagers, ...), par des processus d'incinération pour, par exemple, chauffer des immeubles ou produire de l'électricité. En effet, la « matière déchet » a un pouvoir calorifique élevé (mesuré par l'indice de pouvoir calorifique, le PCI). La récupération de chaleur provient moins de la chaleur dégagée par le four, que du processus de refroidissement des gaz. Ces derniers (qui sont à 800/1100° en chambre de combustion) doivent être refroidis à 250/300° pour être traités par les procédés appropriés de filtrage. Le refroidissement a lieu à l'aide de tubes de refroidissement sur lesquels coulent de grandes quantités d'eau qui se transforment en vapeur, par le contact avec la chaleur du four (d'où les fameux panaches de fumée blanche, en sortie de cheminée). La valorisation énergétique reste la dernière alternative pour réduire la quantité de déchets ultimes mise en décharge. Par la vente de l'énergie, elle permet de diminuer de 20 % le prix du traitement des déchets urbains.

1.5 Conclusion

Notre étude sur la valorisation des produits en fin de vie nous montre le besoin grandissant d'organisation globale et intégrée de la phase de fin de vie des produits hors d'usage. La fabrication éco-sensibilisée représente un véritable outil de travail pour l'intégration de ces spécificités de recyclage et de valorisation dans la conception des nouveaux produits et de leur processus de fabrication, de distribution, de mise en vente, etc. Le développement des filières de valorisation est un pré-requis fondamental. Il viendra consolider et valider toutes les activités autour de la conception des systèmes de désassemblage nécessaires à la plupart des options fin de vie des produits. Il est évident que bon nombre d'hypothèses devront être faites sur les différentes destinations fin de vie possibles des produits. Les choix de stratégies de fin de vie qui en découlent ne peuvent rester génériques et insensibles aux particularités de chaque type de produit en fin de vie. C'est d'ailleurs dans cette optique qu'une partie des recherches dans ce manuscrit seront orientées « véhicules hors d'usage ». Plusieurs autres raisons à ce choix seront présentées tout au long des chapitres suivants. Le chapitre suivant est consacré à l'existant en terme de systèmes de désassemblage.

Chapitre 2 :

ANALYSE DES SYSTEMES DE DESASSEMBLAGE

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse de l'existant sur les systèmes de désassemblage. Nous allons voir dans la première section que le contexte du désassemblage conditionne fortement les choix de conception des systèmes de désassemblage ; notamment les choix sur le degré d'automatisation, l'organisation hiérarchique et fonctionnelle de ces systèmes et le type de désassemblage envisagé. Nous avons consacré, pour ces points, la section suivante où un certain nombre de travaux de recherche seront présentés. Il sera notamment question de flexibilité des systèmes de désassemblage. Cette notion sera définie en fonction de ce qu'est la flexibilité dans les systèmes d'assemblage. Par ailleurs, de nombreuses définitions seront présentées tout au long de cette section pour permettre la compréhension de notre méthode de conception des systèmes de désassemblage présentée dans les chapitres 4 et 5.

2.2 Contexte actuel du désassemblage

La problématique des industries manufacturières en production réside essentiellement dans l'optimisation globale des trois critères clefs : coût, qualité, délai. L'objectif des concepteurs est donc de concevoir des produits permettant une telle optimisation. C'est déjà là une tâche difficile, mais elle s'est trouvée alourdie par l'obligation qui est faite depuis quelques années, d'étudier les possibilités de recyclage et de réutilisation des produits fabriqués. Il est évident que ces possibilités reposent largement sur l'aptitude des produits à être désassemblés tout ou partie, à moindre coût, que se soit pour la réutilisation, le recyclage ou encore la mise au rebut.

2.2.1 Qu'est ce que le désassemblage ?

Le désassemblage doit être pensé comme étant un processus. Il est représenté par un ensemble d'activités organisées dans le temps et ayant des objectifs de haut niveau (certification ISO 14001, économie sur les matières premières, ...). Dans le même ordre d'idée, L. Brennan définit le désassemblage comme étant un processus de récupération systématique des constituants¹³ cibles dans un assemblage avec la garantie qu'aucun préjudice fonctionnel ne sera apporté aux pièces par le processus [06]. Nous proposons la définition suivante :

Définition 2.1 : Le désassemblage

Le désassemblage est un processus de récupération planifié des éléments constitutifs d'un produit manufacturé pour lequel les caractéristiques mécaniques, fonctionnelles et de fin de vie doivent être préalablement identifiées.

Par ailleurs, le désassemblage peut être requis pour le changement de pièces dans une démarche de maintenance.

¹³ Un constituant est soit un composant élémentaire, soit un sous-ensemble de composants.

2.2.2 Pourquoi le désassemblage ?

Dans le cas de la réparation et de la maintenance, le contexte actuel ne permet pas de prédire, de manière précise, un développement des systèmes de désassemblage. Tel n'est pas le cas de la valorisation en fin de vie pour laquelle de plus en plus de produits manufacturés sont concernés. Le désassemblage est souvent une opération plus coûteuse que rentable. Mais, avec la mise en place des lois et normes sur l'environnement et la gestion des déchets, la valorisation est en train de devenir incontournable et le désassemblage rentable devient plus que jamais nécessaire. Cela est accentué par la réduction de la durée de vie des produits et par le fait que certains produits de consommation tendent à devenir jetables. En effet, la réparation, de nos jours, coûte presque aussi chère que l'achat d'un produit neuf.

Par conséquent, le démontage planifié d'un produit manufacturé pour la récupération de fractions en prenant compte des caractéristiques mécaniques, fonctionnelles et de fin de vie semble être un moyen d'espérer une rentabilité. Il en va de même dans le domaine de l'assemblage¹⁴ où il faut trouver un très bon processus d'assemblage en fonction du système considéré pour que le produit fini soit obtenu avec la plus grande valeur ajoutée possible. Voyons donc les points communs que possèdent l'assemblage et le désassemblage.

2.2.3 Assemblage/désassemblage : comparaison

Il est intéressant d'analyser les similitudes entre la démarche d'assemblage et celle de désassemblage. L'assemblage consiste en un ensemble d'opérations d'agrégation de constituants pour l'obtention d'un produit fini, et ce selon une multitude de configurations possibles. Le désassemblage peut être présenté de la sorte en l'assimilant aussi comme à un système de production pour lequel les objets en entrée sont les produits en fin de vie et les objets en sortie sont les pièces récupérées à destination des filières de recyclage, de la mise en décharge, de la revente après re-conditionnement, etc. Les opérations deviennent alors des opérations de désagrégation. Par ailleurs, il n'est pas déraisonnable de considérer que le processus de désassemblage peut être obtenu par inversion du processus d'assemblage. De nombreux travaux en assemblage ont été, d'ailleurs, basés sur ce principe de réversibilité entre l'assemblage et le désassemblage notamment pour la recherche des processus de désassemblage en vue de la génération des processus d'assemblage [30] [45] [42]. Cependant, la réversibilité de l'assemblage reste une « hypothèse forte » particulièrement quand il s'agit de transcrire des processus d'assemblage en processus de désassemblage.

La non-homogénéité des processus de désassemblage (par opposition à l'assemblage) pose des problèmes de conception car cela requiert une grande flexibilité du système de désassemblage. En effet, les produits à désassembler peuvent être très différents les uns des autres et présentent, en plus, des niveaux de détérioration très disparates. Les opérations de désassemblage peuvent s'avérer difficiles à réaliser. En assemblage, les constituants sont dans un état neuf ; et la probabilité de réussir chaque opérations est proche de 1. Par ailleurs, l'assemblage est un processus total dans lequel tous les composants élémentaires¹⁵ doivent être assemblés tandis que le désassemblage est souvent partiel. Il ne garantit pas la restitution de tous les éléments constitutifs du produit en fin de processus. Un autre aspect très important en désassemblage, est que l'utilisation de procédés de solidarisation irréversibles rend l'opération de désolidarisation impossible ou du moins risquée. Le désassemblage doit alors être totalement ou partiellement destructif. Cela peut d'ailleurs s'avérer profitable dans

¹⁴ L'assemblage consiste en un ensemble d'opérations d'agrégation de constituants pour l'obtention d'un produit fini.

¹⁵ Les composants élémentaires sont les éléments d'un produit considérés comme étant les composantes les plus petits insécables.

certains cas où le coût du temps opératoire de désassemblage n'est pas au moins compensé par la valeur des éléments récupérés.

En conclusion, la symétrie entre l'assemblage et le désassemblage n'est qu'apparente car leurs objectifs et leurs caractéristiques sont différents comme le montre le tableau ci-dessous qui reprend certaines différences selon Chirag Modi B.E. [12].

	Assemblage	Désassemblage
Objectif	Réaliser une fonction d'un produit fini	Récupération de fractions cibles
Conditions opératoires	<ul style="list-style-type: none"> • Tous les composants doivent être réunis. • Aucune détérioration des composants n'est tolérée. • Le nombre d'unités (produits) est défini. • Connaissance de toute la variété du produit assemblé. • La précision est primordiale. • Maîtrise de la qualité. • L'assemblage doit être complet. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'intégrité structurelle du produit n'est pas capitale. • L'altération partielle ou totale des composants est possible. • Le nombre d'unités est sporadique (surtout pour certains types de produits). • Il y a méconnaissance de toutes les variantes d'un produit. • L'imprécision est acceptable. • La qualité est secondaire. • La rentabilité d'un désassemblage total est exceptionnelle.

Tableau 2.1 : Comparaison entre l'assemblage et le désassemblage

2.3 Vision systémique du désassemblage

Cette partie a pour but la description systémique du désassemblage permettant par la suite d'étudier la conception des systèmes de désassemblage.

2.3.1 Définitions

Le désassemblage peut être matérialisé par un système de production au même titre que le système d'assemblage. Celui-ci a été défini par J.M. Henrioud [28] et repris dans plusieurs travaux de recherche. En particulier par F. Touzanne [60] qui avait proposé une transposition du système d'assemblage au système de désassemblage de laquelle découle la définition suivante :

Définition 2.2 : Système de désassemblage

Un *système de désassemblage* est un système de production dont l'objectif est la récupération totale ou partielle des éléments constitutifs d'un ou plusieurs produits manufacturés en fonction de leurs destinations de fin de vie respectives.

Il se définit, par conséquent, par un système multivariable animé de p flux Φ_i^e ($i = 1, \dots, p$) en entrée portant sur des objets P_i et q flux Φ_j^s ($j = 1, \dots, q$) en sortie portant sur des objets C_j (cf. Figure 2.1). Les objets P_i désignent les produits manufacturés en phase de maintenance (réparation ou entretien de routine) ou ceux arrivés en fin de vie. Ces derniers suivent alors une phase de valorisation. Une phase importante après laquelle seule les déchets ultimes sont mis en décharge. Les objets C_j sont appelés *constituants finaux*. Nous les appellerons aussi les *fractions cibles*. Ce sont les éléments cibles pour lesquels il faut optimiser la récupération depuis les produits P_i . Initialement, ces fractions cibles sont soit des composants élémentaires ou encore des sous-assemblages. Chaque objet C_j est le résultat de la séparation de tout ou d'une partie des objets P_i . Les objets, qui existent à un instant donné et qui sont issus des transformations successives du produit P_i sont appelés *constituants intermédiaires*.

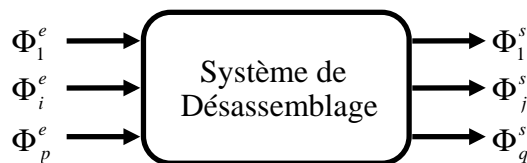


Figure 2.1 : Représentation systémique du désassemblage

Chaque transformation du produit visant à obtenir des constituants intermédiaires se rapprochant de ou des constituants finaux est dite *opération de désassemblage*.

Définition 2.3 : Opération de désassemblage

Une *opération de désassemblage* est une transformation d'un constituant en un ou plusieurs autres constituants en les rapprochant des fractions cibles.

En conséquence, l'opération de désassemblage sous-entend la connaissance du constituant de départ et ceux obtenus après transformation (dévissage, séparation, ...). Le temps d'exécution et les ressources nécessaires sont aussi des éléments devant être identifiés et ce selon le type de l'opération. D'ailleurs, F. Touzanne [60] a fait une tentative concluante d'identification des différents types d'opérations se produisant dans un système de désassemblage en s'inspirant d'une typologie des opérations en assemblage (voir [j4]§4.2.1.1).

Cela nous amène à définir le *processus de désassemblage* comme suit :

Définition 2.4 : Processus de désassemblage

Un *processus de désassemblage* d'un produit P_i est l'ensemble ordonné d'opérations menant à la production de flux identifiés en temps et affiliés en ressources pour l'obtention de fractions cibles¹⁶.

Un *système de désassemblage* est donc un ensemble de ressources permettant la réalisation d'un ou plusieurs processus de désassemblage.

¹⁶ Cette définition se veut respectueuse de la définition générique d'un processus de T.H. Davenport [DAVEN93]: « un processus se définit comme étant un ordonnancement d'activités à travers le temps et les lieux, ayant un début et une fin, avec des entrées et des sorties clairement définies. ».

2.3.2 Degré d'automatisation

Le désassemblage manuel est une méthode coûteuse car grandement liée aux coûts salariaux de main d'œuvre ; pourtant, elle reste la plus efficace pour obtenir une pureté convenable des matières, des fractions cibles les plus rentables, un niveau de détérioration (destruction) très bas et une réactivité et flexibilité aux aléas (durant le processus de désassemblage). Il est aussi concevable d'effectuer, à l'aide d'un système manuel, un désassemblage total. Un système automatisé ne permet généralement pas d'obtenir un niveau élevé de désassemblage, notamment pour les produits complexes. Cependant, il permet de raccourcir les délais opératoires de manière notable. Il faut remarquer, aussi, que très rares sont les cas où un niveau de désassemblage élevé est rentable. K. Feldmann [19][20] résume cette situation par la Figure 2.2. De plus, les coûts de désassemblage à moyen et long terme (en comptant l'investissement sur le système automatisé) semblent moins importants que pour un désassemblage manuel. Par ailleurs, l'augmentation actuelle du nombre de produits à désassembler n'encourage pas la voie du désassemblage manuel. En effet, les systèmes manuels ne semblent pas adaptés pour une valorisation en grande quantité. Pourtant, seul ce type de système est raisonnablement envisageable pour des raisons technologiques.

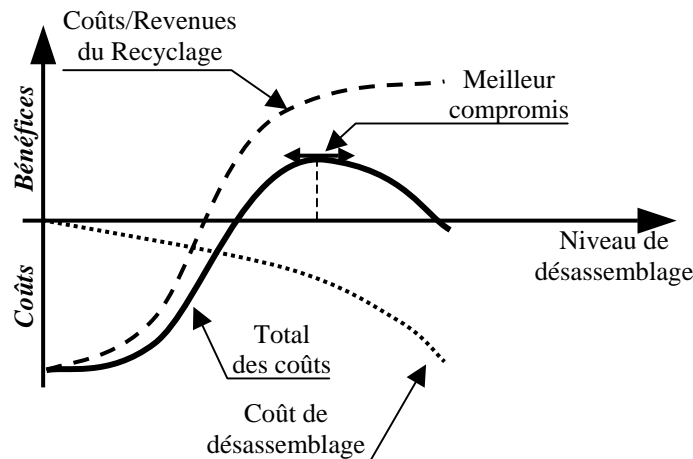


Figure 2.2 : Niveau de désassemblage : un compromis entre le taux de valorisation et les coûts de désassemblage

Il n'est donc pas déraisonnable d'envisager un certain degré d'automatisation lors de la conception des systèmes de désassemblage. Cela est déjà réalisé pour les produits verts. Ces derniers sont des produits conçus pour le respect de l'environnement pendant les différentes phases de son cycle de vie. Ils satisfont les contraintes législatives et permettent de faciliter la valorisation via une grande désassemblabilité. Ce qui n'est pas le cas des produits conventionnels pour lesquels il faut prévoir un degré d'automatisation moins important comme le montre la Figure 2.3.

Les difficultés d'automatisation vont principalement provenir des modifications de structure et des dégradations éventuelles subies par le produit pendant sa durée de vie. Ces modifications vont entraîner des problèmes d'accessibilité pour les robots et de préhension des composants. Cela demandera un haut niveau de flexibilité, des systèmes de vision performants, une politique de sûreté de fonctionnement réelle, etc.

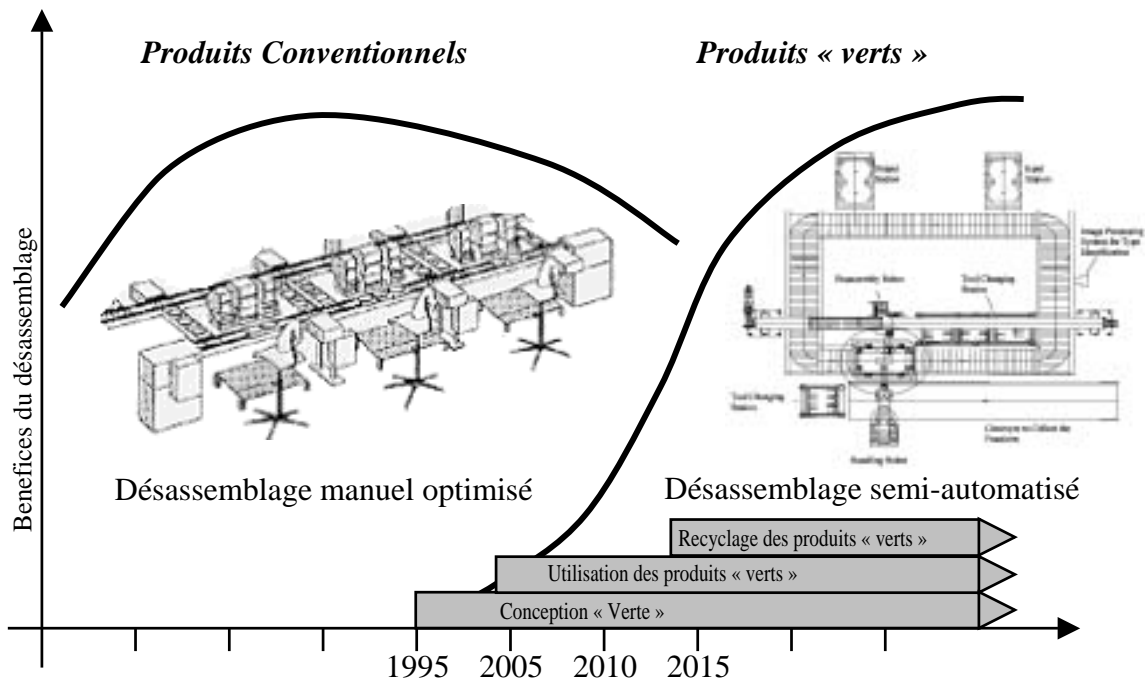


Figure 2.3 : Evolution du degré d'automatisation [60]

2.3.3 Automatisation : de l'assemblage au désassemblage

Pourquoi cette comparaison ? Il est évident que les procédés de désassemblage ne sont pas totalement similaires à ceux de l'assemblage mais une grande majorité semble identique et basée sur des technologies proches. De plus, s'agissant d'un système de production, le choix du degré d'automatisation semble le même pour le désassemblage et l'assemblage.

Par conséquent, nous nous sommes penchés sur les différentes configurations des systèmes d'assemblage pour apprécier la réalisabilité et, ensuite, la viabilité de l'automatisation d'un système de désassemblage. Ces différentes configurations ont été abordées très tôt par G. Boothroyd et P. Dewhurst du Département de Génie-Mécanique de l'Université de Massachussetts [03]. Ils distinguent trois grandes classes de systèmes d'assemblage : les systèmes d'assemblage manuel, les systèmes d'assemblage automatisés spécialisés et les systèmes d'assemblage automatisé programmables (flexibles). Nous distinguons, à notre tour, les systèmes d'assemblage semi-automatisés.

2.3.3.1 Systèmes manuels

Cette classe de systèmes d'assemblage va du manuel intégral au manuel assisté. Dans le premier cas, l'homme réalise absolument toutes les tâches. Cela va de l'approvisionnement à la mise en stock en passant par le montage et le contrôle. Dans le deuxième cas les transports sont remplacés par des dispositifs de transfert ou même des distributeurs de composants spécialisés. L'opérateur se retrouve généralement en poste fixe (cf. Figure 2.4).



Figure 2.4 : Poste d'assemblage manuel pour rasoirs électriques¹⁷

Avantages :

- ↪ outils requis plus simples et peu onéreux,
- ↪ temps d'arrêt dus aux pièces défectueuses négligeables,
- ↪ flexibilité et adaptabilité remarquable,

Inconvénients :

- ↪ la régularité de la qualité du produit n'est généralement pas assurée,
- ↪ la productivité est limitée,
- ↪ la réduction du temps ne peut être espérée sans envisager une assistance mécanique à l'opérateur,
- ↪ le coût d'assemblage par produit est pratiquement indépendant du volume de production.

Les systèmes appartenant à cette classe sont très flexibles. Il est cependant nécessaire d'équilibrer au mieux la charge de travail des opérateurs, afin de limiter les temps d'improductivité [60]. Cela implique une planification ardue, changeante et continue.

Pour ce qui est du désassemblage, la grande flexibilité des opérateurs humains est un atout majeur auquel viennent s'opposer l'irrégularité de flux de produits entrant, la difficulté de certaines opérations pour l'opérateur et la nécessité d'une supervision continue et complexe des processus de désassemblage.

2.3.3.2 Systèmes semi-automatisés

Les opérations d'assemblage sont effectuées par des machines automatiques pour lesquelles les alimentations et évacuations de constituants sont assurées par des opérateurs humains. Quant aux transferts, ils sont réalisés dans la plupart des cas par des dispositifs de transfert automatisés (cf. Figure 2.5).

¹⁷ Philips ©



Figure 2.5 : Machine semi-automatisée avec un dispositif de transfert pour le montage des culasses chez KLOTZ®

Avantages :

- ↪ la cadence de production est plus élevée, ce qui permet une plus grande productivité et, le plus souvent, un retour sur investissement rapide,
- ↪ le coût unitaire décroît proportionnellement avec la croissance en volume de la production.

Inconvénients :

- ↪ les machines sont chères,
- ↪ elles impliquent un coût et un temps de développement très importants,
- ↪ les arrêts dus aux composants défectueux peuvent être un problème sérieux,
- ↪ les machines ne présentent aucune flexibilité en production dans le sens où elles sont conçues pour travailler pendant un cycle de temps fixe et très souvent sur un même modèle du produit,
- ↪ en sous-utilisation, elles ne peuvent être réutilisées pour une autre production ; il en résulte un accroissement du coût d'assemblage,
- ↪ les conditions de travail de l'opérateur restent difficiles.

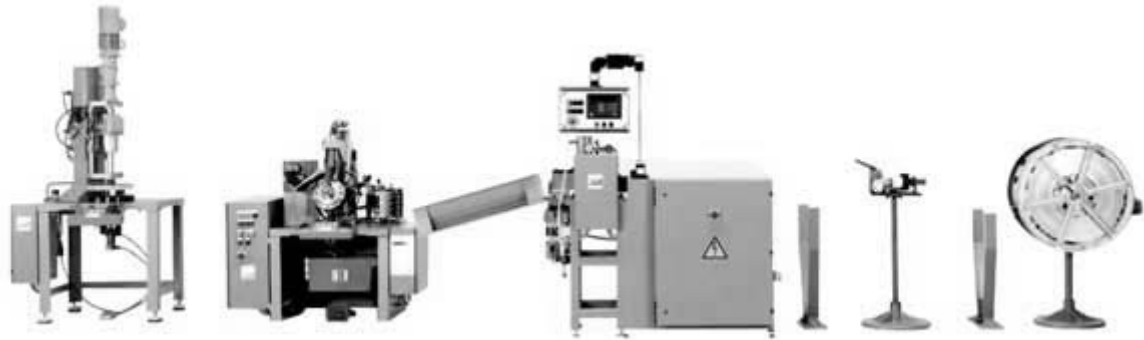
Pour ce qui est du désassemblage, l'introduction de certains postes automatisés pour des opérations de désassemblage technologiquement faisables peut s'avérer complexe. L'équilibrage des charges et des lignes n'en est pas moins ardu. Economiquement, de tels systèmes (pour le désassemblage) ne semblent devoir être viables avant quelques années.

2.3.3.3 Systèmes automatisés

Deux classes de systèmes automatisés peuvent être distinguées en fonction du critère de flexibilité. Les systèmes automatisés spécialisés (très peu flexibles mais grande cadence) et les systèmes automatisés programmables ou robotisés (grande flexibilité).

L'assemblage automatisé spécialisé

Ce sont des systèmes rigides composés de machines hautement dédiées entourées de dispositifs de transfert indexeurs ou libres (cf. Figure 2.6-c-) et de distributeurs de composants (cf. Figure 2.6-b-). Ces systèmes conviennent pour la production de grandes séries (cf. Figure 2.6-a-).



–a– Unité de production Semi-automatique pour la fabrication d’anneaux ornementaux et de revêtements.



–b– Dispositif d'alimentation de bandes en acier automatique (alimentation dédiée)



–c– Équipement de transport de bandes en acier (transfert libre)

Figure 2.6 : Unité d’assemblage automatisée avec transfert libre et une alimentation dédiée, chez KLOTZ®

Avantages :

- ↪ la cadence de production est plus élevée, ce qui permet une plus grande productivité et, par conséquent, un retour sur investissement rapide,
- ↪ le coût d’assemblage par produit décroît proportionnellement avec la croissance en volume de la production.

Inconvénients :

- ↪ la sensibilité aux aléas de production peut entraîner des arrêts de production coûteux,
- ↪ les machines sont chères,
- ↪ elles ne présentent aucune flexibilité.

L’assemblage automatisé programmable

Les systèmes d’assemblage programmables sont des systèmes flexibles composés de stations robotisées munies de systèmes de contrôle sophistiqués. Ces systèmes d’assemblage sont principalement utilisés pour les productions évolutives et multi-produits. En effet, ce sont des systèmes qui présentent des possibilités de (re)programmation et/ou (re)configuration des équipements mais aussi de réorganisation des postes d’assemblage dans un même atelier tout en optimisant les temps de réglages et les flux de constituants et d’outillages. De tels systèmes sont appelés S.F.A (Systèmes Flexibles d’Assemblage). L’homme devient un superviseur qui n’intervient que lorsque surviennent des problèmes face auxquels le système est incapable de réagir.



Figure 2.7 : Lignes d'assemblage (Ilots robotisés, soudure SR/MAG) pour unité arrière T16 (Peugeot® Cabriolet 206)

Avantages :

- ↗ grande flexibilité de production (planification, pilotage, multi-produits,...),
- ↗ grande productivité,
- ↗ c'est un mode d'assemblage qui permet une bonne adaptabilité aux modifications de conception et surtout aux aléas de production.

Inconvénients :

- ↗ les machines sont chères, ce qui implique un amortissement uniquement à long terme,
- ↗ en sous-utilisation, le système est extrêmement onéreux,
- ↗ ce sont des systèmes nécessitant une fabrication par lot si les temps de reconfiguration de ses équipements sont longs,
- ↗ ces systèmes sont peu répandus car ni la standardisation des moyens de distribution ni des préhenseurs n'est actuellement maîtrisée.

Dans le cas du désassemblage, un système entièrement automatisé programmable serait l'idéal pour une production de masse rentable. Cependant, actuellement, le volume des produits à désassembler n'est pas suffisamment important en regard des coûts d'investissement et d'amortissement des équipements robotisés et automatisés que constitue le système de désassemblage automatisé. Un tel système serait envisageable dans les 10 à 15 ans à venir où les possibilités technologiques seront plus grandes.

2.3.3.4 Systèmes de désassemblage actuels

Les arguments en faveur de l'automatisation des systèmes de désassemblage sont principalement :

- a) Dangerosité de certaines pièces et matières récupérées,
- b) Importance grandissante du volume de produits en fin de vie à traiter,
- c) Sûreté dans les processus de désassemblage,
- d) La cadence de travail attendue des systèmes de désassemblage afin d'amorcer l'industrie de la valorisation en fin de vie.

C'est à partir de ces constats que l'on peut faire des compromis sur le degré d'automatisation des systèmes de désassemblage. Actuellement, le désassemblage manuel est celui en vigueur dans la plupart des sites industriels spécialisés dans la récupération des produits usagés complexes. Parmi eux se trouvent les produits domestiques qui sont dits selon le cas : produits blancs (machines à laver, lave-linge, réfrigérateurs, ...), produits bruns (Téléviseurs, chaînes Hi-fi, ...) ou encore produits gris (Imprimantes, ordinateurs, installations serveur, ...). Cette prédominance totale du désassemblage manuel en industrie s'explique par le volume faible (pour l'instant) de ces produits par rapport aux coûts d'investissement et d'utilisation des techniques plus automatisées. Rappelons-le, la petitesse du volume concerne les **produits collectés** ! Tel n'est pas le cas du volume des produits manufacturés arrivant en fin de vie ! D'un autre côté, les bénéfices du démontage ne s'expriment pas encore sous la forme de profits financiers, mais plutôt par leur influence sur les marchés de l'occasion, celui des pièces détachées (marchés secondaires) et celui des matières premières [40]. Les aspects technologiques qui retardent l'apparition de systèmes vraiment **industriels** de désassemblage sont, par ailleurs, la multitude de variétés de produit spécifiques, les états divers et incertains des produits en fin de vie, la méconnaissance parfois des composants standardisés, des techniques de solidarisation irréversibles¹⁸ et surtout les outils de désassemblage actuels qui sont souvent inadéquats.

Nonobstant l'inexistence absolue de systèmes **industriels** de désassemblage automatisés, quelques unités de recherche ont mis en place des systèmes **expérimentaux** dont les plus accomplis sont présentés ci-dessous.

Le premier système de désassemblage est réalisé à *PRIELOG Logistik GmbH* (Allemagne) [55]. Il s'agit d'une cellule de désassemblage robotisée flexible composée d'un robot de désassemblage, de deux stations d'entrée/sortie des produits en fin de vie, de deux stations de changement d'outils, d'un convoyeur pour la collecte des fractions cibles et d'un système de vision pour l'identification des produits entrants dans la cellule (*cf.* Figure 2.8). Les produits traités sont principalement des téléviseurs desquels sont prélevés le tube cathodique, les déflecteurs, les cartes imprimées et les câbles. La cellule est capable de récupérer ces éléments en 5 à 7 minutes, et ce en prenant en compte un certain nombre d'incertitudes sur l'état de la structure du produit et de celui des composants.

¹⁸ L'irréversibilité caractérise ces solidarisations qui doivent être détruites pour la séparation d'éléments constitutifs au risque de détériorer ces derniers.

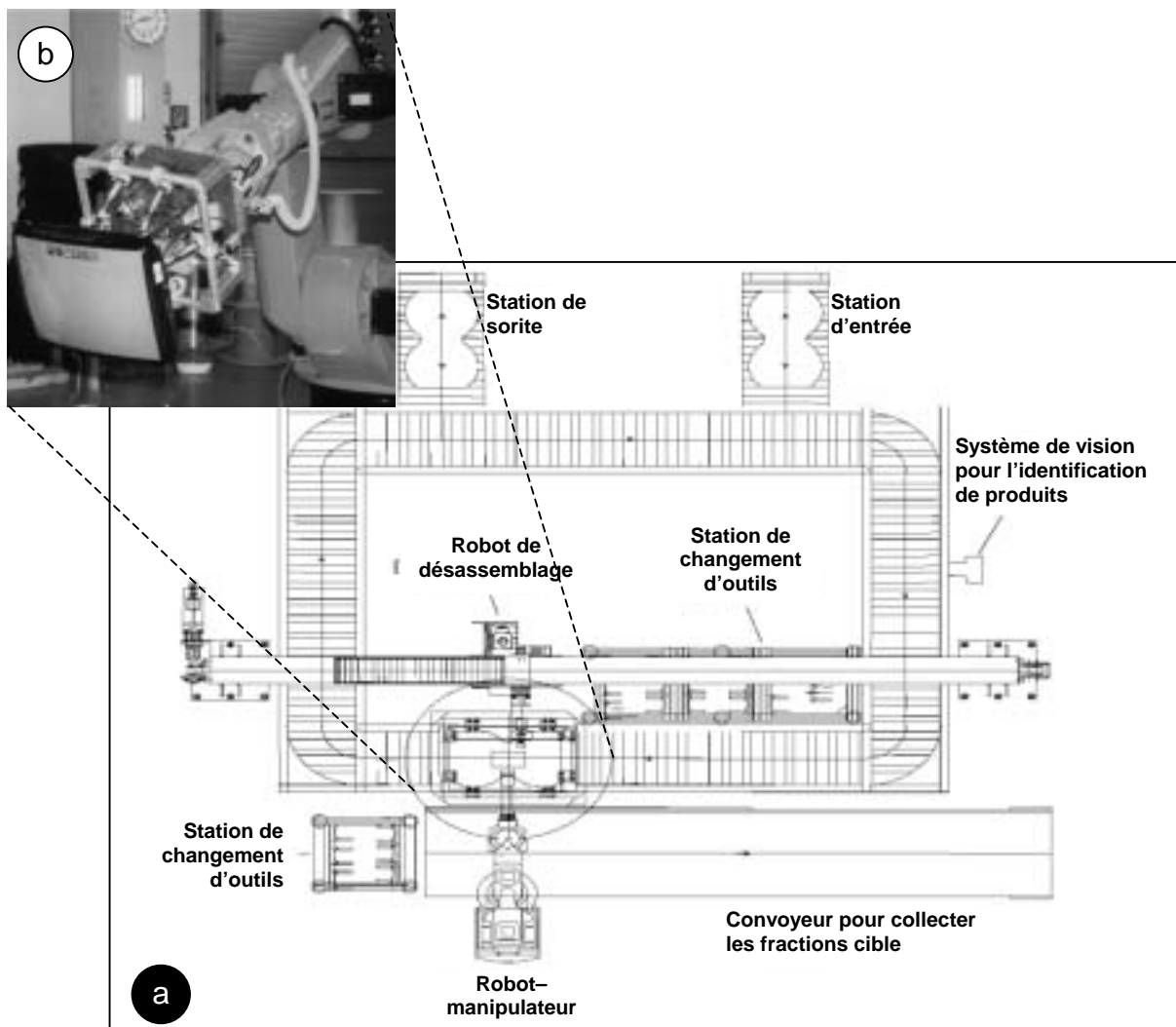


Figure 2.8 : Cellule de désassemblage automatique d'écrans de visualisation (TV/moniteurs)

La plus importante composante logicielle du système est le module d'adaptation du processus de désassemblage (*Disassembly Program Adaptation*). Elle permet de réadapter le processus de désassemblage en fonction des caractéristiques nouvelles et inattendues du produit traité et ce par la mise en place de deux types de bases de données appelées Modèle de données statiques et dynamiques. Le modèle statique porte sur les modèles de produits hors d'usage que l'on veut traiter, les données système (de la cellule) et tous les processus possibles de désassemblage préalablement intégrés. Le modèle dynamique regroupe les incertitudes sur l'état du produit et celles sur le résultat de chaque processus de désassemblage. Un des cas pris en compte est la correspondance d'outils aux différents types de solidarités possibles entre le capot et le corps du téléviseur. En effet, le système de vision vérifie le type de vis utilisé – par le biais d'un traitement d'images dédié – et met à jour le modèle dynamique qui permettra au module d'adaptation du processus de désassemblage de réagir en conséquence. Ce module est basé sur un formalisme d'optimisation via une représentation par réseaux de Petri intéressant.

Une autre équipe du Département de Génie Electrique de l'Université de Paderborn (Allemagne) a mis en place un poste de désassemblage expérimental constitué d'un système de vision stéréoscopique (cf. Figure 2.9 –a–), de capteurs de couples et d'un robot à six axes muni d'un outil de dévissage spécialisé (cf. Figure 2.9 –b–). Les recherches ont porté sur la réactivité d'un système basé sur la vision pour faire face aux états incertains des produits traités. Des expérimentations ont été effectuées sur des roues automobiles [08]. Celles-ci présentaient des reliefs sur les jantes rendant la détection des écrous difficile. Un grand effort a été fourni pour la partie vision au détriment de la problématique de la standardisation des changements d'outils. Néanmoins une démarche de planification des opérations a été menée pour pallier un grand nombre d'aléas.



– a – Système de vision stéréo, – b – outils de dévissage sur le robot

Figure 2.9 : Poste de démontage automatique de roues automobiles

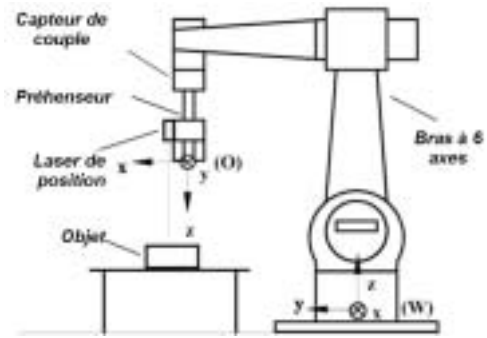
Au Département de Robotique et de Théorie des systèmes de Contrôle de l'Université de Technologie de Darmstadt (Allemagne), une équipe de chercheurs a mis au point un poste de désassemblage formé d'un robot à six axes muni d'un préhenseur à trois doigts et 15 degrés de liberté (cf. Figure 2.10 –a–). Ce système est en boucle fermée grâce à un système de vision reposant au départ sur la logique floue [65] et sur un formalisme de Chaînes de Markov Cachées HMM¹⁹ (Hidden Markov Model) grâce aux travaux de Y. Liu et K. Hohm [44].

Le modèle développé intègre des procédures de détection et de résolution de problèmes de blocage lors du désassemblage robotisé autonome [64]. Ces situations de blocage surviennent à la suite de légères vibrations durant la manipulation d'objets qui engendrent une erreur sur le positionnement. La solution proposée est de créer une multitude de petits mouvements en superposition aux mouvements initialement programmés jusqu'à sortir de la situation de blocage (cf. Figure 2.10 –c–). L'expérimentation s'est faite sur un caméscope d'ancienne génération (cf. Figure 2.10 –b–).

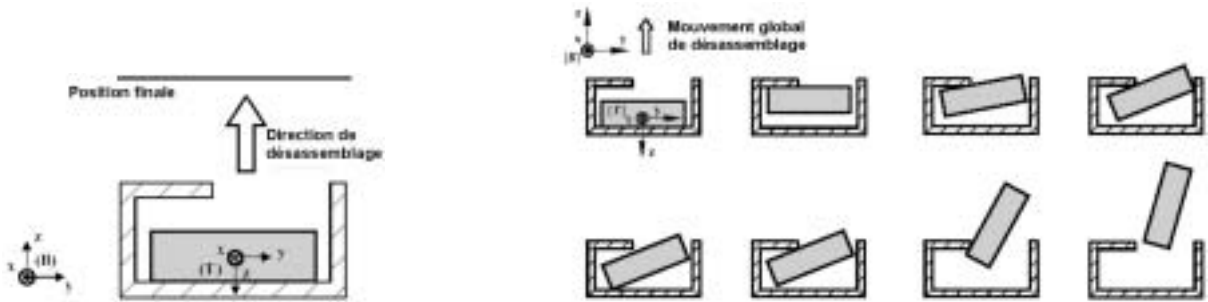
¹⁹ Les chaînes de Markov cachées sont un outil de modélisation très répandu aujourd'hui : en reconnaissance vocale, en séquençage d'ADN, en reconnaissance des formes (récemment), ...



-a- Préhension d'une partie du caméscope



-b- Système robotisé d'un bras à 6 axes, d'un capteur de force, d'un laser de position et d'un préhenseur multi-capteurs.



-c- Comportement attendu du système pour l'extraction d'une pièce cible (fraction cible)

Figure 2.10 : Recherches sur la préhension et les situations de blocage en désassemblage. Dép. de Robotique et de Théorie des Systèmes de Contrôle, Darmstadt Allemagne

Par la suite, une autre équipe du même département a effectué un travail de recherche sur l'implantation d'une cellule de désassemblage [29]. Celle-ci est composée de deux robots à six axes, d'un système de vision, d'un préhenseur tactile et d'une plate-forme informatique qui contrôle le tout. Le premier robot est responsable des opérations de désassemblage proprement dites grâce à un outil de coupe et au préhenseur tactile. Le deuxième robot est chargé de d'acquisition d'informations (cf. Figure 2.11).

Une fois encore, ce qui est à retenir est le travail de recherche sur le système de vision et les capteurs de force au niveau du préhenseur. Cette approche ne repose pas, pour l'instant, sur une stratégie de valorisation globale.

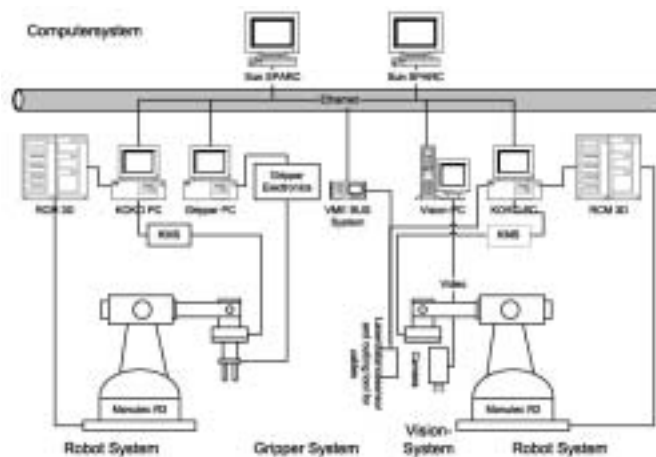


Figure 2.11 : Implantation d'une cellule de désassemblage à Darmstadt

A l'Institut de la Machine-outil et du Génie Industriel au Centre Technologique de Berlin, une équipe d'ingénieurs et de chercheurs ont conçu, simulé puis réalisé un système flexible de désassemblage automatisé pour les lave-linges. Il s'agit, en fait, d'une habile alliance de désassemblage manuel et robotisé (cf. Figure 2.12).

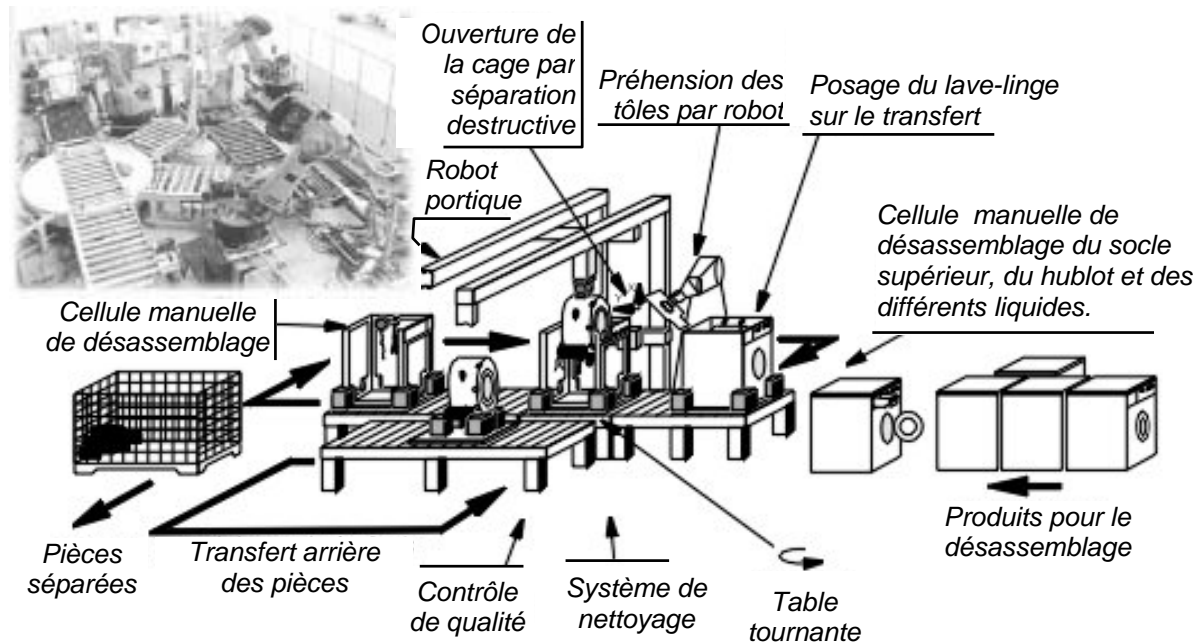


Figure 2.12 : Système de désassemblage flexible hybride (manuel/robotisé)

Par exemple, le socle et le hublot de la machine sont enlevés manuellement au départ du système, puis un robot à six axes muni d'un outil de découpe abrasive ou d'une torche au plasma (cf. Figure 2.13 a/b) vient effectuer une ouverture sur le côté. Tous les procédés de désolidarisation robotisés sont destructifs. Le déclippage, dévissage et autres attaches du même genre sont neutralisés grâce à un outil perforant (cf. Figure 2.13 –d–).

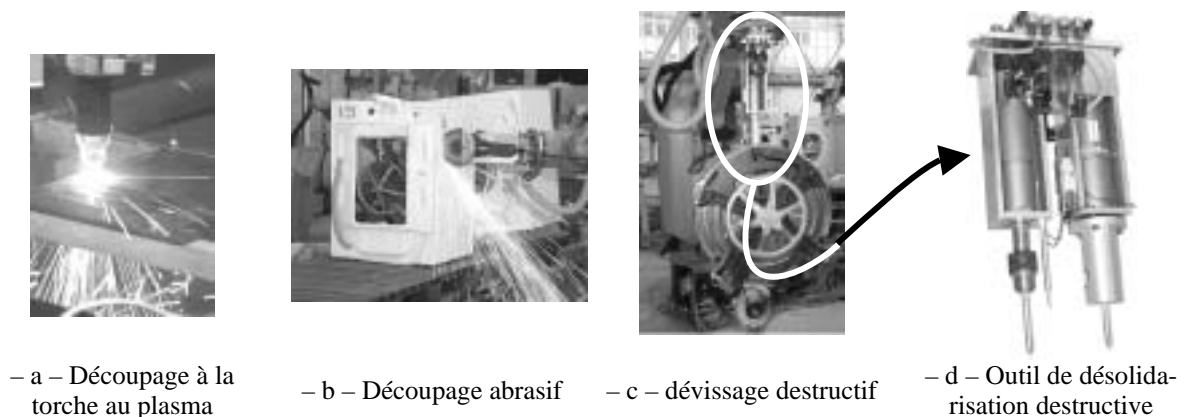


Figure 2.13 : Opérations destructives pour le désassemblage d'une machine à laver

Toutefois, les circuits imprimés sont extraits de manière totalement non-destructive par un préhenseur dédié. Ils sont par la suite nettoyés et décapés par de la glace sèche pour en extraire, toujours de manière non-destructive, les circuits électroniques par un système de dessoudage spécialisé (cf. Figure 2.14).

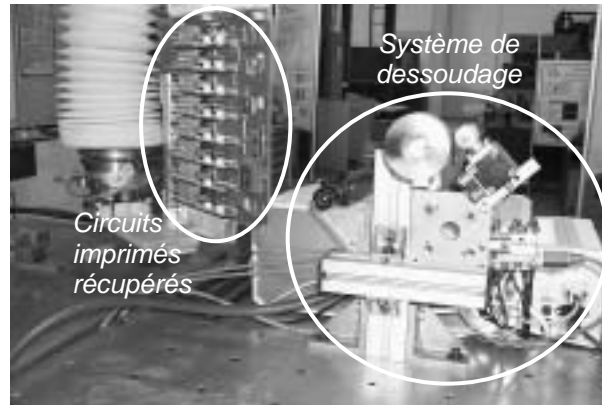


Figure 2.14 : Système de dessoudage des circuits électroniques

Au delà de la performance technique et technologique mise en œuvre dans cette expérience, la planification des processus de désassemblage et la gestion des aléas ne semblent pas être encore traitées. Un graphe de désassemblage est établi par l'expert pour chaque produit entrant dans le système. Il y a lieu de développer en perspective, une méthode systématique de génération des séquences (ou de gammes) de désassemblage.

Récapitulatif

Les systèmes de désassemblage existants présentés ci-dessus ont été développés dans le cadre de la recherche scientifique pour l'industrie, mais semblent loin de la problématique économique actuelle. En effet, la concurrence effrénée à laquelle se livrent les industriels et de la multiplicité des produits exigent une rentabilité importante à très court terme. L'automatisation complète d'un système de désassemblage paraît peu probable au regard des coûts de conception, de réalisation et d'entretien de structures appropriées, très élevés en comparaison de l'utilisation d'opérateurs humains. De plus, les difficultés d'automatisation vont aussi provenir des modifications de structure et des dégradations éventuelles subies par le produit pendant sa durée de vie. Ces modifications vont entraîner des problèmes d'accessibilité pour les robots et de préhension des composants. L'automatisation va alors demander l'utilisation de robots perfectionnés (à six degrés de liberté) et nécessiter l'acquisition d'informations sur l'état réel du produit donc l'utilisation d'outils de vision perfectionnés [63].

C.B. Boks a mené une étude sur la faisabilité économique et technologique d'automatisation du processus de désassemblage en se basant sur un questionnaire. Celui-ci à été remis à plus d'une soixantaine de spécialistes comprenant des industriels, des universitaires et des consultants [02]. L'étude a révélé que, dans un futur proche, le désassemblage semi-automatisé est perçu comme économiquement viable pour les produits actuels. Pour les produits futurs respectant les préconisations DFD²⁰, le désassemblage semi-automatisé apparaît comme incontournable. Pour ce qui est du désassemblage automatisé, une automatisation du processus de désassemblage ne serait pas économiquement viable, du moins pour les produits actuels. Mais, il apparaît comme technologiquement possible, dans 15 à 20 ans, d'avoir des systèmes automatisés [60].

Il semble donc que l'on se dirige vers une automatisation partielle du désassemblage avec l'intervention de l'homme au sein du processus. Cette automatisation partielle se fera sur les

²⁰ DFD : Conception pour le Désassemblage (Design For Disassembly).

systèmes manuels existants pour lesquels des cellules automatisées seront greffées progressivement. C'est dans cette optique que nous avons orienté notre travail de recherche sur la conception et la commande de système de démantèlement mettant en œuvre un désassemblage manuel ou partiellement automatisé.

2.3.4 Organisation d'un atelier de désassemblage

La conception d'un système de désassemblage impose une structuration des activités qu'il est chargé de réaliser. Cette structuration (ou organisation) est nécessairement hiérarchisée.

2.3.4.1 Organisation hiérarchisée d'un système de désassemblage

Plusieurs travaux en assemblage ont porté sur l'organisation hiérarchisée présentée par la Figure 2.15. Il paraît tout à fait adéquat de transposer cette organisation aux systèmes de désassemblage.

F. Touzanne [60] a défini, dans ce sens, l'organisation ou la décomposition d'un système de désassemblage en se référant à plusieurs travaux en assemblage dont ceux de P. Olivier [50].

Définition 2.5 : Atelier de désassemblage
Un *atelier de désassemblage* est une unité de production regroupant tous les moyens nécessaires au traitement des produits pour en extraire les fractions cibles.

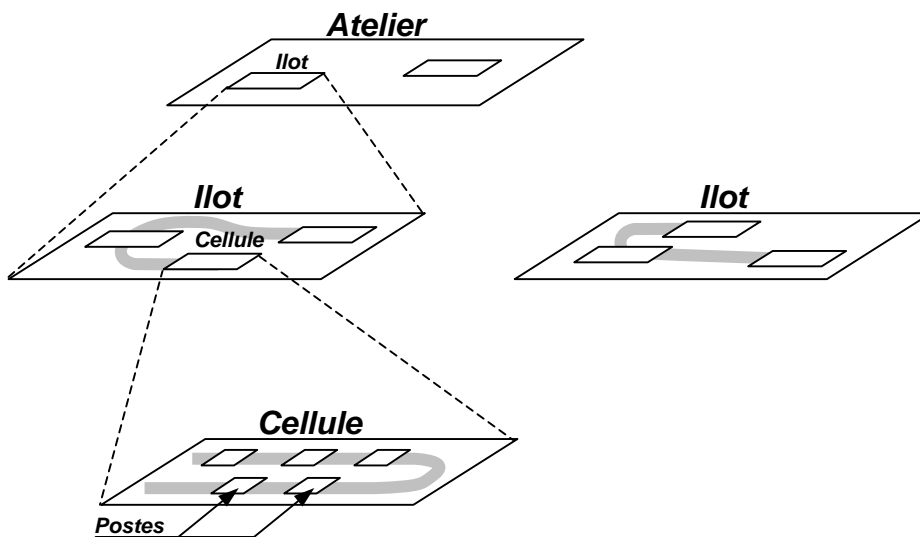


Figure 2.15 : Organisation hiérarchisée d'un système de production

Comme le montre la Figure 2.15, un atelier peut être composé de plusieurs îlots de désassemblage interdépendants en flux mais visant le même objectif : le désassemblage des produits manufacturés. Il se définit comme suit :

Définition 2.6 : Îlot de désassemblage

Un *îlot de désassemblage* est un ensemble d'équipements pouvant assurer le désassemblage complet d'un produit²¹ indépendamment du reste de l'atelier.

L'interdépendance des îlots permet, par exemple, de dédier certains d'entre eux à la valorisation de produits (désassemblage de produits en fin de vie), d'autres à la réparation. Afin de pallier les différents aléas inhérents au fonctionnement habituel d'un système de production en général et à un îlot en particulier, le découpage est recommandé. Celui-ci est effectivement découpé en zones géographiques correspondant à des groupements de machines reliés les uns aux autres par des stocks tampons.

Définition 2.7 : Cellule de désassemblage

Une *cellule de désassemblage* est une subdivision de l'îlot capable d'assurer des activités de désassemblage de manière autonome durant une période de temps limitée grâce à l'emploi de stocks tampons en amont et en aval.

Le plus souvent, les cellules sont dédiées soit au désassemblage manuel, soit au désassemblage robotisé ... tel est le cas du système développé à l'Institut de la Machine-outil et du Génie Industriel de Berlin (cf. Figure 2.12).

Dans ces cellules transitent plusieurs constituants qui subissent continuellement des changements effectués dans des postes de désassemblage. Un poste²² est caractérisé par la présence d'un seul exemplaire du produit à un instant donné. Le temps qui sépare la sortie de deux produits successifs est appelé *temps de cycle* du poste.

Définition 2.8 : Poste de désassemblage

Un poste de désassemblage est le lieu où une ou plusieurs ressources contribuent à la réalisation d'une ou plusieurs opérations de désassemblage²³, et où ne se trouve à un instant donné qu'un seul exemplaire du produit.

Remarque

Il n'est pas exclu qu'un atelier soit composé d'un unique îlot, que celui-ci soit formé que d'une seule cellule elle-même constituée d'un ou deux postes. Dans un poste peuvent être exécutés différents types d'opérations de désassemblage (Annexe 1).

²¹ L'ensemble peut assurer le désassemblage complet mais selon les destinations fin de vie des produits traités, le désassemblage peut être délibérément partiel.

²² Selon P. Olivier [50].

²³ Voir la Définition 2.3 en page 27.

2.3.4.2 Organisation fonctionnelle d'un système de désassemblage

A partir des différentes expériences d'implantation de systèmes de désassemblage rencontrées dans la littérature et en fonction des notions élémentaires des systèmes automatisés de production assistés par ordinateur, nous avons imaginé la composition fonctionnelle d'un système de désassemblage comme le montre la Figure 2.16. Une hypothèse importante est que le système peut être semi-automatisé, comportant par conséquent à la fois des postes manuels et des postes automatiques. Ceux-ci appartiennent à la catégorie des ressources matérielles (par opposition aux ressources logiques). Elles comprennent aussi des systèmes de transfert (convoyeurs, transpalettes, chariots, ...) (c), des postes automatisés ou robotisés (d), des équipements spécialisés pour le désassemblage (f), un réseau de capteurs (g) regroupant toutes les informations concernant les ressources (10, 11, 12 et 13) pour les ré-acheminer vers le système de commande et de contrôle. Quant aux opérateurs humains (e), ils sont chargés du désassemblage manuel, de la surveillance des systèmes de transfert, de la supervision des systèmes automatisés et robotisés.

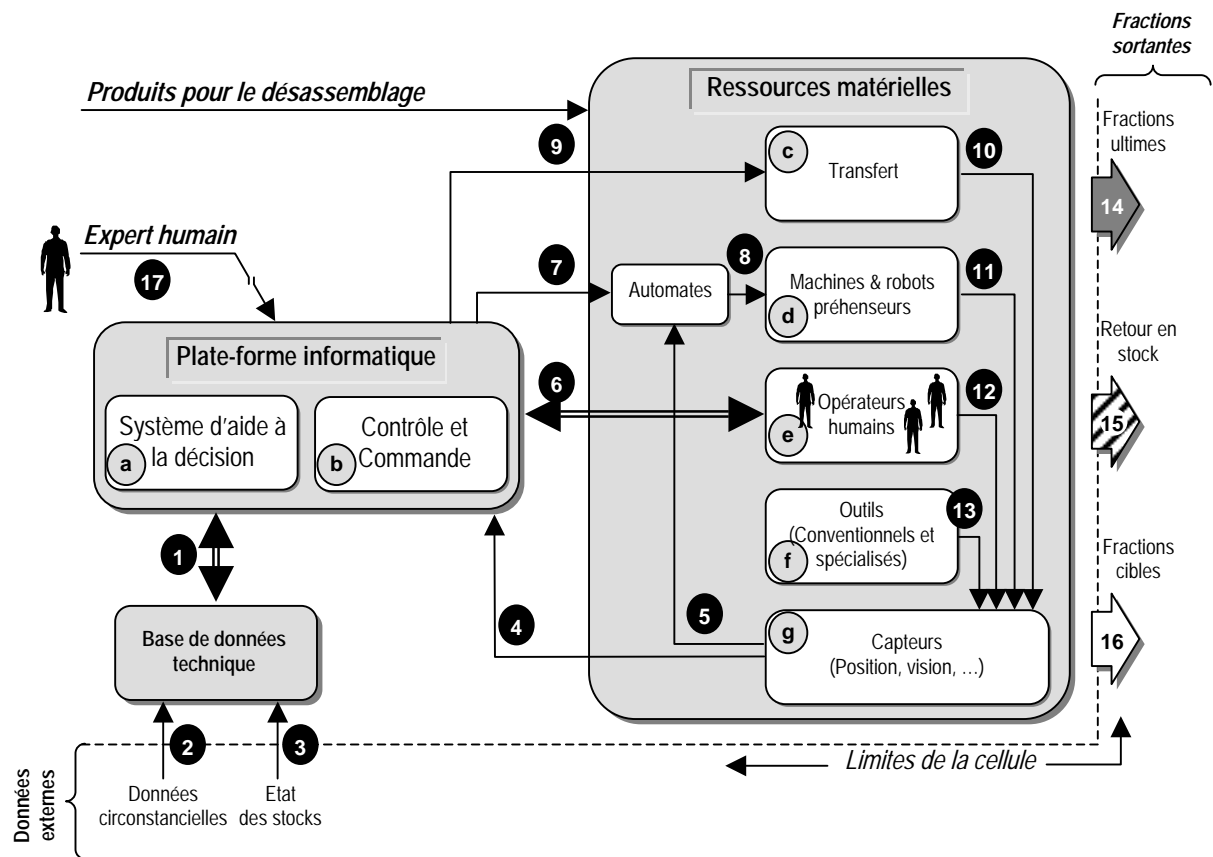


Figure 2.16 : Organisation fonctionnelle du système de désassemblage

Les ressources sont conduites par la plate-forme informatique supervisée par un expert (17) et composée de deux éléments distincts. Le premier est le système d'aide à la décision SAD (a) durant le désassemblage. Il permet une planification réactive des processus de désassemblage par le pilotage en temps réel des ressources matérielles du système. Le fonctionnement repose sur une base de données technique (1) mise à jour à la fois par des opérateurs externes et le SAD. Elles permettent ainsi de fournir des informations statiques sur le produit, les processus prévus de désassemblage, des ressources matérielles et les coûts de fonctionnement plus des informations dynamiques (2 et 3) sur l'état réel des constituants, des processus de désassemblage, des stocks, des besoins en fractions cibles (et donc des priorités de

désassemblage des produits), de la conjoncture économique, des ressources dynamiques (pannes des machines et défaillances humaines), etc. Les données dynamiques sont fournies par les capteurs et opérateurs humains (6 et 4) via le système de commande et de contrôle. Ce dernier est le deuxième élément constitutif de la plate-forme informatique. Le réseau de capteurs peut comporter un système de vision complet permettant d'identifier la plupart des comportements anormaux pour y pallier au plus vite. Cela peut être aussi un moyen de positionnement et de validation des opérations pour les ressources machines (robots et machines automatiques).

Une partie de ces capteurs peut être reliée directement aux automates (5) qui commandent les ressources machines (8). Ils peuvent ainsi indiquer l'état des outils partagés (f) aux postes robotisés. Le système de contrôle et de commande a pour tâche la transcription des informations venant des capteurs (4 et 6) pour le SAD et la commande des systèmes de transfert, des machines et des opérateurs humain (6,7 et 9) en fonction des choix et alternatives préconisés par le SAD pour pallier aux incertitudes sur l'état du produit, l'équilibrage des charges fortement lié à ces incertitudes, le changement des priorités économiques, de la demande en fractions cibles, etc. Face à tout cela, le SAD prend en considération la classe de désassemblage prescrite au départ. Il s'agit des 4 classes décrites ci-dessous.

2.3.5 Critères de classification du désassemblage

La conception d'un système de désassemblage est pleinement liée à la finalité du désassemblage. S'agit-il de valorisation fin de vie, de maintenance ou encore de remanufacture²⁴ [35] ? Chacune de ces finalités induit des politiques différentes dans le système de désassemblage en fonction des coûts de désassemblage, des priorités des produits à désassembler, des lois en vigueur, de la gestion des flux dans les processus de désassemblage (voir la définition 2.4), etc. En d'autres termes, selon la période du cycle de vie considérée, les objectifs et les caractéristiques du désassemblage sont différents. Il est alors intéressant de définir les critères de différenciation définis selon 4 classes (cf. Figure 2.17).

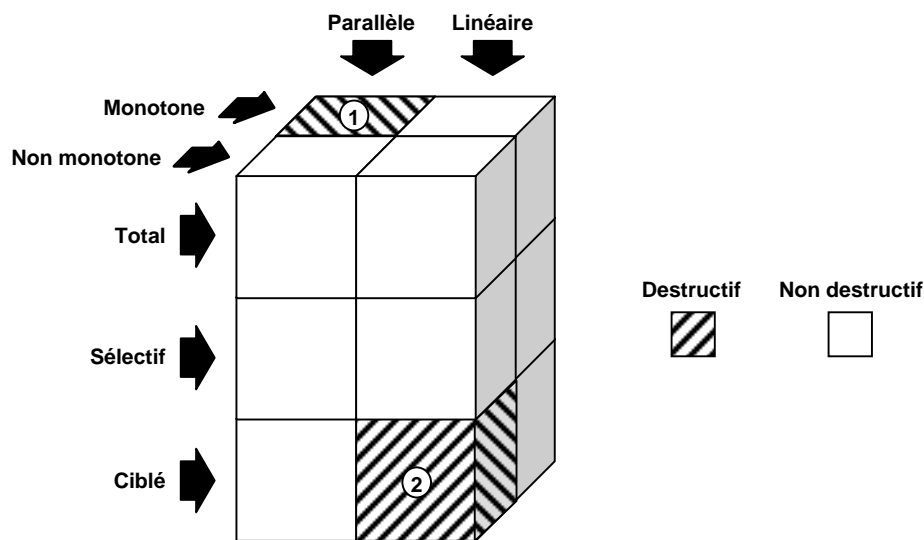


Figure 2.17 : Classification opératoire du désassemblage

²⁴ ... pour non-conformité du produit, ce qui implique un retour sur la chaîne de production.

2.3.5.1 Désassemblage total, sélectif ou ciblé

K. Feldmann [20] rappelle le compromis entre taux de valorisation et coût de désassemblage qui conditionne le niveau de désassemblage (cf. Figure 2.2). Dans ce sens, un niveau de désassemblage élevé (voire un désassemblage total) reste exceptionnellement rentable. Le désassemblage partiel devient alors le meilleur compromis. Il ne permet pas d'obtenir tous les composants élémentaires du système (désassemblage total) mais uniquement les plus rentables. Il ne faut cependant pas considérer le désassemblage total comme une approche purement théorique. En effet, il y a des domaines dans lesquels les produits sont totalement désassemblés dans le but d'un réassemblage dans le cadre d'une politique de maintenance régulière. L'exemple le plus commun est l'avionique. Les appareils sont totalement désassemblés et de manière non destructive pour une inspection complète des composants élémentaires (cf. Figure 2.18). Cependant, un certain nombre de ces composants sont changés indépendamment de leur état mais pour des raisons de sécurité.

Le désassemblage partiel est plus courant. Il englobe à la fois le désassemblage pour la valorisation, le désassemblage pour la réparation et le désassemblage pour la re-manufacture. Nous pouvons distinguer deux types de désassemblage partiel : le désassemblage sélectif et le désassemblage ciblé [60].

Le désassemblage sélectif a pour objectif la décomposition séquentielle du produit en groupes de sous-assemblages sans nécessairement chercher à obtenir une partie ou la totalité des composants élémentaires. Cette classe de désassemblage est principalement utilisée pour la valorisation en fin de vie. D'ailleurs, plusieurs approches de génération des gammes de désassemblage sont basées sur la recherche de ces fractions cibles quand elles ne sont pas totalement définies. L'exemple de la Figure 2.19 montre le souci de récupérer absolument l'un des constituants du produit qui sont les éléments de la batterie et cela au détriment des composants voisins qui sont sujets à détérioration en raison du procédé agressif utilisé (voir § 2.3.5.2).



Figure 2.18 : Démontage d'un Concorde en vue de sa maintenance

Le désassemblage ciblé est utilisé généralement pour accéder à un constituant d'un produit. Il s'agit des fractions cibles précédemment définies. Seuls les constituants qui rendent inaccessibles les fractions cibles sont désassemblés à leur tour. Le produit n'est donc pas entièrement décomposé. Cette approche est principalement utilisée en réparation mais aussi en valorisation en fin de vie pour notamment des produits simples.

2.3.5.2 Désassemblage destructif

Le désassemblage d'un produit peut être réalisé selon plusieurs niveaux de destruction ; nous distinguons les degrés de destruction totale, de destruction partielle, et de non-destruction [26], [53], [56]. Ces modes dépendent fortement de la technique de démontage utilisée, qui peut être manuelle, semi-automatique ou entièrement automatisée. Parmi les techniques de démontage qui intègrent une automatisation totale ou partielle et qui sont peu destructives, certaines font appel à des processus chimiques (bains chimiques), d'autres à des processus thermiques (chocs thermiques pour casser les liaisons) ou mécaniques (vibrations par micro-ondes). Une technique de démontage est à mettre en relation avec le mode d'assemblage du produit (clipsage, soudage, etc.). En général, le coût d'une telle opération est réduit et le succès assuré, même si le fonctionnement du composant extrait n'est plus garanti, du fait des incertitudes sur l'état initial du produit et sur la détérioration due au processus. Parmi les techniques avec un haut degré d'automatisation, et par conséquent plus destructives, les découpes au jet d'eau abrasif, à la torche au plasma ou au laser, permettent un accès rapide aux organes internes par une découpe de l'enveloppe externe du produit.

En d'autres termes, le désassemblage non destructif permet la réutilisation de constituants, mais avec des coûts souvent très importants et sans garantie de succès des opérations. Le désassemblage destructif est moins coûteux et présente un taux de succès des opérations appréciable. Par contre, toute possibilité de réutilisation des constituants est quasi nulle. En fait, le meilleur compromis est de planifier un désassemblage partiellement destructif. Dans le cadre de la valorisation, l'utilisation d'opérations destructives est pourtant fortement recommandée car les coûts se voient considérablement réduits.

Un cas de désassemblage partiellement destructif a été abordé par l'équipe de J. REAP et B. Bras [53] qui ont mis en place un système simple composé d'un robot à 6 axes (*cf.* Figure 2.19 –a–) relié à un poste de commande en boucle ouverte pour lequel un expert suit la procédure de désassemblage et décide de l'arrêt du processus de désassemblage. La classe de désassemblage envisagée fut un désassemblage partiellement destructif d'un Pack-Batterie DW9096 pour lequel seuls les éléments de batterie (*cf.* Figure 2.19 –b–) étaient ciblés. Plusieurs outils de désolidarisation plus ou moins destructifs ont été utilisés pour une unique gamme de désassemblage (*cf.* Figure 2.19 –c–). Les conclusions des auteurs furent que la plupart des préconisations de conception pour le désassemblage (DFD-G²⁵) restent valables mais que la conception pour le désassemblage semi-destructif est à prendre en considération à l'avenir.

²⁵ Design For Disassembly Guidelines → Préconisations de Conception pour le Désassemblage.

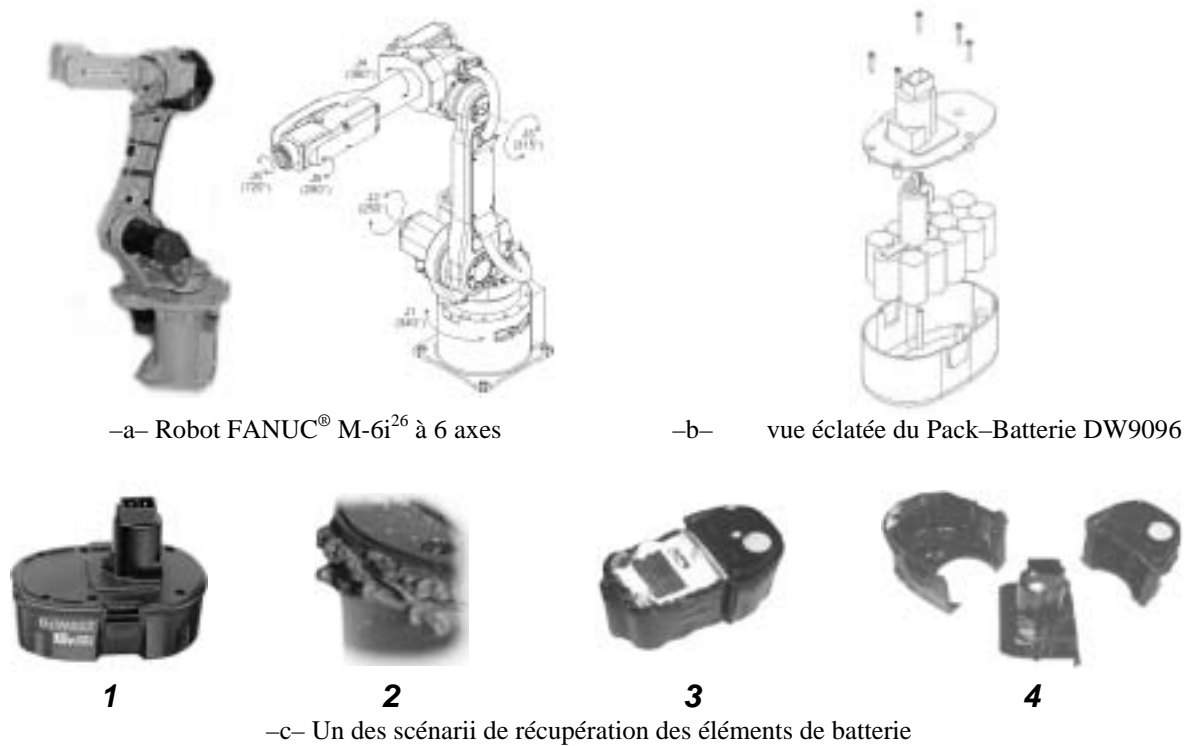


Figure 2.19 : Désassemblage d'une pack-batterie dans une cellule de désassemblage formée d'un unique robot à six axes.

Remarque

Nous considérerons le désassemblage faisant appel à des procédés destructifs uniquement pour les solidarités anodines quant à l'intégrité des constituants, comme étant un désassemblage semi-destructif.

2.3.5.3 Désassemblage linéaire et désassemblage parallèle

On dit que le désassemblage est « linéaire » lorsque les fractions cibles sont retirées du produit une à une. Par opposition, le désassemblage parallèle est une décomposition (souvent binaire) du produit en sous-ensembles jusqu'à obtenir les fractions cibles. La particularité de ce dernier est la possibilité de répartir les tâches sur des opérateurs et des postes différents. L'exemple de la Figure 2.21 montre qu'il est possible d'extraire directement toutes les fractions cibles les unes derrière les autres comme il est possible d'enlever le sous-assemblage {b,e,a} du sous-assemblage {f,c,d} afin qu'ils soient séparés indépendamment. L'intérêt de la linéarité ou du parallélisme du désassemblage dépend grandement du type de système de désassemblage (manuel, automatisé, robotisé ou mixte) et des objectifs de désassemblage (réparation, maintenance ou valorisation fin de vie) [56].

²⁶ <http://www.fanucrobotics.com/datasheets/robots/M-6iB.pdf>

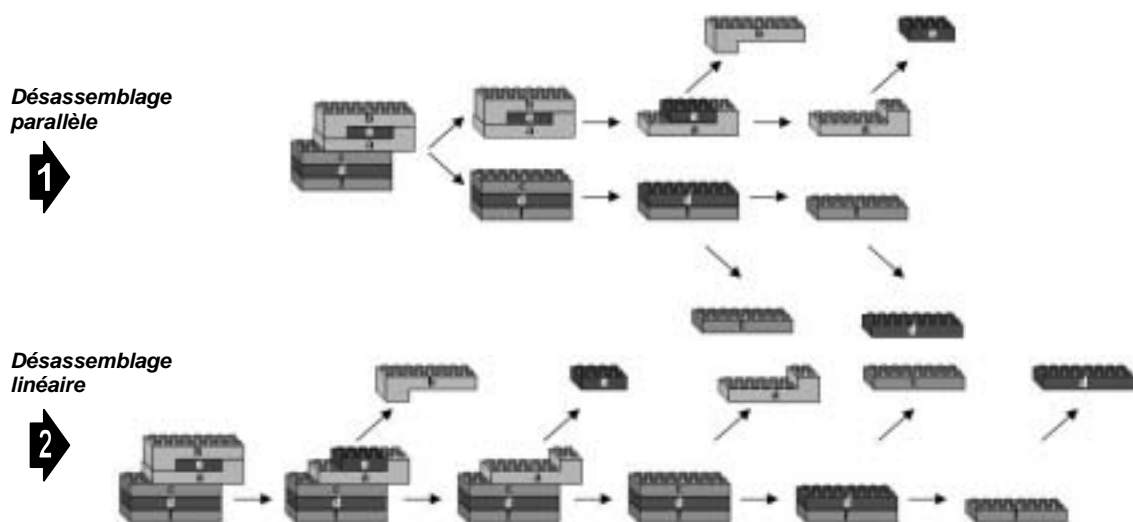


Figure 2.20 : Désassemblage linéaire ou parallèle

2.3.5.4 Désassemblage monotone

Le désassemblage est dit monotone lorsqu'aucun constituant n'est placé temporairement dans une position intermédiaire entre son état initial dans le produit et son état désassemblé (hors du produit). Chacun de ces constituants doit être soit à l'état initial dans le produit soit extrait totalement de celui-ci [56]. Inversement, s'il est nécessaire de placer certains constituants dans des positions intermédiaires pour qu'une autre opération puisse être réalisée, le désassemblage est alors qualifié de non-monotone. Lors de la génération des différentes configurations de désassemblage d'un produit donné, la prise en compte de positions intermédiaires induit une explosion combinatoire. Par conséquent, ces considérations sont rarement prises, y compris dans le cas de l'assemblage [66]. Les opérations de désassemblage (ou d'assemblage) qui ne donnent pas lieu à ces positions provisoires caractérisent le désassemblage complet. Il est défini par F. Touzanne comme suit : *Le désassemblage d'un constituant est complet si ce constituant est entièrement extrait du produit. Le désassemblage d'un constituant est incomplet si ce constituant est simplement déplacé à l'intérieur du produit* [60]. Ainsi, le désassemblage est monotone si chaque constituant du produit subit un désassemblage complet. Le désassemblage est non monotone si au moins un constituant du produit a subi un désassemblage incomplet. L'exemple de la Figure 2.21 montre un cas de désassemblage non-monotone.

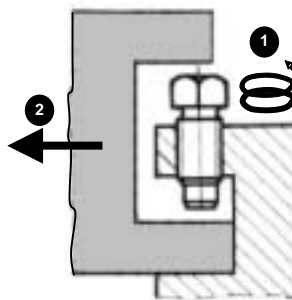


Figure 2.21 : Désassemblage non-monotone.

2.3.6 La flexibilité d'un système de désassemblage

Dans le cas du désassemblage, la flexibilité renvoie principalement à l'incertitude présente sur l'état des produits à recycler, les stocks en sortie, les incertitudes sur le fonctionnement des équipements, la demande du marché (qui conditionne la rentabilité du désassemblage), etc. Nous définissons la flexibilité en désassemblage comme suit :

Définition 2.9 : Flexibilité en désassemblage

La *Flexibilité d'un système de désassemblage* désigne la capacité d'adaptation de ce système aux conditions nouvelles du marché, à l'évolution de la réglementation environnementale en vigueur et aux aléas de fonctionnement des équipements et matériels de désassemblage. C'est aussi l'aptitude à la conduite dynamique du système face aux incertitudes sur l'état des produits traités.

Les conditions nouvelles du marché représentent, par exemple, les fluctuations de la quantité de produits à désassembler par le système. Ils requièrent une capacité d'adaptation à la charge de travail fluctuante. A cela se rajoute la nécessité d'adapter le processus de désassemblage en fonction de l'état des stocks et de la demande en fractions cibles. Par ailleurs, lorsque les stocks sont complets, le système doit pouvoir être modifié pour que les destinations de fin de vie de ces fractions cibles soient changées (lorsqu'il s'agit de désassemblage pour la valorisation fin de vie).

La flexibilité est nécessaire pour la réactivité du système. Celle-ci se manifeste lors des situations de fonctionnement anormales pouvant survenir pendant le désassemblage : par exemple quand l'état du produit, des constituants, des ressources matérielles ou des flux informationnels est douteux ou problématique. Le système de désassemblage doit être alors capable de prendre en compte les caractéristiques réelles du produit et adapter le processus en fonction de cet état.

En plus des produits en fin de vie dont le nombre ne cesse d'augmenter, de nouveaux produits apparaissent de plus en plus et dans une variété démesurée pour laquelle le système doit pouvoir se réadapter et répondre aux besoins en pièces pour la réutilisation, en matières recyclables, etc. Cette réadaptation doit se faire de façon économique et rapide. Ainsi, un système doit être conçu de façon à pouvoir traiter non seulement un ensemble de produits connus appartenant à une même famille mais aussi aux produits futurs appartenant toujours à la même famille.

L'unique issue à cela est :

- 1) de concevoir des ressources (opérateurs humains, des robots ou des équipements spécialisés) pouvant effectuer plusieurs tâches élémentaires,
- 2) de planifier différentes manières d'exécuter une opération de désassemblage,
- 3) et de prévoir un ensemble de routages des processus de désassemblage à travers les ressources matérielles du système.

C'est à tout cela que doit répondre la flexibilité à définir pour le désassemblage. Cependant, la définition de la flexibilité dès la conception d'un système de production (de désassemblage dans notre cas) suppose la définition d'un certain nombre d'indicateurs (ou de critères) qualitatifs et quantitatifs. Ces derniers sont à déterminer en fonction des objectifs du système

à concevoir et des moyens disponibles pour le faire. Plusieurs des critères de performance d'un système de production comme la multiplicité des processus, le caractère multi-variable, les stocks, les durées opératoires sont directement ou indirectement liés à la flexibilité. Il n'est pas aisé d'établir des critères non redondants de façon objective. Pour définir la flexibilité en désassemblage, nous avons par conséquent choisi trois paramètres génériques sur lesquels reposera notre analyse de la flexibilité. Il s'agit des « *acteurs* » (le produit à désassembler, le système de désassemblage et le contexte de désassemblage) devant jouer un ou plusieurs scénarii de désassemblage dans le « *temps* » (avant, pendant et après le processus de désassemblage) en subissant des « *perturbations* » diverses (les incertitudes sur l'état des constituants et les données techniques et économiques, les aléas opératoires ou de fonctionnement du système et les temps opératoires variables et casuels). Le Tableau 2.2 présente notre analyse du besoin en flexibilité en fonction des trois paramètres énoncés. La Figure 2.22 est une représentation graphique de ces besoins en flexibilité. On remarquera les trois rectangles (01), (04) et (09). Ils indiquent une plus grande redondance entre les trois paramètres ; le premier a trait à la capacité du système à intégrer une grande variété de produits, les deux derniers concernent directement la réactivité du système face aux aléas et incertitudes sur le produit et les ressources matérielles en tenant compte du contexte. Il semble bien que ce sont les besoins en flexibilité les plus importantes lors de la conception d'un système de désassemblage.

Outre la flexibilité du système de désassemblage, la « *détermination des gammes de désassemblage* » en fonction (1) du produit à traiter, (2) de l'implantation de la cellule de désassemblage et (3) de ses ressources matérielles et humaines est primordiale. La section suivante présente un état de l'art sur cette phase de la conception des systèmes de désassemblage.

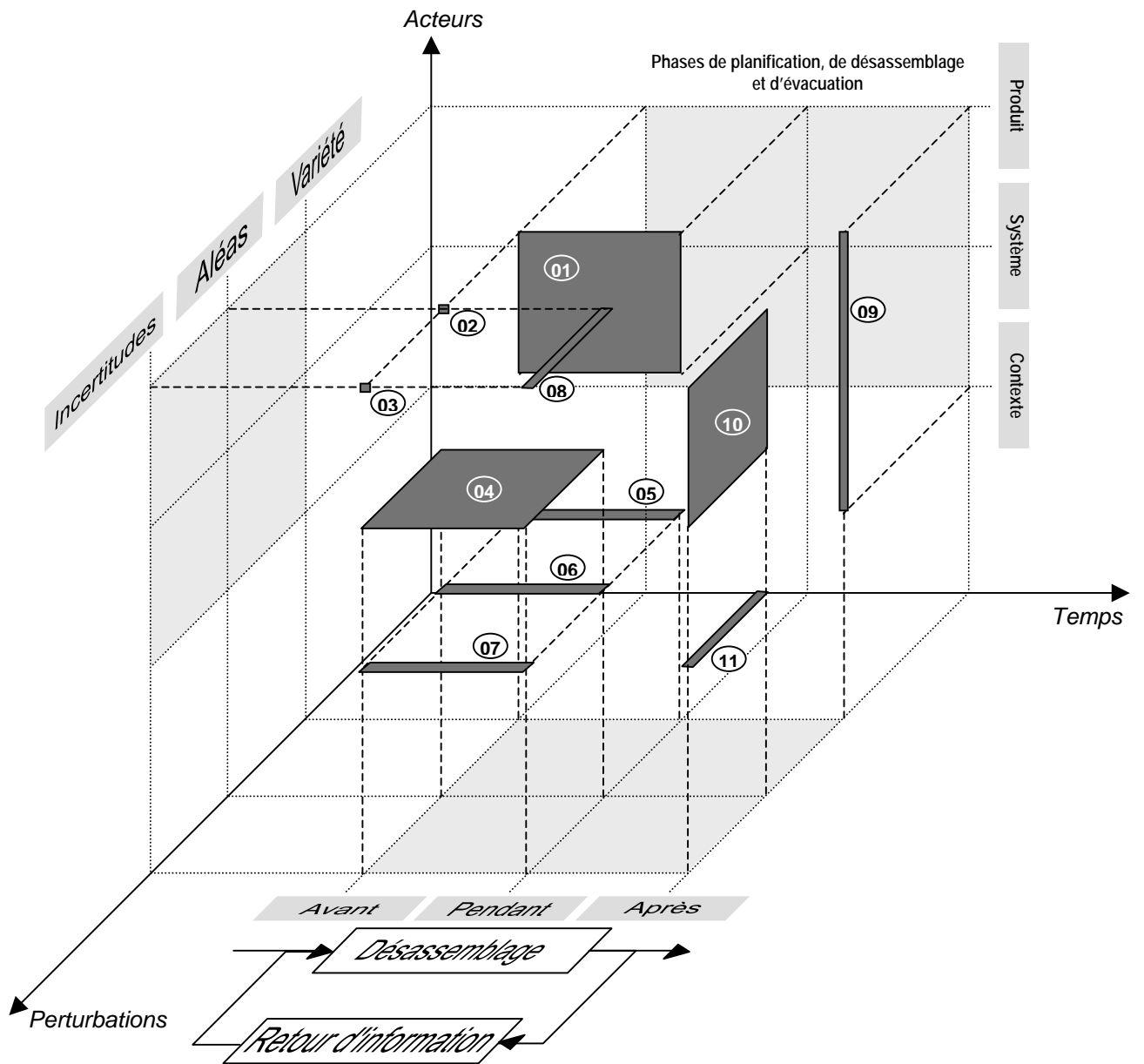


Figure 2.22 : Analyse de la flexibilité en désassemblage

	<i>Temps</i>	<i>Acteurs</i>	<i>Perturbations</i>	<i>Flexibilité</i>
--	--------------	----------------	----------------------	--------------------

☞ *Références de la Figure 2.22*

1	Avant	Produit	Variété	Capacité du système de désassemblage à intégrer une grande variété de produits pour la valorisation, la maintenance et la réparation. Exemple : capacité d'une unité de valorisation de véhicules hors d'usage de traiter un grand nombre de modèles de véhicules.
	Pendant	Système		
2	Avant	Produit	Aléas	Aptitude du système à réorienter le planning prévisionnel des produits à désassembler lorsque certains produits manquent en stock.
3	Avant	Produit	Incertitudes	Capacité du système de désassemblage à s'adapter au produit présenté pour désassemblage en dépit de la différence d'état présumé et réel du produit. Exemple : Entamer le désassemblage ciblé d'un véhicule qui a été modifié par l'utilisateur.
4	Avant	Système	Aléas	Réactivité du systèmes face aux éventuelles pannes que subirait une des ressources matérielles ou encore aux imprécisions sur les flux informationnels au sein du système (mauvaise interprétation du système de vision, erreur sur la mesure des capteurs, ...) en amont ou pendant le processus de désassemblage d'un produit.
	Pendant		Incertitudes	
5	Avant	Contexte	Variété	Capacité importante d'assimiler les différentes données conjoncturelles et leurs changements lors de la pré-planification et la planification réactive du désassemblage. Les données sont souvent économiques et législatives mais sont de plus en plus commerciales (marketing) et parfois politiques.
	Pendant			
6	Avant	Contexte	Aléas	Capacité décisionnelle face à certaines situations d'impasse où des données économiques viennent interférer avec une nouvelle donnée écologique qui remet en cause au moins provisoirement la pré-planification et la planification réactive en vigueur dans le système.
	Pendant			
7	Avant	Contexte	Incertitudes	Capacité d'apprécier les données contextuelles en prenant en compte les aspects statistiques et probabilistes. Exemple : prévoir la diminution des prix de revente des éléments de batterie de type nickel-cadmium avec l'apparition sur le marché d'une nouvelle génération de batterie au Lithium-ion. L'intégrer à la fois lors de la pré-planification du désassemblage d'un produit en entrée mais aussi à la planification réactive durant le désassemblage. Ainsi, le niveau de désassemblage prévu peut changer durant le désassemblage.
	Pendant			
8	Pendant	Produit	Aléas	Aptitude du système à la planification dynamique des processus de désassemblage lorsque, durant le désassemblage, des constituants sont détériorés ou dans un état complètement différent de celui présumé. Exemple : les objectifs à atteindre sont déterminés à partir d'un certain ensemble de fractions cibles. Lorsque l'une de ces fractions est détériorée en raison d'un échec opératoire ou tout simplement retrouvée dans un état ne correspondant plus à la destination prévue, la gamme opératoire et parfois l'ensemble des fractions cibles sont modifiées pour obtenir un maximum de bénéfice.
			Incertitudes	
9	Après	Produit	Variété	Capacité de tri, de regroupement, de classification (notamment en fonction contexte), de contrôle du convoyage et de vérification de la conformité des fractions cibles récupérées en directions des stocks sur la base.
		Système		
		Contexte		
10	Après	Produit	Aléas	Réactivité du système face aux éventuelles pannes que subirait en particulier les ressources de transfert ou aux imprécisions sur les flux informationnels au sein du système en aval du processus de désassemblage d'un produit.
		Système	Incertitudes	
11	Après	Contexte	Aléas	Aptitude à rediriger certaines fractions cibles en désassemblage lorsqu'elles ne sont plus viables par rapport à leur état, leur destination et le contexte du moment.
			Incertitudes	

Tableau 2.2 : Besoins en flexibilité dans un système de désassemblage

2.4 Conclusion

Notre appréhension des particularités du désassemblage quant à la conception des systèmes de démantèlement s'est désormais justifiée. Il est vrai que les aspects contextuels évoqués dans la première section de ce chapitre montre que la rentabilité reste toujours le mot clé de toute démarche de conception de système de production en général et de désassemblage en particulier. Cependant, les fluctuations du marché, les incertitudes sur l'état des produits et de leur quantité prévisionnelle biaisent totalement l'évaluation de cette rentabilité. De plus, la multitude d'objectifs possibles et de configurations envisageables en désassemblage ne facilitent pas cette évaluation. En d'autres termes, l'approche qui consiste à modéliser le produit, à générer ses gammes de désassemblage et à étudier l'implantation des ressources prévues n'est plus suffisante. Il est désormais nécessaire d'intégrer, lors de la génération de gammes, tous les éléments susceptibles d'informer sur le contexte du désassemblage, les particularités constitutives des produits en fin de vie à traiter et les aspects économiques et légaux de valorisation. La méthode de recherche du processus de désassemblage optimal en fonction des considérations système doit être adaptative. Dans le chapitre suivant, un état de l'art sur les méthodes de génération des gammes de désassemblage et d'évaluation des processus de désassemblage est présenté pour introduire, par la suite, la méthode de conception des systèmes de désassemblage que nous proposons.

Chapitre 3 :

CONCEPTION DES SYSTEMES DE DESASSEMBLAGE ETAT DE L'ART

3.1 Introduction

Nous verrons que la plupart des méthodes de conception des systèmes de désassemblage repose sur une approche désormais classique qui est d'étudier le modèle du produit à traiter, de générer des gammes de désassemblage de ce produit et de sélectionner les affectations des ressources matérielles. La première section de ce chapitre est un état de l'art sur la détermination des gammes de désassemblage admissibles. De l'ensemble de ces gammes admissibles, une seule devrait être sélectionnée pour résoudre le problème de désassemblage d'un produit en fin de vie. Il s'agit d'une vision idéaliste car cette gamme sélectionnée est « réputée optimale ». Elle est optimale pour un certain nombre de critères et pas d'autres. Dans la deuxième section de ce chapitre, un état de l'art est présenté sur l'évaluation des gammes ou des processus²⁷ de désassemblage en fonction de différents critères. Certaines méthodes prennent en compte la notion de valorisation, d'autres uniquement les coûts opératoires. La dernière section présente un certain nombre d'approches pour le pilotage de systèmes de production en général et d'assemblage en particulier. Ces approches ont été sélectionnées pour leurs « transposabilité » *a priori* au désassemblage. En effet, le système de désassemblage peut être vu comme un système de production vers lequel affluent des produits en fin de vie et duquel sortent des sous-produits et matières valorisables et des déchets.

3.2 Génération des gammes de désassemblage

En règle générale, la détermination des processus de désassemblage à partir des gammes consiste (1) à choisir toutes les gammes de désassemblage adaptées aux produits traités selon les conditions prédéfinies et les fractions cibles retenues, (2) à sélectionner les ressources appropriées pour exécuter les opérations de désassemblage ainsi considérées et (3) à établir tous les dates d'exécution opératoires et tous les paramètres de production (par ex. prévoir les configurations adaptées des ressources). Par ailleurs, la génération des gammes de désassemblage vise à ramener l'ensemble de toutes les possibilités de désassemblage d'un produit donné à un ensemble réduit qui soit le plus pertinent relativement aux considérations technologiques et économiques du désassemblage. Habituellement, cet ensemble réduit fera l'objet, par la suite, d'une sélection afin d'en tirer la « gamme optimale²⁸ ». La section suivante présente un échantillon des diverses méthodes de génération de gammes en vue de leur évaluation (même approche).

²⁷ « Processus » lorsque des éléments d'ordonnement sont introduits dans l'évaluation.

²⁸ Le caractère optimal peut reposer sur un critère (ex. coût) ou plusieurs critères (taux d'occupation des ressources, conditions environnementales, ...).

3.2.1 Les gammes de désassemblage

La gamme de désassemblage se présente généralement en un ensemble ordonné d'opérations de désassemblage (séquence de désassemblage) ou en une organisation arborescente de ces opérations (désassemblage parallèle). Comme évoqué précédemment, la section suivante présente les travaux de recherche les plus répandus sur la génération d'un ensemble de gammes.

3.2.2 État de l'art

Les travaux de A. Delchambre (1989) font partie de ceux dont la démarche particulière était de générer d'abord les gammes de désassemblage pour en déduire les gammes d'assemblage [13]. Pour ce faire, l'auteur décrit un produit à l'aide de deux types de données : les données géométriques et les données relationnelles. Les données géométriques étaient introduites via une modélisation 3D du produit afin de réduire les temps de calculs de génération des gammes. Les données informationnelles étaient la description de toutes les liaisons entre composants semblable à celle utilisée par A. Bourjault [05]. Cette description a été, cependant, enrichie par une labellisation de chacun des arcs relatifs aux liaisons. Les arcs pouvaient ainsi nous informer sur le type de liaison : posage (p), insertion (i), vissage (s_n), clipsage (c_i),...

La génération des gammes est réalisée en considérant les contraintes géométriques et les contraintes de liaison. Pour le premier type de contraintes, le système de génération de gammes essaie de désassembler un composant en testant les directions de désassemblage possibles et évaluant les collisions éventuelles. Pour le deuxième type de contraintes, le système choisit un composant parmi les composants désassemblables en se basant sur des heuristiques : les sous-ensembles instables sont rejetés et le système regroupe les composants dont les directions de désassemblage sont identiques. Le processus s'arrête quand tous les composants ont été désassemblés [60].

En résumé



Approche globale pertinente.



L'hypothèse de la réversibilité du désassemblage à l'assemblage est forte.

J.-M. Henrioud (1989) a développé une méthode d'élaboration de gammes d'assemblage dont l'approche s'appuie sur le « modèle opératoire » [28]. Il s'agit d'une modélisation des produits à assembler qui prend en compte l'ensemble des caractères à établir pour l'obtention du produit fini (voir §4.2.1.1). Ces caractères sont : les liaisons géométriques, les solidarisation et les caractères complémentaires.

Définition 3.1 : Liaison géométrique

La *liaison géométrique* est la relation spatiale entre deux composants élémentaires. L'ensemble des liaisons géométriques entre tous les composants élémentaires d'un produit représente sa description structurale.

L'obtention des gammes d'assemblage est basée sur la construction d'arbres ET/OU par une approche itérative de décomposition des constituants assemblables jusqu'à l'obtention de tous les composants élémentaires.

Cette méthode d'élaboration des gammes d'assemblage (cf. Figure 3.1) a donné lieu à un logiciel appelé LEGA²⁹ qui fournit toutes les gammes à travers une procédure basée sur un jeu de questions-réponses. Ce logiciel conçu et décrit par J.M. Henrioud [28] et repris par C. Perrard [51] est basé sur un algorithme à structure descendante et est capable de fournir tous les arbres d'assemblage admissibles d'un produit.

Orienté programmation logique, les opérations y sont représentées par des faits et les contraintes sont formalisées par un ensemble de règles. Pour chaque nouvelle opération produite au cours de la génération de gammes, la base de données est consultée afin de déterminer si cette opération est réalisable. L'expert intervient uniquement si cette base ne peut fournir de réponse.

L'assemblabilité des paires de constituants produites dépend de trois contraintes opératoires : (1) l'existence d'une trajectoire permettant leur agrégation sans qu'il y ait collision, (2) la possibilité technologique permettant la réalisation de l'opération et (3) la stabilité du sous-assemblage résultant de l'opération. Il s'agit, respectivement, des contraintes géométriques, matérielles et de stabilité. La formalisation par J.M. Henrioud des contraintes géométriques est telle qu'une contrainte sur une opération d'assemblage d'un constituant *a* reste récurrente pour chaque constituant *b* le comprenant. Elle est, ainsi, reproductible automatiquement.

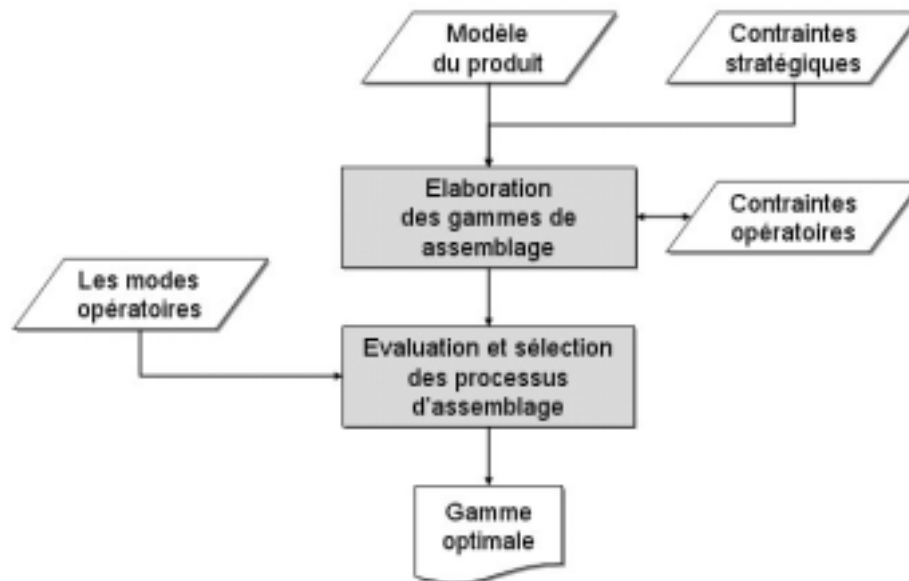


Figure 3.1 : Élaboration de gammes d'assemblage selon J.-M. Henrioud

Pour les produits complexes et dont le nombre de composants est élevé, le nombre de gammes obtenues à partir des seules *contraintes opératoires* devient vite excessif. Il en est de même pour le nombre de questions posées à l'expert. Pour réduire rapidement le nombre de gammes et de questions, des contraintes dites « *stratégiques* » sont introduites en amont. Il s'agit de contraintes qui permettent de définir des sous-assemblages imposés, des groupements de

²⁹ Logiciel d'Elaboration des Gamme d'Assemblage – Logiciel développé au LAB.

composants, un processus linéaire³⁰, des antériorités inter-opérations, etc. Le choix de ces contraintes stratégiques transcrit en fait une stratégie globale d'assemblage du produit qu'il faut convient d'élaborer au préalable.

La phase d'évaluation et de sélection de la gamme de désassemblage repose sur :

1. l'étude de la manipulabilité et la stabilité des sous-assemblages ;
2. l'étude de la difficulté opératoire (accessibilité, direction d'assemblage et nombre de changements de direction) ;
3. l'étude de la difficulté logistique des gammes (nombre d'opérations de transfert, nombre d'opérations de ré-orientation, ...).

Cette méthode d'élaboration de gammes sera celle adoptée pour la génération de gammes de désassemblage que nous présenterons dans le chapitre 4. Le modèle du produit et les contraintes opératoires et stratégiques correspondront aux caractéristiques du désassemblage.

En résumé



Approche globale pertinente.
Formalisme de récurrence des contraintes opératoires remarquable.



Le processus de questions-réponses devient rapidement excessif pour les produits complexes.

Pour la génération des gammes de désassemblage, Y.Q. Lee (1992) se limite à l'ensemble des relations de précedence entre les composants. Tout autre facteur, comme la stabilité, est négligé [43]. Il introduit, par la suite, les notions de degré de liberté et de degré d'interférence. Celles-ci sont introduites par deux matrices : la « matrice d'interférence » et la « table de balayage ».

La matrice d'interférence représente les degrés d'interférence d'un composant sur chaque composant du produit. Dans l'exemple de la Figure 3.2, les trois degrés d'interférence induits par le composants (**b**) (considéré comme fixe) pour l'extraction du composant (**a**) (considéré comme mobile) sont dans les directions : vers la droite (D), vers le haut (H) et vers le bas (B) (cellule grisée dans le Tableau 3.1).

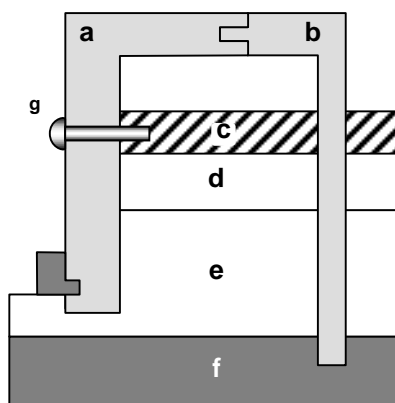


Figure 3.2 : Exemple X pour l'étude de la méthode de Y.Q. Lee

³⁰ Pour chaque opération, un composant élémentaire est assemblé au sous-produit.

Composants	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
<i>a</i>		GHB	GH	GH	GHD	H	HDB	HDB
<i>b</i>	HDB		GHD	GHD	GHD	GHD	D	D
<i>c</i>	DB	GDB		H	H	H	HDB	
<i>d</i>	DB	GDB	B		H	H	B	
<i>e</i>	GDB	GDB	B	B		H	B	DB
<i>f</i>	B	GDB	B	B	B		B	B
<i>g</i>	GHB	G	GHB	H	H	H		H
<i>h</i>	GHB	G			GH	H	B	

B : Bas ; G : Gauche ; D : Droite ; H : Haut.

Tableau 3.1 : Matrice d'interférence ITM de produit X

La table de balayage est une réécriture de la matrice d'interférence dans le sens où elle indique l'ensemble des composants interférant sur le désassemblage d'un autre composant et pour une direction de désassemblage donnée. Cette table de balayage sert de point de départ au processus de génération des séquences de désassemblage.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
H	bgh	a	abg	abcg	abcd gh	abcd egh	ac	ag
B	bcdef gh	acdef	defg	cf	f	•	acdef h	aef
G	egh	acdef gh	abg	ab	abh	b	•	•
D	bcde	cdef	b	b	ab	b	abc	abe

Tableau 3.2 : Table de balayage résiduelle du produit X

Les composants ayant un • (composants directement désassemblables) sont désassemblés. La table est alors modifiée en effaçant les composants désassemblés (Tableau 3.2). De nouveaux composants désassemblables apparaissent dans la table résiduelle et le processus est répété. Lorsque qu'il n'y a plus aucun composant désassemblable, la recherche s'arrête.

En résumé



Approche globale pertinente.

Notions de degrés de libertés et de degrés d'interférence intéressantes pour la déduction des contraintes géométriques simples automatiquement.



La méthode ne permet de traiter que les processus linéaires.

La modélisation préalable des interférences est nécessaire.

Directions de désassemblage limitées à des trajectoires droites.

Pour la génération de gammes d'assemblage et de désassemblage, L. Laperrière (1992) modélise, tout d'abord, le produit par un graphe orienté $D = \{C, R\}$ dont les nœuds et les arcs représentent, respectivement, l'ensemble C des composants et l'ensemble R des relations d'assemblage pouvant être, par exemple, des simples liaisons de contact ou des solidarités [42]. (cf. Figure 3.3–b). L'arc orienté sous-entend la détermination préalable d'un composant fixe et d'un composant mobile. Dans ce cas, le composant mobile pointe vers le composant

fixe. Si ce genre de relation ne peut pas être clairement défini alors l'orientation n'est pas significative et n'est pas considérée.

Un des aspects de ces travaux qui nous a paru le plus important est la phase de génération des gammes de désassemblage. Il s'agit d'une démarche de décomposition successive d'un produit comprenant n composants en un ensemble de $n-1$ opérations sous la forme de bipartitions donnant lieu à des sous-graphes représentant les sous-ensembles du produit. Il y est considéré un ensemble de contraintes conditionnant l'élaboration de ces gammes. Il s'agit :

- des contraintes de faisabilité géométrique ;
- des contraintes d'accessibilité ;
- des contraintes de restriction de composants.

Les contraintes géométriques s'établissent automatiquement par une définition préalable des directions de désassemblage de chaque composant et par la détection des non-conformités de direction de désassemblage pour chaque opération. L'exemple de la Figure 3.3 montre que l'extraction du composant (**b**) du reste du produit implique la rupture des liaisons R_1 et R_2 .

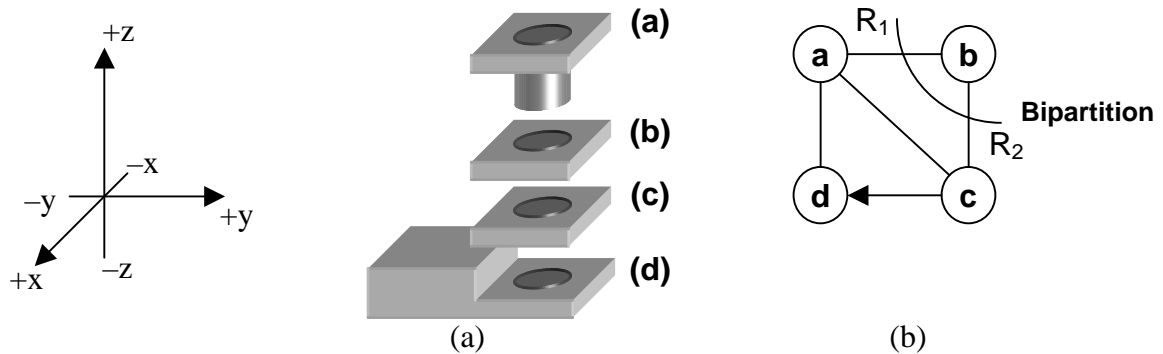
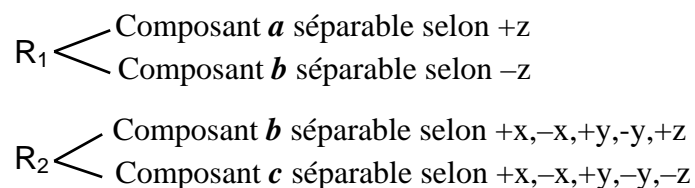


Figure 3.3 : Bipartition du graphe des liaisons selon L. Laperrière

La première est « géométriquement faisable » car la direction d'extraction du composant (**b**) est $-z$ et celle du composant (**a**) est $+z$. En revanche, la deuxième (R_2) ne peut être géométriquement faisable car le composant (**c**) doit aussi être extrait dans la même direction : $-z$.



Remarque

On peut se demander pourquoi il n'y a pas d'arcs ab et bc ? En fait, le caractère fixe ou mobile que l'on peut attribuer n'est fonction que des deux composants en question. Par conséquent, ne sachant pas si **a** serait séparé de **b** uniquement, de **bc** ou encore de **bcd**, il n'est pas pertinent de s'avancer sur la mobilité de l'un ou l'autre des composants **a** et **b**. C'est la même situation pour les composants **b** et **c**.

La contrainte d'accessibilité est introduite manuellement pour identifier toute opération ne pouvant être réalisée en raison de problèmes d'accessibilité liés aux outils de préhension en particulier et aux problèmes technologiques en général (extraction du composant *a* de (b,c), Figure 3.4).

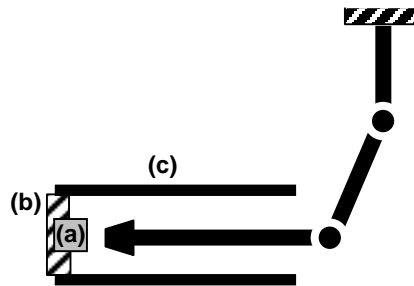


Figure 3.4 : Problème d'accessibilité typique en assemblage/désassemblage

La contrainte de restriction de composants est, en fait, une interdiction de certains états lors de la génération des gammes. L'exemple d'un sous-assemblage devenant instable au retrait de l'un de ses composants représente un cas où la contrainte de restriction de composants est utile.

En résumé

- ⊕ Prise en compte de l'accessibilité des constituants.
- ⊖ Introduction des contraintes manuellement.
Directions de désassemblage limitées à des trajectoires droites.

D. Dutta & al. (1995) proposent une méthode de génération d'arbres de désassemblage (DT : *Disassembly Tree*) grâce à un algorithme reposant sur le principe de l'épluchage d'un oignon (*Onion peeling*) [16]. Cet arbre de désassemblage représente une seule gamme de désassemblage linéaire (« séquentielle » selon les termes de l'auteur). L'arbre de désassemblage est trouvé à partir de deux graphes intrinsèques au produit :

- Le graphe des liaisons (*Component Mating Graph*, CMG) qui représente le produit au niveau des composants. Les nœuds et les arcs de ce graphe représentent, respectivement, les composants et les liaisons entre eux.
- Le graphe des adjacences (*Face Adjacency Graph*, FAG) qui est une représentation du produit à un niveau inférieur. En effet, les nœuds et les arcs représentent, respectivement, les faces d'un composant et leurs adjacences.

Dans le graphe des adjacences présenté à la Figure 3.5, 6 faces du composant A dont 2 faces communes avec le composant B sont représentées. Les faces f_1 et f_2 sont communes aux composants A et B. Il existe donc une liaison entre A et B. Les faces f_3 , f_4 et f_6 du composant A sont des faces « extérieures³¹ ». Le graphe des liaisons (CMG) montre qu'il existe une liaison entre le composant A et B.

³¹ Celles qui ne sont pas en contact avec des composants.

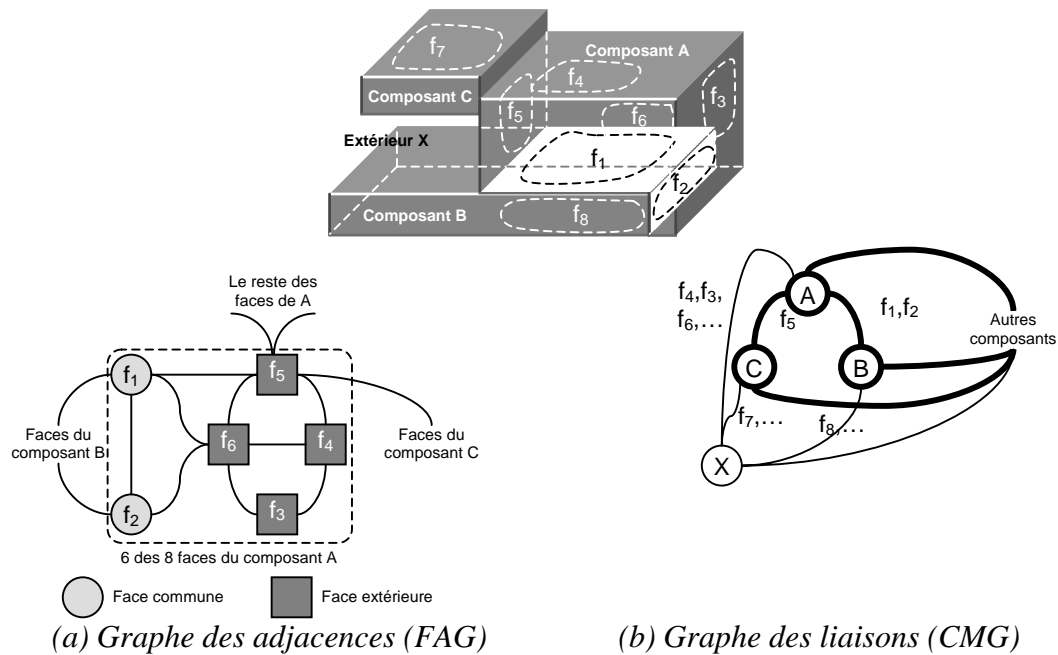


Figure 3.5 : Graphe des liaisons et graphe des adjacences selon D. Dutta

L'élaboration de l'arbre de désassemblage se fait en plusieurs étapes. A partir des graphes GFA et CMG, les composants ayant une frontière avec l'extérieur (ils sont appelés composants frontières) sont identifiés et leur désassemblabilité est évaluée.

Les composants désassemblables sont ajoutés à l'arbre de désassemblage comme enfants de la racine. Par la suite, les graphes GFA et GCM sont mis à jour en effaçant, d'une part, les composants désassemblés pour le graphe GCM et, d'autre part, les faces des composants pour le graphe GFA. L'algorithme s'arrête quand il n'y a plus de composant à ajouter à l'arbre de désassemblage.

En résumé

- ⊕ Formalisme facilitant l'implémentation informatique.
- ⊖ La méthode ne permet de déterminer qu'un seul processus linéaire. Inexistence de considérations matérielles. Modélisation complexe.

S. Chen (1997) a développé un graphe des contacts afin de réduire l'explosion combinatoire lors de la génération des gammes de désassemblage et ce en se basant sur un algorithme d'extraction de composants par épluchage d'oignon (Onion peeling) [09]. La méthode se présente en une représentation 2D (par des polygones) du produit dont sont extraites les relations de contact entre les faces des composants. Le principe est d'identifier, pour chaque composant, toutes les faces partagées avec d'autres composants. L'enchaînement des faces de contact forme les arêtes d'un polygone. Il en résulte un « graphe des contacts » (cf. Figure 3.6). Les sommets du graphe sont caractérisés par leur degré. Le degré d'un sommet représente, en fait, le nombre d'arêtes qui relient ce sommet. Ainsi, le sommet terminal (V_T) est un sommet de degré 1. Le sommet intermédiaire (V_I) est un sommet de degré supérieur à deux. Un sommet de degré deux est appelé sommet simple (V_S).

S. Chen définit ensuite des listes d'arêtes ayant pour début et fin des sommets terminaux ou intermédiaires et comme points intermédiaires des sommets simples (cf. Figure 3.6-b). Le

graphe est par la suite simplifié en remplaçant chaque liste d'arêtes par une nouvelle arête simple (cf. Figure 3.6-c). Après simplification, le graphe des contacts consiste alors seulement en des arêtes V_T-V_I ou V_I-V_I .

L'algorithme de génération des gammes proposé par S. Chen permet la détermination des composants et sous-ensembles désassemblables. C'est-à-dire ceux ayant des sommets terminaux. Les sous-ensembles étant considérés, l'approche permet la détermination de processus parallèles. Ce qui distingue l'approche de S. Chen des méthodes précédemment décrites est la détection des sous-ensembles désassemblables, basée sur les propriétés du graphe des contacts [60].

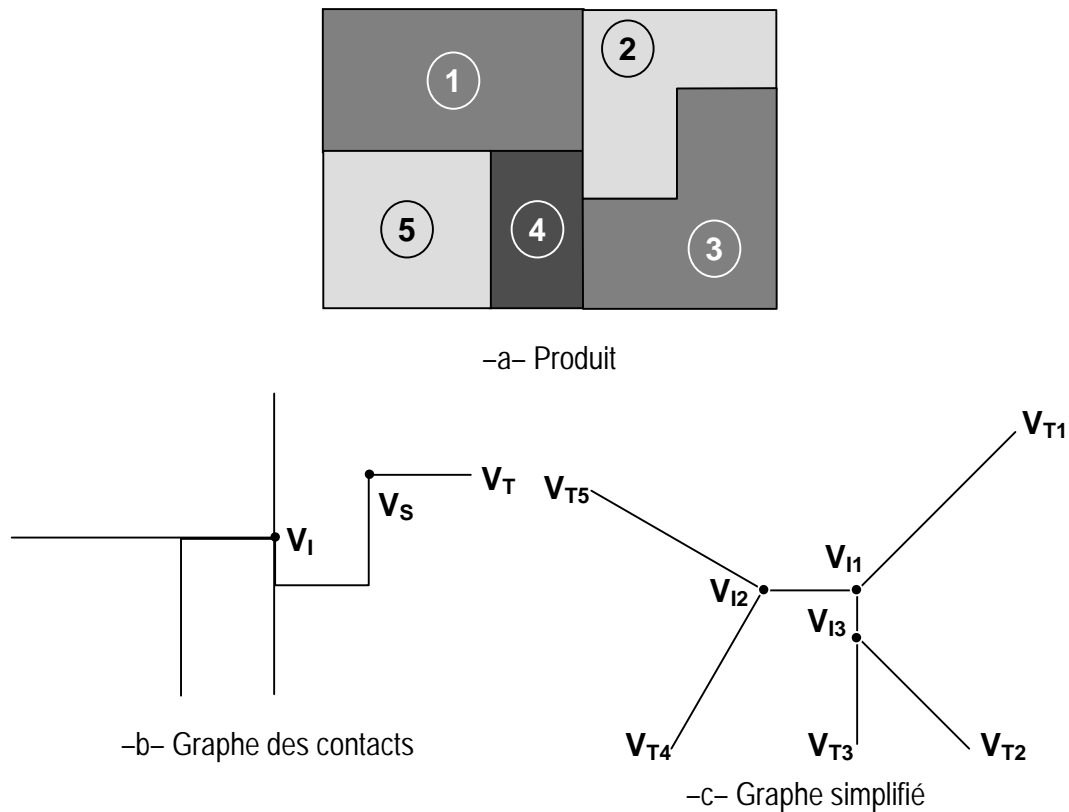


Figure 3.6 : Exemple de graphe des contacts selon S. Chen

En résumé

- ⊕ Approche globale pertinente.
Production de gammes parallèles.
- ⊖ Représentation 2D souvent insuffisante par rapport à la complexité des produits actuels.
Inexistence de considérations matérielles.

P. Borst (1997) a développé aussi une modélisation du produit par un ensemble de composants et de liaisons, et ce en affectant deux caractéristiques à chacune des liaisons considérées [04]. La première indique l'existence d'une énergie de cohésion renforçant la relation de contact entre deux composants. Si c'est le cas, la liaison sera qualifiée de « *solidarisée* ». Cette énergie doit nécessairement être supprimée avant l'extraction d'un composant. Dans le cas où il n'y a aucune énergie de cohésion, la liaison sera qualifiée de

« *non-solidarisée* ». Dans ce cas, les composants sont uniquement en contact, sans force additionnelle.

La deuxième caractéristique de la liaison informe sur la direction suivant laquelle la liaison limite le mouvement des composants liés. Ainsi, la liaison peut être « *contre* » si la liaison limite le déplacement dans une direction perpendiculaire à la surface de contact ou « *latérale* » si la liaison limite le déplacement dans une direction parallèle à la surface de contact.

Par combinaison de ces deux caractéristiques, nous pouvons nous retrouver devant quatre liaisons possibles :

- Liaison contre solidarisée ;
- Liaison latérale solidarisée ;
- Liaison contre non solidarisée ;
- Liaison latérale non solidarisée.

A partir de ces liaisons, P. Borst représente le produit par un modèle « *composants-liaisons* ». Nous donnons si après, un exemple simple qui met en évidence la combinaison de deux types de liaisons sur un composant vis-à-vis de deux autres (cf. Figure 3.7).

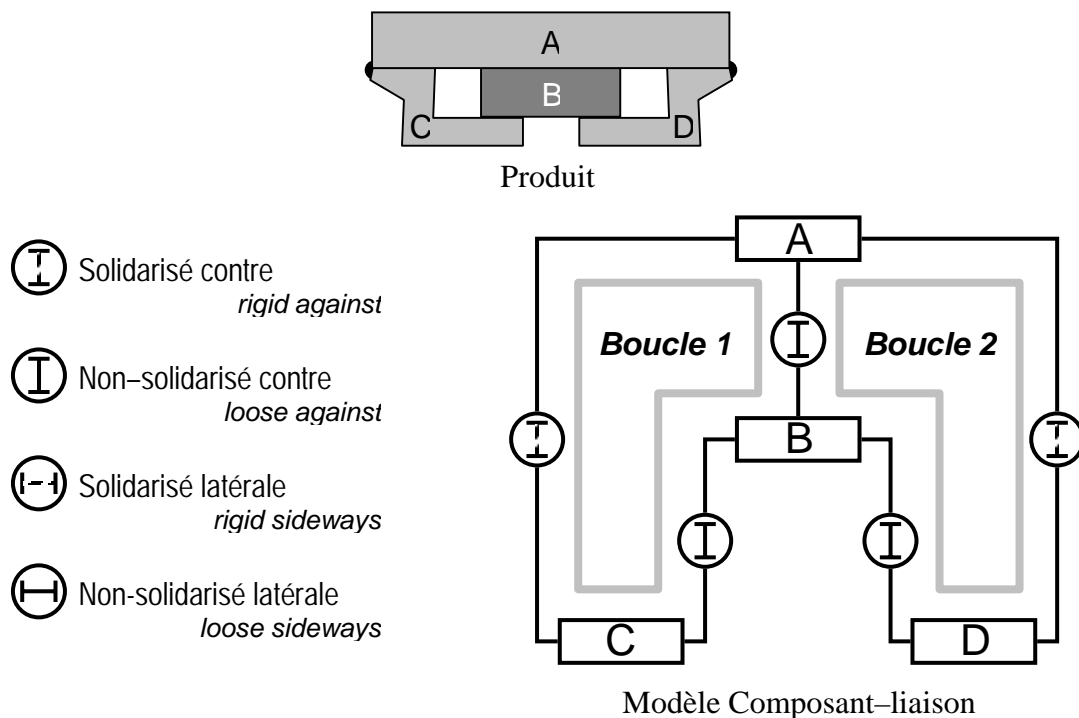


Figure 3.7 : Exemple de modèle composant-liaison de P. Borst

P. Borst propose un algorithme permettant de générer automatiquement un arbre ET/OU à partir de la détermination des « sous-assemblages libres », ceux sont des groupes de composants qui peuvent être séparés du reste du produit car ils ne sont liés par aucune solidarisation au reste du produit. De plus, pour chacun d’eux, il y a au moins une direction de désassemblage commune. Ceci est vérifié justement grâce aux notions de liaisons contre et latérale. L’algorithme inclut aussi une analyse simple des coûts de désassemblage pour permettre une évaluation des gammes.

En résumé

- +** Typologie des solidarisations intéressante.
- Inexistence de considérations matérielles.
Directions de désassemblage limitées à des trajectoires latérales et frontales sans notion de sens.

Parti des mêmes considérations géométriques que les auteurs précédents, K. Moore et al. (1998) ont développé une méthode de génération des gammes de désassemblage basée sur les relations de précedence de type ET, OU mais aussi des relations de précedence complexes ET/OU et XOR entre les composants du produit considéré [75]. Les auteurs définissent ces relations de précedence comme suit :

<i>Relations de précedence</i>		
ET	Une relation de précedence ET entre deux composants C_1 et C_2 en relation avec C_3 signifie que C_1 ET C_2 doivent être désassemblés avant C_3 .	\times
OU	Une relation de précedence OU entre deux composants C_1 et C_2 en relation avec C_3 signifie que C_1 OU C_2 doit être désassemblé avant C_3 .	$+$
OU- exclusif	Une relation de précedence OU-exclusif (\oplus) entre trois composants C_1 , C_2 et C_3 en relation avec C_4 signifie que C_1 ET ($C_2 \oplus C_3$) doivent être désassemblés avant C_4 .	\oplus

Pour des besoins de formalisation, ces relations de précedence sont regroupées en une matrice (dite de précedence) : $B = \left[b_{ij} \right]_{i,j=1..k}$ où k représente le nombre de composants dont est constitué le produit considéré.

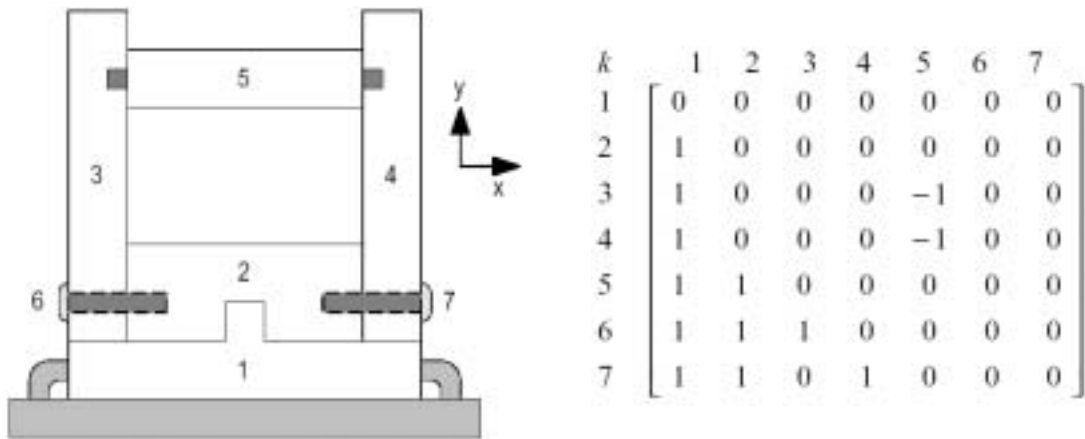
Les éléments de la matrice sont définis comme suit :

$$b_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \text{si le composant } i \text{ "ET précède" le composant } j \\ d \quad \text{si le composant } i \text{ "OU précède" le composant } j \\ -1 \quad \text{si le composant } i \text{ "XOR précède" le composant } j \\ 0 \quad \text{sinon} \end{array} \right\}$$

où d représente une des directions de désassemblage considérées ($-x, +x, -y, +y$).

A partir de cette matrice, K. Moore propose un algorithme permettant de générer automatiquement les gammes de désassemblage tout en faisant un certain nombre de remarques sur les relations de précedence et en appliquant un ensemble de règles de construction permettant l'obtention d'un réseau de Petri de désassemblage complet.

Un exemple, donné dans [75], est rappelé ci-après avec la matrice de précedence correspondante.



(a) Produit X (6 composants, directions de désassemblage dans le plan (x,y)) (b) Matrice de précedence étendue (XOR)

Figure 3.8 : Exemple de matrice de précedence selon K. Moore

En résumé

- ⊕ Formalisme intéressant facilement implémentable.
- ⊖ Inexistence de considérations matérielles.
La méthode ne permet de traiter que les processus linéaires.
Nécessite la détermination d'un composant de base

L'objectif de S. Gerner (2001) est de générer un processus de désassemblage pour une cellule automatisée destinée au recyclage [22]. Celle-ci repose sur une plate-forme de recyclage appelée « REX » (présentée dans [11]) dont l'organisation est donnée par la Figure 3.9.

Ainsi, la cellule assure trois fonctions globales pour démonter un produit : la conception du processus de démontage, la commande des ressources de la cellule et le contrôle et la supervision. Le processus de désassemblage est élaboré en fonction du scénario de désassemblage. Le scénario classe les composants du produit selon leurs options de fin de vie déterminées par le diagnostic et cherche à les regrouper dans des « *super-composants* ».

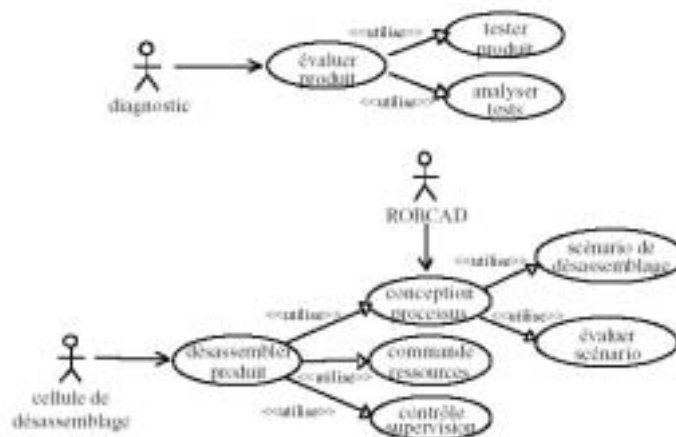


Figure 3.9 : Diagramme de séquences - REX

Les super-composants sont des sous-ensembles de composants qui ne doivent pas être désassemblés. Ils réduisent ainsi le nombre d'opérations de désassemblage et sont fonctions des destinations de fin de vie associées aux composants. Ensuite, l'ordre d'extraction des composants (et super-composants) est établi et les séquences des activités de désassemblage sont déterminées. Ces séquences libèrent et extraient les pièces détachées, les polluants et les composants appartenant aux différentes fractions de matières premières. Enfin, le processus de désassemblage du produit conforme au scénario est évalué par la comparaison du désassemblage avec d'autres options de recyclage, comme par exemple le broyage, afin de déterminer des solutions efficaces au niveau économique et écologique [21].

La génération des scénarii de désassemblage comprend une partie statique et une partie dynamique. La partie statique correspond à la représentation du produit en fonction de la valorisation et la partie dynamique s'occupe des activités de désassemblage et de leur affectation aux ressources de l'atelier. Pour créer les scénarii, le logiciel de CFAO ROBCAD³² a été utilisé pour fournir un environnement virtuel qui intègre une maquette virtuelle pour simuler les activités de désassemblage. Les contacts sont ainsi déterminés par un test de collision statique, ainsi que les contraintes de précédence qui déterminent les composants qui empêchent l'accès à un composant donné (cf. Figure 3.10). Les précédences d'un composant sont détectées par son déplacement selon un axe de translation (six axes sont considérés, $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$) avec une analyse de collision. Ces précédences définissent pour chaque composant les composants qui doivent être enlevés afin de le libérer. Lorsqu'un composant est libéré, il doit être extrait. A chaque extraction est associée une activité de désassemblage. A ce niveau, la désassemblabilité du composant est évaluée en tenant compte de la ressource. Pour cela, une trajectoire de robot, est générée. Cette trajectoire doit être sans collision sinon l'opération est jugée non réalisable. Lorsqu'une trajectoire est trouvée, le composant est effectivement extrait et le processus est répété jusqu'à ce que tous les composants soient extraits [60].

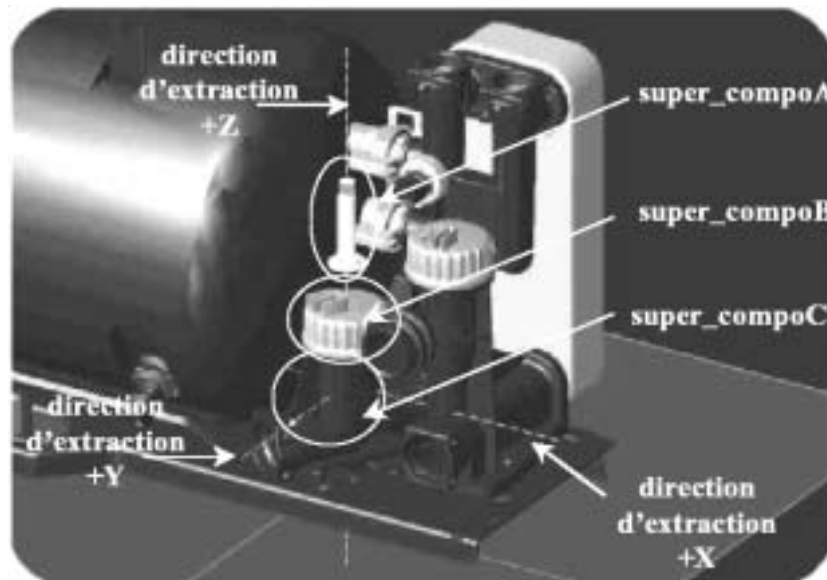


Figure 3.10 : Etablissement des contraintes de précédence par simulation de déplacement sur ROBCAD

³² Robcad est l'un des outils de programmation hors ligne (PHL) les plus utilisés. Il a été développé par Tecnomatix Technologies Ltd. La nouvelle version est désormais baptisée : eM-Workplace.

En résumé



Prise en compte des ressources du système.
Prise en compte de l'accessibilité des constituants (CAO).



La méthode ne permet de traiter que les processus linéaires.

3.2.3 Bilan

L'échantillon ci-dessus de ce qui se fait en termes de génération de gammes indique clairement que la totalité des méthodes repose principalement sur la représentation du produit via un modèle. Cette représentation peut être directe ou détournée. Dans le premier cas, la modélisation consiste à décrire le produit en fonction des relations physiques existant entre ces composants (liaisons, solidarisions, ...). Dans le deuxième cas, la modélisation consiste à prendre en compte non plus les relations de contact entre les composants mais les relations de précédence, d'accessibilité, d'interférence, d'adjacence, ... entre les composants. Il arrive aussi que les deux modélisations s'agrègent. Les travaux présentés montrent que la phase de génération et d'optimisation des gammes est d'autant plus robuste que les informations sur le produit sont riches, ceci au prix, naturellement, d'une complexité accrue. Les algorithmes les plus simples sont ceux qui font appel à un modèle basé uniquement sur les relations de contact. Nous avons remarqué, par ailleurs, que l'identification des contraintes géométriques reste une condition *sine qua non* pour une génération de gammes pertinente. Ces contraintes géométriques peuvent être alors précisées en termes de désassemblabilité, d'accessibilité, ...

3.3 Évaluation des processus de désassemblage

Lorsque l'ensemble des gammes de désassemblage admissibles est obtenu, la phase suivante est habituellement de sélectionner une gamme optimale en termes de coût, de taux de valorisation, de complexité, etc. La notion d'optimalité est complexe car plusieurs critères sont à prendre en compte. Plusieurs auteurs de travaux sur l'évaluation des gammes de désassemblage ont fait des choix sur ces critères afin de simplifier le problème. Les auteurs cités ci-dessous ont, pour certains, développé des méthodes statiques dont l'évaluation des gammes se fait en amont de leur exécution. D'autres ont proposé des méthodes dynamiques surtout pour pallier les difficultés dues à l'état du produit.

3.3.1 État de l'art

La démarche de H.C. Zhang et T.C. Kuo (1996) consiste en l'analyse du désassemblage en exploitant une base de données technique et en optimisant les coûts de valorisation par la sélection de la séquence de désassemblage adéquate (cf. Figure 3.11) [69][70]. L'analyse du désassemblage est classique. Elle repose sur deux phases : l'analyse du modèle du produit et la génération de l'arbre de désassemblage et ce en se basant sur les données techniques du produit traité (matière, type de solidarisions, masse des composants, ...). Cet arbre de désassemblage est obtenu par bipartition du graphe des liaisons appelé « component-fastener graph ». L'auteur explique que le résultat de la bipartition est un *unique* arbre de désassemblage !

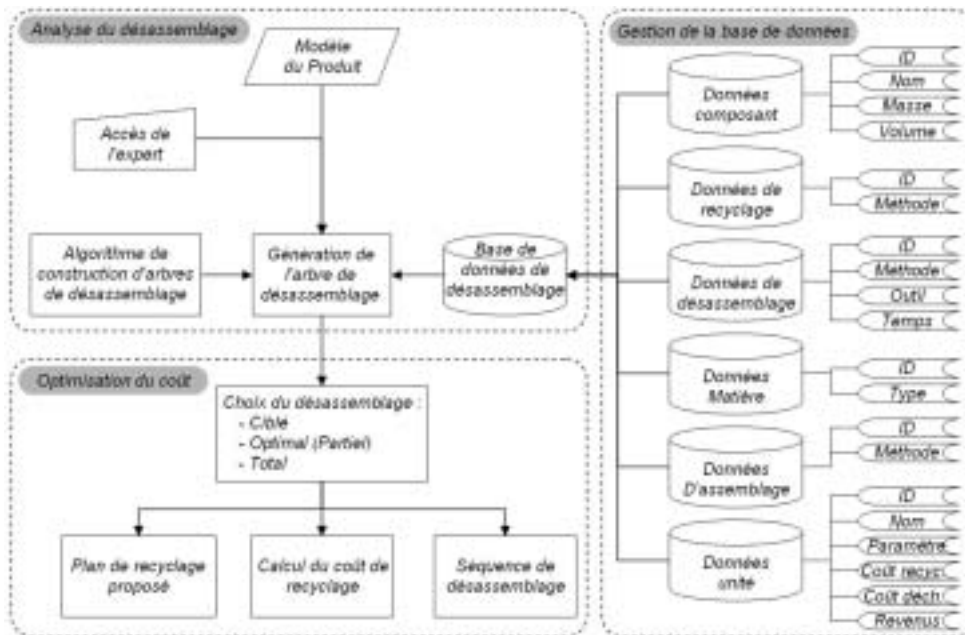


Figure 3.11 : Modèle de désassemblage selon H. C. Zhang

L'optimisation des coûts de valorisation consiste à rechercher la séquence de désassemblage la moins coûteuse depuis cet arbre de désassemblage. Pour ce faire, la connaissance du coût de désassemblage, du coût de traitement matière, du coût de mise en décharge et du revenu de vente de chaque composant est nécessaire. Bien évidemment, une seule destination fin de vie est retenue pour les constituants. L'auteur prend ainsi en compte la valorisation matière, la réutilisation et la mise en décharge. Cette optimisation est réalisée par le biais d'un algorithme dédié. Celui-ci permet de décider de la destination fin de vie la plus rentable à partir de la base de données technique pour le désassemblage. Le caractère partiel, ciblé ou total du désassemblage doit être préalablement précisé.

En résumé

- ⊕ La mise en place d'une base de données technique pour la valorisation est une bonne initiative.
- ⊖ Le désassemblage est limité à un processus linéaire.
Le formalisme de génération de l'arbre de désassemblage (par bipartition) se limite aux seuls caractères géométriques des composants élémentaires.

La méthode qu'ont adoptée M. Johnson et M. Wang (1998) repose sur un double objectif : l'évaluation et l'optimisation d'un processus de désassemblage pour la valorisation [33][34]. Leur méthode commence par l'étude de la faisabilité de la valorisation puis par la recherche de la gamme optimale via une phase de génération de séquences de désassemblage et une phase d'optimisation. La méthode se termine par l'identification des recommandations de conception en fonction des constats et difficultés rencontrés (cf. Figure 3.12).

La faisabilité de la valorisation s'apprécie par :

- la détermination des revenus de valorisation,
- l'identification des fractions à valoriser et des matériaux à récupérer,
- l'analyse des options de valorisation possibles et du taux de valorisation global
- et enfin par l'inventaire des différentes contraintes relatives au produit, au système et à la conjoncture générale.

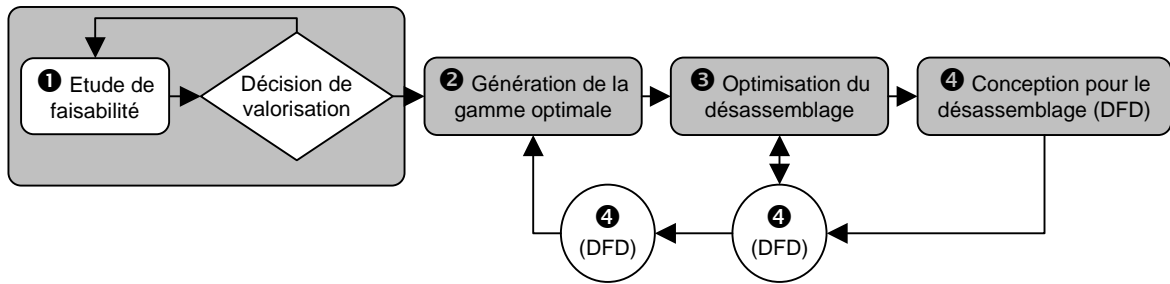


Figure 3.12 : Planification du désassemblage selon M. Johnson et M. Wang.

Par la suite, la recherche de la meilleure gamme de désassemblage se fait par l'optimisation d'une fonction globale sur la base des coûts de désassemblage et des revenus de valorisation. Les auteurs se basent sur une analyse économique conséquente. Une deuxième optimisation se fait par des regroupements de composants et d'éventuelles modifications des objectifs et options de désassemblage. Durant ces deux optimisations, des recommandations de conception sont élaborées pour permettre une meilleure accessibilité aux composants, un plus facile regroupement de certaines fractions et des coûts de désassemblage réduits.

En résumé

- ⊕ Approche globale pertinente.
Analyse économique consistante de la « valorisabilité » des composants.
- ⊖ L'intégration de l'analyse économique dans la méthode de génération de gammes de désassemblage est complexe.
Inexistence de considérations matérielles.

A. Gungor et S.M. Gupta (1998) proposent que les différentes possibilités de séparation systématique d'un produit en constituants, en composants élémentaires ou en autres types de groupements soient générées grâce à un modèle CAO de ce produit [25]. Toutefois, la présence d'un haut niveau d'incertitude du aux altérations du produit durant le cycle de vie et aux aléas survenant lors du désassemblage rendent extrêmement difficile leur intégration dans un tel modèle. Les auteurs proposent, alors, une méthode d'optimisation à deux niveaux lors de la recherche de la meilleure séquence de désassemblage (cf. Figure 3.13).

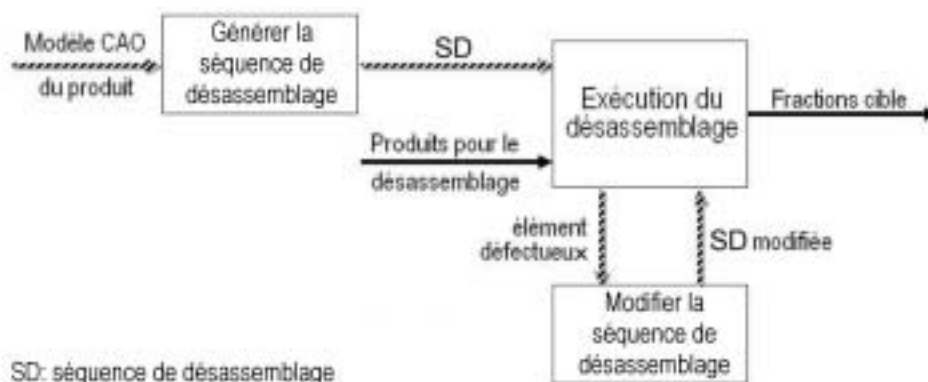


Figure 3.13 : Modification d'une gamme en exécution selon A. Gungor

En effet, après la génération des relations de précedence sur des considérations géométriques, une première optimisation s'opère pour fournir la séquence de désassemblage optimale. Par la suite, une deuxième optimisation permet la résolution des problèmes liés aux incertitudes et la

génération d'un nouveau processus de désassemblage alternatif. Ce deuxième niveau est exécuté lors de la réalisation du processus de démontage. Ces deux niveaux d'optimisation sont possibles grâce à des algorithmes dédiés.

Les hypothèses prises au départ sont que :

1. la description CAO du produit originel est connue ;
2. la structure du produit a changé durant le cycle en raison de dégradations ;
3. seul le désassemblage d'un produit à la fois est pris en compte ;
4. lorsqu'un composant est défectueux, il n'est plus désassemblable.

Après avoir construit une matrice de précédence pour le désassemblage du produit, une méthode heuristique est utilisée pour produire la séquence de désassemblage optimale. Il s'agit d'une optimisation des coûts et revenus de la séquence de désassemblage. L'auteur considère, pour ce faire, les temps de changement d'outils, les temps de changement de direction de désassemblage, le nombre de composants et leurs temps de désassemblage. La nature de la méthode donne, par conséquent, un optimum local. Les détails sur l'algorithme proposé sont dans [23][24].

L'étape suivante consiste, tout simplement, à exécuter les opérations de désassemblage une à une jusqu'à arriver à un composant défectueux. Dans ce cas, l'opération alternative prévue est exécutée. Le coût de cette opération et le nouveau revenu de ce composant défectueux sont intégrés à la fonction de coût global en remplacement de ceux d'un composant sain. L'exécution des opérations continue par la suite. L'algorithme utilisé repose sur le principe de transvasement d'éléments d'une pile vers une autre. L'une des piles contient les composants déjà retirés, une deuxième contient les composants défectueux retirés et une troisième ceux en attente.

En résumé



Heuristique d'optimisation des coûts de désassemblage intéressante.



La méthode permet de ne traiter que les processus linéaires.

Elle nécessite la connaissance préalable de toutes les opérations alternatives possibles pour le désassemblage d'un produit dont l'état est incertain !

La quatrième hypothèse énoncée est fortement réductrice.

A. Zussman (2000) a mis en place une démarche pour concevoir et implémenter des processus de désassemblage adaptés [71]. Et ce, en utilisant les réseaux de Petri (RP) pour la valorisation des produits hors d'usage. La modélisation et la planification de processus par les RP est présenté par le schéma synoptique de la Figure 3.14, le but étant d'être capable de générer des processus adaptés (générés sur la base des données du produit), qui soient à même de remplacer un processus déficient en cours d'exécution.

Le RP de désassemblage est constitué, classiquement, de transitions et de places. Celles-ci représentent, respectivement, les opérations de désassemblage et les sous-assemblages. Ces derniers comprennent le produit initial, les constituants intermédiaires et les fractions cibles. Une *fonction-valeur* (*Value function*) est associée à chaque place et une *fonction-coût* (*cost function*) à chaque transition.

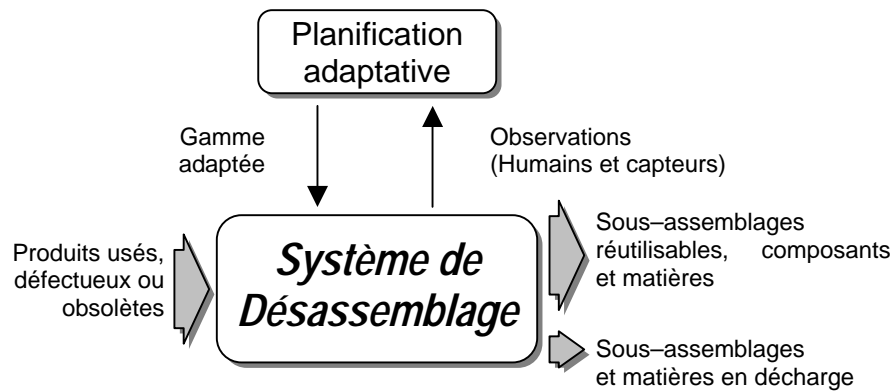


Figure 3.14 : Flux de matières et d'informations du système adaptatif de désassemblage selon A. Zussman

La première indique ce que peut rapporter chaque constituant selon sa destination de fin de vie la plus favorable. La deuxième indique le coût de désassemblage de chacun d'eux. De plus, les transitions se voient attribuer deux valeurs : une valeur de pré-franchissement (*Pre-firing*) et une autre de post-franchissement (*Post-firing*). La première valeur indique le niveau de priorité de franchissement de la transition ; elle est appelée la **valeur de décision** (*Decision value*). La deuxième indique la probabilité (ou le taux) de succès de franchissement de la transition et par conséquent le succès de l'opération de désassemblage correspondante ; elle est appelée **valeur de probabilité** (*Probability value*). Cette dernière valeur est mise à jour en temps réel et en fonction des résultats prélevés.

Comme le montre la Figure 3.14, la partie planification fournit une gamme de désassemblage présélectionnée pour chaque produit choisi, et cela à partir des fonctions valeur et des fonctions coût. Le choix de la gamme est basé sur les données du produit préalablement intégrées dans le système. Durant l'exécution du processus de désassemblage, les observations humaines et celles issues des capteurs du système sont collectées et envoyées à la partie planification. Elles serviront à mettre à jour les valeurs associées aux opérations et aux constituants. A partir de là, le processus de désassemblage est adapté en fonction des valeurs de probabilité et de décision.

La valeur de décision n'est, en fait, qu'un niveau de priorité qui permet de choisir parmi toutes les opérations possibles pour le désassemblage, celle qui est préférable. La probabilité de succès vient compromettre cette priorité dans le cas où l'opération (transition) choisie présente un taux d'échec opératoire important. Trois algorithmes ont été développés pour permettre de choisir l'opération alternative (une des transitions de sortie de la place considérée) qui présente le meilleur compromis entre le niveau de priorité et le taux de succès.

La conception et l'exécution d'un processus de désassemblage d'un poste de radio ont été effectuées selon la démarche précédemment décrite (cf. Figure 3.15-a). L'expérimentation du scénario de désassemblage a été réalisée au sein d'une cellule expérimentale constituée, entre autres, par deux bras robotisés : un Mantec 6ddl et un Scara 4ddl (cf. Figure 3.15-b).

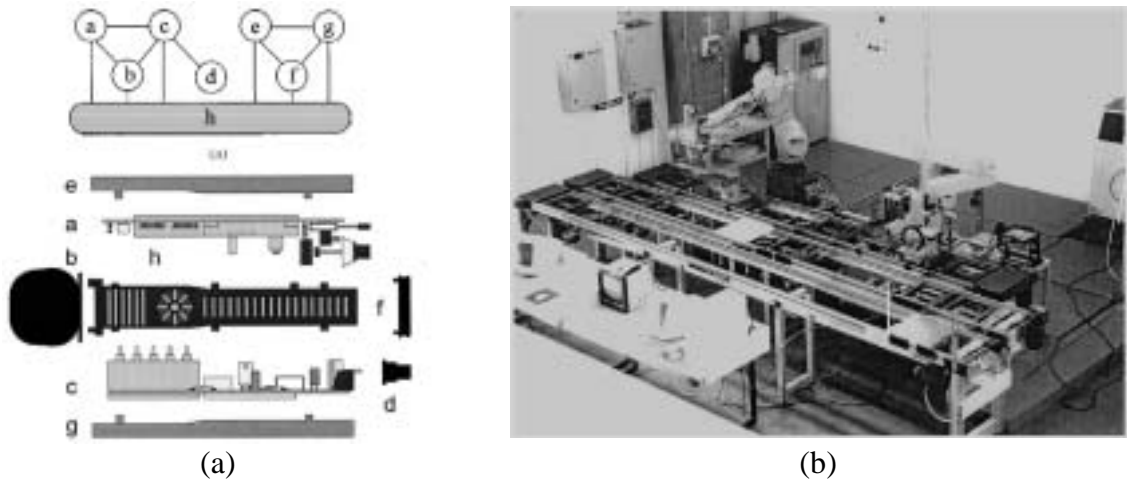


Figure 3.15 : Etude de désassemblage d'un poste de radio et simulation dans une cellule prototype de désassemblage

En résumé

- ⊕ Approche globale pertinente.
Prise en compte des ressources du système.
Considération des incertitudes opératoires.
- ⊖ Toutes les données pour l'optimisation sont préalablement intégrées par un expert.
Les fonctions valeur et coût sont fixées au départ et ne peuvent varier en fonction des détériorations des composants dues aux opérations elles mêmes.

Dans la démarche de T. Murayama (2001), le désassemblage est évalué selon deux critères : le temps de désassemblage et la désassemblabilité [48]. Les auteurs ont développé un logiciel qui génère les séquences de désassemblage par bipartitions (cut-sets) du graphe des liaisons du produit. La désassemblabilité est déterminée à partir de sa représentation CAO. Ce logiciel permet aussi d'évaluer la facilité de désassemblage³³. L'une des principales hypothèses est que le désassemblage considéré vise à récupérer un constituant *cible* noté M_1 (M_2 désigne le constituant formé de tous les composants du produit excepté le constituant cible). Il s'agit donc de désassemblage pour la maintenance.

L'objectif est alors d'arriver à l'extraction de ce composant avec un désassemblage minimum. Lors de la recherche des cut-sets, l'auteur utilise une « *fonction d'entropie* » (cf. Figure 3.16) pour sélectionner les cut-sets préférables relativement au composant cible. Dans cette démarche, seuls les liaisons et les graphes de précédence sont considérés.

³³ La différence entre la désassemblabilité et la facilité de désassemblage est que la première indique s'il est possible ou pas de désassembler ; la deuxième est une appréciation de la difficulté de le faire à travers la valeur de l'entropie calculée.

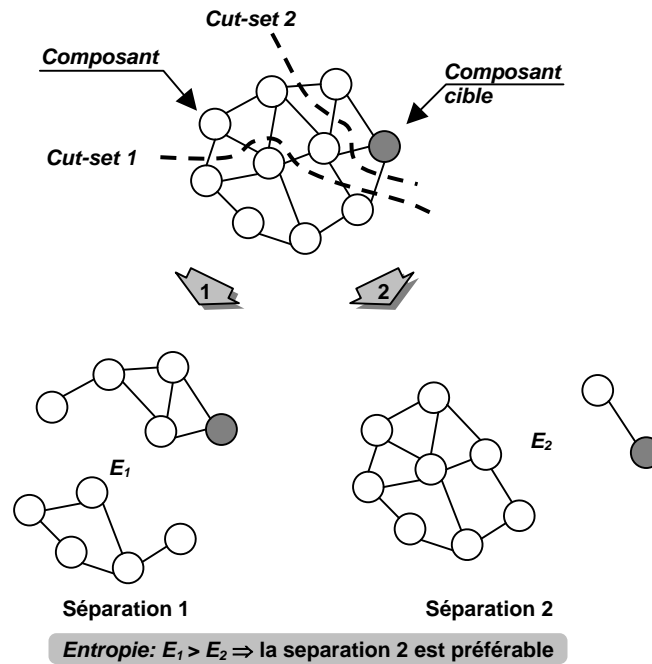


Figure 3.16 : Exemple de deux bipartitions pour retirer un composant élémentaire selon T. Murayama

La fonction d'entropie est donnée par la formule suivante :

$$E = \sum_{i=1}^2 \frac{|D_i|}{|D|} \left(\sum_{j=1}^2 \left(\frac{|D_{ij}|}{|D_i|} \cdot \log_2 \left(\frac{|D_i|}{|D_{ij}|} \right) \right) \right) \quad (3.1)$$

où,

$|D|$: est le nombre de composants du constituant de départ D

$|D_i|$: est le nombre de composants du constituant obtenu D_i ($i=1,2$)

$|D_{ij}|$: est le nombre de composants du constituant cible M_j ($j=1,2$)

Chaque bipartition d'un constituant D en deux constituants D_1 et D_2 fait l'objet d'un calcul de la fonction d'entropie. Parmi les bipartitions de D évaluées, seule celle qui présente la plus petite valeur de la fonction d'entropie est sélectionnée. L'opération se reproduira pour chacune des constituants D_1 et D_2 jusqu'à obtenir, d'une bipartition, le constituant cible.

En résumé



Notion d'entropie originale en désassemblage.

La méthode présentée porte sur le désassemblage ciblé mais pourrait être adaptée au désassemblage sélectif.



Seules les liaisons sont prises en compte. Le reste des caractères constitutifs d'un produit n'est pas traité.

Inexistence de considérations matérielles.

J.-G. Kang (2002) propose une méthode restreinte à la détermination des seules gammes linéaires admissibles pour le désassemblage d'un produit considéré [37]. Ces gammes

linéaires sont regroupées en un graphe d'états de désassemblage orienté comme le montre l'exemple de la Figure 3.17.

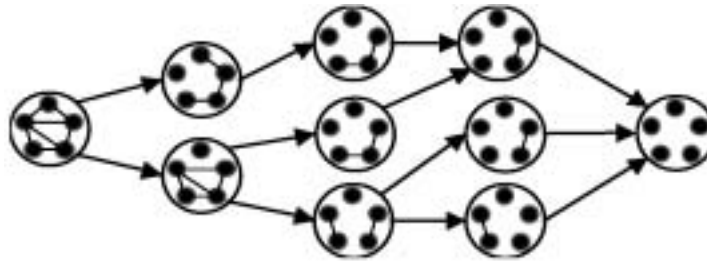


Figure 3.17 : Graphe d'état orienté de désassemblage utilisé par J.-G. Kang

A partir de là, une c_j est affectée à chaque arc orienté. Cette valeur peut représenter, par exemple, le coût de désassemblage ou la difficulté de désassemblage selon une échelle de valeurs prédéfinie. t_{ij} sont les éléments de la matrice de transition. Ils valent -1 et 1 lorsque, respectivement, l'opération j s'effectue sur le sous-ensemble i ou produit le sous-ensemble i . A chacun des arcs est associée une variable de décision binaire x_j indiquant la prise en compte ou non de cet arc, et par conséquent, de l'opération de désassemblage correspondante dans le choix final de la séquence (gamme linéaire) de désassemblage. Le problème de recherche de la gamme optimale est alors traduit selon un formalisme de programmation linéaire en un problème d'optimisation classique. Sa formulation est présentée ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \sum_{j \in A} c_j \cdot x_j \\
 & x_0 = 1 \\
 & \sum_{j \in A} t_{ij} \cdot x_j \geq 0 \quad \text{pour tout } i \in \mathbf{N} \\
 & x_j \in \{0,1\} \quad \text{pour tout } j \in \mathbf{A}
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Afin de prendre en compte les incertitudes sur la qualité *a posteriori* de l'opération de désassemblage choisie, J.-G Kang reprend la notion de « regret » *a posteriori* du choix de l'opération pour proposer finalement une démarche d'optimisation MinMax (*Minimax Regret Criterion*). En d'autres termes, il ramène le problème initial à un problème de minimisation du regret formalisé par la formule ci-dessous :

$$\min_{x \in X} R_{\max}(x) = \min_{x \in X} \max_{\substack{y \in X \\ c \in \Delta}} (cy - cx) \quad (3.3)$$

cy et cx représentent, respectivement, les valeurs de la séquence optimale et de la séquence effectivement choisie.

Pour concrétiser sa méthode, l'auteur a développé un algorithme qui lui a permis d'effectuer des simulations sur le désassemblage d'un photocopieur dont le graphe d'états de désassemblage comportait 1187 nœuds et 3975 arcs. Les revenus sont directement proportionnels au poids de chaque constituant. Il s'agit là d'une hypothèse fortement simplificatrice pour valider la méthode. Elle ne remet pas en cause sa pertinence puisque les revenus peuvent être affectés individuellement aux constituants. La solution optimale a été trouvée au bout de 10 minutes environ et ce sur un micro-ordinateur cadencé à 800 Mhz.

En résumé

- +** Formalisme intéressant basé sur la programmation linéaire.
- La méthode ne permet de traiter que les processus linéaires.

Pareillement à J.-G. Kang, A.J.D. Lambert (2003) propose une méthode de sélection de la « séquence de désassemblage » la plus rentable par un formalisme de programmation linéaire [76][77]. L'auteur représente le produit à désassembler par un graphe de désassemblage (*disassembly graph*) qui est un graphe ET/OU simplifié³⁴ (cf. Figure 3.18-γ). Il part donc de l'hypothèse que le graphe de désassemblage est préalablement construit.

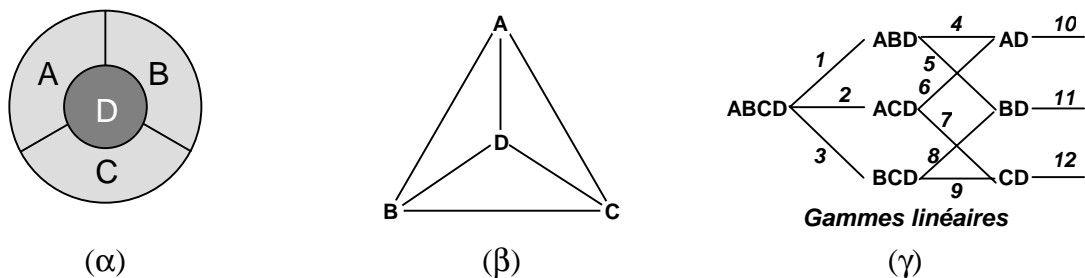


Figure 3.18 : Exemple d'un produit (α), de son diagramme de liaisons³⁵ (β) et de son graphe de désassemblage (γ)

Ce graphe est transcrit sous forme d'une matrice appelée « matrice des transitions ». Les nombres de colonnes et de lignes correspondent, respectivement, au nombre d'arêtes du graphe de désassemblage plus 1 et au nombre de constituants possibles (composants élémentaires compris). Chaque élément T_{ij} de cette matrice égale -1 si l'action d'indice j décompose le constituant i et 1 si l'action j produit le constituant i . Les éléments restants valent 0 .

Par ailleurs, l'auteur attribue à chaque arête (appelée transition) de ce graphe, un coût c_j et à chaque nœud un revenu r_i . Cela lui permet de trouver la séquence la plus rentable grâce au modèle de programme linéaire suivant :

$$\text{La fonction objectif à maximiser : } R = \sum_i \sum_j (T_{ij} \cdot r_i - c_j) \cdot x_j \quad (3.4)$$

sous les contraintes :

$$\sum_j T_{ij} \cdot x_j \leq 0 \quad (3.5)$$

avec la condition initiale : $x_0=1$

x_j est la variable de décision binaire qui désigne les transitions à effectuer lorsqu'elle vaut 1 . Celles qui valent 0 ne sont pas effectuées.

³⁴ ... sans représentation des composants élémentaires.

³⁵ Il s'agit d'un graphe de liaison selon A.J.D. Lambert.

En résumé



Formalisme intéressant basé sur la programmation linéaire.



La méthode se limite aux processus linéaires mais pourrait être généralisée sans difficultés.

Inexistence de considérations matérielles.

3.3.2 Bilan

La plupart des travaux sur l'évaluation des processus de désassemblage repose sur l'appréciation par le coût. Qu'elle soit par rapport aux opérations de désassemblage ou aux bénéfices éventuels de la valorisation, cette approche économique suppose que l'on connaisse précisément chacun des coûts opératoires et des revenus de valorisation (qui sont liés aux destinations fin de vie du produit). Conséquence importante : la connaissance préalable de l'état de dégradation du produit en fin de vie est cruciale pour ces méthodes. Cela n'est évidemment que rarement possible. Pour pallier ce genre de difficultés, certains auteurs ont proposé l'adjonction d'opérations alternatives. Cela peut constituer une solution au problème mais induit alors une plus grande complexité quant à la précision des incidents. Une solution pourrait être de développer ou d'adapter le savoir-faire en matière de pilotage de système de production pour le désassemblage. La section suivante donne un aperçu des quelques approches de pilotage qui semblent intéressantes pour le désassemblage.

3.4 Pilotage des systèmes d'assemblage

La phase de pilotage d'un système de désassemblage est capitale pour sa rentabilité. Nous avons expliqué les conséquences que peut avoir le pilotage sur les modes opératoires et sur le taux de valorisation en présence d'un produit différent de celui modélisé. Il s'agit d'une caractéristique du désassemblage à laquelle s'ajoute tout ce qui a trait au bon déroulement de la production de manière générale. Un état de l'art sur le pilotage des systèmes d'assemblage est présenté dans la section suivante pour permettre une transposition au désassemblage.

3.4.1 Notions de pilotage

Il n'existe pas de définition unifiée du pilotage dans la littérature des systèmes de production. Toutefois, nous pouvons avancer une définition générique utilisable pour les systèmes de désassemblage :

Définition 3.2 : Le Pilotage

Le pilotage consiste à commander et à contrôler la partie opérative du système pour que le déroulement de la production soit conforme aux objectifs tels qu'ils ont été définis lors de la planification.

En d'autres termes, le pilotage d'un système de désassemblage permet de suivre le scénario de désassemblage prévu et de veiller à ce que toutes ses composantes soient exécutées. Il s'agit du respect des gammes de désassemblage, des affectations des tâches aux ressources, de l'organisation des ressources, des dates d'exécutions des opérations, etc. De plus, le système doit être capable de présenter une ou des alternatives de production (désassemblage) pour chaque complication survenue. Cette réactivité n'est possible que par des moyens de contrôle en temps réel mais aussi par des moyens de nouvelle planification également en temps réel.

3.4.2 État de l'art

Dans ses travaux sur l'assemblage, B. Yin (1995) présente le pilotage comme étant l'alliance de quatre activités complémentaires [68] :

- l'ordonnancement à court terme/à très court terme ;
- l'ordonnancement en temps réel ;
- la commande / la coordination / l'exécution ;
- le suivi / la surveillance.

L'ordonnancement à court terme consiste en la génération d'un plan des ordres d'occurrence d'activités dans le système à court terme. Dans le cas où surviendrait un incident qui remet en question la bonne exécution des ordres émis, cet ordonnancement peut être remplacé par un ordonnancement en temps réel. B. Yin pose alors l'hypothèse que le fonctionnement du système est alors suspendu jusqu'à ce qu'une nouvelle stratégie soit choisie. Dans ce contexte de réactivité en temps réel, il s'agit de prendre une décision à l'occurrence de chaque événement intervenant au niveau de l'atelier : par exemple, quand un opérateur devient libre, il faut lui affecter une tâche ; quand un produit entre dans le système, une gamme de fabrication doit être choisie, etc. Ces décisions doivent être prises en temps réel [68]. En aval de cette phase (cf. Figure 3.19) se trouve la partie chargée de la surveillance par l'acquisition du résultat de l'exécution des décisions en temps réel. Dans la partie commande locale, il s'agit de la commande séquentielle qui consiste à maîtriser la coopération entre les opérateurs, les convoyeurs, les palettes, les systèmes de sécurité, etc.

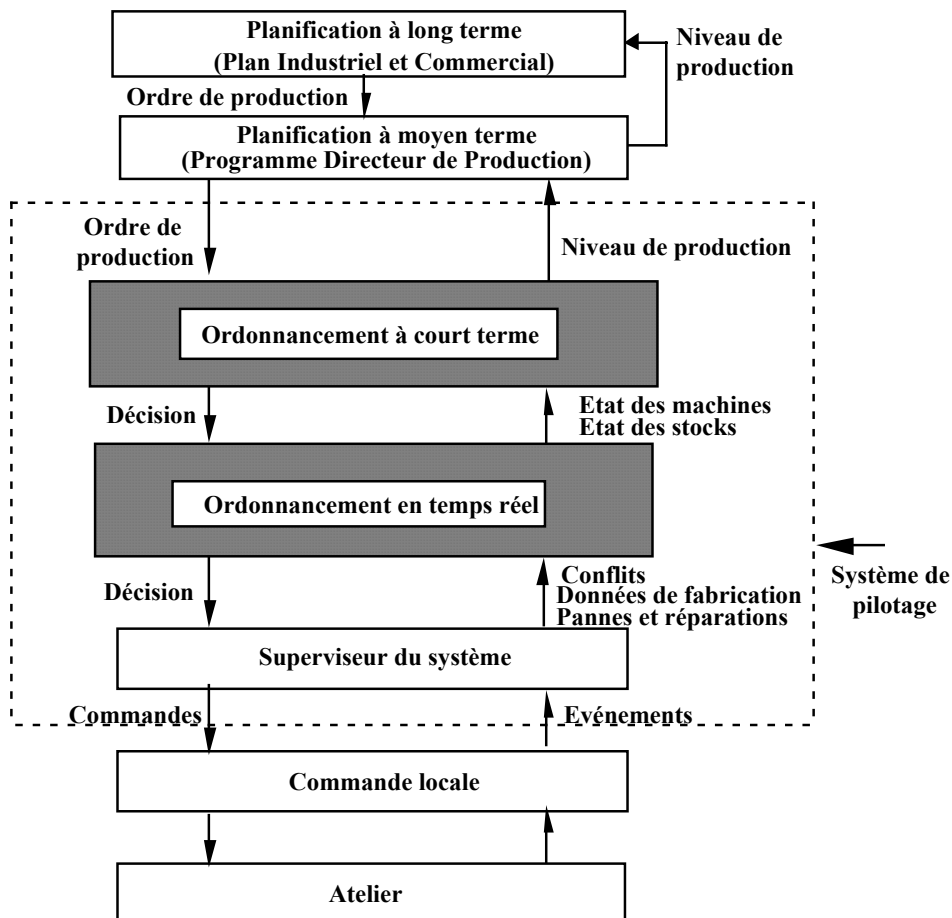


Figure 3.19 : Structure d'un système de pilotage de production selon B. Yin

Ces quatre activités de pilotage pourront être considérées comme le niveau temps réel de la gestion de production, qui réalise l'exécution des ordres de production. Le pilotage est le dernier niveau qui peut prendre une décision concernant le déroulement de la production, avant l'exécution des ordres et la réalisation des travaux par les moyens physiques de production. Il est intéressant de voir sur la Figure 3.19 le flux descendant suivi par les ordres de fabrication, les décisions émises et les commandes. Ces flux sont étroitement liés aux flux ascendants que sont les indicateurs sur les états des machines, des stocks, des pannes, et les données informatives de manière générale. Ces informations proviennent des produits finis ou de sous-assemblages, des outils et du processus.

C. Briand (1999) présente ses résultats de recherche sur la configuration des systèmes de pilotage pour la production dans [07]. Il explique que le processus de pilotage a pour but d'amener le système à réaliser un objectif de fabrication en respectant les contraintes matérielles caractérisant les éléments du procédé, les contraintes liées aux gammes d'usinage / assemblage (et de désassemblage) de chaque produit et, dans la mesure du possible, les contraintes temporelles fixées de manière prévisionnelle (dates de fin de fabrication, dates de livraison, etc.). Le système de pilotage doit en plus être capable de réagir judicieusement aux aléas de la fabrication (de désassemblage). L'auteur propose, ainsi, de décomposer le pilotage en trois modèles intégrant respectivement les trois types de contraintes précédemment citées : le modèle du procédé, le modèle des gammes et le modèle des scénarii.

Le modèle du procédé intègre les contraintes matérielles et représente tout ce qu'il est possible de faire dans l'atelier indépendamment des gammes de fabrication. Il peut lui être associé un modèle à événements discrets comme par exemple un réseau de Petri (de plus ou moins haut niveau selon la complexité des contraintes à prendre en compte). Dans ce cas, la structure du réseau reflète les diverses possibilités de cheminement des produits au sein de l'atelier. Les contraintes sur les ressources sont représentées de façon classique par des places initialement marquées. Les jetons sont associés aux produits et aux ressources mises en jeu. Le marquage du réseau donne ainsi une représentation précise de la configuration de l'atelier. Enfin, le graphe des marquages accessibles de ce réseau caractérise la flexibilité structurelle sur laquelle peut jouer le pilotage.

Le modèle des gammes donne un aperçu des gammes des produits existantes. Il n'intègre pas les contraintes de ressources (prises en compte dans le modèle précédent) mais indique la production à mettre en œuvre ainsi que les diverses séquences opératoires (possédant éventuellement des alternatives) caractérisant chaque type de produit. On peut également associer un réseau de Petri à ce niveau.

Enfin, le modèle des scénarii synthétise les différents scénarii de production envisageables et associe une (ou plusieurs) fenêtres temporelles de réalisation à chaque activité. Il peut correspondre à un graphe potentiels-tâches ou encore à un réseau de Petri temporel. Quel que soit le formalisme choisi, le modèle des scénarii devra évoluer en temps réel au fur et à mesure de l'avancement de la production pour toujours refléter la flexibilité effectivement disponible au niveau du plan de production.

Pour illustrer son approche, C. Briand prend l'exemple d'un atelier constitué de deux machines d'usinage (M_1 et M_2), d'un stock d'entrée (ZE) et d'un stock de sortie (ZS). Les possibilités de transfert sont représentées sur la Figure 3.20 par des arcs orientés. Les ressources M_1 et M_2 ont une capacité unitaire et réalisent les opérations d'usinage A et B durant

respectivement 2 et 3 unités de temps. Deux types de produits P_1 et P_2 ont été définis possédant chacun une gamme distincte (dépendant de l'ordre des opérations d'usinage A et B). La politique de fabrication est cyclique et consiste à réaliser conjointement une instance de chacun des produits en 7 unités de temps. Il y a n produits de chaque type à réaliser.

Le modèle du procédé décrit tous les cheminements possibles dans l'atelier (y compris ceux non-utilisés dans le cas de cette production). Il représente également les transferts qui ne sont pas explicitement pris en compte dans les gammes. Le modèle des gammes définit les séquences d'activités nécessaires pour la réalisation de chacun des produits. Le marquage initial du réseau définit la production à mettre en œuvre à chaque cycle. La visualisation de l'évolution temps réel du réseau renseigne sur l'avancement de la production. Le modèle des scénarii est ici un réseau de Petri temporel qui incorpore la politique de fabrication précédemment décrite ainsi que l'aspect temporel de la fabrication.

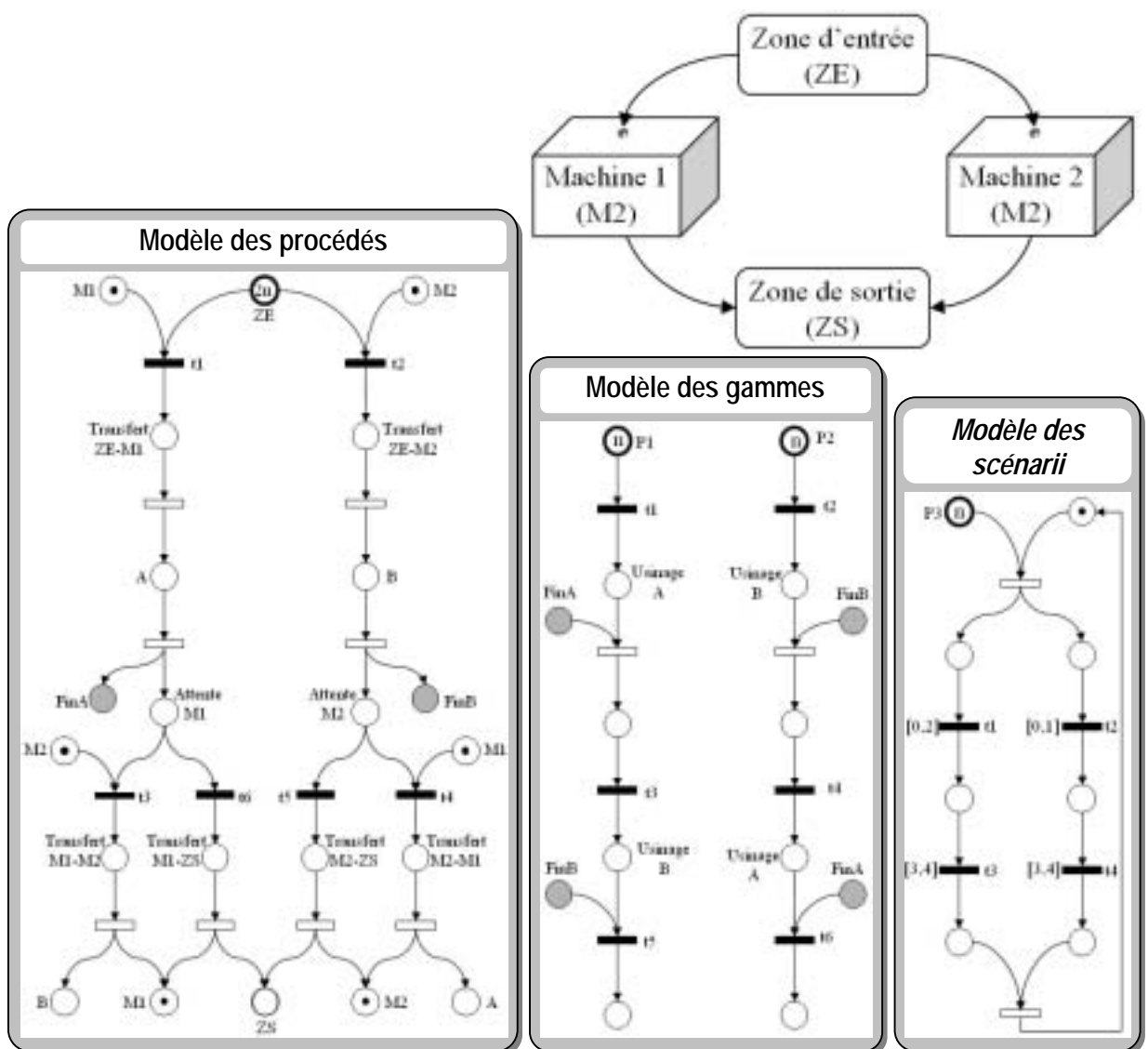


Figure 3.20 : Un exemple de pilotage selon les trois modèles de C. Briand

Les interactions inter modèles sont décrites ici par des places de communication (places grisées FinA et FinB) et des fusions entre certaines transitions appartenant aux trois modèles (transitions noircies t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 et t_6). Le marquage initial des places p_1, p_2, p_3 et z_e indique le nombre d'instances de chaque produit à mettre en œuvre. Le processus de pilotage s'apparente à l'évolution conjointe de ces trois réseaux [07].

Dans les travaux de C. Berchet (2000) sur la modélisation d'un système d'aide au pilotage industriel, trois types de pilotage semblent à la fois nécessaires et complémentaires pour un système de production robuste [01]. Il s'agit du pilotage en amont de la production dit : « pilotage *a priori* », du pilotage pendant le processus de production dit : « pilotage réactif pour anticipation » et du pilotage correctif dit : « pilotage *a posteriori* » (cf. Figure 3.21).

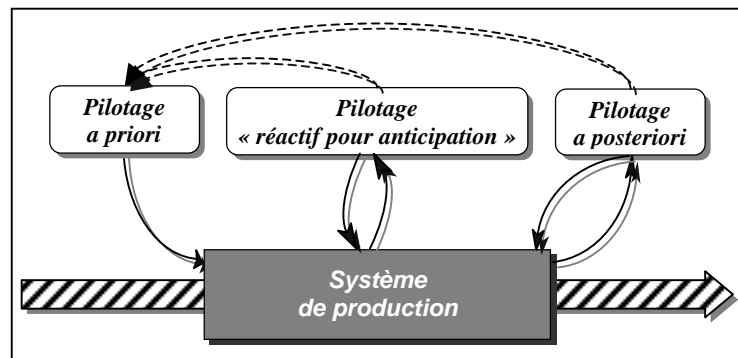


Figure 3.21 : Les phases de pilotage d'un système de production selon C. Berchet

Le premier type de pilotage s'appuie sur les modèles du produit, du système et des conditions de production de manière générale. Le pilotage est donc théorique ; son efficacité varie avec l'incertitude sur le déroulement de la production. Le deuxième type de pilotage agit durant la production sur, entre autres, la mobilisation et l'affectation des ressources, l'exécution des gammes de production et l'entretien des stocks tampons. Le but est d'anticiper une panne incertaine ou une qualité de production (d'où les termes « *pour anticipation* »). Pour ce faire, le système de pilotage agit, par exemple, sur les facteurs techniques internes maîtrisables, sur les écarts / trajectoire initiale, etc. Il s'agit finalement d'un pilotage préventif. Le troisième type de pilotage entre en action lors d'une panne ou d'une anomalie qui mettent effectivement en péril la poursuite immédiate de la production conformément aux objectifs initialement prévus. Si la production ne peut continuer dans les conditions prévues, une réactivité et une flexibilité importante sont requises.

De manière beaucoup plus conceptuelle que C. Briand, C. Berchet présente le pilotage par un caractère hiérarchique en fonction du temps et de l'ampleur et du volume des éléments à piloter et contrôler. La figure Figure 3.22 résume sa vision hiérarchisée du pilotage.

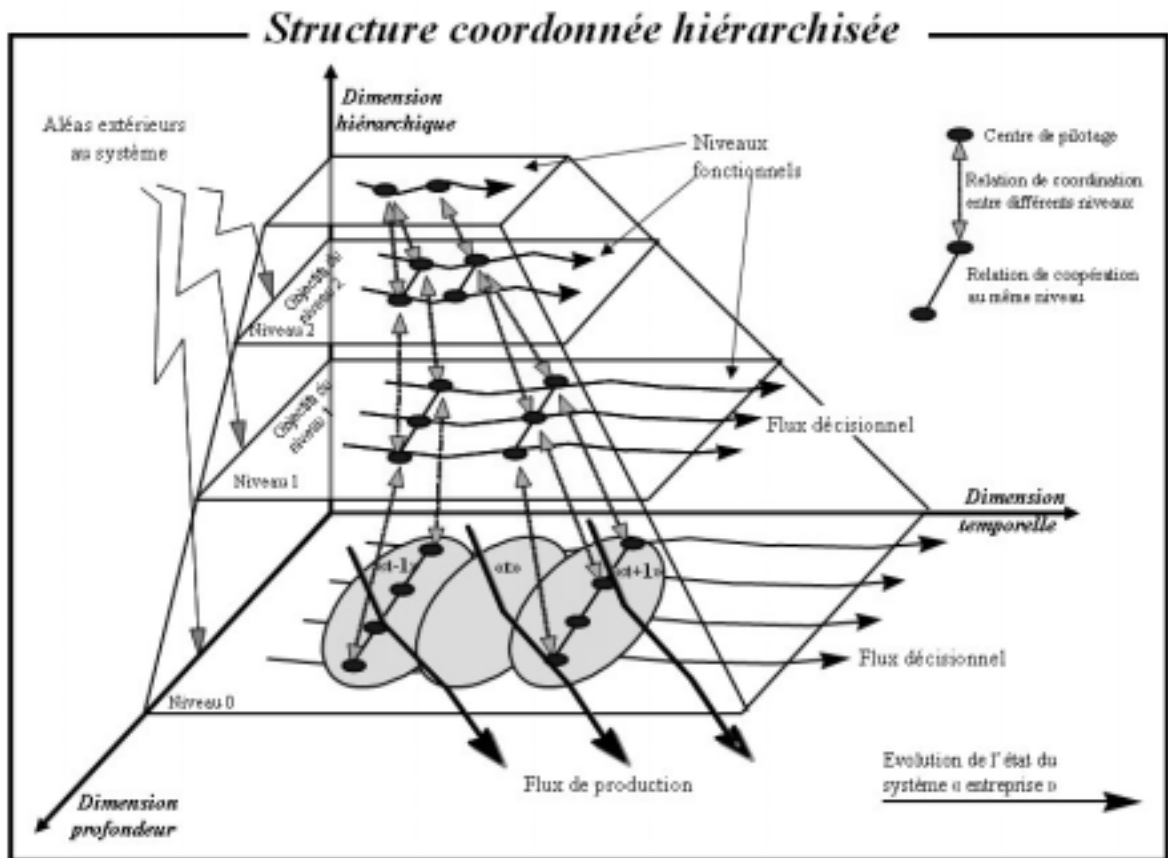


Figure 3.22 : Pilotage : une structure coordonnée et hiérarchisée selon C. Berchet

3.4.3 Bilan

La liste des approches précédemment présentées n'est pas exhaustive mais celles-ci restent, malgré tout, les plus représentatives des travaux sur les le pilotage des système d'assemblage. De par sa représentation des trois modèles en réseaux de Petri, le travail de B. Briand laisse entrevoir une possibilité de formalisation du système de pilotage séduisante. L'approche de C. Berchet qui prévoit des stratégies de pilotage différentes en amont, au moment et en aval des perturbations semble aussi pertinente. Bien que hautement conceptuelle, sa structure hiérarchisée du pilotage paraît incontournable pour la conception d'un système de pilotage du désassemblage pour lequel les difficultés sont ardues. D'autre part, la structure de pilotage de B. Yin est simple, logique et intéressante en vue des flux de données acquises et émises.

3.5 Conclusion

La première section de ce chapitre montre que plusieurs méthodes de génération de gammes semblent robustes ; et pour peu qu'il existe une méthode qui regroupe leurs avantages et qui réduise leurs faiblesses, la rentabilité serait plus facilement atteignable. En effet, le manque général de ces approches vient justement de cette notion de rentabilité. Peu de méthodes, dans ce chapitre, prennent en compte les coûts de désassemblage. Elles sont basées essentiellement sur les données du produit à traiter. Par ailleurs, le choix du processus de désassemblage idéal n'existe pas. Nous avons vu dans ce chapitre que plusieurs critères de sélection sont possibles. La difficulté est probablement d'en sélectionner les plus pertinents en termes de rentabilité du désassemblage mais aussi de respect des contraintes légales et environnementales. Il s'agit, en effet, de l'une des particularités fortes du désassemblage de

produit en fin de vie. Notre conclusion sur l'évaluation des processus de désassemblage est de développer une méthode qui ramène cette tâche d'évaluation et de sélection du processus de désassemblage à un problème d'optimisation. De plus, la nécessité d'un formalisme flexible par rapport aux critères de sélection nombreux et hétérogènes est incontestablement nécessaire. Pour ce qui est du pilotage d'un système de désassemblage, nous pensons que justement cette flexibilité doit porter aussi sur la conduite du système de désassemblage. Le formalisme d'optimisation doit être conforme aux différentes politiques de pilotage que l'on pourrait adopter. Les deux chapitres suivants sont consacrés, d'ailleurs, à notre contribution en la matière.

Chapitre 4 :

DEMARCHE ORGANISEE DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE DESASSEMBLAGE POUR LA VALORISATION DES VHU (CYD-VHU)

4.1 Introduction

Ce chapitre traite deux des quatre phases de conception de systèmes de désassemblage que nous proposons. Il s'agit d'une démarche organisée en vue de la valorisation de véhicules hors d'usage que nous avons appelé CYD-VHU (**C**onception de **s**ystèmes de **D**ésassemblage pour la valorisation des **V**HU). Par conséquent, la majeure partie des considérations présentées est liée aux caractéristiques des VHU. L'aspect le plus important de notre démarche est qu'elle est dédiée non seulement à la conception de systèmes de désassemblage mais aussi à la reconception et à la commande de systèmes déjà existants. En effet, nous avons veillé à ce que notre méthode reste aussi valable pour des réorganisations d'établissements de démolition en privilégiant de nombreux aspects *ad hoc* notamment le travail manuel. Il est vrai que ce dernier aspect a été traité compte tenu des réalités technologiques et économiques actuelles.

La première section de ce chapitre traite de l'analyse et des choix de conception à faire, en premier temps, lors de la modélisation du produit. Après un bref rappel du modèle opératoire adopté, une succession d'éléments d'analyse du produit et des hypothèses de modélisation sont présentés dans le but d'une modélisation la plus pertinente du produit pour le désassemblage. Dans un deuxième temps, les caractéristiques du système physique de désassemblage sont présentées et suivies, à chaque fois, d'hypothèse et de suggestions de modélisation que le concepteur est invité à respecter. Dans un dernier temps, les aspects les plus éloquentes du contexte économique, environnemental et autres sont abordés et traités de la même manière.

La deuxième section traite du modèle du système de désassemblage proprement dit, dans lequel sont formalisés tous ses éléments descriptifs. Il y sera question, notamment, de la méthode de modélisation et de génération des gammes de désassemblage, de comment définir la stratégie de désassemblage et de la formalisation par propagation des éléments descriptifs de valorisation des constituants du produit.

La démarche organisée de CYD-VHU est illustrée à la Figure 4.1. Elle se présente en sept étapes dont la première est l'examen du cahier des charges. Cette étape a pour objectif de dégager les données de valorisation et de production primordiales à l'exécution de la méthode. Cette étape n'est pas des moins importantes ; elle est une donnée du problème à part entière. Cependant, il n'est pas envisageable, compte tenu de nos prérogatives, de faire une étude étendue sur le « comment » interpréter et exploiter le cahier des charges. Nous supposons, alors, que cette étape d'analyse est correctement exécutée. Elle entre dans le cadre de la première phase qui est appelée « *la phase préparatoire* ». Celle-ci comprend deux autres étapes qui sont l'analyse et les choix pour la CYD-VHU.

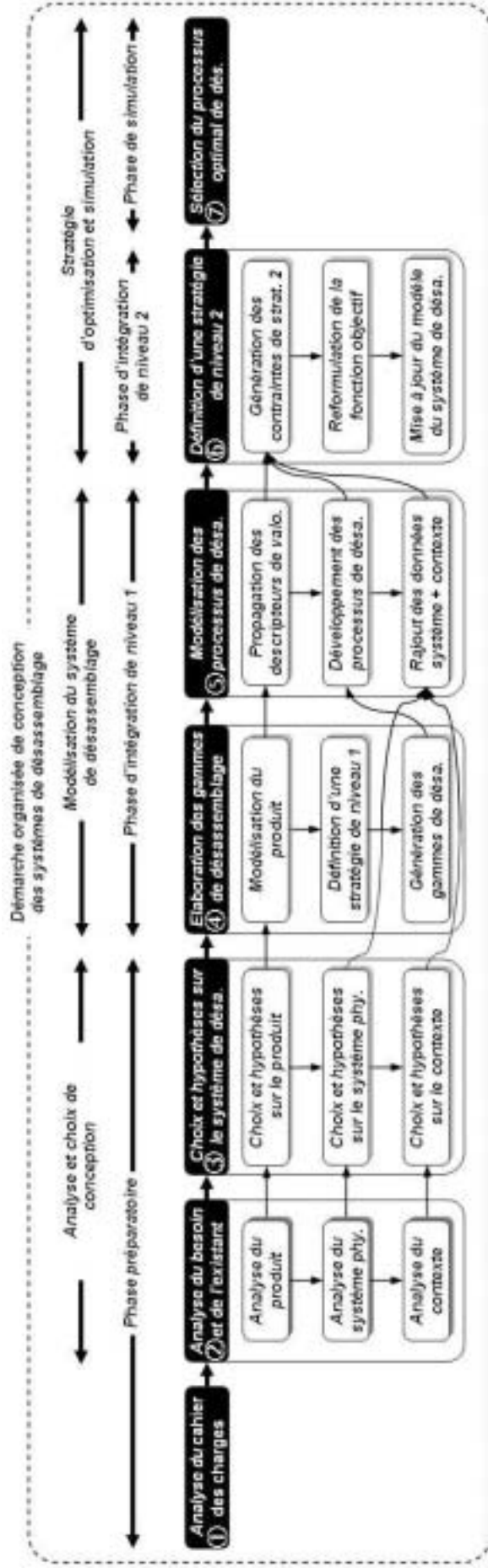


Figure 4.1 : Démarche générale de conception de systèmes de désassemblage pour la valorisation des VHU

4.2 Analyse et choix de conception (étapes 2 et 3)

La phase préparatoire est l'interprétation des données sur le produit à désassembler et la définition des moyens disponibles et des conditions générales pour ce désassemblage. A partir de cela, des choix devront être faits et consignés pour convenir d'un modèle de produit suffisamment consistant pour permettre la génération des gammes de désassemblage admissibles. Celles-ci doivent contenir la gamme optimale relative aux interprétations et hypothèses du système physique et du contexte de désassemblage (cf. Figure 4.2). L'analyse portera sur les types de liaisons, de solidarisations et autres caractères du produit à désassembler. Elle impliquera des hypothèses sur : les capacités des opérateurs pour effectuer les tâches de désassemblage, les ressources de transfert et d'évacuation des sous-produits obtenus, l'agencement général et prévisionnel de la cellule de désassemblage, et la politique de sous-traitance des sous-produits à valoriser, etc.

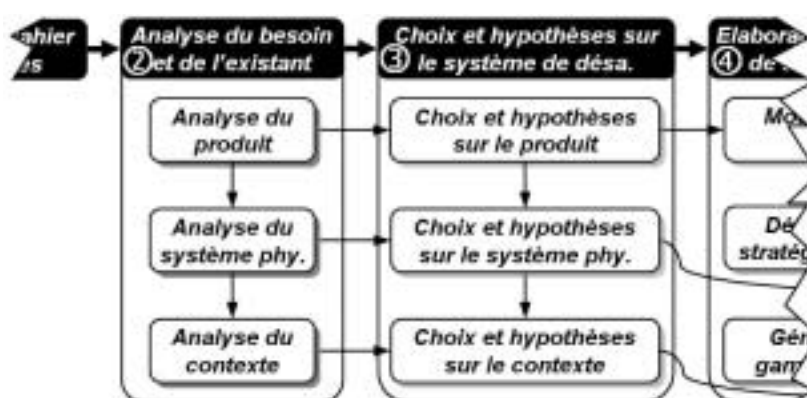


Figure 4.2 : Phase d'analyse et de prise de choix en vue de la conception de systèmes de désassemblage

4.2.1 Au niveau du produit

L'analyse du produit consiste à définir un modèle simple du produit qui est utilisable pour la génération des gammes et qui comporte toutes les données propres au désassemblage. Le produit à désassembler (le VHU en l'occurrence) doit être rigoureusement décrit pour envisager toute conception réaliste de système de désassemblage. Les informations, qui sont de rigueur dans cette description, sont la structure du produit, les solidarisations utilisées entre tous les composants élémentaires, les caractères complémentaires³⁶ et les données de valorisation de chacun de ces composants et des sous-produits qui pourraient faire l'objet de traitements particuliers. La structure du produit est la représentation des liaisons entre les différents composants. Ces liaisons, dites géométriques (Définition 2.10), caractérisent la façon dont un composant est lié au produit et par conséquent, quelles liaisons faut-il supprimer pour dissocier ce composant du produit. C'est la base même de la génération de gammes de désassemblage.

Les solidarisations représentent les éléments qui mettent en œuvre une énergie de cohésion destinée à pérenniser certaines liaisons. Elles sont d'une importance similaire sinon supérieure. En effet, elles sont souvent la cause d'échecs en matière de désassemblage, de

³⁶ Voir Annexe 1.

détériorations de composants ou sous-produits, de leur mise au rebut alors qu'ils étaient initialement destinés à la valorisation, etc.

Remarque

Dans ce qui va suivre, plusieurs aspects du modèle du produit seront traités et quelques hypothèses seront prises. Ces aspects comme le type de liaisons et de solidarisations peuvent paraître peu probables lors de la modélisation d'un produit « *pour le désassemblage* ». Plus spécifiquement, la section ci-dessus traite de « comment modifier un modèle initialement conçu pour l'assemblage pour qu'il soit utilisable pour le désassemblage ? ». Les hypothèses posées représentent donc des éléments de réponse à cela.

4.2.1.1 Rappel du modèle opératoire de J.-M. HENRIOUD

En vue de la modélisation du produit pour la génération de gammes de désassemblage, nous avons choisi le « *modèle opératoire* » présenté dès les premiers travaux de J.M. Henrioud [28]. Il s'agit d'une « *approche constituant* » basée sur une représentation arborescente de l'agrégation progressive de composants élémentaires en sous-ensembles de plus en plus complexe jusqu'à obtenir le produit final. Celui-ci est décrit, dans une problématique *d'assemblage*, par le modèle opératoire qui regroupe l'ensemble de ses caractéristiques qui doivent être établies au cours du processus d'assemblage [60]. Plus précisément, ce modèle du produit prend en compte la structure du produit, définie à partir de l'ensemble des composants et des liaisons géométriques, les caractères physiques et les caractères complémentaires (voir ci-dessous).

La structure du produit est représentée par un graphe défini par l'ensemble C de ses composants élémentaires et de l'ensemble Γ de ses liaisons géométriques. Les caractères physiques comptent les solidarisations faibles et fortes. Les premières sont réalisées lors de la mise en liaison géométrique des composants et les deuxièmes sont réalisées postérieurement. Pour tout produit constitué d'un ensemble C de composants, on note Σ l'ensemble de ces solidarisations. Il est défini par l'application $\hat{s} : \Sigma \rightarrow \wp(C)$.

Les caractères complémentaires permettent d'intégrer dans le modèle, les opérations de nettoyage, de marquage, de polissage, d'usinage, de mesure, etc. Il s'agit de caractères qui apportent des modifications physiques (ex. ébavurage) ou fonctionnelles (ex. lubrification) aux constituants. Ces caractères peuvent, enfin, correspondre à des opérations de contrôle. Ces caractères sont définis par l'application $\tilde{p} : \Pi \rightarrow \wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi)$.

Cette méthode initialement développée pour l'assemblage, s'est avérée parfaitement adaptable au désassemblage. L'agrégation progressive de composants élémentaires devient la désagrégation progressive de sous-assemblages jusqu'à obtenir les fractions cible. Cette adaptation du modèle opératoire pour l'assemblage au désassemblage repose sur la typologie des opérations de désassemblage (cf. Figure 4.3). En effet, chaque étape de désagrégation correspond à une opération de désassemblage dont le type conditionne l'admissibilité (la validité) des gammes de désassemblage. Elles sont générées par la construction de graphes ET/OU dont les nœuds représentent les constituants, les couples d'arcs ET représentent les opérations de désassemblage et les sous-ensembles OU représentent les différentes possibilités de désassemblage (cf. Figure 4.4).

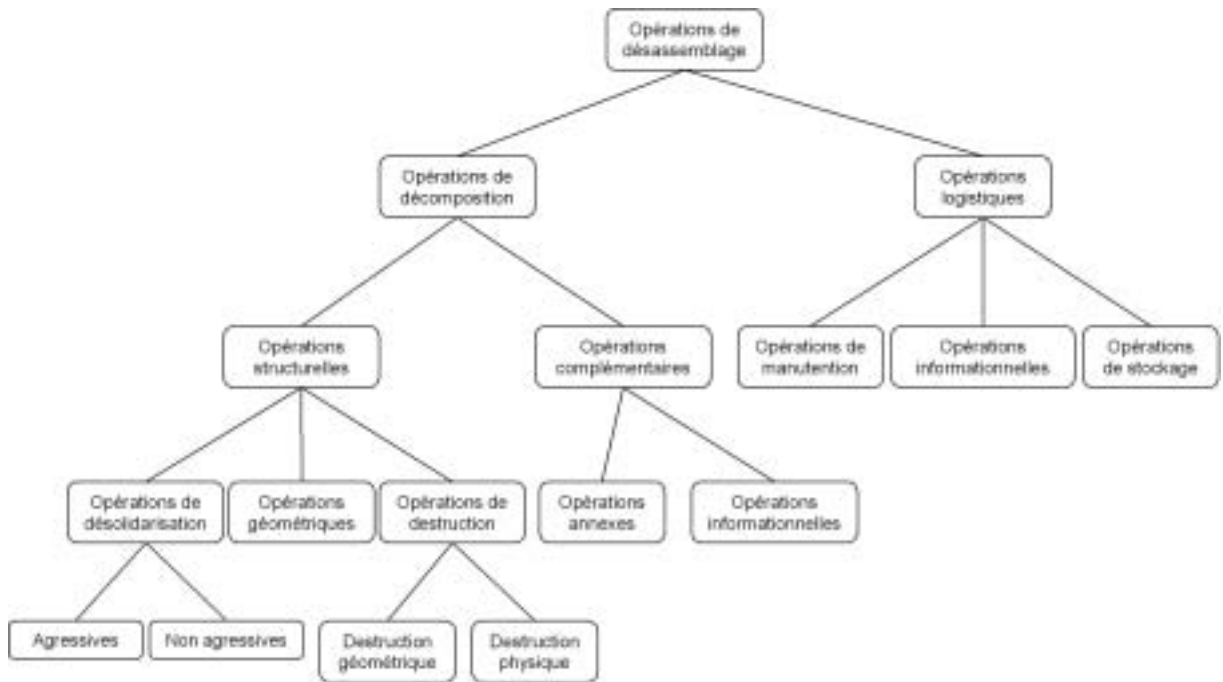


Figure 4.3 : Typologie des opérations de désassemblage [60]

Les choix et hypothèses qui seront pris pour modéliser le produit concerneront les opérations rentrant dans la construction de graphes de désassemblage. La typologie adoptée est développée par F. Touzanne [60] qui s'est d'ailleurs grandement inspiré des travaux de J.M. Henrioud [28] sur l'assemblage (*cf.* Figure 4.3). Après une description partielle de cette typologie, nous traiterons certaines situations de désassemblage et présenterons les choix et hypothèses pour le modèle du produit. Une description détaillée de cette typologie est donnée en Annexe 1.

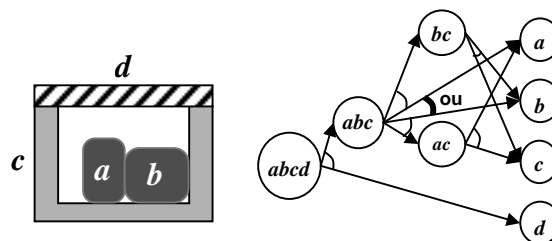


Figure 4.4 : Exemple³⁷ d'un graphe ET/OU de désassemblage

Les opérations de désassemblage correspondent, principalement, aux liaisons mécaniques entre les composants élémentaires et les énergies de cohésion qui les renforcent (dites aussi solidarisation). Ces énergies de cohésion se matérialisent par des éléments solides ou liquides mais aussi par des actions chimiques, thermiques, mécaniques, etc. Par conséquent, l'extraction de certains composants nécessite parfois la modification morphologique d'un constituant, voire même sa fracture en deux ou plusieurs pièces. Il est à remarquer que ce type d'alternative est loin d'être exceptionnel dans le domaine de la valorisation des VHU. Toutefois, les VHU les plus récents permettent de plus en plus une séparation simple et bénigne des composants. Ainsi, les trois types d'opérations intervenant sur la structure du

³⁷ Le graphe ET/OU ne représente pas toutes les possibilités de désassemblage. Ceci est dû au fait que des contraintes de désassemblage supplémentaires ont été introduites lors de sa génération.

produit sont les opérations de désolidarisation (agressives et non agressives), les opérations de destruction (morphologiques et physiques) et les opérations géométriques.

Durant le processus de démontage du VHU, des opérations complémentaires interviennent pour viabiliser le désassemblage sans pour autant qu'il y ait séparation de constituants. Il s'agit, d'une part, d'opérations annexes qui modifient l'état du constituant (nettoyage, dégrippage, effacement de marquages, ...). D'une autre part, des opérations de contrôle sur l'état des constituants sont introduites dans le processus de désassemblage pour indiquer toute anomalie.

Lors de l'inventaire des liaisons géométriques, il peut s'avérer pratique de connaître leur type. En effet, une **liaison de contact** (voir §4.2.1.2) suscite une désunion dès la désolidarisation des composants du couple. Pour une **liaison morphologique**, un minimum de stabilité des composants étant assurée, la désunion peut être retardée par rapport à la désolidarisation (cf. Figure 4.5). Évidemment, d'autres types de liaisons peuvent être dénombrés ; les types de liaisons qui sont liés à des procédés de solidarisation sont évoqués dans les paragraphes ci-dessus.

4.2.1.2 Liaisons morphologiques et de contact

Les **liaisons morphologiques** et de contact nous servent à prévenir l'instabilité de certaines liaisons lors du désassemblage. Lorsqu'une liaison est dite morphologique, cela veut dire que les deux constituants auxquels elle correspond restent unis sans nécessiter de solidarisations ou d'appuis d'autres constituants adjacents. Ainsi, il est possible de procéder par exemple à la rupture des solidarisations de ces constituants et passer au traitement du reste du produit. Au contraire, lorsque la **liaison est dite de contact**, l'agrégation de ses deux constituants n'est durable qu'en présence d'une ou plusieurs solidarisations entre eux deux ou encore en l'existence de constituants adjacents capable de les maintenir. Lorsque la génération de gammes de désassemblage est envisagée, la connaissance de ce type de liaisons permet d'enchaîner ou pas les opérations de séparation de constituants aux opérations de désolidarisation.

Dans l'exemple présenté à Figure 4.5, nous préconisons de réunir l'opération géométrique de séparation des deux composants (a) et (c) et l'opération de dévissage (désolidarisation) pour donner une opération de désolidarisation intégrée (voir §4.2.1.4 –). Le composant (c') représentera, dans l'exemple de la Figure 4.5, le composant élémentaire et le caractère de solidarisation qu'est le dévissage. En d'autres termes, il s'agira d'extraire un sous-assemblage {c'}={c,vis} du produit au lieu de {c} initialement.

Lors de l'écriture du modèle du produit pour la génération de gammes de désassemblage, l'hypothèse suivante est valable :

Hyp. 4.1 : En cas de risque de détachement d'un constituant d'un autre après suppression d'un caractère de solidarisation, celui-ci lui sera agrégé pour former un sous-assemblage indémontable.

L'extraction de ce nouveau constituant sous-entendra la succession de la désolidarisation et de la désunion.

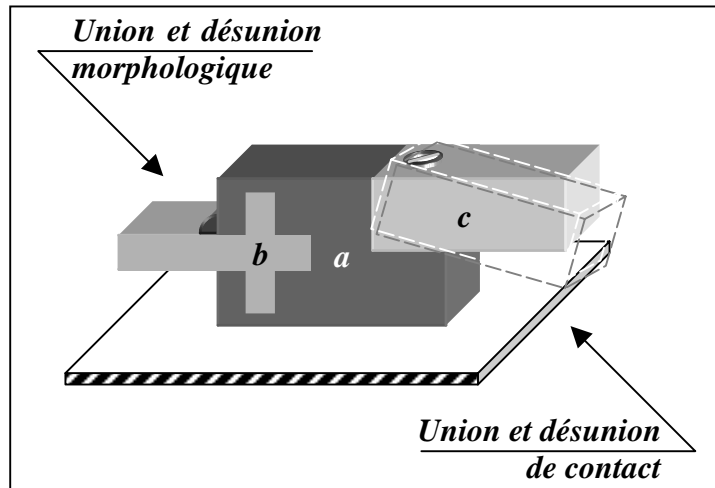


Figure 4.5 : Stabilité des liaisons

Remarque

Une telle hypothèse peut être inutile si une contrainte stratégique est introduite lors de la génération de gammes de désassemblage pour rendre directement successive la désolidarisation et l'extraction du composant.

4.2.1.3 La monotonie du désassemblage dans les liaisons morphologiques

Le caractère monotone du désassemblage signifie qu'au moins une opération de désassemblage est destinée à placer temporairement un constituant dans une position intermédiaire entre son état initial dans le produit et son état désassemblé (définie au §2.3.5.4). La monotonie du désassemblage accroît la difficulté d'analyse de la conception. En effet, les configurations intermédiaires des constituants doivent être prises en compte ainsi que les éventuelles contraintes qui s'y rapportent. Des hypothèses simplificatrices doivent être émises par conséquent. L'une d'elles concerne la mise en position intermédiaire d'un élément de vissage pour extraire un constituant. Le vissage est alors considéré comme étant une mise en liaison morphologique (vissage sans serrage) entre deux composants. En d'autres termes, il est assimilé à un composant élémentaire à part entière plutôt qu'à un caractère de solidarisation. L'exemple de la Figure 4.6 considère deux configurations d'assemblage α et β de deux composants a et b avec lesquels se trouve une vis de pression c . Sans le serrage de cette vis, le couple a et c correspond à une simple liaison morphologique qui peut être rompue par une rotation de c autour de a au lieu d'une translation comme c'est le cas habituellement. Cependant, la configuration α impose qu'il soit enlevé qu'à l'issue de 3 étapes. Il s'agit d'une série d'opérations de désassemblage non-monotones.

Pour revenir au modèle du produit, la configuration β suppose que la vis soit considérée comme un composant élémentaire qui sera rajouté aux données du produit. Pour ce qui est de la configuration α , la vis sera considéré comme un composant élémentaire c tout en gardant le caractère de solidarisation \underline{c} . Ainsi, la procédure de désassemblage serait de désolidariser le composant b du composant a en traitant le caractère de désolidarisation \underline{c} . Une contrainte d'antériorité sera adjointe, lors de la génération des gammes, pour signifier l'extraction du composant c qu'après l'extraction du composant b .

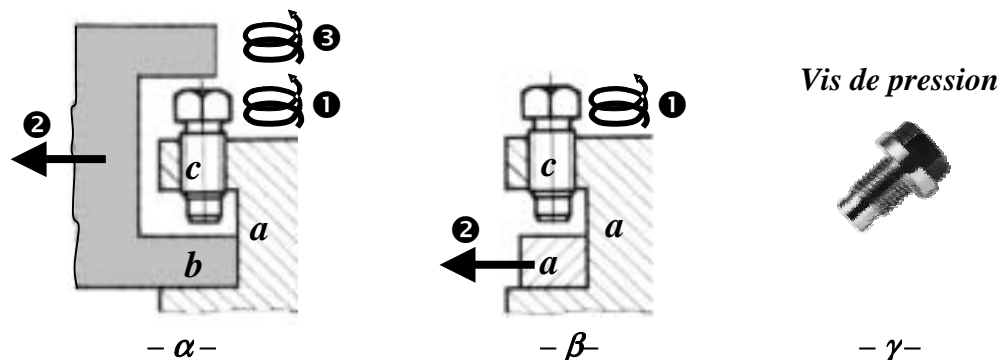


Figure 4.6 : Cas d'opérations non-monotones

L'hypothèse est la suivante :

Hyp. 4.2 : En cas de désassemblage non-monotone impliqué par un ou plusieurs caractères de solidarisation, ceux-ci seront assimilés, selon le cas, à des composants élémentaires. Certains cas nécessiteront la modélisation à la fois de la solidarisation et des composants élémentaires de celle-ci.

Remarque

L'exemple de la vis de pression (et de l'hypothèse correspondante) n'est pas représentatif des difficultés qu'apporte le désassemblage monotone. La démarche suivie pour traiter cet exemple se veut « élément indicatif » pour faciliter le traitement d'autres exemples.

4.2.1.4 Classification des désolidarisations

Compte tenu de la grande diversité technologique des procédés de solidarisation actuels, il est difficile d'établir une classification exhaustive. Aussi, nous avons opté pour une classification basée sur la chronologie de réalisation de celle-ci par rapport à la suppression de la liaison de deux ou plusieurs composants élémentaires. L'intérêt est de prévoir les éventuelles contraintes d'antériorité entre les opérations de désassemblage en fonction de l'ordre d'exécution des opérations de solidarisation par rapport au reste des opérations.

La Figure 4.7 présente une typologie des solidarisations comportant trois types distincts. Ceux-ci concernent la pérennisation de la liaison entre deux composants élémentaires. Nous appellerons ce type de solidarisation : « **solidarisation binaire** ». Quant la solidarisation est directement liée à la liaison qui relie les deux composants, elle ne suggère pas de démarches particulières lors de la modélisation du produit mis à part celles décrites précédemment. Cependant, certaines solidarisations ne sont pas toujours simplement associées aux liaisons mais sont directement intégrées ou au contraire, indépendantes. Des exemples de solidarisations binaires sont présentés dans les Figure 4.8 ; Figure 4.9 ; Figure 4.10.

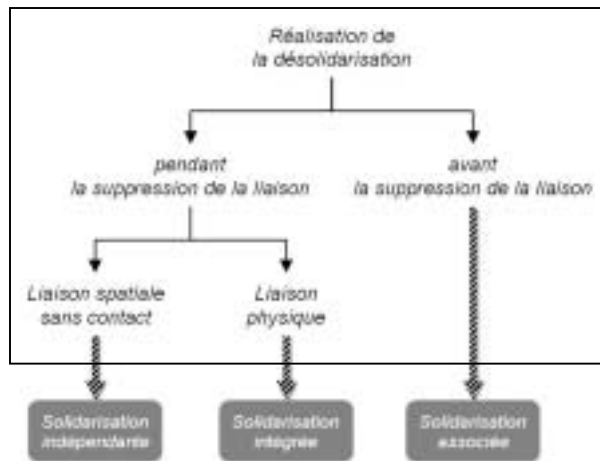


Figure 4.7 : classification des solidarisations

Solidarisation binaire associée

La solidarisation associée devrait être supprimée en premier pour que les couples de composants soient séparables (cf. Figure 4.8). Dans le modèle du produit, la solidarisation doit être normalement identifiée, c'est-à-dire sous forme de caractère de solidarisation. Le procédé de solidarisation peut être une soudure, un vissage, un rivetage, etc. Il est rare que les procédés inverses de ces solidarisations soient destructifs pour le produit traité.

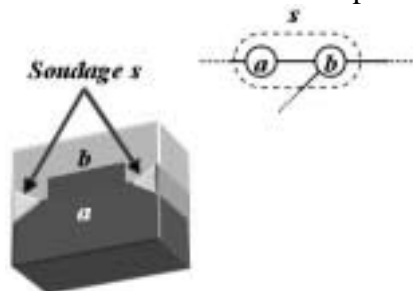


Figure 4.8 : Exemple d'une solidarisation associée

Solidarisation binaire indépendante

La solidarisation indépendante assure l'énergie de cohésion entre deux composants en liaison spatiale sans qu'il y ait de contact direct. Ce genre de solidarisations se présente, le plus souvent, sous forme de soudure ou de collage (cf. Figure 4.9). Ces derniers sont des caractères importants pour le désassemblage. Évidemment, il s'agit d'une liaison à part entière dans le modèle du produit. Cependant, il faudra agréger l'opération de désassemblage et le caractère de solidarisation en une seule et même entité. L'Hyp. 4.1 doit être respectée.

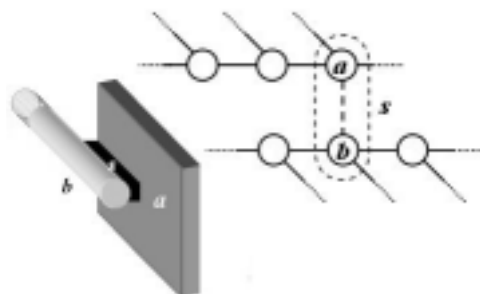


Figure 4.9 : Exemple d'une solidarisation indépendante

La solidarisation binaire intégrée

En dernier, la « ***solidarisation intégrée*** » est une solidarisation de deux composants durant la mise en liaison géométrique. Celle-ci est impérativement une liaison mécanique réelle³⁸. Il y a lieu d'appliquer, dans ce cas, l'Hyp. 4.1 puisque la suppression de la solidarisation provoque systématiquement celle de la liaison. Celle-ci est d'ailleurs considérée comme une liaison morphologique et le plus souvent problématique comme dans l'exemple de la Figure 4.10. Les deux composants ne sortent pas toujours indemnes de l'opération de désassemblage.

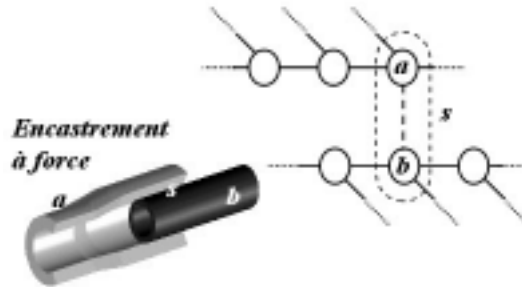


Figure 4.10 : Exemple d'une solidarisation intégrée

Il y a des cas où la solidarisation ne concerne pas seulement deux composants mais un ensemble de composants totalement ou partiellement connectés entre eux. On parle alors de « ***solidarisation multiple*** ».

Remarque

Hormis le fait que la liaison correspondante soit avec ou sans contact, les solidarisations indépendantes et intégrées peuvent être confondues en désassemblage. D'ailleurs, J.-M. Henrioud a défini l'ensemble des solidarisations indépendantes et intégrées comme étant des solidarisations faibles [28].

La solidarisation multiple associée

L'exemple de la Figure 4.11 présente une difficulté non négligeable car la désolidarisation des composants ***a*** et ***b*** induit le démontage des rondelles ***c*** et ***d*** et des éléments supplémentaires que sont une vis et un écrou. Ces derniers étant déclarés comme éléments de solidarisation.

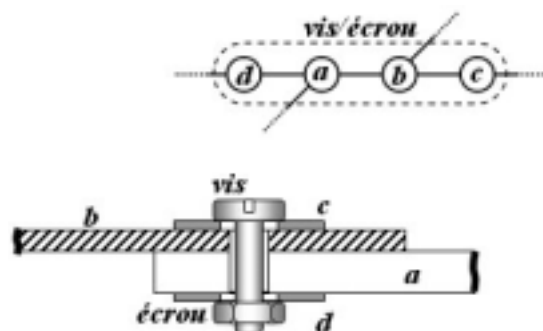


Figure 4.11 : Exemple d'une solidarisation multiple associée

³⁸ Il y a un contact physique direct entre les deux composants.

Comme nous le verrons dans les sections suivantes, la génération de gammes de désassemblage est basée sur le principe de bipartition. Il s'agit d'une construction arborescente des constituants obtenus par division d'un constituant initial en **deux** autres constituants.

L'exemple ci-dessus indique l'obtention de **quatre** composants élémentaires et le boulon (vis+écrou). Pour ramener cela à une bipartition, il faudra considérer les rondelles comme des éléments de désolidarisation au même titre que le boulon. L'opération de désassemblage correspondante serait alors composée en une opération de désolidarisation par vissage et d'une séparation des deux composants **a** et **b**.

Afin de simplifier le modèle pour une génération de gammes par bipartition, l'hypothèse à préconiser lors de notre construction du modèle du produit pour le désassemblage est la suivante :

Hyp. 4.3 : Pour des configurations particulières de désolidarisation, certains composants liés à la fonction de solidarisation seront occultés dans le modèle du produit.

La solidarisation multiple indépendante

L'exemple de la Figure 4.12 représente un autre cas de solidarisation multiple. L'extraction du composant **c** suggérerait de supprimer la solidarisation notée **s**. De ce fait, il n'y aurait plus aucune garantie quant au maintien du reste du sous-assemblage {a,b,d}. La solution que nous préconisons est de décomposer la solidarisation (collage) et mettre ainsi en évidence les deux solidarisations s_1 et s_2 qui rattachent le composants **c** aux composants **a** et **d** (cf. Figure 4.13).

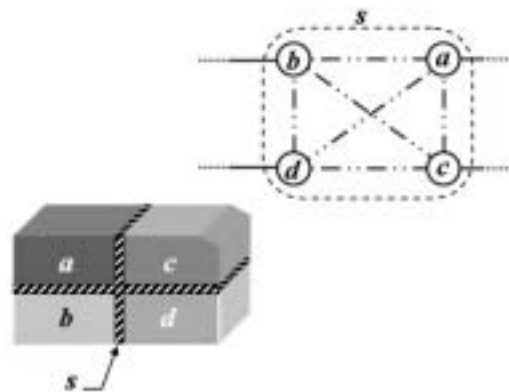


Figure 4.12 : Exemple d'une solidarisation multiple indépendante

L'hypothèse qu'on peut émettre est la suivante :

Hyp. 4.4 : Toute solidarisation multiple sera divisée en autant de solidarisations dérivées nécessaires qui n'engendrent pas de difficultés supplémentaires.

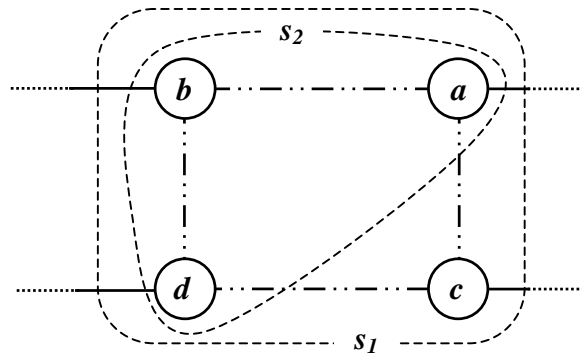


Figure 4.13 : Décomposition d'une solidarisation multiple

Remarque

Cette décomposition de solidarités complexifie indéniablement la combinatoire de la génération de gammes. Par ailleurs, elle s'avère nécessaire pour le désassemblage de certains produits.

La solidarisation multiple intégrée

Le dernier cas de la Figure 4.14 vient justement démontrer qu'il n'est pas toujours possible de prendre l'hypothèse ci-dessus. En effet, on ne peut simuler une solidarisation entre les composants *a* et *b* puisque ces derniers sont initialement tenu par insertion à force avec un troisième composant (*c*). La seule solution qui paraît réaliste est de faire en sorte que les composants *a* et *b* soient enlevés successivement du composant *c*. Dans ce cas, la solidarisation serait ignorée et les deux liaisons reliant ces composants au composant *c* serait considérées comme des liaisons morphologiques.

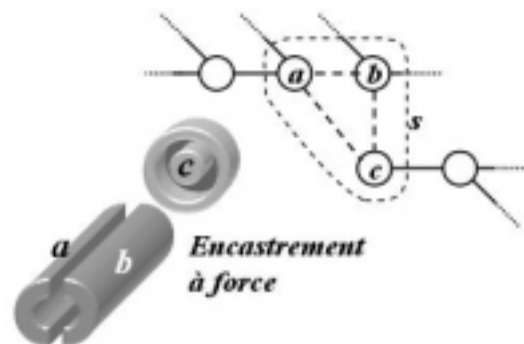


Figure 4.14 : Exemple d'une solidarisation multiple intégrée

4.2.1.5 Caractères complémentaires

Les opérations complémentaires sont des opérations destinées à modifier l'état du produit sans changer sa structure. Celles appelées « annexes » représentent les opérations de nettoyage, de lubrification, de polissage, de marquage, d'ébavurage, etc. Il s'agit de caractères qui, par leur établissement, apportent des modifications à un composant ou même à un sous-assemblage (+ peinture, + nettoyage, etc.). Ces caractères viennent ainsi s'annexer aux opérations structurelles que sont les opérations géométriques, de désolidarisation et de destruction. Les opérations dites « informationnelles » modifient l'état du produit du fait de la

prise d'informations le concernant. Ceux-ci sont principalement des opérations de contrôle des sous-assemblages.

Afin de respecter une structure de bipartition dans la construction arborescente du graphe de désassemblage, les caractères complémentaires réalisés peuvent être assimilés à des composants élémentaires comme le montre la Figure 4.15.

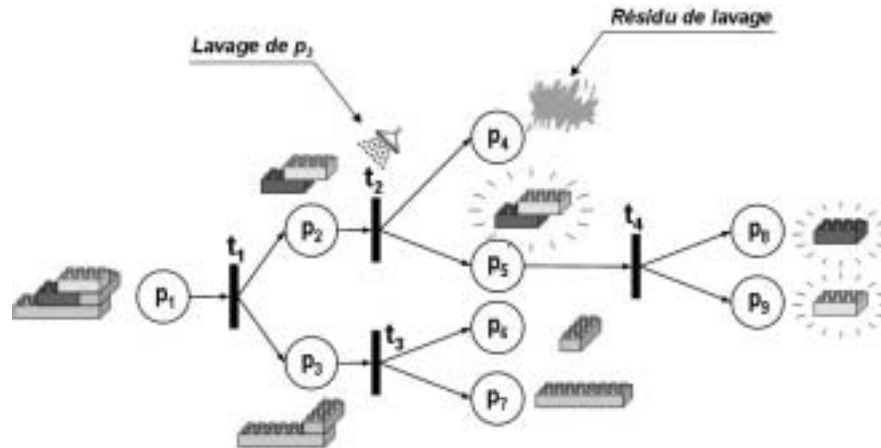


Figure 4.15 : Exemple d'intégration d'une opération complémentaire

Le choix que nous proposons de prendre est le suivant :

Hyp. 4.5 : Lors de la modélisation des processus de désassemblage par les réseaux de Petri, les caractères complémentaires seront représentés par des places au même titre que les composants élémentaires. Les revenus qui seront affectés aux places représenteront, dans le cas de caractères complémentaires, des coûts de traitement. De plus, ils pourront être désignés comme étant des « fractions cibles » lorsque leur traitement est nécessaire.

4.2.1.6 Irréversibilité de certains caractères de désolidarisation et complémentaires

Nous dirons d'un caractère non géométrique qu'il est *symétrique* si l'opération associée est *réversible* (ex. vissage). Dans le cas contraire nous parlerons de caractères *asymétriques*. L'exemple est celui d'une opération de poinçonnage sur un composant lors de l'assemblage qui ne peut être transposée au désassemblage que par une opération de grattage de ce poinçon. La raison est que le composant gratté ne peut retrouver son état initial. Cela peut influencer le choix de destination fin de vie (réutilisation en l'occurrence). En d'autres termes, l'analyse du produit pour sa modélisation ne doit pas être qu'une « déconstruction arborescente » mais certaines opérations peuvent être changées et parfois décomposées en plusieurs opérations de désassemblage. Tous cela ne peut se faire, dans le contexte actuel, que de manière manuelle et au cas par cas compte tenu de la complexité de mise en œuvre d'un système expert adapté. En résumé, les caractères complémentaires et les solidarités asymétriques doivent être l'objet d'analyse pour leur faire correspondre les opérations de démantèlement adéquates.

Hyp. 4.6 : Nous supposons que pour chaque caractère non géométriques, il existe une ou plusieurs opérations alternatives qui seront intégrées dans le processus de désassemblage.

4.2.2 Au niveau du système

L'analyse du système est une étape importante dans le choix des processus de désassemblage. Il existe de nombreux processus permettant de désassembler un produit, chaque processus implique des architectures et des implantations différentes ... donc des performances et des coûts différents. C'est dire que l'estimation des besoins en ressources du système est primordiale. Par ailleurs, l'analyse du système est conditionnée par l'objectif de notre démarche organisée de CYD-VHU. L'analyse est différente selon que l'on veuille expérimenter de nouvelles (ré)organisations d'un système existant de désassemblage³⁹ ou que l'on désire estimer la capacité de production et d'investissement nécessaire à la conception d'un nouveau système. Connaissant le ou les produits à désassembler, le premier cas semble plus aisé à traiter (cf. Figure 4.16).

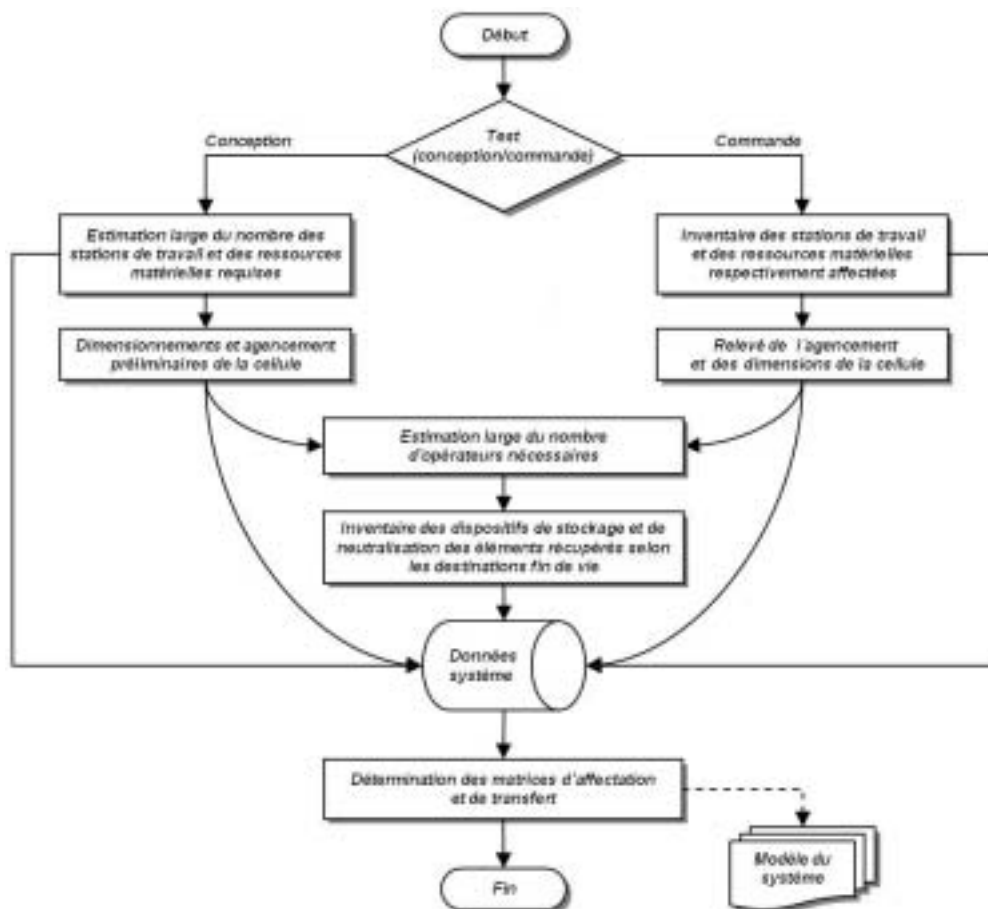


Figure 4.16 : Analyse du système à modéliser

L'analyse consistera alors à inventorier les stations capables d'assumer la fonction de « station de désassemblage », à y dénombrer les outils, machines et consommables susceptibles de servir les procédés de désassemblage et à saisir les éventuelles possibilités de ré-agencement et de re-disposition de ces ressources matérielles. Dans le cas d'une conception, la difficulté est d'estimer, avec le plus de justesse possible, l'envergure de la cellule de désassemblage et des matériels qui y figureront. Le dimensionnement et l'agencement de la cellule devront faire l'objet de considérations économiques et de performances. L'effectif du personnel dépend de l'ordre de grandeur des flux attendus dans la

³⁹ Un système de désassemblage existant peut être un atelier de démolissage pour la revente et le recyclage. La reconversion est *a priori* la méthode la moins coûteuse.

cellule de désassemblage et de leurs propres performances. Finalement, les normes et préconisations relatives au stockage et au traitement des divers éléments récupérés du processus de désassemblage devront être scrupuleusement respectés. Par exemple, des voies d'évacuation devront être prévues pour chaque station, des bacs isolés et parfois hermétiques devront être disposés dans la cellule en fonction des fractions cibles attendues et des compatibilités fin de vie entre elles. Il est évident que la justesse des estimations dans toutes ces étapes dépend de l'expérience de l'expert et ne pourra être vérifiée qu'après mise en route de la cellule de désassemblage. Les données, ainsi recueillies, seront stockées dans une base de donnée. Celle-ci servira à fournir des informations numériques pour la réalisation du modèle du système physique (la cellule). Il s'agit, entre autres, de la matrice d'affectation des tâches de désassemblage et des opérateurs pour chaque station, du nombre de stations et d'opérateurs dont disposera la cellule, des durées de transfert des constituants entre les stations, etc.

Relativement à l'organisation hiérarchique du système de désassemblage présentée à la Figure 2.15, notre modélisation se situe au niveau de la « cellule ». Celle-ci est une des subdivisions d'un îlot de désassemblage où sont assurées l'ensemble des opérations de désassemblage nécessaires pour traiter les produits en fin de vie considérés, en l'occurrence les VHU. La cellule de désassemblage dispose alors d'une autonomie d'action durant une période le plus souvent fixée par le chef d'atelier et en tout cas conditionnée par les stocks tampons prévus en amont et en aval. La cellule est constituée d'un ensemble de lieux dans lesquels sont exécutées certaines opérations de désassemblage. Une ou plusieurs ressources (humaines ou matérielles) sont mises à contribution à chaque fois. Selon cette organisation de la cellule, le « lieu » de désassemblage ne peut être qualifié de « poste » au sens de P. Olivier [50] car plusieurs opérations de désassemblage sur différents constituants peuvent intervenir en même temps dans le même lieu. Nous appellerons ce lieu : « *station* ». Cette organisation différente que nous avons voulu pour la cellule de désassemblage nécessite un certain nombre d'hypothèses présentées aux paragraphes suivants.

4.2.2.1 Temps de reconfiguration et de déploiement des opérateurs

Nous avons voulu signifier, par le nom « station », le caractère stationnaire éventuel du constituant reçu dans le poste et autour duquel seront exécutées un certain nombre d'opérations de désassemblage (cf. Figure 4.17). La première hypothèse est classique, elle concerne les ressources matérielles et permet de réduire la complexité du système à étudier :

Hyp. 4.7 : Les temps de reconfiguration des ressources matérielles au sein de ces stations de désassemblage seront compris dans les temps opératoires.

L'hypothèse suivante concerne la mobilité dans les stations, son but est de procurer plus de flexibilité à la cellule :

Hyp. 4.8 : Au sein d'une même station de désassemblage, les opérateurs peuvent se déplacer librement, le plus souvent autour des produits ou des constituants arrivés dans la station.

4.2.2.2 La charge opératoire des opérateurs de désassemblage

L'hypothèse ci-dessus a été motivée par nos observations sur les habitudes de travail dans les ateliers de maintenance et de réparation de véhicules et dans les ateliers de démolisseurs automobiles (évoqués au §1.4.3). Cette mobilité des opérateurs permet, de plus, l'exécution

d'un grand nombre d'opérations de désassemblage autour du constituant initialement reçu dans la station. En effet, les opérateurs ont ainsi la liberté d'enchaîner les opérations de désassemblage parallèlement les uns aux autres tant que cela est possible (développé au 5.2.3). L'hypothèse correspondante est la suivante :

Hyp. 4.9 : Au sein d'une même station de désassemblage, chaque opérateur peut exécuter une seule opération à la fois mais simultanément aux autres (opérateurs).

Soucieux de se rapprocher le plus possible de la réalité opératoire dans une production à prédominance manuelle, nous avons aussi émis l'hypothèse que les temps opératoires mis par les opérateurs pour une même opération sont différents. Cela est dû à plusieurs facteurs dont :

- l'expérience de l'opérateur dans l'exécution de l'opération affectée ;
- la performance habituellement reconnue et finalement attendue de l'opérateur (fonction de l'âge, de l'ancienneté au niveau expérience, ...);
- la charge moyenne hebdomadaire (par exemple) de travail allouée à l'opérateur qui pourrait suggérer une fatigue ou une baisse de sa performance.

En résumé, les temps d'exécution varient selon le contexte de leur réalisation. On peut formuler l'hypothèse suivante :

Hyp. 4.10 : Des temps opératoires spécifiques seront affectés à chaque opérateur pour les opérations qui lui sont attribuées.

4.2.2.3 Capabilité opératoire des stations

Pour faciliter l'équilibrage des charges et la réduction du temps global de désassemblage d'un lot de véhicules, nous avons proposé que plusieurs stations d'une même cellule soient en mesure d'exécuter une opération donnée. Cela suppose que ces stations aient accès aux ressources nécessaires : équipements et outillage, dédoublés ou partagés. L'hypothèse est la suivante :

Hyp. 4.11 : Plusieurs stations sont capables d'exécuter une opération de désassemblage ; une seule de ces stations sera effectivement sélectionnée pour le faire.

Cela permettra un plus grand champ d'action pour l'équilibrage des charges sur les stations de désassemblage.

4.2.2.4 Détermination des ressources humaines et matérielles

Nous avons préconisé un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pour réduire la complexité du modèle d'optimisation du système de désassemblage et de son pilotage dans la mesure du raisonnable. La première simplification a été d'occulter la gestion des ressources de transfert inter-stations et d'évacuation des constituants au sein de la cellule (cf. Figure 4.17). L'hypothèse est la suivante :

Hyp. 4.12 : Les ressources de transfert et d'évacuation sont considérées autonomes, toujours disponibles et opérationnelles.

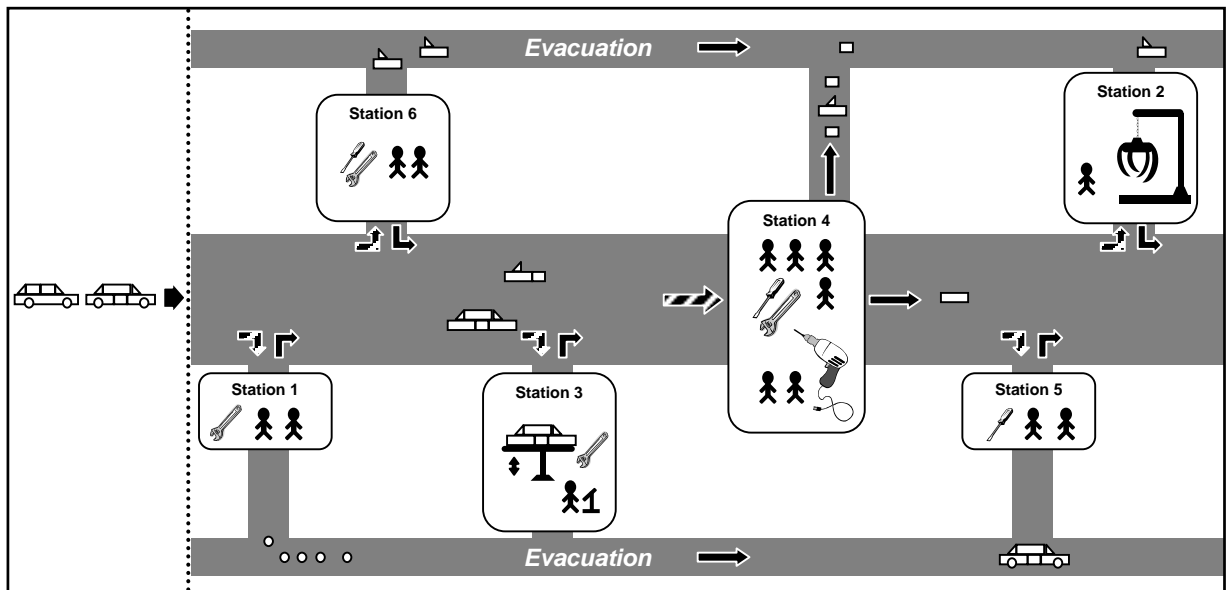


Figure 4.17 : Cellule de désassemblage modélisée

Toujours pour simplifier et diminuer la complexité du modèle de système de désassemblage et de son pilotage sans s'éloigner des réalités de production, nous avons décidé de fixer *a priori* le nombre de stations et d'opérateurs dans la cellule de désassemblage :

Hyp. 4.13 : Le nombre de stations et le nombre d'opérateurs dont est pourvue la cellule de désassemblage sont prédéterminés.

Remarque

Il se peut que, lors de l'optimisation du système de désassemblage, une ou plusieurs des stations de la cellule n'aient aucune opération de désassemblage d'affectées. Cela signifie alors que le nombre de stations est surélevé et qu'il faut le diminuer puis relancer l'optimisation. Nous sommes bien dans une démarche de conception.

4.2.3 Au niveau du contexte

La prise en compte des conditions de production dès la conception d'un système de désassemblage sur la base de données conjoncturelles et probables n'est pas une tâche facile. D'autant plus que certains choix relatifs à ces données devront être faits après la génération des gammes admissibles de désassemblage. Il n'y pas de méthode formelle pour l'intégration de ces données. Par conséquent, l'analyse du contexte se fera autour de points particuliers et à travers la formulation d'hypothèses notamment sur les taux de valorisation en vigueur ou sur l'offre et la demande de certaines matières ou pièces. Cela donnera effet à des hypothèses et préconisations que l'expert devra intégrer dans le modèle du contexte lui permettant de définir des contraintes contextuelles. Celles-ci conditionneront la phase d'optimisation du désassemblage traitée au chapitre suivant.

4.2.3.1 Analyse de la valorisation

Différentes destinations fin de vie des constituants d'un produit sont possibles. Les choix de stratégies de fin de vie doivent considérer un nombre important de paramètres comme l'existence de filières adéquates, la rentabilité des choix de valorisation pour chacun des

constituants, etc. Comme il a été évoqué dans le premier chapitre, les destinations fin de vie en termes de valorisation sont de trois types : la réutilisation, la valorisation matière et la valorisation énergétique⁴⁰. Pour décider de la meilleure pour chaque constituant, il faut connaître entre autres sa constitution matière, son poids et sa compatibilité vis-à-vis des valorisations matière et énergétique. Cela sous-entend la mise en place d'une base de données croisée ou se mêlent les coûts de valorisation, la compatibilité de valorisation, l'existence de filières, etc. L'hypothèse qui s'y rapporte est la suivante :

Hyp. 4.14 : Chaque composant élémentaire est considéré, en terme de valorisation, comme une entité homogène de matière pour laquelle est défini préalablement un taux de valorisation prévisionnel.

En effet, cette hypothèse concerne les composants élémentaires car ils sont généralement mono-matière ou constitués de matières compatibles (par rapport aux procédés de valorisation). On peut très bien imaginer une méthode de détermination de la méthode de valorisation la plus rentable à partir d'une simple table de correspondance entre les matières et les coûts de valorisation. Cela peut très vite devenir ardu pour les constituants dans lesquels se trouvent des composants hétérogènes en terme de valorisation. Nous avons ainsi posé une autre hypothèse :

Hyp. 4.15 : Chaque constituant d'un produit devra faire l'objet d'une analyse au cas par cas par un expert pour déterminer sa destination fin de vie. Ce constituant devra garder cette destination fin de vie tout au long de notre démarche organisée de conception.

Pour assister l'expert lors de son expertise, nous avons développé une approche formalisée d'analyse de l'aptitude à la valorisation des constituants dans la section 4.3.3 .

Les constituants qui présentent une constitution matière homogène peuvent bénéficier d'un regroupement (*clustering*) en un super-composant à condition que les destinations fin de vie des composants soient similaires. Ce choix de procédure a été d'ailleurs pris par de nombreux auteurs comme indiqué dans le paragraphe 3.3.1 [09], [33], [22] et [62]. Nous respecterons d'ailleurs ce choix avec rigueur tout au long de notre démarche organisée :

Hyp. 4.16 : Chaque fois qu'il est possible, les constituants homogènes en terme de valorisation devront être assimilés à des composants élémentaires dès la construction du modèle du produit ou par le biais des contraintes stratégiques lors de la génération des gammes et de l'optimisation du désassemblage.

Un des points fondamentaux dans la valorisation est le taux minimum de valorisation pour les VHU. En effet, un des accords contenus dans la directive européenne sur la valorisation des VHU (voir §1.4.3) prévoit un poids maximum de déchets ultimes égal au plus à 15% du poids total du VHU depuis 2002. En d'autres termes, le taux de valorisation minimum est de 85% du poids du VHU. Celui-ci arrivera à terme à 95%. Par conséquent, un autre choix en vigueur :

Hyp. 4.17 : A partir de l'analyse de destination fin de vie, chaque constituant d'un produit devra faire référence à un taux de valorisation matière ou énergétique et à un revenu qui resteront valables tout au long de la démarche organisée de conception.

⁴⁰ La mise en décharge n'est pas un type de valorisation ! C'est une des destinations fin de vie d'un VHU.

Le revenu de chaque constituant nécessitera aussi l'intervention de l'expert compte tenu de l'inexistence de bases de données techniques de valorisation normalisées. Ces revenus seront négatifs quand il s'agira de coûts.

4.2.3.2 Pièces spéciales et substances dangereuses

Les substances dangereuses et certaines pièces que contiennent les véhicules automobiles (batteries au plomb, éléments pyrotechniques des airbags, ...) sont de plus en plus réglementées et requièrent, par conséquent, des mesures particulières lors de la modélisation du produit. En fonction de la sous-traitance et des évolutions technologiques, il peut arriver que certaines de ces substances trouvent leurs filières de valorisation. En conséquence, leur identification dans le produit ne doit pas être figée. Leur évacuation ou traitement spécifique doit être alors introduit par le biais de contraintes conjoncturelles lors de la génération de gammes ou lors de l'optimisation du désassemblage.

Hyp. 4.18 : Il est nécessaire d'identifier les constituants qui doivent faire l'objet de traitement spécifiques au niveau de la mise en place de la stratégie de génération des gammes de désassemblage.

4.2.3.3 La demande en pièces et en matières

Générer les gammes de désassemblage les plus rentables n'est pas toujours la meilleure stratégie. En effet, les fluctuations du marché de la pièce d'occasion ou du recyclage font varier, à leur tour, la demande. Quand celle-ci accuse une baisse importante, les pièces stockées en aval du système de désassemblage ne sont pas écoulées, engendrant ainsi des surcoûts de stockage souvent très importants. Il ne faut pas oublier que certains constituants des VHU sont volumineux. Le choix des fractions cibles que l'on doit obtenir après optimisation doit prendre en compte ces aspects du marché. Encore une fois, nous préconisons l'intervention de l'expert à défaut d'une base de données économique à jour. L'hypothèse est la suivante :

Hyp. 4.19 : Avant chaque optimisation du désassemblage, la liste des fractions cibles à obtenir doit être mise à jour en fonction des données du marché.

4.2.3.4 Politique de sous-traitance

Comme dans la construction automobile, la sous-traitance est une démarche importante et souvent très économique dans la valorisation des VHU. Diverses pièces d'un VHU sont souvent écoulées sur les marchés étrangers. C'est le cas des moteurs qui sont exportés vers l'Afrique et généralement avec des frais d'expédition à la charge de l'acheteur. Ce genre d'opportunités commerciales est très rentable mais tout autant imprévisible. C'est pourquoi les fractions cibles destinées à la vente doivent aussi faire l'objet de mises à jour continuelle. La méthode à suivre est la même : la levée ou l'application de contraintes contextuelles lors de l'optimisation du désassemblage. L'Hyp. 4.19 se voit donc confirmée.

4.2.3.5 Coûts des équipements et Rémunération des opérateurs

Le coût d'une opération de désassemblage dépend de la ressource matérielle qu'elle nécessite et des moyens humains qu'elle mobilise. Chaque ressource matérielle a un coût d'exploitation par heure qui dépend de sa technologie, de son âge, des consommables qu'elle nécessite et du nombre d'opérateurs qui la maintiennent opérationnelle. Par ailleurs, l'expérience et

l'efficacité de l'opérateur qui exécute cette opération sont des paramètres décisifs dans l'estimation de la durée opératoire et donc de son coût. Nous avons pris, par conséquent, l'hypothèse simplificatrice suivante :

Hyp. 4.20 : Considérant les ressources matérielles comme des éléments intégrants de la cellule de désassemblage, leurs coûts d'exploitation seront considérés forfaitaires et estimés à l'heure.

Ainsi, la réduction des coûts matériels se fera par la réduction de la durée globale de la gamme de désassemblage sélectionnée.

Hyp. 4.21 : Considérant les opérateurs humains comme des ressources partageables sur un atelier où résident plusieurs cellules de désassemblage, seul le temps de travail dans chaque cellule entrera dans l'estimation des coûts de démantèlement d'un produit.

4.2.4 Conclusion

Il est évident que ces hypothèses et choix introduisent, explicitement ou implicitement, des préconisations de modélisation du produit, du système et du contexte à partir des données diverses et variées. Nous ne pensons pas faisable d'automatiser complètement cette analyse. Cette phase nécessite l'intervention ininterrompue d'un expert. Nous n'en avons pas fait notre « cheval de bataille » compte tenu de nos objectifs de départ. Cependant, beaucoup de travaux sur la conception pour le désassemblage (*Design For Disassembly*) sont en cours (évoqué dans le chapitre 2).

4.3 Modélisation du système de désassemblage – Niveau 1 (étapes 4 et 5)

La modélisation du système de désassemblage est la première étape de son optimisation. Dans un premier temps, il est question de la modélisation du produit sur lequel reposera la génération de toutes les gammes faisables pour le désassemblage d'un VÉHICULE HORS USAGE (cf. Figure 4.18).

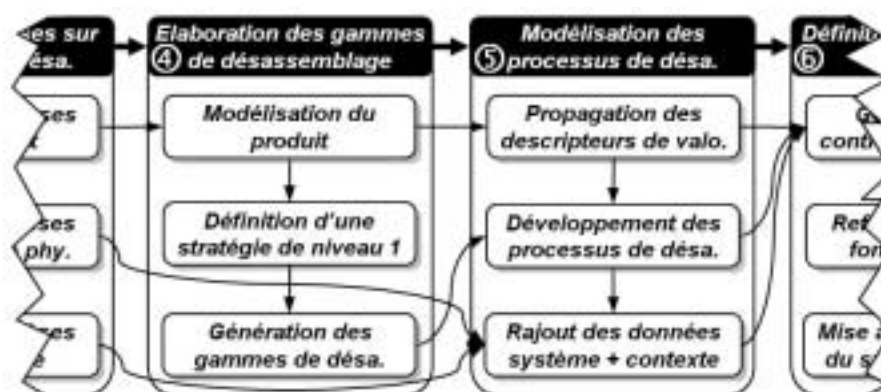


Figure 4.18 : Phase d'analyse et de choix en vue de la conception de systèmes de désassemblage

Dans un deuxième temps, l'expert devra intervenir pour valider ou non les opérations qui ne peuvent l'être de manière systématique. Cette intervention entre dans le cadre d'une stratégie que nous appellerons de niveau 1 car c'est la première procédure de réduction du nombre de gammes de désassemblage.

Dans un troisième temps, les gammes de désassemblage sont générées par bipartition. Le résultat est l'obtention des gammes « *admissibles* » de désassemblage. Par la suite, un réseau de Petri sera élaboré pour regrouper ces gammes en un modèle mathématique qui est le modèle des processus de désassemblage. Après propagation (voir §4.3.3 page 112) des données de valorisation à tous les constituants issus de la génération de gammes (niveau 1 de l'étape 5), ce modèle sera augmenté des données du système physique et des conditions de déroulement du désassemblage (niveau 3).

4.3.1 Modélisation du produit

Le modèle du produit est l'élément central sur lequel repose la méthode de génération des gammes de désassemblage. En effet, le modèle est censé fournir toutes les informations nécessaires à l'élaboration de gammes réalisables. Il doit permettre, par ailleurs, de réduire le nombre de combinaisons possibles entre toutes les opérations de désassemblage d'un produit et ce par des contraintes diverses implicitement ou explicitement formulées. Comme évoqué dans la section 3.2.2, de nombreuses représentations du produit ont été développées dans la littérature ; certaines sont plus complètes que d'autres mais parfois plus complexes. Nous avons choisi un juste milieu en termes de complétude et de simplicité de description du produit. Cette modélisation du produit a été développée initialement pour l'assemblage en vue de la génération des gammes d'assemblage au Laboratoire d'Automatique de Besançon⁴¹ (LAB). Ce modèle, qui a évolué à maintes reprises, décrit la structure du produit par des constituants et des liaisons les reliant (voir §4.2.1.1). De plus, la méthode de génération des gammes de désassemblage que nous avons adoptée n'est en fait qu'une transposition de celle développée au LAB. Elle s'inscrit dans la même approche du modèle du produit [28][60].

Le modèle proposé est basé sur des considérations géométriques des différents éléments du produit tel qu'il a été présenté dans le modèle opératoire de [28]. Les nouveaux éléments rajoutés à ce modèle – évoqué en début de ce chapitre (4.2.1.1) – se rapportent à la valorisation.

Les éléments de ce modèle sont au nombre de cinq : les fractions cibles (*cf.* ci-dessous), les liaisons, les solidarisions, les caractères complémentaires et les caractères de valorisation comme suit :

$$P_r = \langle C, \Gamma, \Sigma, \Delta, D, \hat{s}, \tilde{p} \rangle$$

où:

C est l'ensemble des fractions cibles du produit P_r .

Γ est l'ensemble des liaisons entre fractions cibles de P_r .

Σ est l'ensemble des solidarisions dans P_r .

Π est l'ensemble des caractères complémentaires de P_r .

D est l'ensemble des descripteurs de valorisation de P_r .

4.3.1.1 Les fractions cibles

Un produit P_r est constitué d'un ensemble de composants élémentaires. La séparation de ces derniers n'est pas toujours souhaitable pour la valorisation. C'est-à-dire qu'à ce stade de la modélisation, les composants élémentaires peuvent être en réalité des sous-assemblages

⁴¹ UMR CNRS n°6596 (France)

appelés fractions cibles. Nous continuerons, tout de même, à identifier ces fractions cibles à des composants élémentaires. Ainsi, il sera affecté à chaque produit \mathbf{P}_r l'ensemble \mathbf{C} des fractions cibles : $\mathbf{C} = \{u_1, u_2, \dots, u_z\}$

4.3.1.2 Les liaisons

Les liaisons inter-fractions seront déterminées par une fonction qui définit tous les couples de fractions cibles entre lesquelles se trouve une liaison géométrique. Il s'agit de l'application⁴² l :

$$l: \Gamma \rightarrow \mathbf{C}^2 \quad \left| \begin{array}{l} \text{Pour toute liaison } \gamma_k \text{ de } \Gamma \text{ est associé un couple unique } (u_i, u_j) \text{ dans } \mathbf{C}^2. \Gamma \\ \gamma_k \mapsto (u_i, u_j) \text{ est, par conséquent, une partition de } \mathbf{C}. \end{array} \right.$$

l décrit un graphe $\mathbf{G} = [\mathbf{C}, \Gamma]$ appelé "*graphe des liaisons*" du produit \mathbf{P}_r . Il s'agit d'un graphe non orienté et connexe.

Remarque

- Il arrive que des liaisons existent dans un mode de fonctionnement et n'existent pas dans d'autres comme c'est le cas de constituants mobiles au sein du produit [56][60]. A chaque état est associé un graphe des liaisons différent. Pour réduire les risques d'explosion combinatoire lors de la génération de gamme, nous avons décidé d'occulter cet aspect.
- Dans ce qui suit, nous appellerons « composants élémentaire » les fractions cibles que vise l'optimisation du désassemblage.

4.3.1.3 Les solidarisations

Les solidarisations seront déterminées par une application qui définit pour chaque groupe de composants qui sont attachés les uns aux autres par une unique énergie de cohésion, un élément σ_k de Σ . Il s'agit de l'application⁴³ \hat{s} :

$$\hat{s}: \Sigma \rightarrow \wp(\mathbf{C}) \quad \left| \begin{array}{l} \hat{s} \text{ fait correspondre, à toute solidarisation } \sigma_k, \text{ un élément } \mathbf{U} \text{ de l'ensemble} \\ \sigma_k \mapsto \mathbf{U} \text{ des partitions de } \mathbf{C} \text{ pour lequel est établie une solidarisation garantissant la} \\ \text{cohésion de tous ses composants.} \end{array} \right.$$

Ainsi, tout organe de liaison (tel que des vis, des écrous, des rivets, etc.), toute matière rapportée (telle que la colle et la soudure) et toute énergie (telle que l'emmanchement forcé, le sertissage, etc.) pourront être intégrés dans la génération des gammes de désassemblage.

Remarque

Tel qu'il a été remarqué dans la section 4.2.1.4 , certaines solidarisations comme l'insertion à force ne seront pas toujours prises en compte afin d'alléger, entre autres, le modèle du produit et par conséquent la génération des gammes et son optimisation.

⁴² Chaque couple de fractions en contact ne peut être représenté par plus d'une liaison (l est injective). Il y a généralement des couples de fractions qui ne correspondent à aucune liaison de Γ dès lors qu'ils ne sont pas en contact (l n'est pas surjective).

⁴³ \hat{s} n'est pas injective car un constituant du produit peut être concerné par deux solidarisations distinctes (donc des outils distincts aussi). \hat{s} n'est pas surjective puisque un constituant peut ne pas avoir de solidarisation.

4.3.1.4 Les caractères complémentaires

Un caractère complémentaire peut faire référence à un ou plusieurs éléments de l'ensemble des composants de C et à des solidarisations de Σ . Les caractères complémentaires peuvent servir pour faciliter le désassemblage (graissage et dégrippant), remettre à neuf des constituants (nettoyage), mesurer la faisabilité d'une opération (contrôle), disposer d'une traçabilité de chaque composant, etc. La formulation dont nous nous sommes inspiré considère qu'un caractère complémentaire s'applique, au plus, sur des composants, des liaisons et des solidarisations. En effet un bain chimique peut concerner un ou plusieurs composants à la fois, le contrôle partiel du produit peut concerner une ou plusieurs liaisons, des solidarisations et d'autres caractères complémentaires (pour graisser, le nettoyage préalable est souvent préconisé). L'application⁴⁴ \tilde{p} permet de représenter cela :

$$\tilde{p} : \Pi \rightarrow \wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi) \quad \left| \begin{array}{l} \tilde{p} \text{ définit quels sont les éléments de } C, \Gamma \text{ et } (\Sigma \cup \Pi) \\ \text{directement ou indirectement concernés par chaque caractère} \\ \text{complémentaire } \pi_k. \end{array} \right.$$

$$\pi_k \mapsto V$$

4.3.1.5 Les caractères de valorisation

L'optimisation du désassemblage qui motive nos travaux est basée principalement sur la recherche du meilleur compromis entre la rentabilité et le taux de valorisation du VHU. Le choix et l'organisation des données de valorisation pour le modèle du produit sont, par conséquent, cruciaux. Nous avons vu dans le chapitre 1 que l'un des points les plus concrets de la directive européenne sur la valorisation des VHU était le taux de valorisation du produit traité. Celui-ci dépend de la destination fin de vie, de la masse et du taux de valorisation de chacun des composants élémentaires de ce produit. L'intégration des matières entrant dans la constitution chimique et mécanique de chaque composant est nécessaire pour déterminer la destination fin de vie et le taux de valorisation des constituants apparaissant lors du désassemblage. L'intérêt de disposer de toutes ces informations permet aussi de : regrouper des constituants en sous-ensembles cohérents, de ne pas réaliser d'opérations sans intérêt, de forcer certains paramètres de valorisation pour déterminer de nouvelles gammes de désassemblage, etc.

F. Touzanne [60] a été le premier à intégrer les paramètres de valorisation dans le modèle opératoire de la méthode LAB sur laquelle nous nous sommes basés. Pour ce faire, il a introduit les notions de « descripteur » et d'« attribut ». Ces termes ont été repris des travaux de recherche de L. Dufrene [15] sur la modélisation d'une famille de produits en assemblage. F. Touzanne a défini le **descripteur de valorisation** comme étant un caractère de valorisation que possède l'ensemble des constituants d'un produit.

Ce descripteur peut être de deux types :

- quantitatifs s'il est possible de mesurer le caractère (exemple : masse);
- qualitatifs dans les autres cas (exemple : Destination de fin de vie).

Quant à l'**attribut**, il s'agit de toute valeur que peut prendre un descripteur au sein du produit. A chaque descripteur correspond donc un ensemble d'attributs qui représentent toutes les conditions possibles de valorisation.

⁴⁴ \tilde{p} n'est pas injective car un constituant du produit peut être concerné par deux caractères complémentaires distincts. Elle n'est pas non plus surjective puisque un élément de $\wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi)$ peut n'être sujet à aucun caractère complémentaire.

Nous avons donc adopté cette notion de descripteur avec deux extensions au modèle et une hypothèse de travail. Celle-ci est de ne pas décider de la destination fin de vie des composants à ce stade de la modélisation mais plutôt au stade de la stratégie de niveau 2 que nous allons présenter dans le chapitre suivant. La première extension au modèle est que les attributs seront, désormais, multi-dimensionnels. Par exemple, nous définirons le descripteur « Taux de valorisation » avec un attribut à 4 dimensions pour pouvoir indiquer le taux correspondant à chaque destination fin de vie. En effet, les taux de valorisation matière et énergétique diffèrent selon la matière et selon la technologie existante. La réutilisation et la mise au rebut traduisent, respectivement, des taux de valorisation de 100% et de 0%. La deuxième extension est que les descripteurs de valorisation ne seront pas applicables uniquement à l'ensemble C des composants élémentaires mais aussi à l'ensemble des caractères complémentaires et de solidarités $\Sigma \cup \Pi$.

Pour chaque composant, nous définissons l'ensemble $D = \{d_{DFV}, d_{Masse}, d_{Valo}, d_{Ir}, d_{MAt}\}$ de cinq descripteurs de valorisation avec chacun un ensemble d'attributs (*cf.* Tableau 4.1).

<i>Descripteurs</i>	<i>Définition</i>	<i>Attributs</i>
Destination fin de vie \mathbf{d}_{DFV}	$d_{DFV} : \wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi) \rightarrow A_{DFV}$ $u_i \mapsto a_i^{DFV}$	$A_{DFV} = M_{4 \times 1}(\{0,1\})$... Ensemble de vecteurs de dimension 4 à éléments dans $\{0,1\}$. Les quatre éléments du vecteur valent 0 ou 1 selon que la réutilisation, la valorisation matière, la valorisation énergétique et la mise au rebut sont respectivement possibles.
Masse \mathbf{d}_{Masse}	$d_{Masse} : \wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi) \rightarrow A_{Masse}$ $u_i \mapsto s_i$	$A_{Masse} = \mathbf{R}^+$... la masse servira au calcul du taux global de valorisation, des revenus de valorisation (matière et énergétique) et des coûts de mise au rebut.
Taux de valorisation \mathbf{d}_{Valo}	$d_{Valo} : \wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi) \rightarrow A_{Valo}$ $u_i \mapsto a_i^{Valo}$	$A_{Valo} = M_{4 \times 1}(\mathbf{R}^+)$... les quatre taux de valorisation correspondent, respectivement, à la réutilisation, la valorisation matière, la valorisation énergétique et la mise au rebut (voir la remarque n°1 ci-dessous).
Indice de revenu \mathbf{d}_{Ir}	$d_{Ir} : \wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi) \rightarrow A_{Ir}$ $u_i \mapsto a_i^{Ir}$	$A_{Ir} = M_{4 \times 1}(\mathbf{R})$... les quatre indices de revenu multipliés par la masse du composant valorisée donnent les revenus correspondants, respectivement, à la réutilisation, la valorisation matière, la valorisation énergétique et la mise au rebut (voir la remarque n°2 ci-dessous).
Matière \mathbf{d}_{Mat}	$d_{Mat} : \wp(C) \times \wp(\Sigma \cup \Pi) \rightarrow A_{Mat}$ $u_i \mapsto a_i^{Mat}$	$A_{Mat} = M_{nf \times 1}([0,1])$... Ensemble de vecteurs de dimension nf à éléments dans l'intervalle $[0,1]$. Ces éléments expriment le pourcentage massique de chacune des nf familles de matières ⁴⁵ considérées (voir la remarque n°3 ci-dessous).

Tableau 4.1 : Descripteurs de valorisation et leurs attributs

Remarques

1. Lorsqu'un constituant est réutilisé, la valorisation de cette partie du produit est totale. Le taux de valorisation correspondant est de 100 %. Le taux de valorisation matière et énergétique de ce constituant varie en fonction des matières qui le constituent et des procédés utilisés. Dans le domaine du recyclage automobile, le taux de valorisation matière et énergétique sont habituellement approximés, respectivement, à 100% et 57%. Quant à la mise au rebut, la valorisation est nulle, le taux est de 0%.
2. Pour le cas de la réutilisation (RU), l'indice de revenu représente le prix de vente au poids. En effet, le produit de cet indice par la masse doit donner le prix de vente sur le

⁴⁵ Une famille de matière rassemble toutes les matières compatibles en termes de valorisation matière ou énergétique.

marché de la pièce détachée d'occasion par exemple. Cependant, il paraît plus simple de donner directement ce prix de vente mais l'importance de garder cette notion de revenu au poids dans les cas de mise au rebut (MR) ou de valorisation matière (VM) et énergétique (VE) sont importants.

- Concernant l'attribut a_i^{Mat} relatif au descripteur matière, il ne devrait indiquer, idéalement, la présence que d'une famille de matière à la fois par fraction cible. Il n'en est rien en réalité ; la présence d'impuretés sera aussi indiquée pour permettre de décider de la possibilité ou non de la valorisation matière ou énergétique. Par ailleurs, la définition de l'attribut comme étant un vecteur de dimension nf est ainsi faite pour des raisons de pratique.

Exemple d'application

Soit le tableau de bord d'un VHU (cf. Figure 4.19) composé de neuf composants : $C = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9\}$. Les données s'écrivent comme suit :

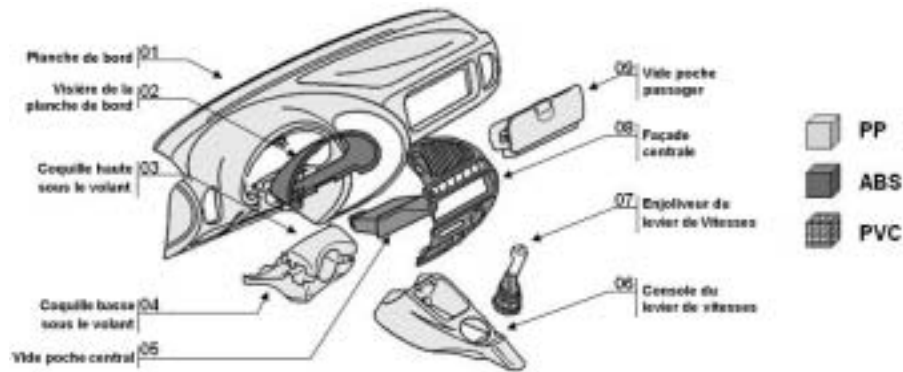


Figure 4.19 : Exemple d'un produit VHU pour la valorisation

Les masses :

$$(s_i)^9 = {}^T [6800 \quad 230 \quad 200 \quad 270 \quad 180 \quad 560 \quad 80 \quad 420 \quad 800] \text{ (en grammes)}$$

Les matières :

$$(a_i^{\text{Mat}})^9 = {}^T \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 100\% \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \text{PP} \\ \leftarrow \text{ABS} \\ \leftarrow \text{PVC} \end{matrix}$$

Pour des raisons de pratique, nous avons considéré l'absence de toute impureté dans la composition des fractions cibles.

Les destinations fin de vie :

$$\begin{aligned} (a_1^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \text{RU} \\ \leftarrow \text{VM} \\ \leftarrow \text{VE} \\ \leftarrow \text{MR} \end{matrix}, & (a_2^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_3^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_4^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_5^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \\ (a_6^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_7^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, & (a_8^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_9^{\text{DFV}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Les taux de valorisation :

Les taux de valorisation de l'ABS et du PP sont, respectivement, de 70% et 80%.

$$\begin{aligned} (a_1^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 80 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_2^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 100 \\ 70 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_3^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 100 \\ 80 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_4^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 100 \\ 80 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_5^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 100 \\ 70 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \\ (a_6^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 100 \\ 80 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_7^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_8^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 70 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_9^{\text{Valo}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 80 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (\%) \end{aligned}$$

Les indices de revenus :

$$\begin{aligned} (a_1^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_2^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_3^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_4^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_5^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \\ (a_6^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_7^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \\ -2 \end{bmatrix}, & (a_8^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, & (a_9^{\text{Ir}}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ (euros/gramme)} \end{aligned}$$

Les taux de valorisation sont indiqués en pourcentage. Ils sont issus des travaux de P. Tonnelier [59] et de F. Mathieux [46]. Les indices de revenus ne sont donnés qu'à titre indicatif. Ils ne reflètent pas les revenus réels dans les filières de recyclage dédiées. L'indice négatif signifie que le revenu n'est en fait qu'un coût qui sera amputé aux revenus du désassemblage. En général, les déchetteries calculent le prix de mise au rebut en fonction de la masse du déchet ultime.

A partir de ces descripteurs de valorisation, il est possible de décider de la destination fin de vie la plus rentable pour chacun des composants du produit. La méthode consiste en le calcul, pour chaque composant selon chaque destination fin de vie, du produit de la masse du composant, du taux de valorisation et de l'indice de revenu. Le résultat sous forme matricielle est le suivant :

$$\begin{array}{c}
 \leftarrow \text{les neuf composants} \rightarrow \\
 \left(a_1^{\text{DFV}} \right) = \begin{bmatrix}
 0 & \mathbf{46.10^3} & \mathbf{4.10^4} & \mathbf{54.10^3} & \mathbf{36.10^3} & 112.10^3 & \mathbf{24.10^3} & 0 & 0 \\
 \mathbf{544.10^3} & 161.10^2 & 16.10^3 & 216.10^2 & 126.10^2 & \mathbf{448.10^3} & 0 & \mathbf{294.10^2} & \mathbf{64.10^3} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \begin{array}{l}
 \leftarrow \text{RU} \\
 \leftarrow \text{VM} \\
 \leftarrow \text{VE} \\
 \leftarrow \text{MR}
 \end{array}
 \end{array}$$

Les revenus en gras sont les plus élevés. Ils correspondent aux destinations fin de vie qui devrait être retenues pour chacun des neuf composants.

Remarques

Cette matrice permet d'associer un revenu sur chacune de place du réseau de Pétri pour décider de la profondeur de désassemblage lors de l'optimisation de niveau 2 (voir Chapitre 5). Par conséquent, un revenu négatif correspondant à la mise en décharge d'un constituant ne veut pas dire que celui-ci ne sera pas désassemblé. En effet, ses fractions cibles peuvent rapporter plus.

Pour la détermination, la combinaison et le choix des taux de valorisation, P. Tonnelier [59] a effectué un travail de recherche sur la valorisation matière et énergétique relativement exhaustif.

4.3.2 Elaboration des gammes de désassemblage

Le principe est de partir du produit représenté par tous ses éléments de décomposition (relatifs aux opérations de décomposition dans Figure 4.3) et d'effectuer des bipartitions successives jusqu'à la finalisation de tous les caractères complémentaires, les solidarisation et que l'obtention des composants élémentaires de ce produit. Pour ce faire, nous avons adopté la méthode de génération des gammes d'assemblage dite « Méthode LAB » [28][51] traitée dans le chapitre 3. Notre choix a été motivé, d'une part, parce que cette méthode est désormais éprouvée. D'autre part, elle a donné lieu à un logiciel appelé LEGA⁴⁶ qui fournit toutes les gammes à travers une procédure basé sur les questions-réponses. L'ensemble de ces gammes admissibles sont disponibles via un réseau de Petri (voir §4.3.2.2).

4.3.2.1 Définition d'une stratégie de désassemblage

La génération de gammes de désassemblage d'un produit de plus d'une dizaine de composants peut très vite aboutir à une explosion combinatoire. De plus, la bipartition brute d'un constituant donne toujours un sous-ensemble de solutions peu rentables. L'introduction de contraintes stratégiques peut souvent réduire énormément l'espace de recherche et donc le nombre de gammes. Quand la stratégie est convenablement définie, les gammes obtenues sont plus pertinentes pour la phase d'optimisation du désassemblage (Stratégie niveau 2).

⁴⁶ Logiciel d'Elaboration des Gamme d'Assemblage – Logiciel développé au LAB.

Comment définir une stratégie de génération de gammes ?

Soit l'ensemble G_m des gammes de désassemblage d'un produit donné. Il s'agit de définir des contraintes où des « paquets » de contraintes stratégiques qui puissent ponctionner cet ensemble G_m de sorte que seules restent les gammes les plus pertinentes. Chaque paquet de contraintes peut définir un type de sous-stratégie que nous appellerons « *filtre* »⁴⁷. Par exemple, rendre insécable tout sous-assemblage formé par des composants et des solidarités métalliques. Cela se fera par le biais de contraintes de « sous-assemblage imposés », le filtre correspondant est S_2 dans la Figure 4.20. Un autre filtre S_3 peut être défini pour ne prendre en compte que les processus linéaires. Un troisième filtre S_1 peut être défini pour introduire des précédences entre opérations. De cette manière, l'ensemble des gammes admissibles⁴⁸ se verra réduit à celles considérées viables pour le niveau 2.

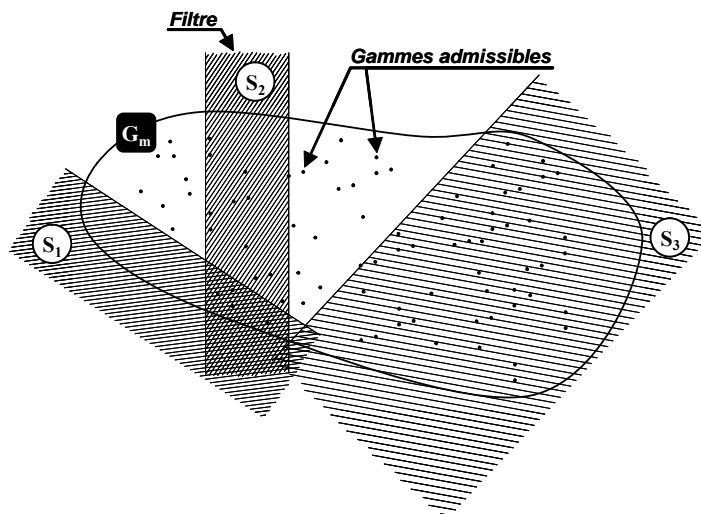


Figure 4.20 : Stratégie de génération de gammes par les filtres

4.3.2.2 Modélisation des gammes de désassemblage

LEGA expose les gammes admissibles obtenues soit sous forme d'arbres ou sous forme de réseaux de Petri. Pour la stratégie d'optimisation du désassemblage, le choix d'un outil de représentation et de modélisation des gammes de désassemblage s'est naturellement porté sur le réseau de Petri. Les avantages de ce dernier ne sont plus à présenter (visualisation des comportements dynamiques, une interface-utilisateur pratique, intégration des ressources-système, ...). La caractéristique des réseaux de Petri qui nous a paru la plus intéressante est la facilité de passage vers une formulation en programmation linéaire. Le concept a été alors d'user des réseaux de Petri pour modéliser le désassemblage et de la programmation linéaire pour l'optimisation du désassemblage. Le réseau de Petri de désassemblage (RPD) sur lequel est basée la plupart de nos travaux de recherche regroupe, à chaque fois, l'ensemble des gammes admissibles de désassemblage. Les places et les transitions correspondent, respectivement, aux constituants et aux tâches de désassemblage (cf. Figure 4.21).

⁴⁷ Finalement, la stratégie est définie par l'union de paquets de contraintes, c'est la superposition de filtres.

⁴⁸ Gammes admissibles : respectant les contraintes opératoires.

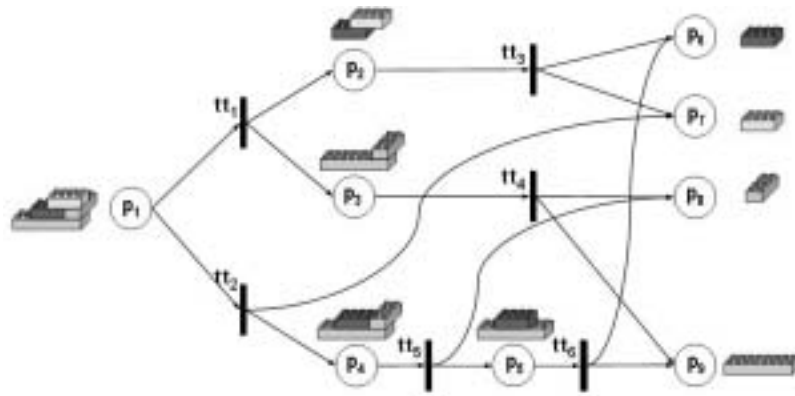


Figure 4.21 : Exemple d'un RPD regroupant deux gammes totales de désassemblage

Le RPD est défini par le quadruplet $Z(P, T, Pre, Post)$ où :

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n > 0$ est un ensemble fini de places correspondant aux constituants;
- $T = \{tt_1, tt_2, \dots, tt_m\}$, $m > 0$ est un ensemble fini de transitions correspondant aux tâches⁴⁹ de désassemblage, avec $P \cup T \neq \emptyset$ et $P \cap T = \emptyset$;
- $W^- : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$, est une fonction qui définit l'ensemble des arcs dirigés de P vers T associant les constituants aux tâches de désassemblage qui peuvent leur être appliquées;
- $W^+ : T \times P \rightarrow \mathbb{N}$, est une fonction qui définit l'ensemble des arcs dirigés de T vers P associant les tâches aux constituants qu'elles produisent.

L'optimisation du désassemblage par la sélection de la meilleure gamme (selon le critère prédéfini) revient finalement à sélectionner un sous-ensemble de transitions et de places correspondant à un sous-ensemble de constituants et de tâches. Ainsi, une des deux gammes représentées dans la Figure 4.21 pourrait s'identifier par l'ensemble des transitions $\{tt_2, tt_5, tt_6\}$ et l'ensemble des places $\{p_1, p_4, p_5, p_8, p_9\}$.

Les RPD mono-gammes (comme $\{tt_2, tt_5, tt_6\}$ de la Figure 4.21) présentent un certain nombre de caractéristiques comme le montre la Figure 4.22. En premier lieu, les constituants sont utilisés et produits par au plus une seule tâche. Cela signifie que les places doivent avoir au plus un arc en entrée et un arc en sortie. Il s'agit d'un type particulier de réseaux de Petri, un « *Graphe d'événements* ».

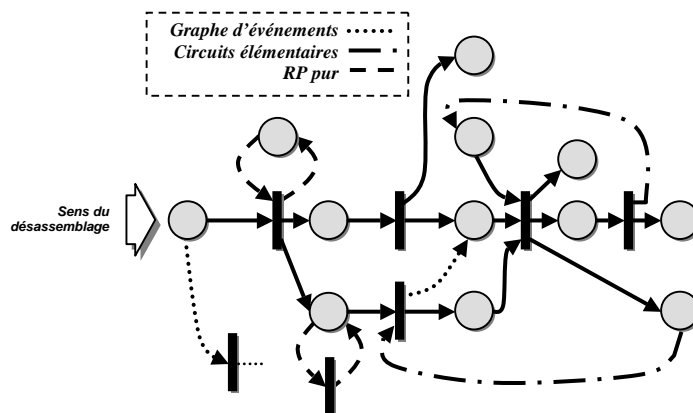


Figure 4.22 : Représentation des propriétés du RPD mono-gamme.

⁴⁹ Une opération de désassemblage est l'ensemble : {tâches de désassemblage, constituant d'entrée, 2 constituants de sortie}.

En deuxième lieu, chaque opération programmée ne correspond qu'à un unique constituant en entrée. L'opération produira, alors, des constituants tous différents de celui en entrée. Le réseau de Petri devra être « *sans circuits élémentaires* » (et donc *pur*). La raison est qu'il ne devrait pas y avoir de constituants qui soient ré-injectés dans une chaîne dont ils sont directement issus. Chaque opération étant distincte non seulement par ses constituants d'entrée mais aussi de sortie.

Remarque

Les réseaux de Petri de désassemblage mono-gammes seront notés RPD1 et ceux multi-gammes (regroupant l'ensemble des gammes admissibles) seront notés RPD2.

4.3.2.3 Gammes totales ou partielles

Durant toute la démarche organisée CYD-VHU, il est nécessaire que les RPD2 sujets à l'optimisation représentent des gammes de désassemblage totales afin de garantir l'obtention du meilleur processus de désassemblage. Celui-ci pourra représenter une gamme partielle ou totale (voir les sections suivantes). Ce sera une contrainte de génération de gammes qui sera respectée durant toutes les étapes suivantes.

4.3.3 Propagation des descripteurs de valorisation

A ce stade de notre démarche organisée, nous ne disposons que d'informations de valorisation sur les composants élémentaires (ou considérés comme tels). Pour pouvoir mettre en place la stratégie d'optimisation du désassemblage (niveau 2), il sera nécessaire de disposer d'informations de valorisation sur chacun des constituants entrant dans la construction du RPD2. A défaut, il sera indispensable d'interpoler les informations de valorisation de ces constituants à partir de celles individuelles des composants élémentaires. Nous appellerons cette procédure : « *propagation des descripteurs de valorisation* ».

4.3.3.1 Notations

Les places p_i du RPD2 « Z » (défini dans la section 4.3.2.2) sont indexées par i de 1 à n . Par convention, les z premières places p_1, p_2, \dots, p_z correspondront aux composants élémentaires u_1, u_2, \dots, u_z définis dans la section 4.3.1.1 . Les $(z'-z)$ suivants correspondront au reste des caractères complémentaires et de solidarisation précédemment définis⁵⁰.

4.3.3.2 Descripteur de destination fin de vie

La destination fin de vie d'un constituant dépend des matières dont sont constitués les composants élémentaires, les solidarisations (ex. agrafes) et les caractères complémentaires (ex. peintures). Elle dépend aussi des destinations fin de vie de chacun de ces composants et du marché de la pièce détachée de manière plus globale.

Vu l'aspect multicritère de ce problème, nous ne proposons pas une formalisation mathématique qui ne pourrait garantir la pertinence de la destination fin de vie trouvée mais laissons la liberté à l'expert de choisir celles qui conviennent.

⁵⁰ $1 \rightarrow z$: composants élémentaires ; $z \rightarrow z'$: solidarisations et caractères complémentaires ; $z' \rightarrow n$: constituants non élémentaires ;

Le descripteur de valorisation est, de ce fait, défini comme suit :

$$\begin{aligned} d_{DFV} : P &\rightarrow A_{DFV} \\ p_i &\mapsto a_i^{DFV} \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.3.3.3 Descripteur de masse

La masse s_i de chaque constituant est évidemment la somme des masses des deux constituants qui lui sont directement successeurs dans le RPD2 considéré. La formule (4.2) permet de systématiser le calcul des masses des constituants.

$$\forall i \in \{z'+1, \dots, n\}, \quad s_i = \sum_{i'=1}^{n/i \neq i} (\beta_{ii'} \cdot s_{i'}) \quad (4.2)$$

A chaque fois, s_i est calculé par la somme des masses de tous les constituants munies d'un coefficient $\beta_{ii'}$. Celui-ci prend respectivement les valeurs 1 ou 0 quand le constituant i' est directement ou non en aval de l'opération de désassemblage⁵¹ i . La constante d'antériorité-place $\beta_{ii'}$ est calculée grâce à la formule (4.3).

$$(\beta_{ii'})^{n \times n} = W^- \times {}^t W^+ \quad (4.3)$$

W^+ et W^- sont, respectivement, les matrices d'incidence arrière (Post) et avant (Pre) du RPD2.

Le descripteur de masse est défini comme suit :

$$\begin{aligned} d_{Masse} : P &\rightarrow A_{Masse} \\ p_i &\mapsto s_i \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.3.3.4 Descripteur de taux de valorisation

L'attribution des taux de valorisation à chaque constituant se fait par la somme des taux de valorisation pondérés des deux constituants qui lui sont directement successeurs.

$$\forall i \in \{z'+1, \dots, n\}, \quad a_i^{Valo} = \frac{\sum_{i'=1}^{n/i \neq i} (\beta_{ii'} \cdot s_{i'} \cdot a_{i'}^{Valo})}{s_i} \quad (4.5)$$

Le descripteur de taux de valorisation est défini comme suit :

$$\begin{aligned} d_{Valo} : P &\rightarrow A_{Valo} \\ p_i &\mapsto a_i^{Valo} \end{aligned} \quad (4.6)$$

⁵¹ $\beta_{ii'} = 1$ si la place d'indice i précède la place d'indice i' dans le RPD2 et $\beta_{ii'} = 0$ sinon.

Par exemple, considérons deux constituants dont les taux de valorisation respectifs sont de 30% et 75%. Si leurs masses respectives sont de 6 kg et 4 kg, alors le taux de valorisation global est de :

$$\frac{30\% \times 6 + 75\% \times 4}{10} = 48\%$$

Remarque

Contrairement aux taux de valorisation matière et énergétique, celui calculé pour la réutilisation ne permet que d'avoir une appréciation sur la « réutilisabilité » du constituant considéré. S'il est effectivement réutilisable, son taux de valorisation est de 100%.

4.3.3.5 Descripteur d'indicateur de revenu

L'indicateur de revenu a_i^{Ir} d'un constituant est aussi calculé par la somme des masses des deux constituants qui lui sont directement successeurs multipliées par les indicateurs de revenu respectifs (formule (3.2)).

$$\forall i \in \{z'+1, \dots, n\}, a_i^{Ir} = \frac{\sum_{i'=1}^{n/i \neq i'} (\beta_{ii'} s_{i'} a_{i'}^{Ir})}{s_i} \quad (4.7)$$

Le descripteur de l'indicateur de revenu est défini comme suit :

$$\begin{aligned} d_{Ir} : P &\rightarrow A_{Ir} \\ p_i &\mapsto a_i^{Ir} \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.3.3.6 Descripteur de matière

La constante $\beta_{ii'}$ sera encore une fois utilisée pour le calcul de l'attribut a_i^{Mat} du descripteur de matière d'un constituant d'indice i . Elle permettra d'additionner uniquement les attributs des constituants qui lui sont directement successeurs. L'attribut ainsi calculé sera un vecteur de dimension nf (nombre de familles de matières) dont les éléments informent sur les proportions de matières que le constituant comporte.

$$\forall i \in \{z'+1, \dots, n\}, a_i^{Mat} = \sum_{i'=1}^{n/i \neq i'} \beta_{ii'} a_{i'}^{Mat} \quad (4.9)$$

Le descripteur de matières est défini comme suit :

$$\begin{aligned} d_{Mat} : P &\rightarrow A_{Mat} \\ p_i &\mapsto a_i^{Mat} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Remarque

L'attribut obtenu peut indiquer l'existence de plusieurs familles de matières qui sont, par définition, incompatibles en vue de la valorisation matière et énergétique. Dans ce cas, celui-ci ne pourra avoir pour destination fin de vie que la réutilisation ou la mise au rebut.

Récapitulatif

Désormais, chacun des constituants retenus à travers les gammes admissibles sélectionnées sera pourvu de l'ensemble $D = \{d_{DFV}, d_{Masse}, d_{Valo}, d_{Ir}, d_{MAI}\}$ des cinq descripteurs de valorisation. Le RPD2 augmenté des ces descripteurs de valorisation devient le doublet : $Z_0 = (Z, D)$.

4.3.4 Modélisation des Processus de Désassemblage

Comme le rappelle la définition 2.4, le processus de désassemblage est une représentation de la gamme de désassemblage augmentée des données d'ordonnancement et d'affectations des ressources à toutes les opérations de désassemblage considérées dans la gamme.

4.3.4.1 Intégration des temps opératoires

Les temps opératoires sont les temps de franchissement attribués à chaque transition du RPD2. Ils sont directement prélevés d'une base de données technique préalablement élaborée. Le RPD obtenu est un réseau de Petri temporisé qui est défini par le triplet $Z_1 = (Z, D, \Delta')$ où Δ' est la fonction « durée de franchissement » $\Delta' : T \rightarrow \mathbf{N}$ qui, à chaque transition, fait correspondre un entier naturel décrivant la durée d'exécution de l'opération considérée.

La forte hypothèse prise pour une telle configuration est que ces temps opératoires sont indépendants des opérateurs qui les exécutent, de ressources utilisées et des conditions générales de réalisation. Or, nous pensons qu'il n'est pas réaliste d'occulter ces données systèmes et contextuelles dans notre démarche organisée de CYD-VHU. Cette fonction sera remplacée dès les paragraphes suivants.

4.3.4.2 Intégration des données système

Conformément aux hypothèses prises dans la section 4.2.2 et compte tenu de l'organisation de la cellule de désassemblage développée dans la section 5.2.3, nous avons défini sept nouveaux éléments à notre doublet Z_1 et redéfini la fonction des durées de franchissement.

Le résultat est le suivant :

$$Z_2 = (Z, D, \Delta, S, O, T_{HTO}, A_O, A_T, D_{DS}, D_{TS})$$

où :

- Δ est la fonction « *durée de franchissement* » notée $\Delta : T \times O \rightarrow \mathbf{N}$ qui, à chaque transition, fait correspondre un entier naturel représentant le temps opératoire correspondant à la tâche considérée en fonction de l'opérateur qui l'exécute ;
- S est l'ensemble des *stations de désassemblage* prévues dans la cellule ;
- O est l'ensemble des *opérateurs humains* présents dans chaque cellule de désassemblage ;

- T_{HTO} est l'horizon de travail en amont duquel l'optimisation du désassemblage s'effectue conformément à la définition de la section 5.2.3.2 ;
- A_O est la fonction « *affectabilité des opérateurs* » $A_O : S \times O \rightarrow \{0,1\}$ qui, à chaque couple : (station g de l'ensemble S / opérateur k de l'ensemble O), fait correspondre une valeur binaire A'_{gk} quand l'opérateur considéré peut être affecté à la station indiquée ;
- A_T est la fonction « *affectabilité des opérations* » $A_T : T \times S \rightarrow \{0,1\}$ qui, à chaque couple : (transition j de l'ensemble T / station g de l'ensemble S), fait correspondre une valeur binaire A_{jg} indiquant la possibilité d'exécuter la tâches de désassemblage considérées dans la station indiquée compte tenu – entre autres – des ressources matérielles et humaines affectées à cette station ;
- D_{DS} est la fonction « *durée de déplacement inter-stations* » $D_{DS} : S \times S \rightarrow \mathbf{N}$ qui, à chaque couple : (station g / station h) de l'ensemble S , fait correspondre un entier naturel d'_{gh} représentant le temps moyen de déplacement d'un opérateur de la première station vers la deuxième ;
- D_{TS} est la fonction « *durée de transfert inter-stations* » $D_{TS} : S \times S \rightarrow \mathbf{N}$ qui, à chaque couple : (station g / station h) de l'ensemble S , fait correspondre un entier naturel d_{gh} représentant le temps moyen de transfert d'un constituant de la première station vers la deuxième.

4.3.4.3 Intégration des données contextuelles

Les hypothèses posées dans la section 4.2.3 préconisent la définition de sous-ensembles de constituants, d'opérateurs et de stations pour prendre en compte un certain nombre de situations plus ou moins conjoncturelles durant l'optimisation du désassemblage. Le Tableau 4.2 résume cela. Le détail de ces sous-ensembles est donné dans la section 5.2.4 .

	Produits/substances dangereuses	La demande en pièces sur le marché	Politique de sous-traitance	Politique de Maintenance	Gestion du personnel
CPS : Constituants non finaux	X				
SAI : Sous-assemblages imposés	X	X	X		
SAE : Sous-assemblages évacuables sans désassemblage		X	X		
CSS : Stations mises hors service				X	
CDO : Opérateurs non disponibles					X

Tableau 4.2 : Sous-ensembles des données du contexte

Nous avons rajouté les cinq sous-ensembles (que nous nommerons dorénavant « ensembles ») dans le 10-uplet Z_2 précédent. Le résultat est le suivant :

$$Z_2 = (Z, D, \Delta, S, O, T_{HTO}, A_O, A_T, D_{DS}, D_{TS}, CPS, SAI, SAE, CSS, CDO)$$

où :

- **CPS** est l'ensemble des constituants qui ne peuvent être gardés tels quels ;
- **SAI** est l'ensemble des sous-assemblages imposés ;
- **SAE** est l'ensemble des sous-assemblages évacuables ;
- **CSS** est l'ensemble des stations mises hors service pour panne ou pour des raisons de simulation ;

- **CSP** est l'ensemble des couples (j,g) pour lesquels l'opération j ne peut être exécutée dans la station g temporairement ;
- **CDO** est l'ensemble des opérateurs mis en indisponibilité.

Désormais, toutes les données concernant le produit, la cellule de désassemblage et les conditions de réalisation de la gamme optimisée sont réunies. Il reste à élaborer une stratégie globale d'optimisation du système de désassemblage ... dite de niveau 2.

4.4 Conclusion

Sans faillir à l'esprit de la méthodologie d'assemblage développée par J.-M. Henrioud et al., nous avons apporté les adaptations de concepts et de formulations pour traiter une problématique difficile qu'est la conception de systèmes de désassemblage des produits manufacturés pour la valorisation. En effet, nous avons vu dans ce chapitre comment interpréter les particularités structurelles et fonctionnelles d'un produit en fin de vie pour développer un modèle du produit, du système physique et du contexte avec le plus de réalisme possible. Bien que peu formelle, la première partie de ce chapitre est conséquent quant à la phase de modélisation. Elle est basée sur une succession de constats et d'hypothèses pour finalement indiquer plus ou moins implicitement la méthode la meilleure pour la construction du modèle de désassemblage. Celle-ci a été traitée dans la seconde section qui n'a pas été la plus aisée à développer. En particulier, en raison des considérations de valorisation et de leur propagation sur tous les constituants possible d'un produit. Cette notion de propagation représente une des extensions au modèle du produit développé par J.-M. Henrioud et repris pour le désassemblage par F. Touzanne. Une autre extension concerne la définition multidimensionnelle des descripteurs de valorisation intégrés par ce même auteur. Le formalisme proposé demande une connaissance accrue du domaine de la valorisation et des filières de recyclage en particulier sur la compatibilité des matières pour le recyclage (chapitre 1). Le résultat obtenu est une représentation exhaustive des processus de désassemblage admissibles en vue d'une optimisation par programmation linéaire. Comme nous le verrons au chapitre suivant, le passage d'une modélisation des processus de désassemblage à une modélisation pour la programmation linéaire a été facilité par l'adoption, notamment, des réseaux de Petri en tant qu'outil de représentation des processus. Nous verrons justement qu'il sera question d'optimisation sous contraintes orientée programmation linéaire.

Chapitre 5 :

OPTIMISATION DU DESASSEMBLAGE SOUS PROGRAMMATION LINEAIRE ET EXTENSION DE LA DEMARCHE CYD-VHU

5.1 Introduction

Après avoir développé l'analyse et les choix de conception ainsi que la modélisation du système de désassemblage dans le chapitre précédent, nous allons montrer comment intégrer les processus de désassemblage dans un modèle de programmation linéaire (PL) pour l'optimisation du désassemblage. Nous verrons qu'après des résultats concluants d'utilisation de la PL dans la conception de systèmes d'assemblage [36][47] et de systèmes de transfert [14], il sera de même pour le désassemblage.

La première partie de ce chapitre concernera le modèle de PL proprement dit. Dans un premier temps, une fonction objectif basée sur les coûts et revenus de désassemblage sera proposée. Dans un deuxième temps, la transcription des données du système de désassemblage et de ses processus sera développée pour générer automatiquement les contraintes de désassemblage dans le modèle de PL. Il sera question de 13 types de contraintes exprimées par une combinaison linéaire des variables de décision du programme. A la fin de cette partie, deux nouvelles propositions de fonctions objectif seront traitées.

La deuxième partie du chapitre est consacrée à la partie pilotage du système de désassemblage en mode incertain. Les particularités du désassemblage en la matière seront explicitées. Par la suite, un ensemble de règles seront proposées pour le pilotage préventif ou correctif.

La dernière partie est une extension de la démarche CYD-VHU pour le désassemblage multi-produits. Les contraintes seront revues et deux politiques d'optimisation seront présentées. Chacune d'elles exigera une fonction objectif différente et des contraintes supplémentaires.

5.2 Stratégie d'optimisation – Niveau 2 (étape 6 et 7)

Rappelons-le, le but de notre démarche organisée est de trouver la meilleure configuration envisageable pour le système de désassemblage (à concevoir ou à améliorer) et ce en intégrant le plus d'informations possibles sur le produit, la cellule et le contexte. Choisir la meilleure configuration revient à sélectionner la gamme optimale de désassemblage avec les dates, les ressources et les affectations nécessaires. La Figure 5.2 montre la gamme optimale issue de l'ensemble des gammes admissibles lors du traitement du tableau de bord d'un VHU de la Figure 4.19. La phase d'intégration de niveau 2 (*cf.* Figure 5.1) consiste, dans un premier temps, en la formulation des conditions de fonctionnement du système de désassemblage que l'on veut concevoir (ensemble des processus, cellule et contexte de désassemblage).

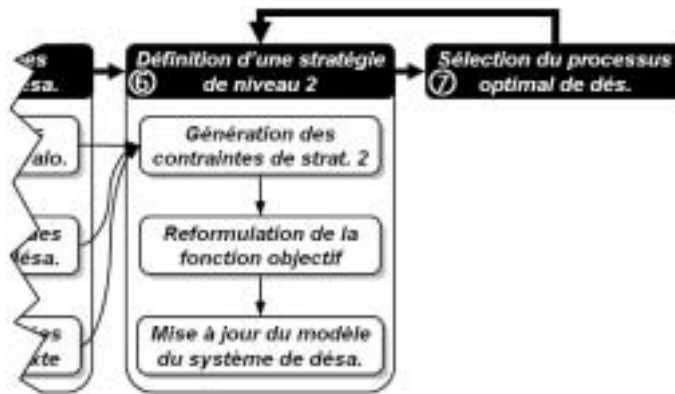


Figure 5.1 : Phase de définition et d'intégration de la stratégie d'optimisation en vue de la conception du système de désassemblage

Dans ce but, nous avons défini un ensemble de 13 contraintes orientées programmation linéaire que l'on regroupe en 3 catégories (cf. Figure 5.11). Elles permettront d'orienter la recherche du meilleur processus de désassemblage compte tenu des besoins et des attentes en performances du système de désassemblage à concevoir. Dans un deuxième temps, le modèle des processus de désassemblage muni des données système et contexte seront l'objet de mises à jour par l'expert en vue de réduire l'espace de recherche. Pour finir, le modèle des processus ainsi que les contraintes produites automatiquement ou par expertise subiront une phase de conversion selon l'environnement de simulation adopté.

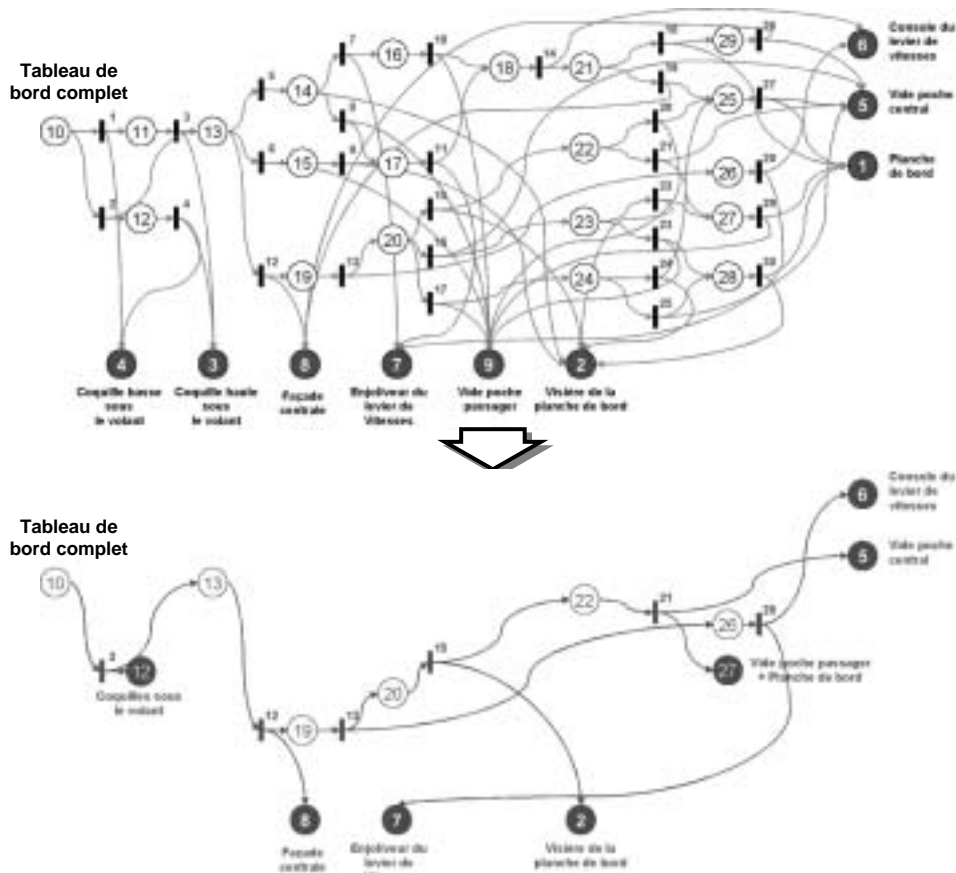


Figure 5.2 : Sélection de la gamme optimale depuis le RPD2 d'un tableau de bord d'un VHU

Après l'analyse des méthodes habituelles de travail dans les centres de démolissage de VHU et la transposition de certains concepts d'ordonnancement et de la conception de systèmes d'assemblage, nous avons choisi de définir cette stratégie à travers des contraintes dans un environnement d'optimisation orientée programmation linéaire. Cependant, il subsiste un élément très important qui est l'objectif de l'optimisation. Nous avons développé notre démarche organisée de sorte qu'elle puisse servir à la fois pour concevoir un système de désassemblage par la modélisation et la simulation, mais aussi pour optimiser un système existant. Celui-ci pourrait être analysé dans un environnement de simulation où l'on peut agir sur le nombre d'opérateurs, la distribution des tâches sur les différentes ressources de la cellule, l'agencement de celle-ci, etc.

5.2.1 Optimisation et Fonction Objectif

Partant du RPD2 obtenu, nous définissons m variables de décision t_j (variables binaires) ; chacune correspondant à une transition tt_j ⁵². A chaque transition tt_j , on associe le coût c_j de l'opération correspondante. A chaque place p_i , on associe le revenu r_i que le constituant correspondant rapporte pour la destination fin de vie la plus favorable. Ce revenu sera négatif lorsqu'il est destiné à la mise en décharge. Tous ces éléments serviront à la constitution d'une fonction de coût F_{obj} . Celle-ci est à optimiser par la recherche de la bonne combinaison des variables de décision t_j qui représente par ailleurs la meilleure gamme de désassemblage. Les transitions ainsi sélectionnées constitueront le RPD1 recherché. La formule de calcul de cette fonction de coût est donnée dans l'équation (5.1).

$$F_{obj} = \max \left[\sum_{j=1}^m t_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n (w_{ij} \cdot r_i) - c_j \right) + r_1 \right] \quad (5.1)$$

Le coefficient w_{ij} représente l'élément de la matrice d'incidence du RPD2. Il permet d'obtenir, pour chaque transition, la somme des revenus des constituants obtenus (des places de sortie) à laquelle est soustrait le revenu du constituant sujet à la bipartition (de la place en entrée). Le revenu r_1 est le revenu attendu du produit considéré sans désassemblage. Ainsi, la fonction objectif donne précisément le revenu global du processus de désassemblage choisi. Si celui-ci est négatif, cela signifie que le produit en fin de vie considéré n'est pas revendable mais engendre plutôt des coûts pour sa mise au rebut. En d'autres termes, r_1 est négatif⁵³.

L'expression de la fonction objectif suppose que les coûts opératoires sont connus et qu'une destination fin de vie est attribuée à chaque constituant (0). En d'autres termes, un seul revenu est joint à chaque composant. Il est calculé par le biais de la formule ci-dessous :

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, r_i = a_{i/\max}^{lr} \cdot s_i \quad (5.2)$$

Où $a_{i/\max}^{lr}$ est l'indicateur de revenu correspondant à la destination fin de vie la plus favorable.

Exemple d'application :

L'exemple ci-dessous donne un aperçu de ce que peut être la sélection d'une gamme selon les revenus des constituants obtenus et les coûts des opérations de désassemblage effectuées⁵⁴. La gamme en question est identifiée par le sous-ensemble des variables de décision t_j égales à 1. Il s'agit de $\{t_1, t_3\}$. Le revenu obtenu est de 5.

⁵² Pour des raisons pratiques, il sera parfois indiqué j pour désigner la transition tt_j .

⁵³ Cela veut dire que le produit va en décharge.

⁵⁴ Les valeurs proposées dans cet exemple ne sont pas réels.

La méthode classique pour calculer ce résultat est d'additionner les revenus des constituants obtenus à la fin du désassemblage et de retrancher les coûts des opérations effectivement réalisées. Dans cet exemple, les revenus sont r_3 , r_6 et r_7 . Le total est de 8. La somme des coûts de désassemblage est de c_1 plus c_3 . Elle est de 3. Le bénéfice net est de 5.

Le calcul par la formule (5.2) se fait d'abord par l'addition des deux totaux suivants (au nombre des opérations exécutées) :

1. le total des revenus de l'opération n°1 qui est la somme des revenus des constituants obtenus p_2 et p_3 , à laquelle on retranche le revenu du constituant de départ p_1 et le coût de l'opération tt_1 en question. Le résultat est : $3+3-2-3=1$.
2. le total des revenus de l'opération n°2 qui est la somme des revenus des constituants obtenus p_6 et p_7 , à laquelle on retranche le revenu du constituant de départ p_2 et le coût de l'opération tt_3 en question. Le résultat est : $3+2-1-3=1$.

Ensuite, le revenu du produit considéré r_1 est ajouté à cette somme des totaux. Le résultat est identique ! L'avantage de cette deuxième méthode est de calculer ce résultat par la combinaison linéaire des variables de décision t_j .

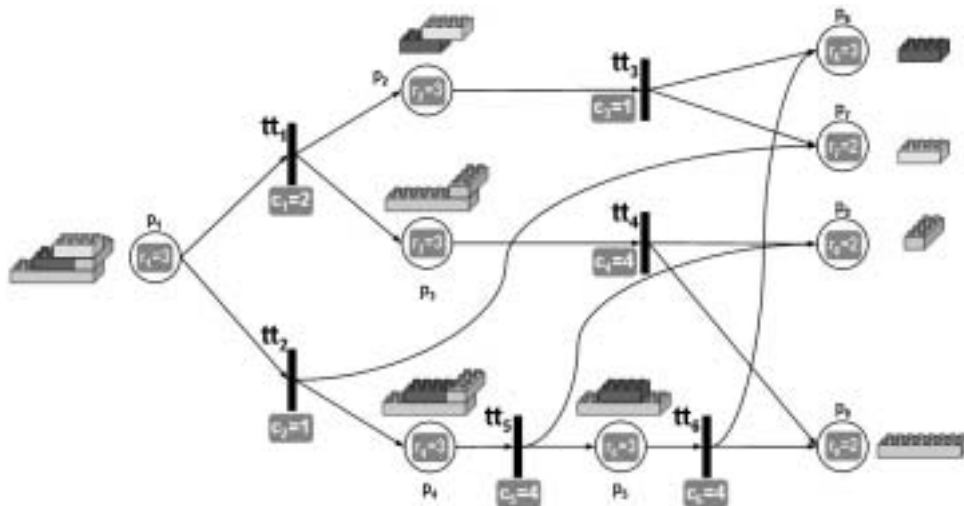


Figure 5.3 : Exemple d'un RPD2 pour le calcul des revenus totaux des RPD1

5.2.2 Contraintes Produit

Les contraintes produit viennent conditionner les variables de décision t_j afin de respecter la faisabilité opératoire des opérations de désassemblage sélectionnées. Notre classification des contraintes donne deux types : la contrainte d'antériorité et la contrainte d'exclusion.

5.2.2.1 Contrainte d'antériorité (CAN)

Le contrainte d'antériorité (CAN) exprime le fait que si la variable t_i associée à une transition tt_j est à 1, alors toutes les variables t_j des transitions qui la précèdent sur tout chemin allant de la racine du RPD2 à tt_j doivent aussi être à 1. Par exemple, on ne peut pas avoir la combinaison des valeurs suivante : $t_1=0$, $t_3=1$ pour le produit de la Figure 5.3.

$$\text{Soit : } (\alpha_{jj'})^{m \times m} = {}^t W^+ * W^- \quad (5.3)$$

où $\alpha_{jj'}$ est la constante binaire qui indique l'antériorité⁵⁵ de chaque couple $(t_j, t_{j'})$ du RPD2 par un 1 ou un 0. Nous la baptisons « *constante d'antériorité-transition* ». W^+ et W^- sont, respectivement, les matrices d'incidence arrière et avant⁵⁶ du RPD2.

On sait que : $(\alpha_{jj'}=1) \Leftrightarrow (t_j \text{ précède directement } t_{j'})$

Si $(t_j=1) \Rightarrow$ toutes les transitions qui précèdent t_j ont leur indicateur à 1. Alors :

$$\forall j' \in \{1, \dots, m\}, t_{j'} - \sum_{j \neq j'} (\alpha_{jj'} t_j) \leq 0 \quad (5.4)$$

Par ailleurs, comme les transitions de la place initiale n'ont pas de transition qui les précèdent, il faut les exclure de l'inéquation précédente. Pour ce faire, on remarque que pour toute transition $t_{j'}$ qui a des transitions qui la précèdent, on a forcément :

$$\sum_{j \neq j'} \alpha_{jj'} > 0 \quad (5.5)$$

En posant $Ant(j') = \sum_{j \neq j'} \alpha_{jj'}$, on obtient finalement :

$$\forall j' \in \{1, \dots, m\} / Ant(j') > 0, t_{j'} - \sum_{j \neq j'} (\alpha_{jj'} t_j) \leq 0 \quad (5.6)$$

Exemple d'application :

L'exemple de la Figure 5.3 contient quatre cas d'antériorité inter-transitions $t_1 \rightarrow t_3$; $t_1 \rightarrow t_4$; $t_2 \rightarrow t_5$ et $t_5 \rightarrow t_6$. Les seules constantes d'antériorité non nulles sont α_{13} , α_{14} , α_{25} et α_{56} . Ce qui donne le système d'inéquations suivant :

$$\begin{cases} t_3 - t_1 \leq 0 \\ t_4 - t_1 \leq 0 \\ t_5 - t_2 \leq 0 \\ t_6 - t_5 \leq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

5.2.2.2 Contrainte d'exclusion (CEX)

La contrainte d'exclusion (CEX) exprime l'impossibilité pour deux transitions t_j et $t_{j'}$ en aval d'une même place d'avoir simultanément leurs indicateurs t_j et $t_{j'}$ à 1 puisqu'elles représentent des opérations alternatives et donc exclusives. Cette contrainte est introduite facilement par l'ensemble d'inéquations ci-après :

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} > 1 : \sum_{j=1}^m (w_{ij}^- t_j) \leq 1 \quad (5.8)$$

⁵⁵ $\alpha_{jj'} = 1$ si la transition j précède la transition j' dans le RPD et $\alpha_{jj'} = 0$ sinon.

⁵⁶ W^+ et W^- correspondent respectivement aux applications nommées communément POST et PRE.

Exemple d'application :

L'exemple de la Figure 5.3 prend en compte deux possibilités de désassemblage total (deux gammes totales) du produit représenté par la place p_1 . Les transitions exclusives l'une de l'autre sont tt_1 et tt_2 . Il faut donc ajouter l'inéquation suivante :

$$t_1 + t_2 \leq 1 \quad (5.9)$$

5.2.3 Contraintes Système

Cette section décrit la formulation mathématique des caractéristiques et considérations systémiques citées précédemment. L'ensemble des contraintes système n'est pas exhaustif mais représente, néanmoins, une première ébauche d'un formalisme de base des contraintes issues du métier. Le choix des contraintes système formulées dans ce chapitre s'est fait avec un objectif, à la fois, de réalisme et de simplicité.

5.2.3.1 Contraintes d'affectation opératoire (CAF)

Comme évoqué précédemment, plusieurs stations de travail dans l'atelier peuvent réaliser les mêmes opérations (Hyp. 4.11). Seule une station de travail sera sélectionnée ... l'affectation est unique. La « contrainte d'affectation », notée CAF, est utilisée dans cet objectif.

Afin de définir l'affectation effective et unique d'une opération j à une station g , nous utilisons une variable de décision binaire notée : a_{jg} . Conformément à l'hypothèse sur le nombre de stations (Hyp. 4.13), nous notons S l'ensemble des stations et ns le nombre de ces stations (ns est le cardinal de S). Par ailleurs, nous définissons la « **matrice d'affectabilité station-opération** » $(A_{jg})^{m \times ns}$ comme suit :

- $A_{jg}=1 \Leftrightarrow$ l'opération j est réalisable par la station g
- $A_{jg}=0 \Leftrightarrow$ l'opération j ne peut pas être réalisée par la station g

Ainsi, les éléments A_{jg} de cette matrice nous serviront pour la formulation mathématique de la contrainte d'affectation. L'inéquation de la formule (5.10) permet de ne rendre l'affectation (transition,station) effective ($a_{jg}=1$) qu'en cas d'affectabilité ($A_{jg}=1$).

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}, \forall g \in \{1, \dots, ns\}, a_{jg} \leq A_{jg} \quad (5.10)$$

Pour identifier les opérateurs k susceptibles d'exécuter l'opération j considérée, une autre variable de décision binaire a'_{jk} est définie. Celle-ci est liée à la « **matrice d'affectabilité station-opérateur** » $(A'_{gk})^{ns \times no}$.

Les éléments de cette matrice sont définis tels que :

- $A'_{gk} = 1 \Leftrightarrow$ l'opérateur k peut être affecté à la station g
- $A'_{gk} = 0 \Leftrightarrow$ l'opérateur k ne peut pas être affecté à la station g

L'inéquation à ajouter pour que la variable de décision a'_{jk} respecte les contraintes d'affectabilité station–opérateur est la suivante :

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}, \forall g \in \{1, \dots, ns\}, \forall k \in \{1, \dots, no\}, a'_{jk} \leq (1 - a_{jg}) + A'_{gk} \quad (5.11)$$

La somme des termes $(1 - a_{jg})$ et A'_{gk} autorise l'affectation de l'opération j à l'opérateur k à l'exception du cas où l'opération j est affectée à une station g à laquelle l'opérateur k ne peut être affecté. Les termes obtenus donne ainsi la **matrice d'affectation⁵⁷ opérateur–opération** $(a'_{jk})^{m \times no}$.

Les opérations susceptibles de se voir affecter un opérateur sont évidemment celles dont la variable de décision t_j est à 1. Cette relation entre les deux variables de décision a_{jg} et t_j est formulée par l'équation de la formule (5.12).

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}, \sum_{g=1}^{ns} a_{jg} = t_j \quad (5.12)$$

En effet, si $t_j = 0$ alors tous les a_{jg} doivent être nuls, l'opération correspondante n'est pas affectée. Si $t_j = 1$ alors il y a un et un seul $a_{jg} = 1$, les autres étant tous nuls car l'opération ne peut être affectée qu'à une seule station.

De la même façon, seules les transitions effectivement franchissables sont susceptibles de se voir affecter un opérateur. La formulation mathématique est donnée par l'équation de la formule (5.13).

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}, \sum_{k=1}^{no} a'_{jk} = t_j \quad (5.13)$$

En résumé, la formulation de la CAF n'est possible que par un système de quatre équations rappelées dans le système d'équations (5.14).

$$\forall j \in \{1, \dots, m\} : \begin{cases} \sum_{g=1}^{ns} a_{jg} = t_j \\ \sum_{k=1}^{no} a'_{jk} = t_j \\ \forall g \in \{1, \dots, ns\}, a_{jg} \leq A_{jg} \\ \forall g \in \{1, \dots, ns\}, \forall k \in \{1, \dots, no\}, a'_{jk} \leq (1 - a_{jg}) + A'_{gk} \end{cases} \quad (5.14)$$

⁵⁷ Il s'agit, cette fois-ci, d'affectation effective et non d'affectabilité.

Exemple d'application :

Soit l'exemple de RPD2 de la Figure 4.21 pour lequel nous voulons trouver la gamme optimale de désassemblage sur un système déjà existant. La configuration de celui-ci est donnée à la Figure 5.4. Il s'agit d'une cellule constituée de 4 stations de désassemblage manuel reliées entre elles par un système de transfert. Celui-ci est considéré comme toujours opérationnel et autonome conformément à l'Hyp. 4.12. La même hypothèse est prise pour le système d'évacuation des constituants terminaux. Comme l'indiquent les sous-ensembles de transitions marqués sur chaque bord gauche des stations, celles-ci ne peuvent prendre en charge qu'un certain nombre d'opérations de désassemblage. Les raisons sont diverses : disponibilité ou non des ressources matérielles adéquates, fragilité de certains constituants interdisant certains transferts, espace vital minimum (dit aussi espace de sécurité) au sein des stations, etc.

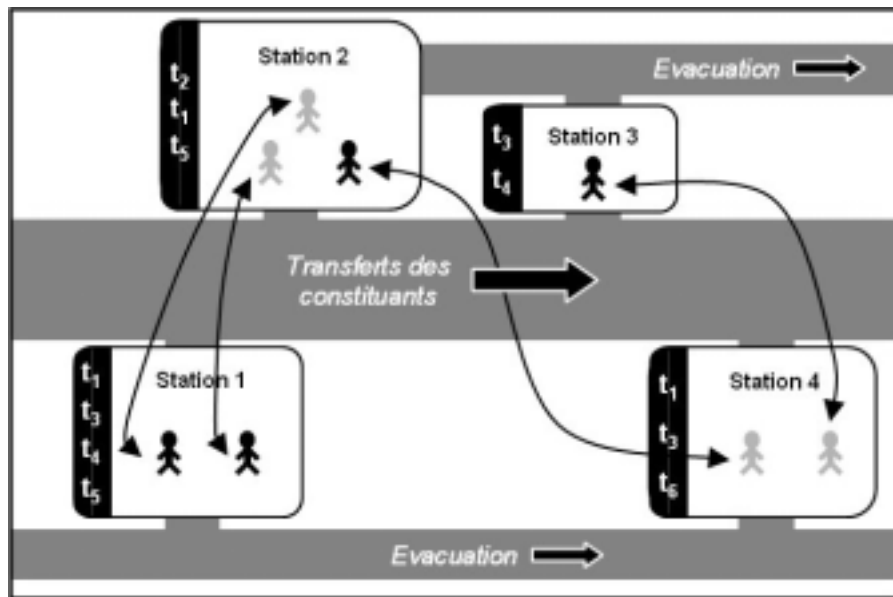


Figure 5.4 : Exemple de cellule de désassemblage

Cette contrainte d'affectation est mise en place grâce à la matrice d'affectabilité station-opération $(A_{jg})^{m \times np}$ précédemment désignée. Ses éléments A_{jg} sont les suivants :

$$(A_{jg})^{m \times np} = \begin{matrix} & s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 \end{matrix}$$

Chacune des quatre colonnes donne la liste des opérations pouvant être exécutées dans la station correspondante. Chacune des lignes donne la liste des stations dans lesquelles l'opération considérée peut être traitée (chaque opération peut être traitée dans au moins une station).

Pour ce qui est des affectations d'opérateurs aux stations, elles sont données par la matrice d'affectabilité station–opérateur $(A'_{gk})^{ns \times no}$. La Figure 5.4 montre qu'aux stations 1,2,3 et 4 seulement 2,3,1 et 2 opérateurs sont respectivement acceptés. Dépasser ces quotas remettrait en cause, par exemple, les normes de sécurité dans la cellule de désassemblage. Par conséquent, chaque colonne de la matrice d'affectabilité station–opérateur devrait comporter au plus les nombres indiqués ci-dessus. La matrice serait la suivante :

$$(A'_{gk})^{ns \times no} = \begin{array}{cccc|c} & s_1 & s_2 & s_3 & s_4 & \\ \hline & 1 & 1 & 0 & 0 & o_1 \\ & 0 & 0 & 1 & 1 & o_2 \\ & 1 & 1 & 0 & 0 & o_3 \\ & 0 & 1 & 0 & 1 & o_4 \end{array}$$

En réalité, cette limitation sur les colonnes de la matrice peut être levée sans que le nombre maximum toléré d'opérateurs dans chaque station soit dépassé. En effet, 3 opérateurs peuvent être affectés à la station 1 sans qu'ils y soient en même temps. Si l'un des deux premiers est affecté à une autre station avant que le troisième ne vienne d'une autre station pour opérer dans celle-ci, la condition du nombre maximum toléré est respectée. Toutefois, prendre en compte les affectations effectives rendrait le problème d'optimisation tellement plus complexe que nous nous sommes limités à une restriction statique (via A'_{gk}) plutôt que dynamique (via a'_{jk}). Les flèches de la Figure 5.4 montrent la mobilité des quatre opérateurs (en noir) entre les stations auxquelles ils sont affectables.

Soit la gamme sélectionnée G_I représentée par l'ensemble des transitions $\{tt_1, tt_3, tt_4\}$ (cf. Figure 4.21). Le système de contraintes d'affectation pour l'opération tt_1 relativement à la station 1 est le suivant :

Pour $j = 1$:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bullet a_{11} = 1 & \text{la station 1 sera le lieu d'exécution de l'opération 1} \\ \bullet a'_{11} + 0 + a'_{13} + 0 = 1 & \text{seul un des opérateur 1 et 3 exécutera effectivement l'opération j} \\ \bullet \text{Pour } g = 1, a_{11} \leq 1 & \text{l'affectation est possible dans la station 1} \\ \bullet \text{Pour } g = 1, \begin{cases} a'_{11} \leq (1-1) + 1 & \text{dans la station 1, l'opérateur 1 peut exécuter l'opération 1} \\ a'_{12} \leq (1-1) + 0 & \text{l'opérateur 2 ne peut exécuter l'opération 1} \\ a'_{13} \leq (1-1) + 1 & \text{dans la station 1, l'opérateur 3 peut exécuter l'opération 1} \\ a'_{14} \leq (1-1) + 0 & \text{l'opérateur 4 ne peut pas exécuter l'opération 1} \end{cases} \end{array} \right.$$

5.2.3.2 Contrainte d'horizon (CHO)

La contrainte d'horizon (CHO) est propre à la production aperiodique et hétérogène que représente l'activité de désassemblage des produits manufacturés telle que nous l'avons considérée. En effet, on ne peut parler de : « temps écoulé, en moyenne, entre la production de deux unités successives » qu'est le temps de cycle. Dans notre cas, il s'agit de production en parallèle de plusieurs fractions cibles issues de différents VHU dans une même implantation.

Par conséquent, nous avons préféré utiliser le terme « horizon d'optimisation » ou horizon de travail. Il est défini comme suit :

Définition 5.1 : Horizon d'optimisation

L'*horizon d'optimisation* indique la durée sur laquelle le processus de désassemblage doit être optimisé et où le changement d'objectif de désassemblage est fortement improbable.

Plusieurs situations imposent la modulation de cet horizon. Effectivement, l'éloignement de l'horizon permet la prise en compte de gammes partielles de haut niveau (qui tendent vers la gamme totale). Cela peut s'avérer intéressant lorsque la conjoncture de valorisation impose la récupération de composants élémentaires. Par opposition, le rapprochement de l'horizon réduit parfois le nombre de gammes partielles possibles et disqualifie le plus souvent la gamme totale. En contrepartie, cela réduit l'espace de recherche à des gammes partielles « primitives⁵⁸ » peu profondes mais dont les revenus de valorisation dépassent de loin les coûts de désassemblage. Ces derniers sont grandement réduits par le nombre des opérations écartées du fait de la petitesse de l'horizon d'optimisation (HTO). Comme le montre la Figure 5.5, le choix de l'HTO est décisif pour le caractère d'optimum global trouvé. Le premier choix HTO_1 indique que la meilleure gamme de désassemblage ne sera pas rentable mais présentera le coût le moins élevé (cf. Figure 5.5–(c)). Le deuxième choix HTO_2 laisse supposer que la meilleure gamme rentable sera retrouvée. Enfin, le troisième choix HTO_3 permettra de trouver également la meilleure gamme rentable mais dans un espace de recherche inutilement plus grand. Il est à remarquer que le niveau de désassemblage n'est pour l'instant, qu'une notion très subjective par rapport au temps nécessaire pour l'atteindre. Les échelles de mesures respectives ne sont pas linéairement indépendantes (cf. Figure 5.5–(b)).

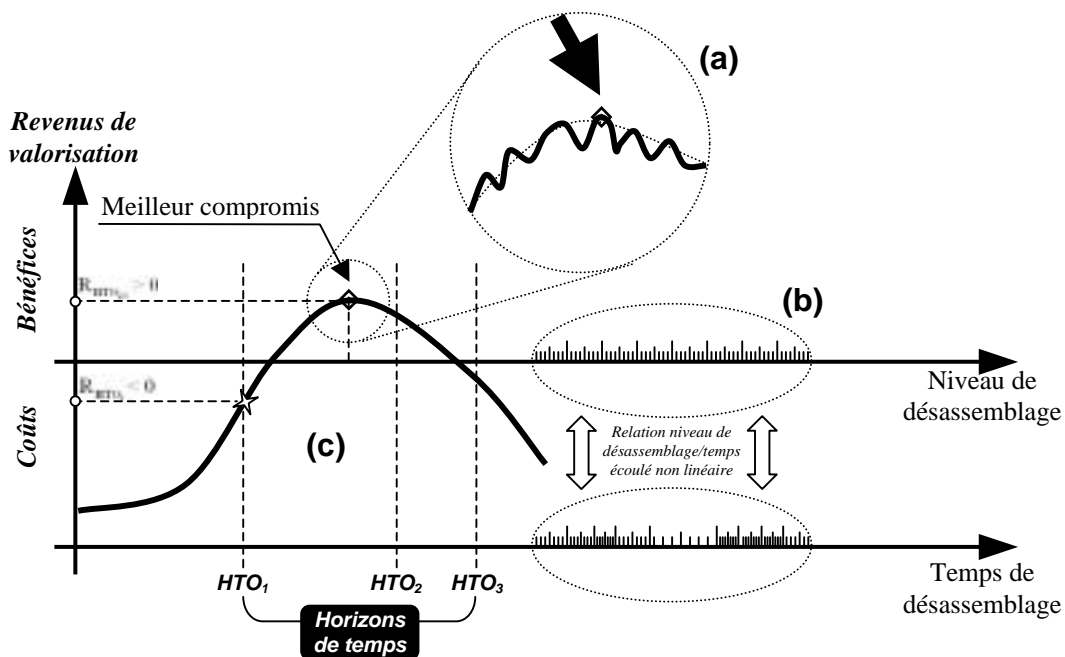


Figure 5.5 : Réduction de l'espace de recherche par la contrainte d'horizon

⁵⁸ Gamme dont le niveau de désassemblage est très peu avancé. Par opposition, les gammes de niveau de désassemblage élevé sont dites « développées ».

Faire cesser le désassemblage avant l'horizon d'optimisation revient à s'assurer que chacune des dates de fin des opérations sélectionnées soit en amont de cet horizon. La date de fin d'une opération d'indice j est la date de son exécution T_j (de début) augmentée de la durée opératoire δ_{jk} selon l'opérateur k affecté. La formulation mathématique de la CHO se présente sous la forme d'une inéquation indiquée dans la formule (5.25). Le terme t_j permet d'écarter d'emblée les opérations non sélectionnées.

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}, T_j + \sum_{k=1}^{no} a'_{jk} \delta_{jk} \leq T_{HTO} \times t_j \quad (5.15)$$

Nous n'avons pas pris en compte les temps d'évacuation et de transfert des pièces récupérées. En effet, cela nous a paru peu important compte tenu du fait que la disponibilité des ressources matérielles de désassemblage est en partie l'objet de l'optimisation alors que les ressources de transfert et d'évacuation sont considérées dès le départ sans panne et toujours opérationnelles (hypothèse évoquée précédemment). La limitation de l'HTO est d'ailleurs perçue comme un facteur d'affranchissement de certaines ressources de désassemblage qui peuvent alors servir au désassemblage de nouveaux produits.

Exemple d'application :

Soit la gamme G_I de l'exemple précédent dont les opérations 1,3 et 4 sont exécutées, respectivement, par les opérateurs 1,3 et 2. Les deux premières opérations se font dans la station 1 et la dernière dans la station 3.

Soit l'horizon⁵⁹ fixé à 100 et la matrice des durées opératoires $(\delta_{jk})^{m \times no}$:

$$(\delta_{jk})^{m \times no} = \begin{matrix} & \begin{matrix} o_1 & o_2 & o_3 & o_4 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 20 & 20 & 20 & 20 \\ 20 & 20 & 20 & 20 \\ 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & 5 & 5 & 5 \\ 10 & 10 & 10 & 10 \\ 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \end{matrix} \end{matrix}$$

Comme le montre la matrice, les opérateurs sont considérés d'égales performances. Les contraintes d'horizon conditionnent les dates d'exécution des opérations comme suit :

$$\begin{cases} T_1 + \delta_{11} \leq T_{HTO} \times t_1 \Rightarrow T_1 \leq 80 \\ T_3 + \delta_{31} \leq T_{HTO} \times t_3 \Rightarrow T_3 \leq 95 \text{ (voir la Figure 5.6)} \\ T_4 + \delta_{41} \leq T_{HTO} \times t_4 \Rightarrow T_4 \leq 95 \end{cases}$$

⁵⁹ L'unité de temps importe peu du moment qu'elle est la même pour toutes les autres données temporelles du système.

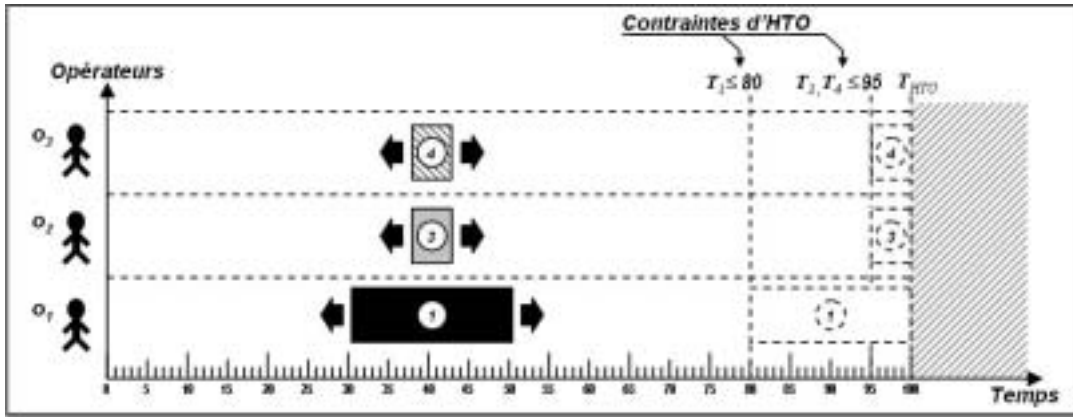


Figure 5.6 : Déploiements possibles des trois opérateurs considérés

5.2.3.3 Contraintes précédenance (CPR)

Il s'agit d'une contrainte classique de problème d'ordonnancement. La contrainte de précédenance (CPR) garantit le début d'exécution d'une opération d'indice j' après la fin de toutes les opérations j qui lui sont antérieures. Cette précédenance est introduite, dans la formulation mathématique – formule (5.16) –, par le terme $\alpha_{jj'}$.

$$\begin{cases} \forall (j, j') \in \{1, \dots, m\}^2, \forall (g, h) \in \{1, \dots, ns\}^2 / \alpha_{jj'} = 1: \\ T_j + \sum_{k=1}^{no} a'_{jk} \cdot \delta_{jk} + d_{gh} \leq T_{j'} + T_{HTO} \cdot \left(2 - (a_{jg} + a_{j'h})\right) \end{cases} \quad (5.16)$$

Le terme $T_j + \sum_{k=1}^{no} a'_{jk} \cdot \delta_{jk}$ de l'inéquation donne la date de fin de l'opération d'indice j . δ_{jk} est le temps d'exécution de l'opération j par l'opérateur k . Le terme d_{gh} est le temps nécessaire au constituant issu de la station g pour arriver au poste h . Ces deux stations correspondent, respectivement, aux lieux d'exécution des opérations d'indice j et j' . Dans le cas contraire (correspondances des stations g et h aux opérations d'indice j et j'), la contrainte n'est plus viable. Le terme $T_{HTO} \cdot \left(2 - (a_{jg} + a_{j'h})\right)$ la rend alors nulle. Ce terme est supérieur ou égal à T_{HTO} .

Remarque

Les temps de reconfigurations des ressources matérielles ne sont pas pris en compte comme prévu par l'Hyp. 4.7.

Exemple d'application :

Soit la même gamme G_1 de l'exemple précédent. Considérons le cas de l'exécution de l'opération 3 dans la station 3, évidemment après l'exécution de l'opération 1 dans la station 1 par l'opérateur 1 (cf. Figure 5.7).

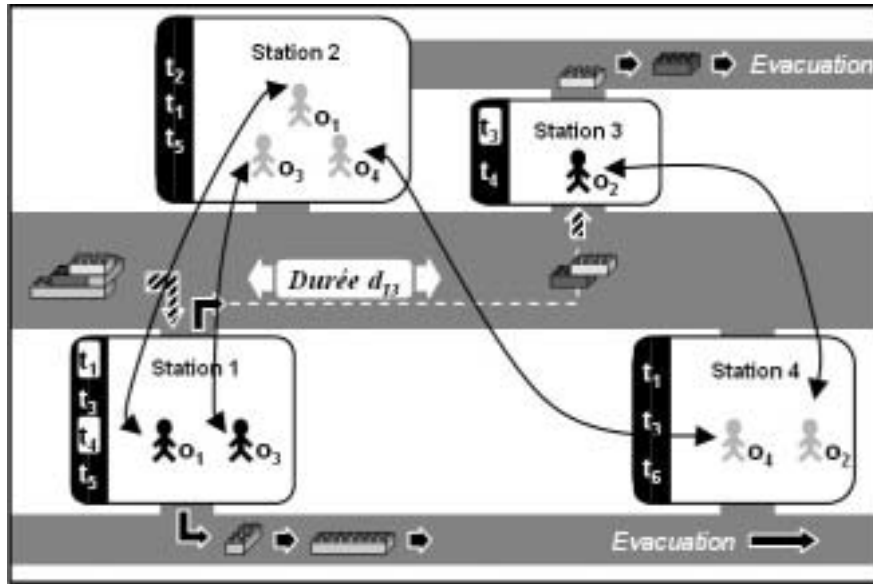


Figure 5.7 : Déploiements possibles des quatre opérateurs considérés

La contrainte de précédence impose que la date d'exécution de l'opération 3 T_3 soit supérieure à la date de *fin* de l'opération 1 T_1 majorée du temps de déplacement du constituant d'indice 2 (place p_2) de la station 1 à la station 3. Elle est représentée dans la Figure 5.8 et formulée comme suit :

$$\begin{cases} \text{pour } (j, j') = (1, 3) \text{ et } (g, h) = (1, 3), / \alpha_{13} = 1: \\ T_1 + \delta_{11} + d_{13} \leq T_3 + 0 \end{cases} \Rightarrow T_1 + 40 \leq T_3$$

Pour l'opération 4, la contrainte est la suivante :

$$\begin{cases} \text{pour } (j, j') = (1, 4) \text{ et } g = 1, / \alpha_{14} = 1: \\ T_1 + \delta_{11} + d_{11} \leq T_4 + 0 \end{cases} \Rightarrow T_1 + 20 \leq T_4$$

$$\text{Où } (d_{gh})^{ns \times ns} = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0} & 10 & 20 & 30 \\ 10 & \mathbf{0} & 10 & 20 \\ 20 & 10 & \mathbf{0} & 10 \\ 30 & 20 & 10 & \mathbf{0} \end{bmatrix} & \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{matrix} \end{matrix}$$

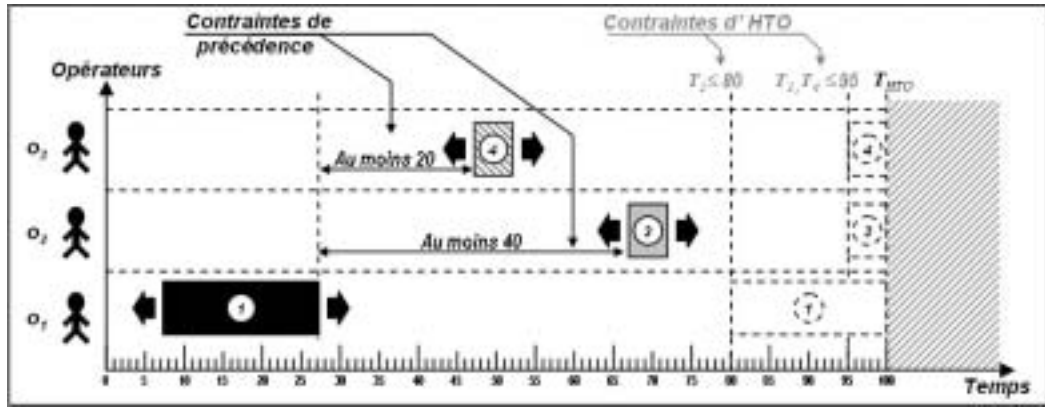


Figure 5.8 : Interprétation graphique des contraintes de précedence

5.2.3.4 Contraintes de disjonction (CDJ)

Comme préconisé par l'Hyp. 4.9, plusieurs opérations peuvent être exécutées en même temps et dans une même station à la condition que chacun des opérateurs de la station ne fasse qu'une opération à la fois. Par conséquent, les intervalles d'exécution des opérations effectuées par un même opérateur doivent être tous disjoints deux à deux (cf. Figure 5.9).

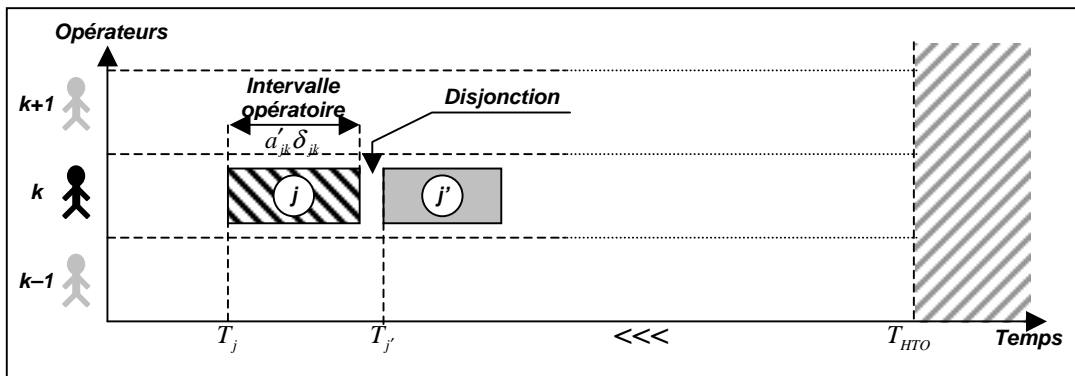


Figure 5.9 : Notion de disjonction opératoire pour un opérateur

C'est la contrainte de disjonction (CDJ) qui garantit ces conditions et sa formulation mathématique est donnée dans la formule (5.17).

$$\begin{aligned}
 & \forall (j, j') \in \{1, \dots, m\}^2, \forall k \in \{1, \dots, no\} / (j \neq j') : \\
 & \begin{cases} T_j + a'_{jk} \delta_{jk} \leq T_{j'} + T_{HTO} \cdot (\theta_{jj'}) + T_{HTO} \cdot \pi \\ T_{j'} + a'_{j'k} \delta_{j'k} \leq T_j + T_{HTO} \cdot (1 - \theta_{jj'}) + T_{HTO} \cdot \pi \end{cases} \quad (5.17) \\
 & \text{avec } \pi = 2 - (a'_{jk} + a'_{j'k})
 \end{aligned}$$

A priori, l'inéquation $T_j + a'_{jk} \delta_{jk} \leq T_{j'}$ pourrait suffire pour expliciter la disjonction. En réalité, cela signifierait que l'opération d'indice j' n'est exécutée qu'après l'opération d'indice j . Afin de libérer les opérations d'une telle contrainte de précedence deux à deux, nous avons introduit une variable de décision binaire *aléatoire* qui permet d'introduire la CDJ dans l'un ou l'autre ordre d'exécution des opérations j et j' . Il s'agit de $\theta_{jj'}$ qui, multipliée par l'HTO, rend nulle l'une ou l'autre des inéquation de la formule (5.17). C'est une technique éprouvée

en ordonnancement de la production [85]. Le même principe est utilisé pour les cas où les deux opérations considérées ne sont pas affectées au même opérateur et par voie de conséquence à la même station. Il s'agit des termes a'_{jk} et $a'_{j'k}$ qui nous indiquent, rappelons-le, l'affectation des tâches j et j' à l'opérateur k .

Il s'agit d'une configuration très générale dans le sens où un opérateur peut très bien se déplacer d'une station vers une autre pour y exécuter une autre opération. Il faut également tenir compte des temps de déplacement inter-stations des opérateurs notés d'_{gh} . Pour ce qui est de la formulation mathématique, la solution est de rajouter le temps de déplacement d'un opérateur entre les stations g et h à gauche de l'inéquation. Le terme $T_{HTO} \cdot (2 - (a_{jg} + a_{j'h}))$ rend la formule caduque si j et j' ne sont pas réalisées, respectivement, dans les stations g et h . Il sera mis à droite de la formule. Le résultat est montré dans la formule (5.18).

$$\begin{aligned} & \forall (j, j') \in \{1, \dots, m\}^2, \forall k \in \{1, \dots, no\} / (j \neq j'): \\ & \begin{cases} T_j + a'_{jk} \delta_{jk} + d'_{gh} \leq T_{j'} + T_{HTO} \cdot (\theta_{jj'} + \pi + \pi') \\ T_{j'} + a'_{j'k} \delta_{j'k} + d'_{gh} \leq T_j + T_{HTO} \cdot (1 - \theta_{jj'} + \pi + \pi') \end{cases} \quad (5.18) \\ & \text{avec } \pi = 2 - (a'_{jk} + a'_{j'k}) \quad \text{et} \quad \pi' = (2 - (a_{jg} + a_{j'h})) \end{aligned}$$

Exemple d'application :

Reprenons les considérations de l'exemple d'application précédent avec, toutefois, la contrainte conjoncturelle⁶⁰ suivante : $a'_{11} = a'_{41} = 1$. Cela signifie que l'on exige l'exécution des opérations 1 et 4 par le même opérateur 1. L'opérateur 3 étant indisponible sur l'horizon considéré.

Les intervalles d'exécution respectifs de ces deux opérations ne doivent pas se chevaucher. Cette contrainte de disjonction est exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} & \text{pour } (j, j') = (1, 4) \text{ et } k = 1 / (j \neq j'): \\ & T_1 + a'_{11} \delta_{11} + d'_{11} \leq T_4 + 100 \cdot (\theta_{jj'} + \pi + \pi') \\ & \text{avec } \theta_{jj'} = 0, \pi = 2 - (a'_{11} + a'_{41}) = 0 \text{ et } \pi' = (2 - (a_{11} + a_{41})) = 0 \\ & \Rightarrow T_1 + 20 \leq T_4 \end{aligned}$$

La distance de 20 entre les deux dates de début devrait être ainsi suffisante. Ce résultat est redondant avec celui obtenu par l'exemple d'application de la CPR car les deux opérations considérées sont antérieures l'une à l'autre conformément au RPD2 de la Figure 4.21.

5.2.4 Contraintes contextuelles

Les contraintes contextuelles agissent sur les variables de décision afin d'y intégrer certains aspects conjoncturels ou spécifiques qui ne peuvent être déduits du RPD2. Ces contraintes peuvent être introduites manuellement comme pour renseigner sur la disponibilité de chacun des opérateurs ou systématiquement comme pour désigner tous les sous-assemblages imposés

⁶⁰ Contrainte conjoncturelle qui peut être introduite manuellement par un expert et enlevée dès que la conjoncture ne correspond plus.

à retirer du produit conformément à la liste transmise par le service des ventes. Celui-ci établit, par exemple, le besoin journalier en pièces.

5.2.4.1 Contrainte de poursuite (CPS)

La contrainte de poursuite (CPS) du désassemblage permet de forcer le franchissement de l'une des transitions en sortie de certaines places. Ces places correspondent à des constituants pour lesquels le désassemblage est indispensable même si la fonction objectif ne le suggère pas (voir l'exemple d'application ci-après). L'utilité d'une telle contrainte est multiple. Elle peut permettre, par exemple, la poursuite du désassemblage de certains constituants dans lesquels se trouvent des composants dangereux prohibés par des réglementations environnementales. C'est le cas de certaines pièces d'usure dans les véhicules pouvant dégager des particules d'amiante du type plaquettes de freins et disques d'embrayage⁶¹. Un constituant peut être aussi sujet à la poursuite du désassemblage en raison d'une forte baisse conjoncturelle de la demande sur le marché des pièces recyclées. Un contexte qui ne peut être transcrit dans les revenus affectés aux constituants. Toujours dans le contexte du marché, un des composants du constituant considéré peut voir sa demande augmenter sans pour autant que le revenu admis n'augmente (pour des raisons contractuelles ou autres). Cela ne peut alors pas être apprécié par la fonction objectif seule. Une fois encore, la CPS constitue une solution pour prendre en compte de telles considérations.

L'idée est de faire en sorte que l'une des transitions de sortie de la place correspondant au constituant à démonter soit franchie. La variable de décision t_j en question serait alors égale à 1. Cependant, il subsiste un obstacle important : cette mise à 1 impose la présélection des gammes reposant sur la production de ce constituant. Or, le principe jusqu'ici, est de ne pas forcer l'obtention du constituant. En revanche, si le constituant est produit, alors la poursuite de son désassemblage est inévitable. Par conséquent, l'une des transitions de sortie devra être franchie uniquement si une des transitions d'entrée l'est aussi.

La formule (5.19) permet de produire les contraintes de poursuite du désassemblage sous une forme linéaire. Le premier terme de la partie gauche de chacune des deux inéquations indique l'existence d'une transition en entrée à franchir et le deuxième terme correspond à une transition à franchir également en sortie. Pour un constituant sous contrainte de poursuite, la somme de ces deux termes doit être à « 0 » ou à « 2 ». La somme de « 1 » voudrait dire que le constituant est produit et devient un constituant final. P_{CPS} est l'ensemble des constituants qui ne peuvent être des constituants finaux. v_i est une variable binaire aléatoire qui permet de décider, pour chaque constituant de P_{CPS} , si la somme vaut « 0 » ou « 2 ». Dans le cas où $v_i=1$, la première inéquation montre que cette somme est égale à « 0 » et la deuxième inéquation est triviale. Si $v_i=0$, la première inéquation est triviale et la deuxième inéquation montre que la somme est égale à « 2 ».

$$\forall i \in P_{CPS} : \begin{cases} \sum_{j=1}^m (w_{ij}^- \cdot t_j) + \sum_{j=1}^m (w_{ij}^+ \cdot t_j) \leq 2(1 - v_i) \\ \sum_{j=1}^m (w_{ij}^- \cdot t_j) + \sum_{j=1}^m (w_{ij}^+ \cdot t_j) \geq 2(1 - v_i) \end{cases} \quad (5.19)$$

⁶¹ Voir le Décret n° 96-1133 du 24 Décembre 1996 relatif à l'interdiction de l'amiante, pris en application du Code du Travail et du Code de la Consommation. Journal Officiel 300 du 26 décembre 1996, page 19126 (France).

Exemple d'application :

En prenant en compte que le RPD1 désigné par les transitions tt_1 , tt_3 et tt_4 de l'exemple de la Figure 5.3, la gamme la plus rentable correspond à $t_1 = t_3 = 1$, et $t_4 = 0$. Afin de forcer la poursuite du désassemblage du constituant p_3 , la contrainte de poursuite serait :

$$\begin{cases} t_1 + t_4 \leq 2 \\ t_1 + t_4 \geq 2 \end{cases} \quad \text{ou} \quad \begin{cases} t_1 + t_4 \leq 0 \\ t_1 + t_4 \geq 0 \end{cases} \quad (5.20)$$

Dans le cas où t_1 serait égal à 1, t_4 le serait également et le revenu global de la gamme serait de 2.

La formule (5.19) peut paraître fastidieuse. La contrainte CPS est ainsi formalisée car elle est exprimée sous la forme canonique et non pas standard. La forme standard de la formule est donnée ci-après.

$$\forall i \in P_{CPS} : \sum_{j=1}^m (w_{ij}^- . t_j) + \sum_{j=1}^m (w_{ij}^+ . t_j) = 2(1 - \vartheta_i) \quad (5.21)$$

Remarque

Habituellement, il est question de contraintes d'inégalité dans la forme canonique des programmes linéaires. La plupart des environnements de programmation linéaire actuels permettent le mélange de contraintes d'inégalité et d'égalité dans un même programme linéaire. Ces environnements intègrent automatiquement les « variables d'écart » (voir l'annexe 4) nécessaires pour transformer ces contraintes d'égalité vers des contraintes d'inégalité. Lorsque nous en sentons l'intérêt, nous donnons, dans ce document, des formules sous la forme canoniques. Le cas contraire, il s'agit de la forme standard comme c'est le cas – en amont– des formules (5.12) et (5.13).

5.2.4.2 Contrainte de sous-assemblage imposé (CSI)

La contrainte de sous-assemblage imposé (CSI) permet de garantir la production d'un constituant sans poursuivre son désassemblage lors de la sélection de la gamme. L'intérêt est de contrôler les sous-assemblages produits par le processus de désassemblage conformément à la demande du marché, à la capacité opératoire de la cellule ou à tout élément ne pouvant être exprimé par un coût ou par un revenu.

Pour imposer la production d'un constituant et l'interdiction de la poursuite de son désassemblage, il suffit d'imposer à 1 l'une de ses transitions en entrée et d'imposer à 0 toutes ses transitions en sortie. Cela est possible grâce à l'unique équation indiquée dans la formule (5.22).

$$\forall i \in P_{SAI} : \sum_{j=1}^m (w_{ij}^- . t_j) + \sum_{j=1}^m (w_{ij}^+ . t_j) = 1 \quad (5.22)$$

P_{SAI} est l'ensemble des constituants considérés comme sous-assemblages imposés.

Exemple d'application :

En ne considérant que le RPD1 désigné par $\{tt_1, tt_3, tt_4\}$ de l'exemple de la Figure 5.3, la gamme la plus rentable correspondant à $t_1 = t_3 = 1$ et $t_4 = 0$. S'il est nécessaire d'obtenir le composant n°6 (p_6), la CSI à rajouter est la suivante : $t_4 = 1$.

t_4 représente l'unique transition d'entrée de la place p_6 (constituant n°6). Celui-ci ne présente aucune transition de sortie car il s'agit d'un composant élémentaire.

5.2.4.3 Contrainte d'évacuation (CEV)

La contrainte d'évacuation (CEV) est à la fois l'opposé de la CPS et une relaxation de la CSI. En effet, si le constituant concerné par une telle contrainte est produit par la gamme sélectionnée, il sera alors un constituant terminal et ne pourra être sujet à aucune opération de désassemblage ultérieure. Il s'agit d'une relaxation de la CSI car, en effet, des pannes de certains postes et des aléas opératoires importants peuvent inciter à empêcher (*a posteriori*) le désassemblage de certains sous-assemblages (bien identifiés). Cependant, la sélection d'une gamme n'est pas conditionnée par la production de ces sous-assemblages. En d'autres termes, les gammes qui ne contiennent pas ces constituants seront également admises dans le processus d'optimisation. Tel n'est pas le cas lorsque des contraintes de type DSI sont déployées.

La formulation linéaire de cette contrainte est simple : pour un constituant i' , les variables de décision correspondant aux transitions de sortie de la place $p_{i'}$ sont mises à 0. De la sorte, aucune opération de désassemblage en aval de ce constituant n'est possible. L'équation (5.23) représente cette formulation linéaire.

$$\forall i \in P_{SAE}, \sum_{j=1}^m (w_{ij}^- \cdot t_j) = 0 \quad (5.23)$$

P_{SAE} est l'ensemble des constituants évacuables *sans désassemblage*.

Exemple d'application :

Soit les mêmes considérations de l'exemple d'application précédent. Le rajout d'une CEV sur le constituant 3 (place p_3) fait que seule la variable de décision t_1 sera mise à 1. Cela signifie que la gamme la plus rentable, désormais, est constituée d'une unique opération de désassemblage qui est la séparation entre les sous-assemblages $\{p_6, p_7\}$ et $\{p_8, p_9\}$. Le revenu est de $(3+3-2-3)+3=4$.

5.2.4.4 Contrainte de désassemblage total (CDT)

Un désassemblage total est rarement profitable dans le domaine de la valorisation en fin de vie. Cependant, la recherche de gammes de désassemblage total peut s'avérer utile lorsque le RPD2 considéré est générique. Celui-ci est un RPD2 dont les places terminales ne représentent pas réellement des composants élémentaires mais des sous-assemblages qui sont traités dans d'autres unités de désassemblage. Cette démarche permet une meilleure organisation de l'atelier de désassemblage. Un autre avantage de la CDT est de permettre la mise au point des stations de désassemblage dans la cellule par le désassemblage total d'un produit préalablement défini. Pour ce faire, disposer d'un choix de gammes de désassemblage total est nécessaire.

Encore une fois, la formulation linéaire est simple puisqu'il suffit de rendre franchissable une des transitions en entrée de chaque place terminale du RDP. Ces dernières sont repérées pour leurs éléments d'incidence w_{ij}^- nuls comme l'équation (5.24) le montre.

$$\forall i \in \{1, \dots, n\} / \sum_{j=1}^m w_{ij}^- = 0 : \sum_{j=1}^m (w_{ij}^+ \cdot t_j) = 1 \quad (5.24)$$

Exemple d'application :

Reprenant encore l'exemple de la Figure 5.3. Le rajout de la CDT aux contraintes produit se traduit par l'exécution des trois opérations possibles ($t_1=t_3=t_4=1$) et donne une valeur de « 2 » à la fonction objectif.

5.2.4.5 Contrainte de valorisation (CVA)

Comme il a été évoqué dans le premier chapitre, la directive 200/53/CE sur la gestion des VHU exige à l'horizon 2006 un taux de valorisation de 85%⁶² au minimum pour les nouveaux types de véhicules. De ce fait, la gamme choisie dans le RPD2 devra impérativement correspondre au minimum à ce taux de valorisation, quelle que soit sa rentabilité ! Il s'agit bien d'une contrainte contextuelle en terme de taux de valorisation (qui sera sujet à accroissement dans le futur) mais d'une contrainte obligatoire en vue de la réglementation en vigueur.

Plusieurs constructeurs automobiles comme *PSA PEUGEOT-CITROËN*, *FORD* et *VOLKSWAGEN* ont déjà entamé des travaux de recherche et développement sur la détermination des taux de valorisation des pièces constituant leurs produits automobiles. La motivation première est d'ordre réglementaire puisque cette même directive européenne exige de ces constructeurs automobiles l'homologation des taux de valorisation et le droit d'information des recycleurs notamment sur ces taux. Le résultat de l'un de ces travaux [59] démontre la complexité de détermination du taux de valorisation en raison de l'inexistence d'une base de données technique dédiée. En effet, la diffusion de la composition exacte des composants automobiles se heurte souvent à la discrétion industrielle que s'imposent les constructeurs et les équipementiers automobiles. De plus, la maîtrise *partielle* des procédés de valorisation ne permet pas toujours de définir le taux de valorisation avec la précision exigée.

Pour notre travail de modélisation, nous avons adopté l'Hyp. 4.14. Ainsi, nous avons attribué à chaque composant i un taux de valorisation τ_i constant. Pour ce qui est des constituants et du produit complet, nous avons attribué des taux de valorisation moyens en fonction des composants élémentaires qui les constituent. Il est évident que cette procédure n'est guère réaliste. Cependant, l'utilisation de notre méthode pour la sélection d'une gamme de désassemblage optimale par un établissement de recyclage ou un constructeur automobile suppose que ces taux de valorisation soient disponibles. Cela ne remet pas en cause la viabilité de la démarche. Pour des raisons pratiques, ces taux de valorisation sont disposés en un vecteur appelé « **Vecteur de valorisation** ».

La formulation linéaire de la CVA est inspirée de la fonction objectif indiquée par la formule (5.1). Pour chaque transition se fait la somme des « masses valorisées » des constituants produits auxquels sont retranchées les masses des constituants qui les ont produit. La *masse*

⁶² A terme, la directive 200/53/CE préconise un taux minimum de valorisation de 95% de la masse du véhicule hors d'usage.

valorisée est le produit du taux de valorisation τ_i et la masse m_i du constituant i considéré (4.2.3.1). La formule linéaire est représentée par l'équation (5.25). S est la masse totale du produit à désassembler. τ_{Th} est le taux de valorisation minimum qu'il faut obligatoirement respecter.

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (w_{ij} \cdot m_i \cdot \tau_i) \cdot t_j \geq S \cdot \tau_{Th} \quad (5.25)$$

L'introduction des variables de décision t_j permet de donner la masse totale valorisée en fonction de la gamme effectivement sélectionnée.

Remarque

Les taux de valorisation $\tau_i=100\%$ et $\tau_i=0\%$ signifient, respectivement, un taux de valorisation intégral (Aluminium en valorisation matière ou bien revente) et un taux de valorisation nul (mise au rebut / procédé de valorisation inexistant).

Exemple d'application :

L'exemple du RPD1 ci-dessous est tiré du RPD2 de la Figure 5.3. Nous avons indiqué des taux de valorisation⁶³ de chacun de ses constituants (y compris le produit complet et les composants élémentaires). La masse de chacun des composants élémentaires est donnée. Le vecteur de valorisation est donc connu et les masses des constituants déductibles. Sans la contrainte de valorisation, le résultat est identique à celui de la Figure 5.3. Les opérations 1 et 2 sont réalisées. Seuls les composants 4 et 5 sont valorisables. La masse valorisée est alors de **31,4 g** qui représente **31,5%** de la masse totale.

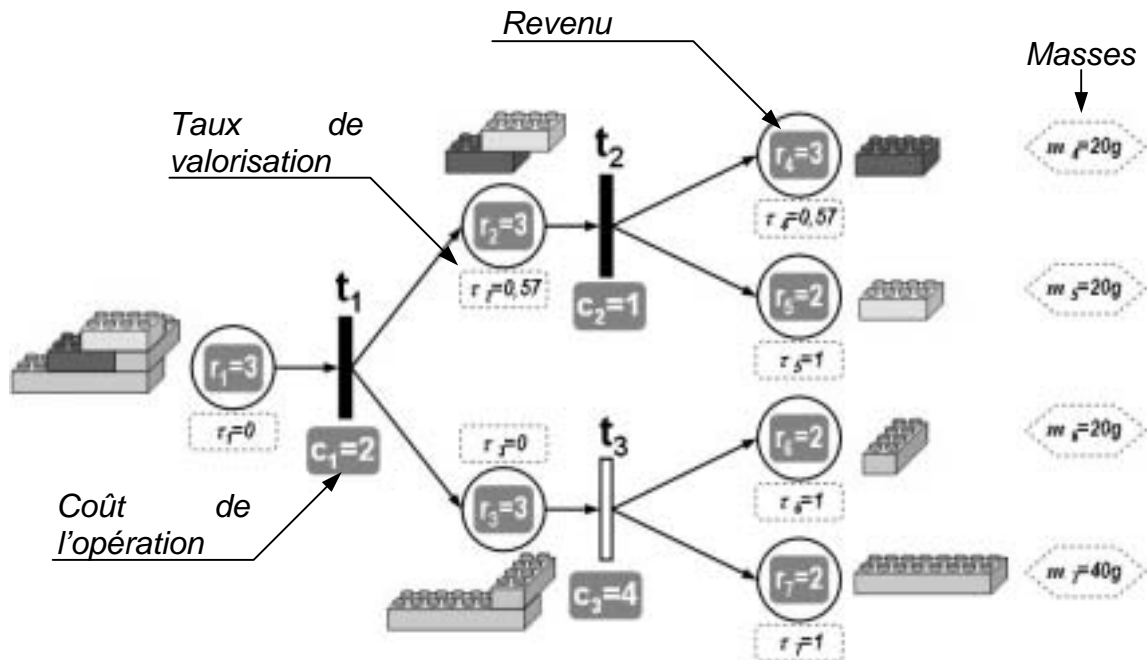


Figure 5.10 : Exemple du calcul du taux global de valorisation

En imposant un taux de valorisation de **85 %** de la masse totale (100g), le résultat est une gamme de désassemblage totale. Le taux global de valorisation est alors de **91,4 %** (masse valorisée : **91,4g**).

⁶³ Les valeurs qui sont présentées dans cet exemple ne sont pas réelles.

5.2.4.6 Contrainte de suspension (CSS)

Bien qu'aucune considération de maintenance n'a été prise en compte de manière explicite dans notre modélisation, nous avons voulu une ouverture via la « contrainte de suspension » (CPN). Il s'agit d'une contrainte contextuelle qui permet d'interdire toute affectation vers une station g donnée, celle-ci étant hors service pour des raisons de maintenance curative ou même préventive. Les affectations en question concernent les opérateurs et évidemment les opérations. La formulation linéaire d'une telle contrainte pour une station hors service d'indice g est donnée dans la formule (5.26).

$$\forall g \in S_{CSS} : \sum_{j=1}^m a_{jg} = 0 \quad (5.26)$$

S_{CSS} est l'ensemble des stations mises temporairement hors service. Ainsi, aucune opération ne sera affectée à la station g appartenant à l'ensemble S_{CSS} .

Remarque

Cette contrainte peut s'avérer très utile pour d'éventuelles simulations de panne et d'appréciation des charges qui incombent aux stations de désassemblage.

Exemple d'application :

Reprenons l'exemple de gammes de la Figure 5.3 exécutable selon l'implantation de la Figure 5.4. Si l'on veut mettre hors service la station 2 en entier, la contrainte CSS correspondante serait la suivante :

$$\text{Pour } g = 2 : \sum_{j=1}^m a_{j2} = 0$$

Dans ce cas particulier, l'opération 2 ne pourra être effectuée dans aucune autre station. Par conséquent, une seule gamme reste possible.

5.2.4.7 Contrainte de suspension partielle (CSP)

Il s'agit d'une relaxation de la CSS dans le sens où seulement une partie des affectations à la station considérée g est invalidée. En d'autres termes, un **sous**-ensemble d'opérations $T_{CSP}(g)$ est défini de manière conjoncturelle pour que des éléments (opérations) ne soient pas affectés à cette station g . En effet, une opération peut être bannie – provisoirement – de cette station pour des raisons techniques, de normes ou autres. La formulation mathématique est donnée par :

$$\forall g \in S : \sum_{j \in T_{CSP}(g)} a_{jg} = 0 \quad (5.27)$$

$T_{CSP}(g)$ est l'ensemble d'opérations de T qui ne peuvent être réalisées temporairement dans la station g . Le terme S désigne l'ensemble des stations.

Il est évident que le sous-ensemble $T_{CSP}(g)$ est déterminé de manière **conjoncturelle** et manuellement par le responsable de la planification. C'est la raison pour laquelle les affectations A_{jg} ne sont pas sollicitées pour intégrer ces contraintes au système.

Exemple d'application :

Soit la gamme de désassemblage de la Figure 5.10 à exécuter dans une cellule avec l'implantation représentée par la Figure 5.4. Si l'on veut interdire l'exécution de l'opération 1 dans la station 2 en raison d'une panne d'outils, la contrainte CSP correspondante sera formulée comme suit :

$$\text{Pour } g = 2 : \sum_{j \in \{1\}} a_{j2} = a_{12} = 0$$

5.2.4.8 Contrainte de disponibilité-opérateurs (CDO)

La contrainte de disponibilité des opérateurs (CDO) permet de définir, pour chaque horizon, la disponibilité réelle des opérateurs affectables aux stations selon la matrice $(A'_{gk})^{ns \times no}$. Dans une démarche de commande d'un système de désassemblage existant, cela permet d'intégrer les congés et absences des opérateurs de désassemblage.

La formulation linéaire d'une telle contrainte est donnée dans la formule (5.28).

$$\forall k \in O_{CDO} : \sum_{j=1}^m a'_{jk} = 0 \quad (5.28)$$

Où $O_{CDO} \in O$ désigne l'ensemble des opérateurs déclarés indisponibles sur l'horizon considéré.

Exemple d'application :

Toujours dans l'exemple précédent avec la même implantation, on souhaite signaler l'absence de l'opérateur 4 pour l'horizon considéré. La solution serait de forcer la valeur de décision a'_{j4} à zéro quelle que soit l'opération j . La formulation est la suivante :

$$\text{Pour } k = 4 : \sum_{j=1}^6 a'_{j4} = 0$$

Récapitulatif

Le modèle du système de désassemblage tel qu'il a été défini, permet de générer « *automatiquement* » toutes les contraintes entrant dans le cadre des 13 types de contraintes présentées dans cette section. Outre le gain de temps dû à la formulation mathématique de ces contraintes, ce modèle autorise la modification au cas par cas par un expert qui pourra relancer le processus d'optimisation après mise à jour. Son intervention ne pourra concerner que les contraintes entourées en pointillés dans la Figure 5.11. Les autres contraintes sont obligatoires.

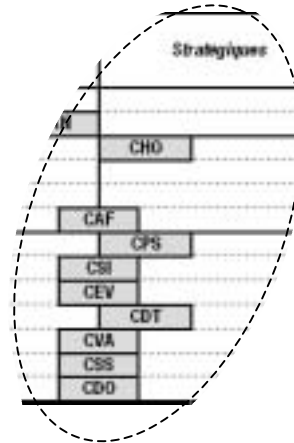


Figure 5.11 : Stratégie d'optimisation par les contraintes

Le deuxième volet de la stratégie d'optimisation est de définir les critères d'optimalité (et donc d'optimisation) au moyen de la fonction objectif. Dans un premier temps, nous adopterons une démarche classique en réalisant un compromis entre les coûts de désassemblage et les revenus de valorisation (section suivante). Dans la section du désassemblage multi-produits (§5.3), nous avons adopté une démarche différente.

5.2.5 Fonction objectif et Sélection du processus de désassemblage optimal

La sélection du « meilleur » processus de désassemblage n'est pas simple. En effet, on voudrait par exemple que les revenus soient maximums (et que les coûts soient minimums), l'échéance du processus soit la plus proche possible, les taux de valorisation soient les plus élevés possibles, etc. Il s'agit d'une optimisation multicritères. Par ailleurs, il est possible d'optimiser un ou deux critères homogènes (ex. les revenus et les coûts), tout en ayant un regard sur des objectifs secondaires (ex. taux de valorisation) via des contraintes stratégiques (cf. Figure 5.11).

Pour l'optimisation du processus de désassemblage d'un VHU, nous avons gardé le même principe que celui qui a donné la formule (5.1). La nouvelle fonction objectif consiste en la sommation des revenus r_i issus des constituants effectivement récupérés et des coûts c_j engendrés par les opérations effectuées. Ceux-là sont obtenus par le produit du coût horaire γ avec les temps opératoires δ_{jk} des opérations j lorsqu'elles sont exécutées par les opérateurs k .

$$F_{obj} = \sum_{j=1}^m \left(t_j \cdot \sum_{i=1}^n (w_{ij} \cdot r_i) - \underbrace{\gamma \cdot \sum_{k=1}^{no} a'_{jk} \cdot \delta_{jk}}_{c_j} \right) \quad (5.29)$$

L'utilisation d'un coût horaire γ unique suppose que les opérateurs génèrent des coûts identiques et directement proportionnels aux temps opératoires quelles que soient leurs qualifications et les postes occupés. Cela signifie qu'ils sont rémunérés à la tâche. Ceci ne reflète pas toujours les conditions réelles de travail. Dans le but de disposer d'un modèle de simulation peu complexe, nous nous sommes, cependant, cantonné à cette hypothèse pour l'instant.

D'autre part, le terme c_j (tel qu'il est formulé) garde sa caractéristique majeure qui est d'être une combinaison linéaire du temps. De ce fait, le réduire revient aussi à réduire le temps global de désassemblage pour peu qu'il soit du même ordre de grandeur que les revenus r_i . Nous pensons ainsi agréger les deux critères que sont la durée totale et les revenus de désassemblage dans une même fonction objectif (à défaut d'une optimisation multicritères). Cette formulation donne souvent des opérations courtes mais qui peuvent s'étaler sur une durée de temps inutilement longue.

Pour rapprocher l'échéance du processus de désassemblage, nous avons introduit un troisième terme dans la fonction objectif : $\lambda.T_j$ indiqué dans la formule (5.30).

$$F_{obj} = \sum_{j=1}^m \left(t_j \cdot \sum_{i=1}^n (w_{ij} \cdot r_i) - \underbrace{\gamma \cdot \sum_{k=1}^{no} a'_{jk} \cdot \delta_{jk}}_{c_j} - \lambda.T_j \right) \quad (5.30)$$

Il s'agit de la somme des dates d'exécution des opérations de désassemblage munies d'un coefficient appelé « *coefficient d'équilibrage* ». Le principe est que la réduction de cette somme provoque la compression du plan d'ordonnement sur l'axe des temps. Cette compression associée aux réductions des temps opératoires donne naturellement un équilibrage appréciable tant que les temps opératoires sont d'ordres de grandeur homogènes.

Remarque

A coefficients égaux ($\lambda = \gamma$), la somme des deux derniers termes de la formule (5.30) n'est que la somme des dates de fin des opérations j effectivement exécutées.

Mise à jour du modèle du système de désassemblage

A ce stade de la phase d'intégration de niveau 2, la stratégie d'optimisation devrait permettre de générer toutes les familles de contraintes stratégiques définies ci-dessus, lesquelles doivent être intégrées dans le modèle du système. En fait, il subsiste un problème crucial qui est la destination fin de vie de chaque constituant considéré. Nous avons vu dans la section 4.3.3 que ces constituants disposaient d'attributs quadri-dimensionnels pour indiquer les destinations fin de vie envisageables, les taux de valorisation et les indicateurs de revenu correspondants. Ces informations servent à donner une certaine latitude à l'expert quant aux choix définitifs des destinations fin de vie. En d'autres termes, celui-ci peut attribuer une destination fin de vie à un constituant qui ne donne pas l'indice de revenu le plus important ; cela peut même dans certains cas, correspondre au taux de valorisation le plus défavorable. En réalité, il s'agit d'une étape où l'expert insère et modifie toutes les données du modèle avant la simulation. Elle sera aussi l'étape de remise à jour des données après les simulations et l'interprétation des résultats. Une fois que toutes les contraintes sont formulées et que le choix de la fonction objectif est fait, la sélection du processus de désassemblage optimal peut désormais se faire en trois étapes : (1) le choix de l'environnement de programmation et de simulation, (2) la préparation des données, (3) la simulation et (4) l'interprétation des résultats.

5.3 Règles de pilotage du système de désassemblage en mode incertain

Comme dans tout système de production, une politique de maintenance s'impose. Par conséquent, nous avons voulu poser les prémisses d'une démarche de maintenance corrective en fournissant une certaine latitude sur le choix des ressources matérielles (nombre de station, capacités opératoires, etc.) et humaines (nombre, compétences, flexibilité, etc.). Au-delà des considérations système, nous avons préconisé la possibilité de mettre hors service des stations et des opérateurs humains de manière provisoire. Cela servira, à la fois, pour la conception de nouveaux systèmes de désassemblage et pour l'amélioration des performances de systèmes existants face aux pannes. Cette liberté de réaffectation dynamique des ressources donne une flexibilité de conception et d'optimisation non sans intérêt. Plusieurs contraintes contextuelles dans ce sens ont été formulées dans la section 5.2.4. Dans ce cas, le problème est d'utiliser ces contraintes au cours d'un processus de désassemblage à bon escient.

5.3.1 De quelle incertitude s'agit-il ?

Ce qui facilite le choix des destinations fin de vie de chacun des constituants du produit est d'en connaître l'état de dégradation. C'est une information décisive dans le choix des opérations de désassemblage, des affectations de ressources et *a fortiori* de la détermination de la gamme de désassemblage optimale. Or, il n'est pas toujours possible de prédire ces dégradations, encore moins avec l'exactitude souhaitée. L'inaccessibilité et l'invisibilité éventuelles des certains constituants du produit peuvent aussi constituer un frein au diagnostic sur l'avancée du désassemblage et par voie de conséquence pour reconsidérer le processus sélectionné.

5.3.2 Démarche préventive et corrective

Cette incertitude autour du processus de désassemblage à sa conception et durant son exécution constitue un problème conséquent que nous avons tenté de résoudre par la mise en place d'un « **protocole de pilotage du désassemblage en mode incertain** ». Ce protocole regroupe un certain nombre de règles que le pilote devra suivre, dans une démarche préventive ou corrective, lorsque les données du produit changent (*cf.* Figure 5.12).

L'exécution exacte du processus de désassemblage présumé optimal garantit la rentabilité de la valorisation telle qu'elle a été pensée au départ. Cependant, il est prévisible que la découverte, *au fur et à mesure* du désassemblage, de l'état des constituants implique la réadaptation *au fur et à mesure* de ce processus de désassemblage. Il en va de la rentabilité de la valorisation. La génération dynamique du processus optimal de désassemblage paraît inévitable. Nous pensons l'organiser de deux manières complémentaires. La première consiste en l'arrêt du processus de désassemblage dès qu'un contrôle prévient soit d'un risque élevé d'échec de certaines opérations de désassemblage soit de l'obtention de constituants cibles dévalués en raison de leur état de dégradation. Pour prévenir cela, la reconsidération des conditions d'optimalité est à faire. La deuxième consiste en l'arrêt du désassemblage en raison d'un échec effectif d'une opération ou d'une dégradation confirmée d'un constituant cible suite à une opération de désassemblage. La première est préventive, la deuxième est incontestablement corrective.

destructive⁶⁴ peut permettre la continuité du désassemblage et par voie de conséquence de celle du processus de valorisation du produit. Devant des constituants endommagés et face à des opérations difficiles ou ayant un taux d'échec important, cette démarche de « reconsidérer » le choix du processus de désassemblage est une démarche préventive. En effet, elle n'intervient pas lors d'un échec opératoire mais prévient de changements de données quant au processus de valorisation. A cette démarche préventive, nous avons voulu rajouter une partie corrective importante.

5.3.3.1 Démarche préventive – constituant dégradé

Comme le montre la Figure 5.12, après l'arrêt préventif du processus de désassemblage et l'identification du constituant dégradé, la redéfinition et la propagation des descripteurs de valorisation d_{DFV} , d_{Masse} , d_{Valo} , d_{Ir} et d_{Mat} de ce constituant doit être faite. Comme il a été expliqué dans la section 3.3.3 en page 123, cette propagation des descripteurs de valorisation se fait à partir des informations disponibles sur l'état des composants élémentaires du produit. Souvent, l'hypothèse pratiquée est de considérer le produit neuf. L'état réel du produit doit naturellement remettre en cause les attributs affectés à ces descripteurs. Le choix des fractions cibles pour une valorisation optimale est lui aussi remis en cause. En résumé, cette étape de redéfinition des descripteurs de valorisation est essentielle. Elle peut être menée de manière automatique : un système expert orienté traitement d'images peut être utilisé pour définir le taux de dégradation. Elle peut aussi se faire de manière manuelle grâce à un expert humain affecté à cette fonction. Dans l'exemple où l'on désire supprimer la possibilité de réutilisation du constituant dégradé. Il s'agit d'un cas où le nombre de destinations fin de vie possibles se réduit d'une destination.

Après cette étape, la mise à jour de la base de contraintes de niveau 2 est nécessaire. En effet, si l'expert juge que le niveau de dégradation ou de conformité du constituant considéré par rapport à celui attendu est trop importante, il peut exiger le retrait de ce constituant du produit pour permettre sa mise au rebut au plus vite. La contrainte rajoutée est dans ce cas la contrainte de sous-assemblage imposé (CSI). S'il estime que la fonction d'une partie de ce constituant peut être préservée, il peut – au contraire – préconiser la poursuite du désassemblage dans l'espoir de récupérer un autre constituant fonctionnel. La contrainte stratégique serait la contrainte de poursuite (CPS). Outre le rajout de ces nouvelles contraintes stratégiques, cette étape est importante car elle permet de signaler dans la gamme les opérations déjà effectuées et ce en affectant la valeur 1 aux variables de décision t_j correspondantes.

La dernière étape est de relancer le processus d'optimisation de niveau deux pour retrouver le meilleur processus de désassemblage en partant du précédent processus partiellement exécuté.

5.3.3.2 Démarche préventive – opération difficile

Lorsqu'une opération de désassemblage difficile ou risquée est détectée, si l'expert décide de l'annuler (pour éviter l'échec ou la dégradation de constituants), il doit l'interdire en forçant sa variable de décision à zéro. Il s'agit en fait d'appliquer la contrainte stratégique d'évacuation (CEV) présentée dans la section 5.2.4.3 . L'étape de mise à jour des contraintes de stratégie de niveau 2 permet, en plus, d'appliquer les mêmes contraintes d'évacuation sur les constituants sujets aux mêmes opérations difficiles. Nous pouvons alors se demander pourquoi ne pas les avoir appliqués dès la définition de la stratégie de niveau 2 de départ. Il

⁶⁴ L'annexe 5 présente une approche d'intégration des opérations destructives dans le modèle de CYD-VHU.

faut savoir que la difficulté opératoire dépend souvent du matériel utilisé, de sa technologie, de son ancienneté, de sa fréquence d'utilisation, etc. Nous ne disposons pas toujours de ces des éléments d'informations lors de cette étape.

Une fois ces contraintes introduites, l'optimisation de niveau deux pour retrouver le meilleur processus du désassemblage peut recommencer, toujours en partant sur le précédent processus partiellement exécuté.

5.3.4 Règles de pilotage dans une démarche correctrice

Cette phase correctrice permet de faire face à des situations d'échec opératoire effectives parfois irréversibles. Ces échecs peuvent à leur tour entraîner des dommages sur plusieurs constituants du produit. Il s'agit de situations qui imposent de reprendre le processus préconisé partiellement exécuté pour en tirer un processus alternatif amenant toujours à la meilleure rentabilité du processus de valorisation. Cette partie correctrice est mise en évidence dans la Figure 5.12 par les éléments en gris. En résumé : lorsque l'opération de désassemblage a échoué, l'optimalité du processus adopté est remise en question. L'analyse de cet échec passe par la détermination des constituants éventuellement dégradés et la possibilité d'opérations alternatives pour obtenir les fractions cibles attendues. Toujours dans un souci de réalisme, nous avons intégré des routines permettant la prise en compte de ces données. Afin de prendre en compte un maximum de possibilités d'échec, nous avons prévu les trois routines suivantes :

5.3.4.1 Démarche correctrice – opération échouée & constituant dégradé

L'échec d'une opération peut être interprété de plusieurs manières : (1) l'opération n'a pas pu être réalisée pour des raisons technologiques, de panne ou autres ; (2) les constituants attendus ont subi des dégradations importantes qui remettent en cause leur valeur de valorisation. Dans ce cas, l'opération serait considérée comme réalisée avec succès. De plus, la redéfinition et la propagation des descripteurs de valorisation sera effectuée après avoir identifié le constituant dégradé. La mise à niveau des contraintes de stratégie de niveau 2 sera par la suite réalisée. Les contraintes en question sont semblables à celles données dans le paragraphe 3.4.1.1. Cela permettra l'optimisation de niveau deux pour retrouver le meilleur processus de désassemblage en partant du précédent processus partiellement exécuté.

5.3.4.2 Démarche correctrice – opération échouée sans alternative & constituant non-dégradé

Quand l'opération de désassemblage prévue n'a pu être exécutée pour des raisons autres que la dégradation du constituant, le choix d'une opération alternative est préconisé. S'il l'expert juge qu'il est inutile ou impossible de rechercher une opération alternative, cette opération échouée est abandonnée définitivement. Sa variable de décision correspondante sera bien évidemment mise à zéro. Sinon, il s'ensuivra la mise à jour des contraintes de niveau 2 et la recherche d'un nouveau processus du désassemblage en partant comme toujours du précédent processus partiellement exécuté. En général, une opération alternative est toujours possible. Par contre, ses répercussions économiques ne sont pas anodines.

5.3.4.3 Démarche corrective – opération échouée avec alternative & constituant non-dégradé

Dans le cas où une opération alternative économiquement intéressante serait trouvée, celle-ci est exécutée. L'opération originelle (celle initialement prévue) sera alors consignée comme exécuté et le processus reprendra dès la mise à jour des contraintes de stratégie de niveau 2. En effet, cette phase est nécessaire notamment pour prendre en compte le temps perdu lors de cette analyse corrective. Par ailleurs, la réussite de l'opération alternative n'est pas pour autant garantie. En cas d'échec, l'opération est abandonnée.

5.4 Cas du désassemblage multi-produits (*EXTENSION*)

La méthode de CYD-VHU ne prend en charge que le désassemblage d'un seul produit à la fois sur un horizon T_{HTO} bien défini. Nous avons expliqué qu'il ne pouvait être question de temps de cycle. Notre problème d'ordonnancement concerne toutes les opérations de désassemblage d'un ensemble de produits différents dans un même intervalle de temps et dans une même cellule de désassemblage. Le modèle de désassemblage développé dans le chapitre précédent doit faire l'objet d'adaptations. Désormais, il devra prendre en compte le désassemblage de plusieurs VHU à la fois, représentés par plusieurs RPD2. L'optimisation doit porter alors sur l'ensemble de ces RPD2.

Pour ce faire, une première méthode serait de rechercher l'ordonnancement optimal pour le premier produit. Ensuite, faire la même chose pour le produit suivant en fonction des intervalles de temps restant dans le premier plan d'ordonnancement. Cette étape serait répétée jusqu'à saturation de ce plan d'ordonnancement. Seuls des optimum locaux peuvent être espérés de cette méthode. Elle est pourtant celle utilisée actuellement dans les sites de démolisseurs automobiles.

La deuxième méthode consiste à optimiser l'ordonnancement pour l'ensemble des produits considérés à la fois. Nous pouvons parler d'un lot de produits avec toutefois une particularité importante : ce lot est hétérogène⁶⁵. Le traitement de ce type de lots nécessite la prise en compte de toutes les gammes admissibles pour chacun des VHU. En fait, il y aura autant de RPD2 à traiter que de marques et de modèles différents dans le lot. Cette dernière méthode garantit un optimum global en terme de résultat d'ordonnancement mais présente une explosion combinatoire certaine. Cependant, fortement contraint, ce problème d'optimisation peut être résolu avec les diverses méthodes actuelles d'optimisation par contrainte y compris la programmation linéaire. Nous avons ainsi choisi de reconsidérer notre précédente modélisation et de l'adapter au traitement d'un lot de VHU sur un horizon d'optimisation T_{HTO} . De plus, le contexte économique de valorisation actuel et le nombre d'opérations à effectuer sur un VHU sont tels que l'on ne pourrait raisonnablement envisager de désassembler plus d'une dizaine de VHU par jour dans une même cellule. Ce nombre réduit de VHU conforte notre choix de méthode.

Par ailleurs, une des nombreuses stratégies de planification dans ce genre d'activités est de prévoir une cellule de désassemblage (à l'entrée de l'atelier) dédiée au démontage des VHU en plusieurs gros blocs qui seront affectés au reste des cellules de désassemblage prévues. Cette organisation hiérarchisée est d'ores et déjà préconisée chez le constructeur d'Automobile PSA Peugeot-Citroën. Il s'agit d'AVF : l'Aptitude à la valorisation d'une

⁶⁵ Dans le sens où les VHU considérés sont de modèles et de marques différents. Cela correspond à des ensembles de gammes admissibles distincts.

fonction. Ainsi, l'extraction du moteur correspond à l'exécution d'une AVF [83][59]. On se retrouve alors, avec une quinzaine de produits à désassembler dans des cellules préalablement dédiées. Cela signifie que quand la taille du problème dans une cellule est multipliée en raison du volume du lot, celle-ci est réduite proportionnellement au nombre d'AVF considérées.

5.4.1 Reformulation du modèle pour le Désassemblage Multi-Produits (DMP)

Dans notre précédente méthode de conception de systèmes de désassemblage, la phase d'optimisation (niveau 2) consistait à reprendre le RPD2 du produit et lui affecter des variables de décision « d'exécution effective » des opérations, de dates décidées pour chacune de ces opérations et des ressources (rep. : t_j ; T_j ; a'_{jk} ; a_{jg}). Ces variables de décision sont définies en fonction des m transitions, n places, no opérateurs et ns stations considérés. Pour le traitement d'un lot de VHU, le nombre de stations et d'opérateurs reste le même (no & ns). Le nombre des transitions et des places devient la somme de tous ceux des RPD2 respectifs. Ainsi, l'optimisation du système de désassemblage pour le traitement des 3 produits de la Figure 5.13 est basée sur les variables de décision $\{t_1\} \cup \{t_2, t_3, t_4, t_5\} \cup \{t_6\}$ et les variables de dates et d'affectations correspondantes.

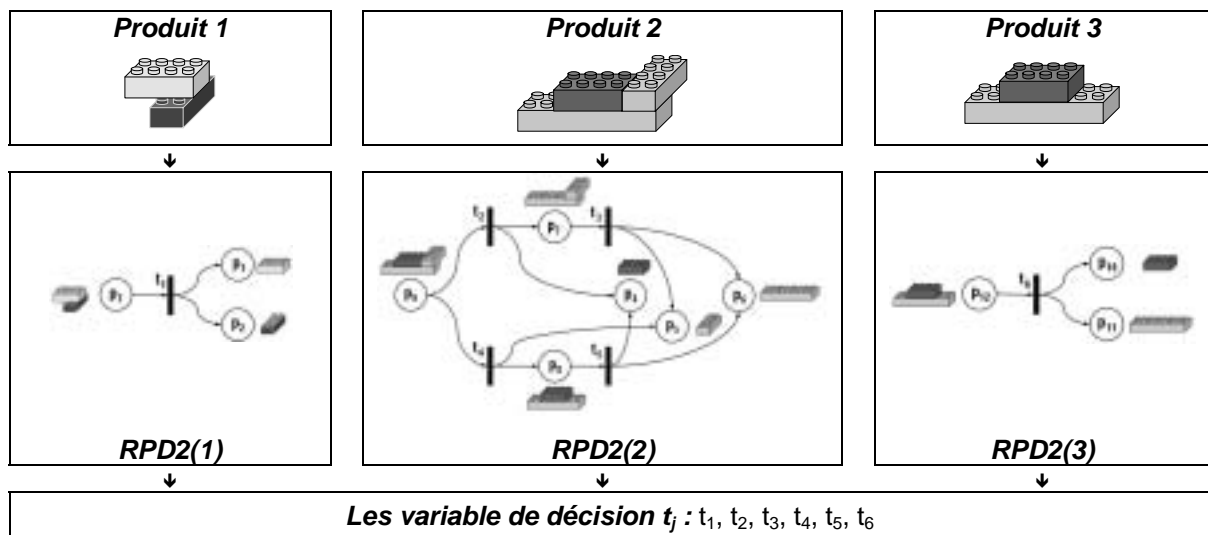


Figure 5.13 : Optimisation du processus de désassemblage pour le traitement d'un lot de trois produits

Après optimisation, le résultat $t_1=1$; $t_2=t_3=1$; $t_4=t_5=0$; $t_6=0$ signifie que :

- Le désassemblage du produit 1 (p_3) s'effectue par la séparation des composants p_1 et p_2 ;
- Le désassemblage du produit 2 (p_9) s'effectue par l'extraction du composant p_4 puis la séparation des composants p_5 et p_6 ;
- Le désassemblage du produit 3 (p_{12}) ne se fait pas car le revenu obtenu des composants p_{10} et p_{11} séparément est supérieur à celui du produit moins le coût de l'opération de désassemblage ;

Cette regroupement des transitions et des places paraît anodine vis-à-vis du modèle de d'optimisation. Qu'en est-il des contraintes produit, système et du contexte qui garantissent la viabilité des résultats obtenus ?

5.4.2 Génération des contraintes de niveau 2 pour le DMP

La formulation mathématique des contraintes de niveau 2 doit être reprise sur la base de nouvelles notations spécifiques au DMP. Soit np le nombre de produits du lot à traiter selon un horizon T_{HTO} . Pour chaque $q \in \{1, 2, \dots, np\}$, les contraintes d'optimisation sont générées toujours autour de variables de décision. L'énumération des places et transitions devient une concaténation des énumérations de chaque RPD2 considéré. Elle se présente comme suit :

indice des places

$$\begin{array}{l}
 \text{Produit n}^\circ 1 \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ 2 \qquad \qquad \qquad \text{Produits intermédiaires} \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ np \\
 i = \overbrace{1, 2, 3, \dots, \dots}^{\text{Produit n}^\circ 1}, \overbrace{\dots, \dots, \dots}^{\text{Produit n}^\circ 2}, \overbrace{\dots}^{\text{Produits intermédiaires}}, \overbrace{\dots, \dots, \dots, n}^{\text{Produit n}^\circ np} \\
 i = x(1), 2, 3, \dots, y(1), x(2), \dots, y(2), \dots, x(np), \dots, y(np)
 \end{array}$$

i est l'indice des places. $x(q)$ et $y(q)$ indiquent, respectivement, le plus petit et le plus grand indice des places relatives au produit q .

Dans l'exemple de la Figure 5.13, l'énumération des places est la suivante :

$$\begin{array}{l}
 \text{Produit n}^\circ 1 \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ 2 \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ 3 \\
 i = \overbrace{1, 2, 3, 4}^{\text{Produit n}^\circ 1}, \overbrace{5, 6, 7, 8}^{\text{Produit n}^\circ 2}, \overbrace{9, 10, 11, 12}^{\text{Produit n}^\circ 3} \\
 i = x(1), 2, y(1), x(2), \dots, \dots, y(2), x(3), \dots, y(3)
 \end{array}$$

Le nombre des places $n(q)$ pour représenter les gammes de désassemblage du produit q est calculé comme suit : $n(q) = y(q) - x(q) + 1$. Le nombre total des places n est le suivant :

$$n = \sum_{q=1}^{np} n(q)$$

indice des transitions

$$\begin{array}{l}
 \text{Produit n}^\circ 1 \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ 2 \qquad \qquad \qquad \text{Produits intermédiaires} \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ np \\
 j = \overbrace{1, 2, 3, \dots, \dots}^{\text{Produit n}^\circ 1}, \overbrace{\dots, \dots, \dots}^{\text{Produit n}^\circ 2}, \overbrace{\dots}^{\text{Produits intermédiaires}}, \overbrace{\dots, \dots, \dots, n}^{\text{Produit n}^\circ np} \\
 j = x'(1), 2, 3, \dots, y'(1), x'(2), \dots, y'(2), \dots, x'(np), \dots, y'(np)
 \end{array}$$

j est l'indice des transitions. $x'(q)$ et $y'(q)$ indiquent, respectivement, le plus petit et le plus grand indice des transitions relatives au produit q .

Dans l'exemple de la Figure 5.13, l'énumération des transitions est la suivante :

$$\begin{array}{l}
 \text{Produit n}^\circ 1 \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ 2 \qquad \qquad \qquad \text{Produit n}^\circ 3 \\
 j = \overbrace{1}^{\text{Produit n}^\circ 1}, \overbrace{2, 3, 4, 5}^{\text{Produit n}^\circ 2}, \overbrace{6}^{\text{Produit n}^\circ 3} \\
 j = x'(1) = y'(1), x'(2), 3, 4, y'(2), x'(3) = y'(3)
 \end{array}$$

Le nombre des transitions $m(q)$ pour représenter les gammes de désassemblage du produit q est calculé comme suit : $m(q) = y'(q) - x'(q) + 1$. Le nombre total des transitions m est le

$$m = \sum_{q=1}^{np} m(q)$$

5.4.2.1 Contrainte d'antériorité pour DMP (CANx)

L'adaptation de la formule (3.14) qui exprime la contrainte d'antériorité se fait par l'application individuelle d'une contrainte d'antériorité sur un couple de transitions d'indices j

et j' correspondants à l'un des produits q considéré. Rappelons que les RPD2 considérés sont disjoints et sont totalement indépendants des uns aux autres vis à vis des variables de décision (t_j). La formule (5.31) fait appliquer, pour chaque produit d'indice q , toutes les contraintes d'antériorités possibles⁶⁶.

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \begin{cases} \forall j' \in \{1, \dots, m(q)\} / Ant(j', q) > 0, \\ t_{j'+x'(q)-1} - \sum_{j=1}^{m(q)/j \neq j'} (\alpha_{jj'}(q) t_{j+x'(q)-1}) \leq 0 \end{cases} \quad (5.31)$$

La constante d'antériorité-transition pour le DMP devient $\alpha_{jj'}(q)$. Elle est définie pour chaque produit et est calculée selon la formule (5.32).

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : (\alpha_{jj'}(q))^{m(q) \times m(q)} = {}^t W^+(q) * W^-(q) \quad (5.32)$$

$W^+(q)$ et $W^-(q)$ sont, respectivement, les matrices d'incidence arrière et avant du RPD2(q).

La fonction d'antériorité indiquant l'existence de transitions antérieures à celle considérée j' est réécrite comme le montre la formule (5.33).

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \forall j' \in \{1, \dots, m(q)\}, Ant(j', q) = \sum_{j=1}^{m(q)/j \neq j'} \alpha_{jj'}(q) \quad (5.33)$$

Exemple d'application :

Dans l'exemple de la Figure 5.13, trois matrices d'incidence avant et arrière sont définies :

$$W^-(1) = W^-(3) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \quad W^+(1) = W^+(3) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$W^-(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} ; \quad W^+(2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

⁶⁶ Les contraintes d'antériorité issues du RPD2 du produit q .

Pour le produit (2), les contraintes sont les suivantes :

$$\forall j' \in \left\{ 1, \dots, \overbrace{6}^{m(2)} \right\} / \overbrace{Ant(j', 2)}^{j'=2 \text{ et } j'=4} > 0 :$$

$$\left. \begin{aligned} t_{2+\frac{2}{x(2)}-1} - \sum_{j=1}^{6/j \neq j'} \left(\alpha_{jj'}(2) \cdot t_{j+\frac{2}{x(2)}-1} \right) \leq 0 &\Rightarrow t_3 - \left(\alpha_{12}(2) \cdot t_{1+\frac{2}{x(2)}-1} \right) \leq 0 \\ \Rightarrow t_3 - t_2 \leq 0 \end{aligned} \right\} \text{pour } j' = 2$$

$$\left. \begin{aligned} t_{4+\frac{2}{x(2)}-1} - \sum_{j=1}^{6/j \neq j'} \left(\alpha_{jj'}(2) \cdot t_{j+\frac{2}{x(2)}-1} \right) \leq 0 &\Rightarrow t_5 - \left(\alpha_{34}(2) \cdot t_{3+\frac{2}{x(2)}-1} \right) \leq 0 \\ \Rightarrow t_5 - t_4 \leq 0 \end{aligned} \right\} \text{pour } j' = 4$$

5.4.2.2 Contrainte d'exclusion pour DMP (CEXx)

Comme pour les contraintes d'antériorité, les contraintes d'exclusion s'appliquent indépendamment sur chaque RPD2 considéré. La formule (5.8) des CEX est remplacée par la formule (5.34) dans laquelle chacune des places i qui donne sur au moins deux alternatives de désassemblage est prise en compte. Une seule de ses transitions de sortie sera franchie. Cette opération se reproduira autant de fois qu'il y a de produits. La formule est la suivante :

$$\begin{aligned} \forall q \in \{1, \dots, np\}, \forall i \in \{1, \dots, n(q)\} : \\ \sum_{j=1}^{m(q)} \left(w_{ij}^-(q) \cdot t_{j+x(q)-1} \right) \leq 1 \end{aligned} \quad (5.34)$$

Exemple d'application :

Dans l'exemple de la Figure 5.13, le seul cas d'exclusion concerne la place p_9 (produit 2) pour laquelle une des transitions t_2 et t_4 peut être sélectionnée. La formule (5.34) donne le résultat suivant :

$$\sum_{j=1}^{\overbrace{4}^{m(2)}} \left(w_{ij}^-(2) \cdot t_{j+\frac{2}{x(2)}-1} \right) \leq 1 \Rightarrow t_{1+\frac{2}{x(2)}-1} + 0 + t_{3+\frac{2}{x(2)}-1} + 0 \leq 1 \Rightarrow t_2 + t_4 \leq 1$$

5.4.2.3 Contraintes système pour le DMP

Que ce soit des contraintes d'affectations d'opérations, de disjonction ou autres, les contraintes système se basent sur des données intrinsèques à la cellule de désassemblage et conditionnent les variables d'état indépendamment du produit considéré. Par conséquent, les formules (5.14), (5.15), (5.16) et (5.18) correspondant, respectivement, aux contraintes d'affectation, d'horizon, de précédence et de disjonction ne sont pas sujettes à reformulation.

Toutefois, un seul détail subsiste : les nombres n et m correspondent, désormais, aux places et transitions de tous les produits à traiter sur l'horizon considéré⁶⁷.

5.4.2.4 Contrainte de poursuite pour DMP (CPSx)

En utilisant la même technique d'indexation des variables de décision t_j , la formulation des contraintes de poursuite se présente comme suit :

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \left\{ \forall i \in P_{CPS}, \sum_{j=1}^{m(q)} \left(w_{ij}^- (q) \cdot t_{j+x'(q)-1} \right) + \sum_{j=1}^{m(q)} \left(w_{ij}^+ (q) \cdot t_{j+x'(q)-1} \right) \neq 1 \right. \quad (5.35)$$

Rappelons-le, P_{CPS} est l'ensemble des constituants qui ne peuvent être des constituants finaux. C'est un ensemble regroupant des constituants de plusieurs produits.

5.4.2.5 Contrainte de sous-assemblage imposé (CSIx)

Les sous-assemblages imposés de tous les produits à traiter sont regroupés dans l'ensemble P_{SAI} . La formule (5.36) permet de contraindre à franchir les transitions en amont de ces sous-assemblages et à bloquer celles en aval.

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \left\{ \forall i \in P_{SAI}, \sum_{j=1}^{m(q)} \left(w_{ij}^- (q) \cdot t_{j+x'(q)-1} \right) + \sum_{j=1}^{m(q)} \left(w_{ij}^+ (q) \cdot t_{j+x'(q)-1} \right) = 1 \right. \quad (5.36)$$

5.4.2.6 Contrainte d'évacuation pour le DMP (CEVx)

La formulation des contraintes d'évacuation pour le désassemblage multi-produits se fait par la même indexation de la variable de décision t_j afin de balayer les éléments de chacun des RPD2 considérés. La formule est la suivante :

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \left\{ \forall i \in P_{SAE}, \sum_{j=1}^{m(q)} \left(w_{ij}^- (q) \cdot t_{j+x'(q)-1} \right) = 0 \right. \quad (5.37)$$

P_{SAE} est l'ensemble des constituants « évacuables » sans désassemblage sur l'ensemble des produits à traiter.

⁶⁷ $n = \sum_{i=1}^m m(i)$ et $m = \sum_{i=1}^m m(i)$

5.4.2.7 Contrainte de désassemblage total pour le DMP (CDTx)

Bien que rare, ce type de contraintes permet parfois la mise au point des stations et des ressources matérielles dans le la cellule de désassemblage ne serait ce que dans la phase de simulation. La formulation linéaire reste la même que pour le cas mono–produit. La formule est la suivante :

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \left\{ \forall i \in \{1, \dots, n\} / \sum_{j=1}^{m(q)} w_{ij}^-(q) = 0 : \sum_{j=1}^{m(q)} \left(w_{ij}^+(q) \cdot t_{j+x(q)-1} \right) = 1 \right. \quad (5.38)$$

5.4.2.8 Contrainte de valorisation pour le DMP (CVAx)

La reformulation de la contrainte de valorisation pour le traitement d'un lot de produits ne nécessite que l'indexation des masses $S(q)$ respectives des produits traités. Le taux de valorisation est vérifié pour chaque produit et non pas sur l'ensemble du lot. Par ailleurs, comme le taux minimum de valorisation τ_{Th} est d'origine légale, il sera le même pour tous les produits. La formule correspondante est la suivante :

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \left\{ \sum_{j=1}^{m(q)} \sum_{i=1}^{n(q)} \left(w_{ij}(q) \cdot s_{i+x(q)-1} \cdot \tau_i \right) \cdot t_{j+x'(q)-1} \geq S(q) \cdot \tau_{Th} \right. \quad (5.39)$$

Remarque

Les contraintes de suspension des stations et les contraintes de disponibilité–opérateurs ne concernent pas le nombre et les différences de produits à traiter. Elles ne nécessitent, par conséquent, aucune reformulation.

5.4.3 La fonction objectif pour le DMP

Les contraintes produit, système et de contexte traitées précédemment nous fournissent le moyen de définir précisément la stratégie de désassemblage que l'on veut adopter. Dans un contexte industriel, l'objectif de cette stratégie est évidemment de faire le plus de bénéfices possible. Par conséquent, le plus simple est que la fonction objectif soit formulée uniquement autour des coûts et des revenus (comme précédemment).

La formulation mathématique de la fonction objectif (Formule (5.30)) adaptée au DMP est la suivante :

$$F_{obj} = \sum_{j=1}^{m(q)} \left(\left(t_{j+x'(q)-1} \cdot \sum_{i=1}^{n(q)} \left(w_{ij}(q) \cdot r_{i+x(q)-1} \right) \right) - c_{j+x'(q)-1} - \lambda \cdot T_{j+x'(q)-1} \right) + r_1 \quad (5.40)$$

$$\text{où } c_{j'} = \gamma \cdot \sum_{k=1}^{no} a'_{j'k} \cdot \delta_{j'k}$$

Les réalités environnementales actuelles nous obligent, pourtant, à considérer d'autres paramètres comme le taux minimum de valorisation et la quantité de VHU traités sur un horizon prédéfini. Cela signifie que plusieurs objectifs sont à prendre en compte. Dans un système de production comme celui du désassemblage, nous pouvons distinguer deux objectifs primordiaux aux yeux du chef de production : (1) la plus grande rentabilité possible ; (2) la bonne gestion des stocks en VHU. En effet, le stockage des VHU pose souvent beaucoup de problèmes en raisons de leur volume (cf. Figure 5.14). La plupart du temps, il est nécessaire de travailler en flux poussé. Par conséquent, maximiser le « nombre de VHU à désassembler » (NVD) sur un horizon déterminé est un critère de choix.



Figure 5.14 : Vue aérienne du parc VHU de R.A.S-Rouen⁶⁸

Pour ce qui est de la rentabilité, le problème majeur est le calcul du « vrai » coût de revient [Brodier94]. Nous avons choisi, par conséquent, d'estimer la rentabilité par l'optimisation de la Valeur Ajoutée Directe (VAD). En désassemblage, le VAD total d'un processus de désassemblage est la somme des bénéfices obtenus par la ventes des fractions cibles⁶⁹ moins le coûts du VHU acheté au propriétaire noté r_I (c'est le coût de consommations directe). Nous l'appellerons VA2D (Valeur Ajoutée Directe de Désassemblage).

Par ailleurs, nous distinguons aussi deux modes de production : production en surcharge et production en sous-charge. Le premier mode décrit, par exemple la situation où la demande du marché est particulièrement élevée. Un autre exemple est que le parc VHU soit saturé et, en plus, en attente de nouveaux VHU. Le deuxième mode décrit les situations inverses ; c'est-à-dire qu'il y a peu de VHU disponibles ou que la demande est faible. La production se faisant alors en flux tendu. Le Tableau 5.1 résume la stratégie que nous appliquons dans chacun de ces cas.

⁶⁸ Rouen Automobile Service : Entreprise de recyclage automobile (<http://www.r-a-s.fr/default.htm>).

⁶⁹ Les revenus des fractions cibles destinées à la mise en décharge seront retranchés à ceux des fractions cibles valorisées.

<i>Fonction objectif</i>	<i>Surcharge</i>	<i>Sous-charge</i>
Contraintes impératives	<ul style="list-style-type: none"> • Horizon HTO fixe (CHO) • Nombre minimum de VHU traités NVD_{Min} exigé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Horizon HTO fixe (CHO) • Nombre minimum de VHU traités NVD_{Min} exigé.
Fonction objectif Max (VA2D)	↗ Maximiser la valeur ajoutée directe de désassemblage VA2D	↗ Maximiser la valeur ajoutée directe de désassemblage VA2D
Contraintes impératives	<ul style="list-style-type: none"> • Horizon HTO fixe (CHO) • $VA2D_{Min}$ 	X
Fonction objectif Max (NVD)	↗ Maximiser le nombre NVD de VHU traités	

Tableau 5.1 : Contraintes et critères d'optimisation du désassemblage en mode de sous-charge et de surcharge

En cas de surcharge, il y a lieu de désassembler le maximum de VHU possibles. Cependant, il faut éviter une production à perte tant que c'est possible. En d'autres termes, la fonction objectif est le NVD et la contrainte est une valeur ajoutée directe minimale que nous notons : $VA2D_{Min}$. Pour maximiser le NVD, il est nécessaire de dénombrer le nombre de véhicules traités. Un véhicule traité est un véhicule sur lequel au moins une opération de désassemblage est exécutée⁷⁰.

Soit une variable binaire V_q qui est égale à 1 si le produit q est traité, à 0 sinon. Le nombre de VHU traités est alors la somme de V_q . Comment attribuer les valeurs 0 ou 1 rien qu'avec celles des t_j correspondantes ? Nous l'avons fait par l'ajout des deux contraintes indiquées dans la formule (5.41).

$$F_{Obj} = \sum_{q=1}^{np} V_q$$

telle que :

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \quad (5.41)$$

$$\begin{cases} V_q \leq \sum_{j=x'(q)}^{y'(q)} t_j \\ \forall j \in \{x'(q), \dots, y'(q)\} : V_q \geq t_j \end{cases}$$

Prenons un exemple :

Soit le produit d'indice 1 lié à trois variables de décision t_1 , t_2 et t_3 . La fonction objectif est :

$F_{Obj} = V_1$ telle que :

$$V_1 \leq t_1 + t_2 + t_3$$

$$V_1 \geq t_1 ; V_1 \geq t_2 ; V_1 \geq t_3.$$

On voit bien que si au moins une des t_j prend la valeur 1, alors V_1 aussi (deuxième contrainte). Dans le cas contraire V_1 prendra la valeur 0 grâce à la première contrainte.

⁷⁰ En réalité, il y a toujours plus d'une opération en raison de la contrainte de taux de valorisation minimum.

La contrainte de $VA2D_{\min}$ s'exprime comme suit :

$$\sum_{j=1}^{m(q)} \left(t_{j+x'(q)-1} \cdot \sum_{i=1}^{n(q)} (w_{ij}(q) \cdot r_{i+x(q)-1}) \right) + r_1 \geq VA2D_{\min} \quad (5.42)$$

En cas de sous-charge, l'objectif premier est de maximiser les revenus puisque le nombre de VHU à traiter sur un horizon fixe n est plus requis. La fonction objectif est :

$$F_{Obj} = \sum_{j=1}^{m(q)} \left(t_{j+x'(q)-1} \cdot \sum_{i=1}^{n(q)} (w_{ij}(q) \cdot r_{i+x(q)-1}) \right) + r_1 \quad (5.43)$$

Nous pouvons aussi envisager une deuxième politique dans une situation de surcharge. Il s'agit, évidemment, de maximiser les revenus (VA2D) comme pour le cas de sous-charge. En plus, un nombre minimum de VHU traités sera fixé. Nous le noterons NVD_{\min} . De cette façon, la rentabilité est assurée et la gestion du parc VHU sera meilleure. Dans ce cas, l'ajout d'un système de trois contraintes est nécessaire :

$$\forall q \in \{1, \dots, np\} : \begin{cases} V_q \leq \sum_{j=x'(q)}^{y'(q)} t_j \\ \forall j \in \{x'(q), \dots, y'(q)\} : V_q \geq t_j \\ \sum_{q=1}^{np} V_q \geq NVD_{\min} \end{cases} \quad (5.44)$$

Comme pour la formule (5.41), les deux premières contraintes servent à dénombrer les VHU traités et la troisième garantit le NVD_{\min} .

5.5 Conclusion

Nous avons montré, dans ce chapitre, que nous pouvons ramener le problème de sélection du processus de désassemblage à un problème d'optimisation sous contraintes. Les différentes fonctions objectif que nous avons présenté tout au long de ce chapitre montre la difficulté de définir une politique d'optimisation claire et précise. En effet, on veut souvent plusieurs choses à la fois, éventuellement sur des horizons de temps différents. Les critères à optimiser sont variés et diversement importants selon le contexte et les objectifs. Notre démarche organisée a porté ses fruits puisque nous avons réussi à étendre la formulation en PL au cas de systèmes de désassemblage multi-produits. Ceci est possible grâce à un choix d'indices. Les simulations de désassemblage d'un VHU sous Xpress-MP⁷¹ ont montré que le modèle de PL ainsi développé permettait de traiter un nombre satisfaisant de VHU.

⁷¹ Environnement de modélisation et de simulation de programmes linéaires de la société DashOptimization®.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans une volonté de rationaliser la démarche de conception des systèmes de désassemblage en général et d'optimisation des processus de désassemblage en particulier. Compte-tenu de l'intérêt grandissant des industriels et des législateurs pour la valorisation des produits manufacturés en fin de vie, nous avons contribué à travailler sur l'étude d'une méthode originale d'optimisation des processus de désassemblage, une méthode que nous avons voulu efficace et souple.

Notre point de départ a été l'étude des différentes approches de détermination des processus d'assemblage domaine où les travaux sont nombreux et bien établis. Nous nous sommes alors rendu compte de la complexité du désassemblage et des incertitudes techniques et économiques qui l'entourent. En nous basant sur nos recherches bibliographiques en la matière, nous avons procédé à l'analyse de la réversibilité des techniques d'assemblage et de désassemblage et à celle des travaux sur les systèmes physiques de désassemblage. Cela a permis d'intégrer une nouvelle approche de modélisation qui est de regrouper les modèles du produit, du système physique et du contexte de désassemblage. Les données de valorisation ont pu, ainsi, être prises en compte. Des connaissances préalables sur le domaine de valorisation ont été nécessaires.

Nous avons pu ainsi formuler une démarche organisée autour de trois grandes phases qui sont : l'analyse et les choix de conception, la modélisation du système et la génération de gammes de désassemblage, et enfin, la définition d'une stratégie globale d'optimisation des processus de désassemblage. Par le choix avantageux d'une représentation compacte et complète de l'ensemble de ces gammes et par l'adoption de la programmation linéaire comme méthode d'optimisation, nous sommes arrivés à exprimer les conditions d'optimisation par des contraintes linéaires. Le formalisme résultant s'est avéré souple et parfaitement évolutif par rapport aux souhaits des responsables des processus de désassemblage quant à la possibilité d'introduire des contraintes issues de leur expertise dans la recherche de la solution optimale.

Devant le nombre de considérations techniques, économiques et légales ajoutées à une grande variété de choix de conception que peut avoir un responsable de conception, nous avons présenté notre contribution sur ce sujet sous la forme d'une série de constats et finalement d'hypothèses à faire avant la modélisation du produit, du système physique et du contexte. Cette étape de modélisation a fait l'objet d'une nouvelle contribution qui traite des caractères de valorisation de tous les constituants susceptibles d'être produits. L'introduction de la notion de propagation nous a apporté une simplicité d'intégration de ces caractères dans les critères d'optimisation des processus de désassemblage.

Par ailleurs, le choix de la représentation en un seul réseau de Petri de la représentation des processus de désassemblage d'un produit nous a grandement facilité la transposition du problème posé à celui d'un problème classique d'optimisation. En effet, la relation bijective que nous avons instaurée entre les variables de décision du problème et les transitions du réseau de Petri a permis une expression facilitée des différentes contraintes.

Comme dans tout problème d'optimisation par contraintes, nous avons formulé treize types de contraintes pour permettre la sélection du système le plus performant relativement à plusieurs critères. Ces contraintes se réfèrent, selon le cas, aux caractéristiques propres au produit comme les procédés de solidarisation, aux considérations contextuelles comme le taux de valorisation minimum, et aux caractéristiques technologique et de production de systèmes physiques comme le nombre d'opérateurs et leur mobilité dans la cellule de désassemblage. Cette méthode est d'autant plus souple que la plupart de ces contraintes ne sont pas obligatoires. Certaines sont d'ailleurs antinomiques comme, par exemple, la récupération de sous-assemblages imposés et l'exigence d'un désassemblage total. Elles constituent un ensemble parmi lequel l'expert en désassemblage fait son choix en fonction du contexte, notamment l'état de la demande du marché des sous-ensembles et/ou en matière.

Concernant la fonction objectif, nous avons vu qu'il s'agissait d'un point particulièrement délicat. En effet, les différentes fonctions objectif que nous avons présentées indiquent la nécessité de définir plusieurs politiques d'optimisation. Toutefois, une seule politique semble incontestée, il s'agit de celle qui consiste à maximiser les bénéfices de valorisation. Cette certitude s'est estompée lorsque nous avons étendu la méthode proposée au désassemblage multi-produits. A ce sujet, l'une de nos avancées les plus significatives a été de rapporter notre formalisme d'optimisation au contexte réel du désassemblage qui est le multi-produit. Nous nous sommes rendu compte, notamment à travers nos échanges avec les acteurs de l'automobile, que le revenu n'est pas toujours la priorité. En effet, il arrive que des démolisseurs (de VHU par exemple) se retrouvent avec un stock de produits en fin de vie saturé. Il est alors nécessaire de traiter le maximum de ces produits quitte à réaliser des revenus moins conséquents. Dans ce cas, la fonction objectif est tout autre. Nous sommes arrivés à exprimer cet objectif sous une forme linéaire pour le modèle de programmation linéaire.

Cependant, le traitement d'un grand nombre de produits complexes provoque, extrêmement rapidement, une explosion combinatoire par la nature même de la programmation linéaire. Il est ainsi nécessaire, de décomposer le problème en ramenant le traitement d'un VHU à celui d'un produit plus générique (et donc plus complexe) où les composants élémentaires représenteront des macro-composants dans le VHU, macro-composants qui feront eux-mêmes l'objet d'un désassemblage à optimiser. Dans la pratique, les constructeurs automobiles comme PSA Peugeot-Citroën, avec qui nous avons eu l'occasion de travailler utilisent d'ailleurs cette démarche, la seule permettant de gérer la complexité du problème global. Enfin, ce qui nous conforte dans notre choix est que ce formalisme présente toutes les qualités requises pour une implémentation informatique rapide et facile. C'est l'objectif à long terme que nous avons essayé de garder à l'esprit tout au long de notre travail de recherche.

Par ailleurs, beaucoup des aspects techniques du désassemblage et des constats peuvent paraître évidents aux lecteurs. Nous avons tenu malgré tout à les détailler parce que nous voulions que ce travail puisse servir à la fois aux chercheurs mais aussi aux ingénieurs travaillant dans ce domaine.

En perspective de ce travail, nous voyons trois points importants :

- le développement d'un outil logiciel dédié pour l'optimisation des processus de désassemblage utilisant les bibliothèques de fonctions de Xpress-MP¹ pour la partie programmation linéaire,
- Intégrer au modèle de CYD-VHU la prise en compte des opérations alternatives pour pallier les échecs opératoires et les incertitudes sur l'état du produit,
- Effectuer des simulations sur des produits complexes et nécessitant éventuellement des procédés de désassemblage spéciaux. Le but est de confirmer la robustesse de l'approche CYD-VHU.

¹ Environnement de modélisation et de simulation de programmes linéaires de la société DashOptimization®.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Berchet C., Habchi G., Courtois A. (2000) Modélisation d'un Système d'Aide au Pilotage Industriel, le Groupement de Recherche pour la Productique (GRP), Annecy.
- [2] Boks C., Tempelman E., Stevels A. (1997) Assessment of Future Developments in Automated Disassembly and the Influence on End-of-Life Scenarios. Proceedings of the 4th International Seminar on Life Cycle Engineering, Berlin, Germany.
- [3] Boothroyd G., Dewhurst P. (1983) Design for assembly handbook. Department of Mechanical Engineering University of Massachusetts.
- [4] Borst P., Akkermans H. (1997) An ontology approach to product disassembly. Proceedings of the 10th european workshop on knowledge acquisition, modeling and management, pp. 33-48.
- [5] Bourjault A. (1984) Contribution à une approche méthodologique de l'assemblage automatisé : élaboration automatique des séquences opératoires. Thèse d'Etat, Université de Franche-Comté.
- [6] Brennan L., Gupta S. M. et Taleb K.N. (1994) Operations Planning Issues in an Assembly/Disassembly Environment, International Journal of Operations and Production Management, 14/9, 57-67.
- [7] Briand C. (1999) Vers une plus grande flexibilité du pilotage des systèmes de production, 2^{ème} congrès sur la modélisation des systèmes réactifs (MSR'99).
- [8] Büker U., Drüe S., Götze N., Hartmann G., Kalkreuter B., Stemmer R., Trapp R., (2001) Vision Based Control of an Autonomous Disassembly Station. Robotics and Autonomous Systems 35 (3-4), S. 179-189.
- [9] Chen S., Oliver J., Chou S. (1997) Parallel disassembly by onion peeling. Journal of Mechanical Design, vol. 119, n° 2, pp. 267-274.
- [10] Chevron D., David B., Binder Z., Descotes-Genon B., (2000) La conception du processus de désassemblage du produit selon le scénario de fin de vie, Journée PRIMECA, Chambéry.
- [11] Chevron D., (1999) Contribution à l'étude de la supervision d'une cellule de démontage. Thèse de Doctorat de l'INPG, Grenoble - France, 1999.
- [12] CHIRAG MODI B.E., (2002) Designing A Tool For Measuring Disassembly Efficiency, Master Thesis Presented to the Faculty of the graduate school of The University of Texas at El Paso.
- [13] Delchambre A., Wafflard A., Gaspart P. (1989) Knowledge-based assembly by disassembly planning. Proceedings of the International Conference on Expert Systems in Engineering Applications, China.
- [14] Dolgui A., Guschinsky N., Harrath Y., et Levin G. (2002) Une approche de programmation linéaire pour la conception des lignes de transfert. Journal Européen des Systèmes Automatisés, vol. 36, n°1, 2002, p. 11-33.

- [15] Dufrene L. (1991) Contribution à une méthodologie de conception des systèmes d'assemblage pour familles de produits. Thèse de l'Université de Franche-Comté.
- [16] Dutta D., Woo T. (1995) Algorithm for multiple disassembly and parallel assemblies. *Journal of Engineering for Industry*, vol. 117, n° 1, pp. 102-109.
- [17] Commission des Communautés Européennes, (1997) Proposition de directive du conseil relative aux véhicules hors d'usage, COM(97) 358 final - 97/0194 (SYN), Bruxelles.
- [18] Delanobre F. (2002), Directive VHU : la responsabilité du producteur réaffirmée, *Waste2B magazine* (www.waste2b.com).
- [19] Feldmann K., Meedt O. (1997) Determination and evaluation of the optimal end of life strategy for products based on simulation of disassembly and recycling. *Proceedings of the 4th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering*, Berlin, pp. 251-263.
- [20] Feldmann K. et al. (1999) The Green Design Advisor: A Tool for Design for Environment. *Journal of Electronics Manufacturing*, vol. 9, issue 1, pp. 17-28.
- [21] Gerner S., Binder Z., Descotes-Genon B. (2000) Generation of a disassembly scenario within a cad/cam tool, 2nd International Conference on Management, Control, Production and Logistics (MCPL), Grenoble (France).
- [22] Gerner S. (2001) Génération du processus de désassemblage automatisé à l'aide d'un logiciel de CFAO et évaluation du recyclage d'un produit en fin de vie. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [23] Gungor A., Gupta S. (1998) Disassembly sequence planning for complete disassembly in product recovery. *Proceedings of Northeast Decision Sciences Institute - 27th Annual Meeting*, Boston, Massachusetts, pp. 250-252.
- [24] Gungor A., Gupta S. M., (1999) Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery : a survey. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 36, issue 4, pp. 811-853.
- [25] Gungor A., Gupta S. (1998) Disassembly sequence planning for products with defective parts in product recovery. *Computers and Industrial Engineering*, vol. 35(1-2), pp. 161-164.
- [26] Gupta S.M., McLean C. (1996) Disassembly of products. *Computer & Industrial Engineering*, vol. 31, issue 1-2, pp. 225-228.
- [27] Surendra M. Gupta et Pitipong Veerakamolmal, (1996) Disassembly of Products – Final Report, NIST Systems Integration for Manufacturing Application Program - Grant No.60NANB5D0112.
- [28] Henrioud J.M. (1989) Contribution à la conceptualisation de l'assemblage automatisé : nouvelle approche en vue de la détermination des processus d'assemblage. Thèse d'Etat, Université de Franche-Comté.
- [29] Hohm K., Müller-Hofstede H., Tolle H., (2000) Robot assisted disassembly of electronic devices. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [30] Homem De Mello, L.S., et Sanderson, A. (1990). AND/OR graph representation of assembly plans. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, N°6, PP188-199.

- [31] Ishii K., Eubanks C.F., et Di Marco P. (1994) Design for Product Retirement and Material Life-Cycle, *Materials & Design*, Vol.15(4), 225-233.
- [32] Ishii, K. et Lee, B. (1996) Reverse Fishbone Diagram: A Tool in Aid of Design for Product Retirement, *ASME Design Technical Conference*, Aug., 1996, Irvine, CA. ASME, Paper 96-DETC/DFM-1272.
- [33] Johnson M., Wang M. (1995) Planning product disassembly for material recovery opportunities. *International Journal of Production Research*, vol. 33, n° 11, pp. 3119-3142.
- [34] Johnson M., Wang M. (1998) Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse. *International Journal of Production Research*, vol. 36, n° 12, pp. 3227-3252.
- [35] Jovane, Altino (1993) A key issue in product life cycle : disassembly. *Annals of the CIRP*, vol. 42, issue 2, pp. 651-658.
- [36] Kanehara T., Suzuki T. Inaba A., et Okuma S. (1997) On algebraic and graph structural properties of assembly Petri net, in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Yokohama, Japon, pp. 2286-2293.
- [37] Kang J.-G., Lee D.-H. et Xirouchakis P. (2002) Disassembly Sequencing With Imprecise Data : A Case Study, *Proceedings of 7th Annual International Conference - Busan*, Korea, pp. 534-537.
- [38] Krikke H.R. (1998) Recovery strategies and reverse logistics network design. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- [39] Krikke H.R., Van Harten A. et Schuur P.C. (1999) Business case Roteb: recovery strategies for monitors, *Computers and Industrial Engineering*, special issue on ecologically conscious manufacturing, 36, pp. 739-757.
- [40] Landrieu A. (1999) Coordination de la chaîne logistique dans le recyclage des produits manufacturés. *Poster Doctoriales 98*, Dolomieu (Isère), France, 22-27 Novembre 1998.
- [41] Landrieu A. (2001) Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie - Tournées de véhicules avec contraintes, Thèse de Docteur de l'INPG/France.
- [42] Laperrière L., Elmaraghy H. (1992) Planning of products assembly and disassembly. *Annals of the CIRP*, vol. 41, issue 1, pp. 5-9.
- [43] Lee Y.Q., Kumana S. (1992) Individual and group disassembly sequence generation through freedom and interference spaces. *Journal of Design and Manufacturing* , vol. 2, pp. 143-154.
- [44] Liu Y., Hohm K. (1998) Discrete Hidden Markov Model based Learning Controller for Robotic Disassembly. *International ICSC/IFAC Symposium on Neural Computation (NC'98)*, Vienna, Austria.
- [45] Mascle C., Figour J. (1990) Methodological approach of sequences determination using the disassembly method. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Integrated Manufacturing*, IEEE Robotics and Automation Society, New-York, pp. 483-490.

- [46] Mathieux F. (2002) Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit, Thèse de Doctorat, Institut Conception, Mécanique et Environnement, ENSAM Chambéry, 288p.
- [47] Mattikalli R., Khosla P. K., Repetto B. et Baraff D. (1993) Stability of Assemblies, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Yokohama, Japan pages 652-661.
- [48] Takeshi Murayama T., Oba F., Abe S., Yamamichi Y. (2001) Disassembly Sequence Generation using Information Entropy and Heuristics for Component Replacement, The 4th International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP01), Fukuoka, Japan.
- [49] Navinchandra D. (1991) Design for Environmentability, Proc. of the 1991 ASME Design Technical Conf., DE-Vol.31, 119-125.
- [50] Oliver P. (1986) Analyse et synthèse des systèmes d'assemblage automatisés. Thèse de doctorat de l'Université de Franche-Comté.
- [51] Perrard C., Magerand E., Bourjault A. (1996) Extraction by disassembling of a single part of a mechanical system for its maintenance. Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Hawaii, 18-21.
- [52] Personne M. (1998) Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI : évaluation des performances environnementales, Thèse soutenue à l'INSA de Lyon, 98 ISAL 0110.
- [53] Reap J. et Bras B. (2002) Design For Disassembly And The Value Of Robotic Semi-Destructive Disassembly, Proceedings of DETC'02 ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Montreal, Canada.
- [54] Rose C.M. (2000) Design for environment: a method for formulating product end-of-life strategies, PhD Thesis of Stanford University.
- [55] Scholz-Reiter B., Scharke H., Hucht A. (1999) Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors, Robotics and Computer Integrated Manufacturing n°15, pp. 247-255.
- [56] Srinivasan H., Shyamsundar N., Gadh R. (1997) A framework for virtual disassembly analysis. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 8, issue 4, pp. 277-295.
- [57] Srinivasan, M., Wu, T., et Sheng, P. (1995) Development of a scoring index for the evaluation of environmental factors in machining processes: Part 1 - Health hazards score formation. Transaction of NAMRI/SME, 23.
- [58] Svoboda S. (1995) Note on Life Cycle Analysis, University of Michigan Corporate Environmental Management Program (CEMP), LCA Note (9).
- [59] Tonnelier P. (2002) Proposition d'une démarche d'intégration d'une nouvelle contrainte en entreprise : cas de la valorisation des véhicules en fin de vie chez PSA Peugeot-Citroën. Thèse ENSAM-Paris.
- [60] Touzanne F. (2002) Contribution à la méthode de conception des systèmes de désassemblage des produits fin de vie, Thèse de l'Université de Franche-comté.

- [61] Uhlmann E., Spur G., Elbing F. (2001) Development of flexible automatic disassembly processes and cleaning technologies for the recycling of consumer goods, Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Assembly Park, Fukuoka, Japan.
- [62] Wang M., Johnson M. (1994) Design for disassembly and recyclability : a concurrent engineering approach. Proceedings of the 10th ISPE/IFAC International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, pp. 436-441.
- [63] Weigl A. (1994) Requirements for robot assisted disassembly of not appropriately designed electronic products : lessons from first studies. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (ISEE '94), San Francisco, USA.
- [64] Weigl A., Tolle H. and Micheli A. (1996) An Approach to Detect and Overcome Blocking Situations in Robotic Disassembly. In C. Bonivento, C. Melchiorri and H. Tolle, editors, Advances in Robotics - The ERNET Perspective, Darmstadt, Germany, World Scientific (RST17/96) pp. 231-240.
- [65] Weigl A., Hohm K. and Tolle H. (1996) A Flexible Tactile Grasping Strategy for Autonomous Robotic Disassembly. In Robotics towards 2000 - Proceedings of the 27th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Milan, Italy, 1996 (RST21/96), pp. 375-380.
- [66] Wilson, R.H. (1995) Minimizing user queries in interactive assembly planning, IEEE Transactions on Robotics and Automation, volume 11 (1995), number 2 pp. 308-312.
- [67] Yarwood A.J., Aagan D.P. (1998) Design for the Environment ToolKit: A Competitive Edge for the Future, Minnesota Office of Environmental Assistance / Minnesota Technical Assistance Program (MnTAP).
- [68] Yin B. (1995) Contribution au pilotage réactif des systèmes flexibles d'assemblage : méthode d'équilibrage dynamique, Thèse de l'Université de Franche-comté.
- [69] Zhang H.C., Kuo T.C., Huang S.H. (1996) Recycling Model of End-of-Life Product. Proceedings of Japan-U.S.A. Symposium on flexible Automation, pp. 1127-1130.
- [70] Zhang H.C., Kuo T.C. (1996) A Graph-Based Approach to Disassembly Model for End-of-Life Product Recycling. Proceedings of 1996 IEEE/CPMT International Electronics Technology Symposium, pp. 255-261.
- [71] Zussman, E. et M. C. Zhou (2000) Design and Implementation of an Adaptive Planner for Disassembly Processes, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 2, pp. 171-179.
- [72] Bates, E. et al. (1999) Development of a Life Cycle Assessment Screening Model. Proc. Of the Amer. Electr. Surface Finishers, Orlando, FL, Jan.
- [73] Document PSA : Rapport environnement PSA 1999.
<http://www.psa.fr/enviro/environnement/fr/menu.html>
- [74] Ferguson, N., Browne J. (2001) Issues in end-of-life product recovery and reverse logistics. Production Planning & Control, Taylor & Francis Journal, Volume 12, Number 5 / July 1, 2001, pp 534 – 547.

- [75] Moore K., Gungor A., Gupta S. (1998) Disassembly Petri net generation in the presence of XOR precedence relationships. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Diego, California, pp. 13-18.
- [76] Lambert, A.J.D. (1999) Linear programming in disassembly/clustering sequence generation. Computers & Industrial Engineering, vol. 36, issue 4, pp. 723-738.
- [77] Lambert, A.J.D. (2003) Optimum Disassembly Sequence with Sequence-Dependent Disassembly Costs. The 5th International. Symposium on Assembly and Task, Planning (ISATP03), Besançon, France.
- [78] Addouche S., Perrard C. and Henrioud J.M. (2002) Linear Programming Model to Find the Optimal Disassembly Sequence. 3rd Cirp international Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Italy (ICME02).
- [79] Addouche S., Perrard C. and Henrioud J.M. (2003) Linear Programming-Based Qualitative Evaluation for Micro-Assembly Planning. The 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR03), University of Coimbra, Portugal.
- [80] Addouche S., Perrard C. and Henrioud J.M. (2003) Integration of Reassembly Operations in Disassembly Processes Planning. IFAC Workshop Intelligent Assembly and Disassembly (IAD'03), Bucharest, Romania.
- [81] Addouche S., Perrard C. and Henrioud J.M., (2003) Disassembly Workshop Model Integration For Disassembly Planning. The 5th International. Symposium on Assembly and Task, Planning (ISATP03), Besançon, France.
- [82] Addouche S., Dafaoui EM. (2003) Modélisation et simulation des processus de désassemblage. 5^{ème} Congrès International de Génie-Industriel (GI2003), Université de Laval.
- [83] S. Pister (2001) Démontage / démantèlement de VHUs - Etude d'une cellule de démontage type, Laboratoire d'Automatique de Besançon - UMR CNRS 6596 - France
- [84] V. Giard (2003) Gestion de la production et des flux. Editions ECONOMICA.
- [85] Guéret C., Prins C., Sevaux M. (2003) Programmation Linéaire – 65 problèmes modélisés et résolus avec l'outil Visual Xpress, Éditions Eyrolles.

LEXIQUE

Compostage ————— **Composting**

Le compostage utilise la fermentation des ordures ménagères pour préparer un compost utilisable en agriculture (comme engrais). Dans ce cas, il faut d'abord trier les déchets, puis les broyer au préalable. Le compostage permet donc de réduire la quantité de déchets mis en décharge, et de produire un excellent engrais. D'une grande souplesse d'utilisation, il peut se faire avec peu ou beaucoup de déchets.

Centre de tri ————— **Waste sorting facility**

Unité de tri spécifique des déchets après collecte.

Certification ISO 14001 ————— **ISO 14001**

La norme ISO 14001 définit le niveau d'exigence pour la protection de l'environnement dans un cadre de référence international. Elle traduit la recherche d'une maîtrise des impacts environnementaux de l'activité et certifie la validité du système de management environnemental mis en œuvre.

Compost ————— **Compost**

Le compost est un mélange de déchets organiques, de matières calcaires, de terre, etc. Après fermentation, il fournit un excellent engrais.

Conception pour le Désassemblage (DFD) ————— **Design For Disassembly**

La conception pour le désassemblage se concentre sur deux phases du cycle de vie du produit dans lequel le désassemblage prend place : la maintenance du produit durant son cycle d'utilisation, où il est fonctionnel, et son démantèlement en fin de vie.

Constituant ————— **Constituent**

Désigne un composant élémentaire, un sous-ensemble ou encore le produit fini.

Contraintes Opératoires (CO) ————— **Operative Constraints**

Les contraintes opératoires conditionnent la possibilité de réaliser une opération de désassemblage pour des raisons géométriques et de stabilité (morphologiques) et des raisons matérielles.

Contraintes Stratégiques (CS) ————— **Strategic Constraints**

Les contraintes stratégiques traduisent l'intention explicite de l'expert de privilégier les gammes respectant une stratégie de désassemblage imposée au préalable.

Déchet ultime ————— **Final waste**

Déchet résultant ou non d'un traitement, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment. Il est donc en bout de chaîne de tri, de recyclage, de traitement et il est destiné au stockage ou à la mise au rebut.

Fraction cible ————— **Target cible**

Composants ou sous-ensembles de composants (selon le modèle du produit) considérés comme la finalité d'un désassemblage.

Gamme de désassemblage ————— ***Disassembly plan***

Une gamme de désassemblage d'un produit est une description du processus permettant d'obtenir de l'ensemble des composants élémentaires ou fractions cibles.

Liaison ————— ***Liaison***

Il existe une liaison (x,y) entre deux composants x et y lorsqu'il y a au moins une liaison mécanique entre eux.

Logistique Inverse ————— ***Reverse Logistic***

la logistique inverse peut se définir comme le mouvement des produits du consommateur vers le producteur à travers une chaîne de distribution. Elle répond à la nécessité de retirer du service les produits après usage et de les traiter en les détruisant, en les transformant ou en les recyclant, dans le but de réduire les coûts et en valorisant les produits récupérés.

Mâchefer ————— ***Bottom ash / clinker***

Sous-produits de l'incinération des déchets, le mâchefer constitue la partie minérale des résidus. Une fois déferrailé et calibré, c'est un matériau utilisable dans un grand nombre de travaux public nécessitant d'importants remblais. Son prix très compétitif et la limitation du recours aux granulats naturels illustrent parfaitement l'intérêt de produits issus du recyclage.

Opération de désassemblage ————— ***Disassembly Operation***

Chaque transformation du produit intermédiaire visant à se rapprocher du produit totalement désassemblé est dite opération de désassemblage.

Opération Générique de désassemblage ————— ***Disassembly Generic Operation***

Une opération générique de désassemblage traduit l'extraction d'un composant du produit. Ainsi, pour un modèle du produit de n composants, (n-1) opérations génériques sont nécessaires pour un désassemblage total.

Recommandation DFD (G-DFD) ————— ***DFD Guidelines***

Les Recommandations de Conception pour le Désassemblage « R-DFD » (*DFD-G pour Design For Disassembly Guidelines*) sont, en fait, des préconisations de conception qui ont principalement pour but de réduire les coûts au désassemblage. Ces préconisations sont destinées bien entendu aux concepteurs qui ne sont cependant pas contraints à les respecter en totalité. Il y a souvent lieu, en effet, d'établir un compromis entre les coûts, la complexité de fabrication (prix de revient du produit) et les coûts de désassemblage de ce produit en fin de vie.

Sécurité du Produit ————— ***Product Stewardship***

Cette notion concerne les risques liés au produit depuis sa conception, sa fabrication, sa distribution, son utilisation par le client, jusqu'à sa destruction et/ou sa récupération pour un recyclage éventuel.

Solidarisation ————— ***Attachment***

Une solidarisation (ou attache) est l'ensemble des éléments du produit autres que les composants qui contribuent à garantir la pérennité d'au moins une liaison (vis, rivets, colles, énergie, etc.).

Système de management environnemental ————— ***Environmental management system***

Le système de management environnemental (SME) est l'ensemble des structures opérationnelles, des procédures et des ressources mise en place pour évaluer, mettre en œuvre et suivre une politique de gestion par le risque des incidences environnementales de l'entreprise.

Tâche ————— ***Task***

Une tâche correspond à une ou plusieurs opérations de désassemblage. L'opération est vue du produit et la tâche est vue de l'équipement.

Valorisation ————— ***Recovery***

La valorisation consiste en le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets ou des produits manufacturés en fin de vie, des pièces, des matériaux réutilisables ou de l'énergie.

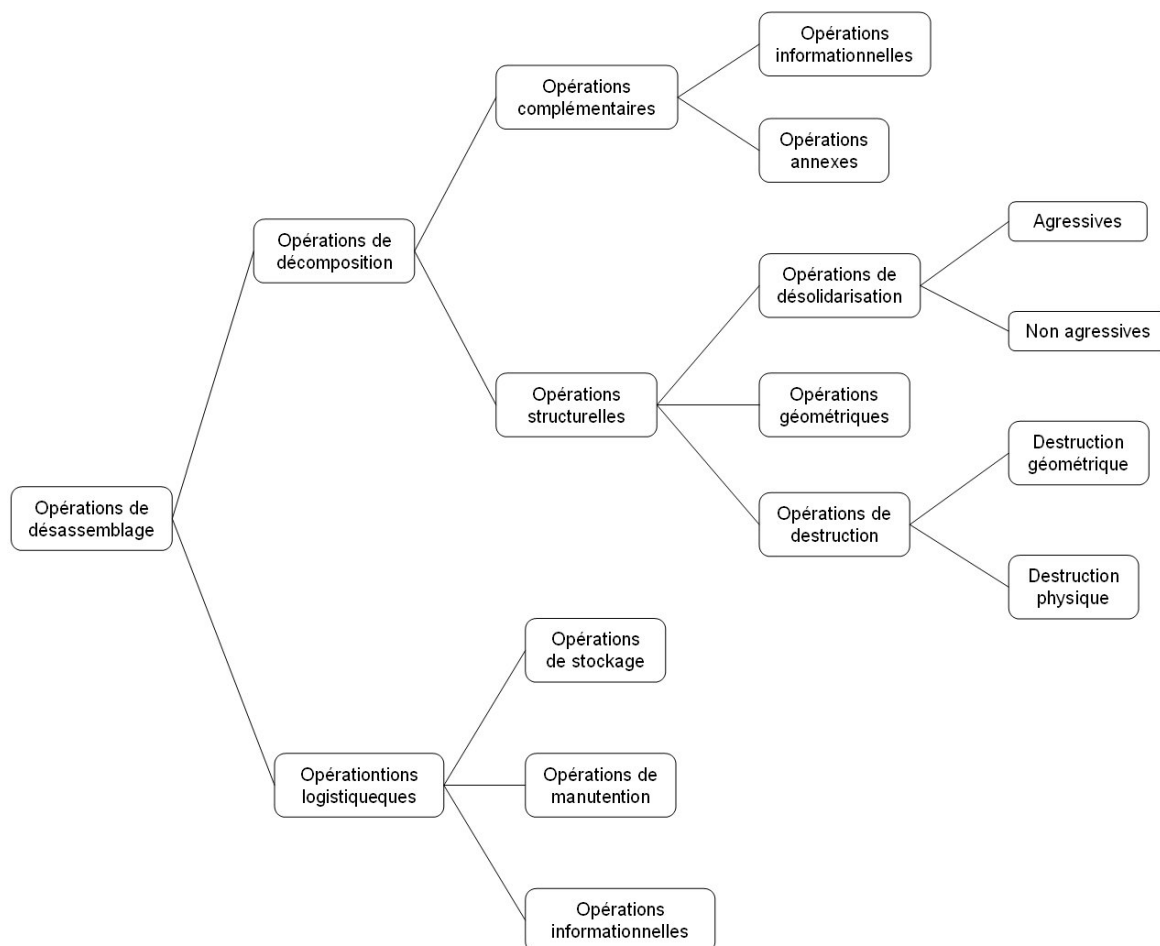
Véhicule Hors d'usage (VHU) ————— ***End-of-Life Vehicle (ELV)***

Un véhicule hors d'usage (ou en fin de vie) est un véhicule hors d'état de circuler dans des conditions normales de sécurité ou qui ne répond plus aux règles de circulation en vigueur. Selon la Commission des Communautés Européennes, le véhicule hors d'usage est tout véhicule qui constitue un déchet au sens de l'article premier a) de la directive 75/442/CE.

ANNEXE 1 :

TYPOLOGIE DES OPERATIONS DE DESASSEMBLAGE SELON *F. TOUZANNE* [60]

La typologie des opérations de désassemblage présentée dans cette annexe est adaptée de la typologie proposée par J.M. Henrioud [Henrioud89] dans le cadre de l'assemblage. Il s'agit des opérations qui peuvent être rencontrées au sein d'un processus de désassemblage. Cette typologie proposée par F. Touzanne [Touzanne02] ne s'intéresse qu'aux opérations concernant directement les constituants du produit à désassembler (Figure ci-dessous). Cela permet d'exclure toutes les opérations qui ne concernent que le système de production (par exemple les réglages, les changements d'outillage, etc). Le désassemblage d'un produit fini peut être défini comme la modification et la suppression progressives de relations qui définissent la situation des constituants au sein d'un produit. Les plus significatives de ces relations sont celles qui impliquent une liaison mécanique entre les composants qu'elles concernent. La modification ou la suppression d'une liaison est réalisée par une *opération géométrique*.



Typologie des opérations de désassemblage d'après F. Touzanne

Ces liaisons sont souvent renforcées par une énergie de cohésion issue d'un procédé de solidarisation. Celui-ci requiert soit un apport d'éléments spécifiques (vis, rivets, colle, etc), soit une déformation des composants concernés (insertion à force, bouterollage, etc), soit les deux à la fois. Cet apport d'énergie réalise une solidarisation (ou *liaison physique*) qui vient se superposer à la liaison géométrique. La suppression d'une solidarisation est réalisée par une **opération de désolidarisation**. Suivant le procédé de désolidarisation utilisé, une opération de désolidarisation peut être agressive ou non. Une opération de désolidarisation est **agressive** si les composants concernés par la solidarisation sont altérés ou dégradés. Lorsqu'ils ne sont pas dégradés, l'opération est non agressive.

Les opérations géométriques et les opérations de désolidarisation s'intéressent directement aux **constituants** et aux relations entre eux. Ces opérations sont donc regroupées sous l'appellation : « **opérations structurelles** ». Lorsque c'est profitable ou obligatoire, le désassemblage autorise la destruction de constituants (procédé de solidarisation irréversible). Parmi les opérations structurelles, en plus des opérations géométriques et de désolidarisation, nous trouvons donc les opérations de destruction. Une **opération de destruction** vise à changer la structure d'un produit ou d'un sous-ensemble en modifiant les relations de contact entre certains constituants. Deux types de destruction sont à distinguer :

- la **destruction physique**. L'objectif est de casser un composant en au moins deux parties pour autoriser ensuite la réalisation d'opérations de désunion ou de désolidarisation. Dans ce cas, de nouvelles relations de contact sont créées.
- la **destruction géométrique**. L'objectif est d'agir sur la forme géométrique d'un constituant en le déformant pour permettre la poursuite du désassemblage sans nécessairement extraire ce constituant. Dans ce cas, les relations de contact existantes sont modifiées.

En plus des opérations structurelles, une autre catégorie d'opérations est susceptible d'intervenir : les opérations complémentaires. Les **opérations complémentaires** sont des opérations destinées à modifier l'état du produit sans en modifier la structure. Ces opérations peuvent être décomposées en deux sous-classes :

- les **opérations annexes**. Ces opérations modifient l'état du produit par la réalisation d'un caractère annexe qui peut être un nettoyage (réalisé pour faciliter le désassemblage), un marquage, etc.
- les **opérations informationnelles**. Ces opérations modifient l'état du produit par l'apport d'informations le concernant. Il s'agit donc essentiellement d'opérations de contrôle (les informations sont relatives à l'état du produit).

Les opérations définies jusqu'ici, sont intrinsèques au produit fini et ont rapport avec sa décomposition. Ces opérations sont donc regroupées sous l'appellation « **opérations de décomposition** ». Ces opérations doivent être réalisées d'une façon ou d'une autre et conditionnent la définition du processus. La réalisation de ces opérations se fait dans un lieu bien défini. Il est alors nécessaire de définir un nouvel ensemble d'opérations : les opérations logistiques. Une **opération logistique** ne modifie pas l'état structurel du produit ou des constituant considéré. De plus, contrairement aux opérations de décomposition, les opérations logistiques dépendent entièrement de l'architecture du système de désassemblage retenu.

Les opérations logistiques sont décomposables en :

- **opérations de manutention** (positionnelles et de transfert). Ces opérations réalisent les transferts de produits ou de constituants d'un lieu à un autre (changement de poste de travail, changement de cellule, changement de processus) ou les positionnements des constituants qui doivent être désassemblés. Ces opérations peuvent être manuelles, effectuées par convoyeur, par chariot, par levage, ...
- **opérations de stockage ou de déstockage**. Ces opérations visent à stocker les fractions cibles en sortie, à stocker temporairement des constituants intermédiaires, à déstocker les constituants intermédiaires.
- **opérations informationnelles**. Elles permettent de vérifier la bonne réalisation des opérations de manutention (détection de la présence de constituants par exemple), de stockage ou de décomposition. Elles permettent, en outre, d'évaluer la faisabilité des opérations à réaliser. Ces opérations permettent alors l'aiguillage des constituants sur le processus.

ANNEXE 2 :

RECAPITULATIF DU MODELE DE CYD-VHU

Le modèle des processus de désassemblage en vue d'optimisation est défini par un 15-uplet :

$$Z_2=(Z, \mathcal{D}, \Delta, S, O, T_{HTO}, A_O, A_T, D_{DS}, D_{TS}, CPS, SAI, SAE, CSS, CDO)$$

où :

- **Z** est un réseau de Petri (P,T,Pre,Post) ;
- **\mathcal{D}** est l'ensemble des descripteurs de valorisation pour le **n** constituants (les places) de Z ;
- **Δ** est la fonction « *durée de franchissement* » notée $\Delta : T \times O \rightarrow \mathbb{N}$ qui, à chaque transition, fait correspondre un entier naturel représentant le temps opératoire correspondant à la tâche considérée en fonction de l'opérateur qui l'exécute ;
- **S** est l'ensemble des *stations de désassemblage* prévues dans la cellule ;
- **O** est l'ensemble des *opérateurs humains* présents dans chaque cellule de désassemblage ;
- **T_{HTO}** est l'horizon de travail en amont duquel l'optimisation du désassemblage s'effectue ;
- **A_O** est la fonction « *affectabilité des opérateurs* » $A_O : S \times O \rightarrow \{0,1\}$ qui, à chaque couple : (station g de l'ensemble S / opérateur k de l'ensemble O), fait correspondre une valeur binaire **A'_{gk}** quand l'opérateur considéré peut être affecté à la station indiquée ;
- **A_T** est la fonction « *affectabilité des opérations* » $A_T : T \times S \rightarrow \{0,1\}$ qui, à chaque couple : (transition j de l'ensemble T / station g de l'ensemble S), fait correspondre une valeur binaire **A_{jg}** indiquant la possibilité d'exécuter la tâches de désassemblage considérées dans la station indiquée compte tenu – entre autres – des ressources matérielles et humaines affectées à cette station ;
- **D_{DS}** est la fonction « *durée de déplacement inter-stations* » $D_{DS} : S \times S \rightarrow \mathbb{N}$ qui, à chaque couple : (station g / station h) de l'ensemble S, fait correspondre un entier naturel **d'_{gh}** représentant le temps moyen de déplacement d'un opérateur de la première station vers la deuxième ;
- **CPS** est l'ensemble des constituants qui ne peuvent être gardés tels quels ;
- **SAI** est l'ensemble des sous-assemblages imposés ;
- **SAE** est l'ensemble des sous-assemblages évacuables ;
- **CSS** est l'ensemble des stations mises hors service pour panne ou pour des raisons de simulation ;
- **CSP** est l'ensemble des couples (j,g) pour lesquels l'opération j ne peut être exécutée dans la station g temporairement ;
- **CDO** est l'ensemble des opérateurs mis en indisponibilité.

ANNEXE 3 :

LISTE DES HYPOTHESES

- | | |
|--------------------|---|
| Hyp. : 4.1 | En cas de risque de détachement d'un constituant d'un autre après suppression d'un caractère de solidarisation, celui-ci lui sera agrégé pour former un sous-assemblage indémontable. |
| Hyp. : 4.2 | En cas de désassemblage non-monotone impliqué par un ou plusieurs caractères de solidarisation, ceux-ci seront assimilés, selon le cas ,à des composants élémentaires. Certains cas nécessiteront la modélisation à la fois de la solidarisation et des composants élémentaires de celle-ci. |
| Hyp. : 4.3 | Pour des configurations particulières de désolidarisation, certains composants liés à la fonction de solidarisation seront occultés dans le modèle du produit. |
| Hyp. : 4.4 | Toute solidarisation multiple sera divisée en autant de solidarisations dérivées nécessaires qui n'engendrent pas de difficultés supplémentaires. |
| Hyp. : 4.5 | Lors de la modélisation des processus de désassemblage par les réseaux de Petri, les caractères complémentaires seront représentés par des places au même titre que les composants élémentaires. Les revenus qui seront affectés aux places représenteront, dans le cas de caractères complémentaires, des coûts de traitement. De plus, ils pourront être désignés comme étant des » fractions cibles «lorsque leur traitement est nécessaire. |
| Hyp. : 4.6 | Nous supposons que pour chaque caractère non géométriques, il existe une ou plusieurs opérations alternatives qui seront intégrées dans le processus de désassemblage. |
| Hyp. : 4.7 | Les temps de reconfiguration des ressources matérielles au sein de ces stations de désassemblage seront compris dans les temps opératoires. |
| Hyp. : 4.8 | Au sein d'une même station de désassemblage, les opérateurs peuvent se déplacer librement, le plus souvent autour des produits ou des constituants arrivés dans la station. |
| Hyp. : 4.9 | Au sein d'une même station de désassemblage, chaque opérateur peut exécuter une seule opération à la fois mais simultanément aux autres. |
| Hyp. : 4.10 | Des temps opératoires spécifiques seront affectés à chaque opérateur pour les opérations qui lui sont attribuées. |
| Hyp. : 4.11 | Plusieurs stations sont capables d'exécuter une opération de désassemblage ; une seule de ces stations sera effectivement sélectionnée pour le faire. |
| Hyp. : 4.12 | Les ressources de transfert et d'évacuation sont considérées autonomes, toujours disponibles et opérationnelles. |
| Hyp. : 4.13 | Le nombre de stations et le nombre d'opérateurs dont est pourvue la cellule de désassemblage sont prédéterminés. |
| Hyp. : 4.14 | Chaque composant élémentaire est considéré ,en terme de valorisation, comme une entité homogène de matière pour laquelle est défini préalablement un taux de valorisation prévisionnel. |

- Hyp. : 4.15** | Chaque constituant d'un produit devra faire l'objet d'une analyse au cas par cas par un expert pour déterminer sa destination fin de vie. Ce constituant devra garder cette destination fin de vie tout au long de notre démarche organisée de conception.
- Hyp. : 4.16** | Chaque fois qu'il est possible, les constituants homogènes en terme de valorisation devront être assimilés à des composants élémentaires dès la construction du modèle du produit ou par le biais des contraintes stratégiques lors de la génération des gammes et de l'optimisation du désassemblage.
- Hyp. : 4.17** | A partir de l'analyse de destination fin de vie, chaque constituant d'un produit devra faire référence à un taux de valorisation matière ou énergétique et à un revenu qui resteront valables tout au long de la démarche organisée de conception.
- Hyp. : 4.18** | Il est nécessaire d'identifier les constituants qui doivent faire l'objet de traitement spécifiques au niveau de la mise en place de la stratégie de génération des gammes de désassemblage.
- Hyp. : 4.19** | Avant chaque optimisation du désassemblage, la liste des fractions cibles à obtenir doit être mise à jour en fonction des données du marché.
- Hyp. : 4.20** | Considérant les ressources matérielles comme des éléments intégrants de la cellule de désassemblage, leurs coûts d'exploitation seront considérés forfaitaires et estimés à l'heure.
- Hyp. : 4.21** | Considérant les opérateurs humains comme des ressources partageables sur un atelier où résident plusieurs cellules de désassemblage, seul le temps de travail dans chaque cellule entrera dans l'estimation des coûts de démantèlement d'un produit.

ANNEXE 4 :

NOTES SUR LA PROGRAMMATION LINEAIRE

La programmation linéaire relève des mathématiques de la Recherche Opérationnelle. Les modèles de programmation linéaire permettent d'aborder un grand nombre de problèmes d'optimisation en apparence très différents, dans des contextes très divers. En effet, sur le plan mathématique, un problème posé peut toujours se ramener à celui de l'optimisation d'une fonction sous la forme d'une combinaison linéaire de variables (dites variables de décision), en respectant un ensemble de contraintes linéaires, fonctions des mêmes variables, lesquelles doivent être positives ou nulles.

Dans la forme, dite **canonique**, le problème s'écrit :

- $\text{Max } \sum_{j=1}^n c_j x_j$
- sous m contraintes : $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$, pour $i = 1, \dots, m$
- avec $x_j \geq 0$, pour $j = 1, \dots, n$

Le problème peut être posé également sous une **forme dite standard** qui ne diffère de la forme canonique que par la transformation des inégalités en égalités. Ceci n'est possible qu'au prix de la création d'une variable d'écart x_{n+i} , par contrainte i . Le coefficient a_{ij} affecté à cette variable d'écart est nul dans toutes les contraintes, sauf celle concernée par cette variable. Dans ce dernier cas, a_{ij} est égal à $+1$ si l'inégalité est du type «inférieur ou égal», et à -1 dans le cas contraire.

Au problème posé, appelé **problème primal** correspond un **problème dual** dans lequel :

- la fonction à minimiser (si le problème primal est un problème de maximum) est une combinaison linéaire des b_i ,
- cet optimum est lié à un ensemble de contraintes qui sont aussi des fonctions linéaires des a_{ij} , mais bornées cette fois par les c_j .

Le tableau ci-dessous reprend les différentes formulations d'un problème en programmation linéaire.

		Problème primal		Problème dual	
		Notation		notation	
		matricielle	en sommation	en sommation	matricielle
Forme canonique	fonction à optimiser	Max x_0 , avec: $x_0 = cx$	Max x_0 , avec: $x_0 = \sum_{j=1}^n c_j x_j$	Min y_0 , avec: $y_0 = \sum_{i=1}^m b_i y_i$	Min y_0 , avec: $y_0 = yb$
	sous contraintes	<ul style="list-style-type: none"> $x \geq 0$ $Ax \leq b$ avec: A; x; b (m, n) (n, 1)(m, 1) 	<ul style="list-style-type: none"> $x_j \geq 0$, pour $j = 1, \dots, n$ $\sum_{j=1}^n x_j a_{ij} \leq b_i$, pour $i = 1, \dots, m$ 	<ul style="list-style-type: none"> $y_i \geq 0$, pour $i = 1, \dots, m$ $\sum_{i=1}^m y_i a_{ij} \leq c_j$, pour $j = 1, \dots, n$ 	<ul style="list-style-type: none"> $y \geq 0$ $yA \leq c$ avec: y; A; b (1, m) (m, n)(1, n)
Forme standard	fonction à optimiser	Max x_0 avec $x_0 = cx$ et c ; x (1, n+m) (n+m, 1)	Max x_0 , avec: $x_0 = \sum_{j=1}^{n+m} c_j x_j$ $c_j = 0, \forall j$ tel que $n+1 \leq j \leq n+m$	Min y_0 , avec: $y_0 = \sum_{i=1}^{n+m} b_i y_i$ $b_i = 0, \forall i$ tel que $1 \leq i \leq n$	Min y_0 avec $y_0 = yb$ et y ; b (1, m+n) (m+n, 1)
	Sous contraintes	<ul style="list-style-type: none"> $x \geq 0$ $Dx = b$, avec: D = [A, I] et I (m, n+m) (m, m) 	<ul style="list-style-type: none"> $x_j \geq 0$ $\sum_{j=1}^{n+m} d_{ij} x_j = b_i$ avec: $i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n+m$ et: * $d_{ij} = a_{ij}$, pour $\forall i$ et $j = 1, \dots, n$ * $d_{ij} = 1$, pour $\forall i$ et $j = n+i$ * $d_{ij} = 0$, pour $\forall i$ et $j \neq n+i > n$ 	<ul style="list-style-type: none"> $y_i \geq 0$ $\sum_{i=1}^{n+m} g_{ij} y_i = c_j$ avec: $i = 1, \dots, m+n$ $j = 1, \dots, n$ et: * $g_{ij} = a_{hj}$, pour $\forall j$ et $\begin{cases} i = n+h \\ h = 1, \dots, m \end{cases}$ * $g_{ij} = -1$, pour $\forall j$ et $i = j \leq n$ * $g_{ij} = 0$, pour $\forall j$ et $i \neq j > n$ 	<ul style="list-style-type: none"> $y \geq 0$ $yG = c$, avec: $G = \begin{bmatrix} -I \\ A \end{bmatrix}$ et I (m, n+m) (m, m)
	Remarque		Les x_j tels que $j = n+1, \dots, n+m$ sont les variables d'écart du primal	Les y_i tels que $i = 1, \dots, n$ sont les variables d'écart du dual	

Tableau synoptique de la formulation d'un problème en programmation linéaire [84]

ANNEXE 5 :

INTEGRATION DES OPERATIONS DESTRUCTIVES

Nous pensons que le choix des opérations destructives lors de la modélisation des processus de désassemblage ou en aval de l'optimisation du système de désassemblage doit suivre une procédure stricte et bien définie. Ce choix se fera par le biais d'un expert compte tenu du peu de données techniques dédiées désassemblage disponibles actuellement. Les paragraphes suivants expliquent la nécessité de s'organiser et la manière avec laquelle nous pouvons le faire.

Nécessité des opérations destructives

La quasi inexistence de travaux totalement dédiés aux aspects destructifs des techniques de désassemblage s'explique uniquement par la complexité du problème. Le grand besoin d'une refonte totale des différentes approches de désassemblage est plus que jamais incontestable. En effet, avec la variété, la complexité structurelle et la fragilité dont sont caractérisés les produits manufacturés de nos jours posent beaucoup de problèmes en démantèlement. Cependant, il commence à y avoir de plus en plus de produits conçus pour le désassemblage sur le marché de la consommation. Le résultat n'est pas toujours satisfaisant en raison des objectifs différents et parfois opposés lors de la conception du produit. De plus, les dégradations dont est sujet un produit durant la phase d'utilisation existeront toujours et seront encore pour longtemps problématiques pour la conception de systèmes de désassemblage robustes. Ces dégradations impliquent souvent des choix opératoires destructifs selon, par exemple, que les fonctions du produit soient préservées ou non. En effet les opérations destructives ont des conséquences diverses. Pour permettre le choix des opérations destructives en tant que opérations alternatives dans le désassemblage notamment en mode incertain, nous avons fait une analyse non-exhaustive des différents types d'opérations destructives.

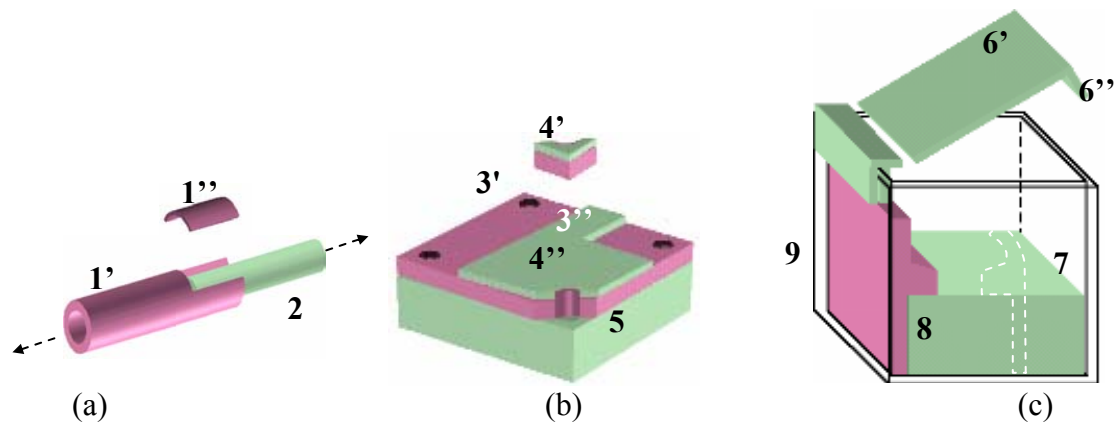
Typologie des opérations destructives

Il n'est pas très aisé d'établir une typologie suffisamment exhaustive en raison du grand nombre de procédés de fabrication et de solidarisation qui sont utilisés pour l'assemblage des produits manufacturés. Nous avons alors choisi de déterminer d'abord les critères de distinction des opérations destructives de désassemblage, ensuite d'en trouver les différents cas possibles. Il a été, ainsi, pris en compte : l'incidence de l'opération destructive sur le caractère opératoire du désassemblage et la préservation fonctionnelle des constituants mis à contribution dans le désassemblage ; l'origine accidentel ou volontaire de l'opération destructive ; le type des éléments concernés (solidarisation ou composant) ; le nombre de composants impliqué et enfin le genre d'opération destructive.

Opération destructive fonctionnelle ou opératoire

Une action destructive apportée sur un constituant peut engendrer la perte totale ou partielle de la fonction de ce dernier. Dans ce cas, la réutilisation ne peut être envisageable comme destination fin de vie. L'exemple (a) de la figure ci-après représente la coupe partielle latérale du composant cylindrique 1 servant à l'extraire plus facilement du composant 2. Le résultat est deux fractions (1' et 1'') ne pouvant assurer la fonction initiale. La réutilisation de ce composant n'est évidemment plus envisageable. Une autre conséquence d'une action destructive est d'ordre opératoire dans le sens où le constituant (ou une partie) ne peut plus

être sujet aux opérations de désassemblage préconisées lors de la génération de la gamme de désassemblage initiale vu les dégradations infligées par l'opération destructive. L'exemple (c) de la figure ci-après montre comment la fracture du couvercle 6 en deux fractions 6' et 6'' exclue le démontage du composant 7 et par conséquent du composant 8 par un procédé non destructif. Si les conditions technologiques ou économiques ne s'y prêtent pas, le constituant restant (6',7,8,9) ne sera pas sujet à un quelconque démontage. Toute la partie relative à ce démontage dans la gamme de désassemblage initiale est ponctionnée.



Exemples d'opérations destructives

Opérations destructives accidentelles ou volontaires

Celles qui sont portées accidentellement sur le produit intermédiaire surviennent souvent durant l'exécution d'une opération de désassemblage convenu dans la gamme de désassemblage. L'impact destructif peut être négligeable par rapport à la destination fin de vie préconisée mais peut aussi être néfaste. L'exemple (b) de la Figure ci-dessus montre comment une opération de dévissage (a priori bénigne) entre les composants 3,4 et 5 peut détériorer deux composants (3 et 4) au point à les rendre non réutilisables. D'autres opérations destructives peuvent être volontairement portées afin de réaliser l'objectif de l'opération en cours (ex. Extraction ou dévissage d'un composant) en particulier et de permettre la continuité du démantèlement d'un constituant donné en général. La coupe partielle latérale du composant cylindrique 1 dans l'exemple (a) de la figure ci-dessus est justement une démarche qui vise à récupérer le composant 1 alors que la solidarisation qui le lie au composant 2 est importante (emmanchement). Pour qu'une telle solution soit proposée, la destination fin de vie est manifestement le recyclage ou la mise au rebut mais certainement pas la réutilisation.

Opérations destructives unaires ou plurielles

Souvent indésirable, l'opération de destruction peut intervenir non seulement sur un élément du produit mais plutôt sur plusieurs d'entre eux comme dans l'exemple (b) de la figure ci-dessus. Les conséquences peuvent être très différentes sur le plan opératoire, fonctionnel (des constituants), économique, etc. C'est fréquemment ce qui pose problème dans le cas d'opérations destructives accidentelles. Lorsque les dégradations résultantes d'une opération destructive condamnent plusieurs constituants à la mise au rebut, la nécessité d'une telle opération doit faire l'objet d'une analyse minutieuse de la part de l'expert.

Opérations destructives sur solidarisation ou sur composants

Bien que les éléments de solidarisation sont les plus concernés par les opérations destructives, il arrive aussi qu'un constituant (en général) ou un composant élémentaire (en particulier) soit l'objet d'une action destructive pour libérer ce dernier ou d'autres composants. Les moyens et outils destinés à détruire une solidarisation (vissage, rivetage, ...) et ceux destinés pour déformer ou couper sur deux un composant sont en général très différents. Dans l'exemple (b) de la figure ci-dessus, le dévissage par perçage d'une des quatre vis assurant le maintien des composants 3, 4 et 5 a causé la détérioration de deux de ces composants. Les dégradations dûes à une opération destructive se sont alors portées sur l'élément de solidarisation (en l'occurrence la vis) mais aussi sur quelques uns des composants solidarisés.

Opérations destructives morphologiques ou structurelles

La déformation d'un composant ou d'un élément de solidarisation (ex. perçage d'un rivet) apporte un changement morphologique qui permet soit son extraction soit celle d'un ou plusieurs autres composants. Il peut arriver que la déformation vise justement à retrouver la forme initiale du composant afin de se conformer à l'hypothèse souvent posée lors de la génération des gammes qui est l'état présumé « originel » des constituant d'un produit. Dans d'autre cas, une découpe du composant (ou d'une solidarisation) en deux ou plusieurs éléments est nécessaire pour continuer le désassemblage. Il s'agit alors d'une transformation structurelle du composant. Les exemples cités ci-dessus se rapportent à des transformations structurelles des composants. Par contre, nous pouvons imaginer une opération de déformation du composant 7 dans l'exemple (c) de la figure ci-dessus suivant les pointillés indiqués. Le but étant d'extraire, malgré tous, ce composant plus le composant 8. Le composant 6'' pouvant alors rester attaché au 9.